

利用地面大气电场和雷达资料进行雷电网临近预报方法

王振会^{1,2}, 徐栋璞^{1,2}, 曾庆锋^{1,2}, 王 皓², 周生辉², 葛 非³

1. 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044
2. 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044
3. 南京信息工程大学数理学院, 南京 210044

摘要 根据雷暴云电场特征, 结合雷达等观测资料, 本文提出一个利用电场幅值阈值和差分阈值方法, 为进行电场测站的首次地闪的雷电网临近预报方法。该方法首先判断电场是否达到设定的幅值阈值或者差分阈值。如果电场达设定阈值, 认为此时测站周围云中电荷量较大, 发生闪电的概率也较大, 进而判断该时刻之前的雷达资料是否达到设定的阈值。如果雷达资料达到设定的阈值则发出预警; 如果未达要求则继续查看下一体扫的雷达情况, 直到发出预警或者电场阈值取消为止。利用此方法对 2009 年南京周边观测区 7 个站点数据进行预警检验, 得到其探测概率约为 80%, 平均预警时间约为 14min。同时, 本文尝试用该预报方法对雷暴云移过观测区的整个过程进行区域性雷电网临近预报。结果发现区域雷电网预警可以直观呈现雷暴云和闪电发生发展情况, 对发生闪电潜在区域也能够直观判断, 并收到较好的预警效果。区域预警不仅能实现对一个地区的监测预警, 而且能对雷暴云的整个过程进行监测预警, 具有单站电场所没有的优势。

关键词 雷电网临近预报; 地面电场; 雷达数据

中图分类号 P427.3

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.14.005

Method of Lightning Forecasting Using Atmospheric Electric Field and Radar Data

WANG Zhenhui^{1,2}, XU Dongpu^{1,2}, ZENG Qingfeng^{1,2}, WANG Hao², ZHOU Shenghui², GE Fei³

1. Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China
2. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China
3. School of Math & Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

Abstract The amplitude and differential threshold have been used to describe the characteristics of atmospheric electric fields in thundercloud in this paper. With these two electric field threshold and combined with radar data, a method for the first Cloud-Ground (CG) lightning forecasting in a certain range of electric field station have been put forward. First, judging electric field which reflects the charge of thundercloud whether reach amplitude threshold or differential threshold, if electric field threshold is satisfied, it is considered that the total charge of cloud is large and the probability of occurring CG lightning is also large, and then the radar data whose scan is end before the electric field threshold is detected will be judged. If radar reach the set radar threshold, the warning will occurred, otherwise judging the radar data of next scan whether reach, until warning occur or electric field indexes is canceled. The electric field data of 7 stations in summer of 2009 in Nanjing surrounding observation area were analyzed and the result showed that the probability of detection was about 80% and the average warning time was about 14min. A typical thunderstorm which moved across observation area was analyzed with the local lightning forecasting method proposed and found that it had a good warning effect. With the local lightning forecasting method, the development of thunderstorm and lightning in observation region will be presented visually and the lightning

收稿日期: 2012-03-22; 修回日期: 2012-04-16

基金项目: 公益性行业科研专项 (GYHY200806014, CXLX11-0624); 江苏省研究生培养创新工程项目 (CXLX11_0624); 江苏高校优势学科建设工程项目 (PAPD)

作者简介: 王振会, 教授, 研究方向为大气探测与大气遥感研究, 电子信箱: eiap@nuist.edu.cn

potential areas can be judged intuitively. In the meanwhile, this local lightning forecasting method can not only monitor and warn a big region, but also can monitor and warn the whole thundercloud. So it has the advantage which single-station electric field have not got.

Keywords lightning forecasting; electrostatic field; radar data

0 引言

雷电是自然灾害的一种,随着全球气候变暖和灾害性天气的频发,雷电灾害造成的经济损失及社会影响越来越大,受灾范围几乎涉及各行业。因此,对雷电及其灾害的监测、预警、预报和防御的需求变得越来越迫切。建立有效的雷电监测预警系统以及研究相应的预警预报方法,对减少雷电对人民生命和财产造成的损失有着重要意义^[1]。

众多学者研究了各种气象参数^[2-3]与雷暴的联系,也尝试使用了大量临近预报方法(例如,Titan 算法^[4]、TREC 算法^[5]、cldGrowth 算法^[6]),这些研究为雷电预警预报系统的开发打下了基础。例如,NCAR 开发的利用卫星、探空等多种数据、多种算法雷暴自动-临近预报系统^[7],能够提供 200m×200m 区域的临近预报,其探测概率(Probability of Detection,POD)为 68%,虚警率(False Alarm Ratio,FAR)为 53%。

遥感技术已经成为监测灾害性天气的一个重要手段^[8-10]。自 20 世纪 50 年代雷达技术开始被用于天气监测以来,天气雷达以其精细的时空分辨率、及时准确的遥感探测能力成为研究雷暴天气的主要工具。许多学者^[11-13]研究了不同高度上不同反射率因子在雷电预警中的应用。如 Gremillion 和 Orville^[13]分析了雷达和闪电定位资料,发现最好的闪电起始特征为在-10℃环境温度下探测到 40dB_z 回波、POD 为 84%、FAR 为 7%、临界成功指数(Critical Success Index,CSI)为 79%、平均滞后时间 7.5min。

雷电活动往往引起地面电场的显著变化,而大气电场仪是测量大气静电场用来预警雷电发生的精密设备。现今,电场仪传感器被广泛运用于观测运动场、公园以及其他室外活动场所^[14]。还有一些学者尝试利用电场幅值^[14-15]、曲线快变抖动的 0—1 关系^[16]、反极性^[17]等方法进行雷电预警。也有学者尝试将电场数据与闪电定位数据^[17]、雷达^[18]等数据结合预警。但众多研究均为对单站电场的分析,因此如果能对各站电场联网,则可以增强大气电场仪的功能和扩大电场的监测范围,提高雷电的预警能力。本文总结了雷暴云电场特征,用电场幅值阈值和差分阈值法两种方法并结合雷达数据进行雷电预警,以期电场和雷达资料在雷电预警中的研究提供一定的应用参考。同时,尝试将多个电场测站数据进行联网并结合提出的预警方法对移过观测区的雷暴过程进行分析,以实现对一个地区及整个雷暴过程的区域雷电预警。

1 数据介绍

为了研究电场强度的时空变化规律,南京信息工程大学(NUIST)在江苏观测区(南京、镇江、扬州和常州地区)安装了 25 台大气电场仪以进行联网观测。观测区地处长江三角洲,

地形以平原为主,地形地势低平,河湖众多,平原、水面所占比例大,是中国的雷暴多发区之一。测站的建立为江苏乃至长江三角洲地区的雷暴研究提供参考和借鉴。本文使用的电场仪为南京信息工程大学研制,探测范围 20km,采样频率 1s,标定后分辨率约 1V/m。本文选择了安装环境大致相同电场测站进行分析,电场测站如图 1 中站点分布所示。NUIST 站安装在南京信息工程大学观测站,以校名缩写命名;NJLH、NJXJ、NJQL、NJLD、NJTQ、ZJJR 分别为南京六合、南京小教场、南京麒麟、南京龙都、南京土桥和镇江句容观测站,以地名缩写命名。同时,为了提高电场探测概率,本文对以电场仪为中心,半径 15km 的范围进行分析,并将此范围作为预警范围。

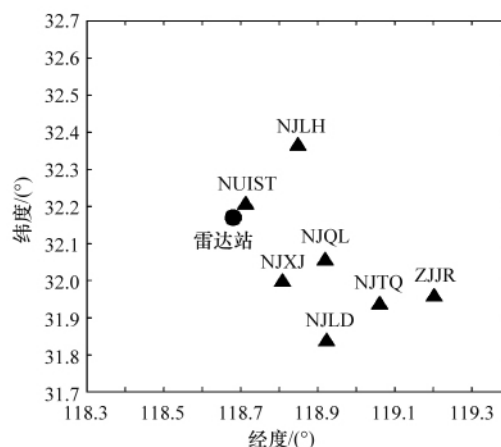


图 1 雷达和电场站点布置

Fig. 1 Location of radar and electric field stations

文中所用雷达资料为新一代多普勒天气雷达资料,体扫时间 6min,探测范围 230km。考虑到学校观测站(NUIST 站,见图 1)电场仪测站在南京雷达盲区内,处理该站数据时利用常州雷达数据,其余站点电场数据则用南京雷达数据。

本文所用闪电定位数据为江苏省气象部门闪电定位系统提供,该系统是中国科学院空间科学与应用研究中心研制的 ADTD 雷电探测仪。探测仪通过测量云地闪回击电流辐射的强电磁脉冲,采用到达时间法(时差法)和定向时差联合法对雷电进行定位。系统探测范围覆盖全省及周边地区,闪电定位算法有 4 种,分别为一站振幅、二站混合、三站混合、四站算法。闪电监测网单站的探测范围约为 150km,由闪电资料所提供的探测范围为(113°E—122°E)、(28.5°N—38°N)。冯民学等^[19]对该系统单站地闪资料的可信度和探测效率进行了检验分析,检测率为 91%,误测率约为 9%。本文中用每个测站预警范围内的闪电定位数据检验该站预报效果。假设在某站预警范围内,某次雷暴过程发生闪电后 30min 内再无闪电发生

且无大于 30dB_z 的雷达回波存在,则认为该雷暴结束。对闪电定位数据做如下处理:

- (1) 筛选出每个电场测站预警范围内闪电数据;
- (2) 删除幅值参数小于 10kA^[20-21] 的闪电,认为其无效;
- (3) 利用雷达资料来检验每一个闪电,即如果在该闪电前后各一体扫时间内,预警范围内 2km 高度以上(为了避免地物等回波)无回波或者无大于 15dB_z 回波存在且电场波动平滑且幅值较小时,认为该闪电无效;
- (4) 筛选出每个电场测站每一次雷暴过程的首次闪电。

2 首次闪电预报方法

大气电场仪是测量大气静电场变化的专用精密设备。非雷暴天气时,电场时间序列变化为连续且呈现小电场幅值。而雷雨云发展时,起电过程逐渐增强,电荷逐渐累积,地面电场强度会逐渐增强达到一定幅值并持续一段时间。因此当电场达到一定幅值时,表征该站周围雷暴云电荷积累了一定电荷量,发生闪电的概率将增大。本文用一段时间内超过一定幅值电场达一定比例作为电场幅值阈值。

雷暴云发生发展时,云中发生的云地闪等放电会造成云中电荷量瞬时变化。大气电场仪可以探测到电荷量变化而表现为电场时间序列的跳动。在雷暴云过程中,云闪占闪电活动的绝大多数^[22],云闪先于地闪 5—35min 发生^[23]。地闪发生前电场跳动现象为雷电预警的先兆,可以用差分方法描述电场跳动现象。

大气电场仪是一种无定向探测设备,无法探知雷暴发生具体方位,而且对环境因素引起电荷变化非常敏感。单独用电场资料进行预警,其得到的预警效果都较差^[14]。天气雷达能反应雷暴云结构、对流强弱等发展情况,同时其能对雷暴云进行定位和预警闪电作用。两个资料的结合能够较好地互补,降低电场资料预警的虚警率。本文提出一个利用地面电场和雷达资料对电场测站预警范围的首次地闪进行雷电预警的方法。具体方法:由于电场反映了测站周围云电荷变化情况,首先判断其是否达设定的幅值阈值或差分阈值。如果电场达到设定阈值,则认为测站周围云中电荷量较大,发生闪电的概率也比较大,进而判断该时刻之前的雷达资料是否达到设定阈值。如雷达资料达到设定的阈值,发出预警;如未达要求,则继续查看下一体扫的雷达情况,直到发出预警或者电场阈值取消为止。本文假定,如某测站电场触发预警之后 30min 内再无电场达到阈值,则认为电场阈值取消。

2.1 电场幅值和差分阈值

对于电场幅值阈值,很多研究都简单地设定一个阈值进行预警,得到的效果较差。本文通过统计在 18min 内(3 个雷达体扫时间,1080 个电场数据)一系列电场幅值阈值和一系列超过这些阈值的比例的预警效果对电场数据寻求最优预警指标。结果发现,在 18min 内电场超过 1kV/m 的比例达到 1/3 时为最优幅值阈值。这与 Aranguren^[14]统计发现的 1kV/m

为最优的幅值阈值结论一致。

本文用差分方法描述电场跳动现象。大气电场时间序列强度 E 的差分为

$$\frac{dE(x,y,z)}{dt} = \frac{E_{i2}(x,y,z) - E_{i1}(x,y,z)}{\Delta t} \quad (1)$$

式中, $E_{i1}(x,y,z)$ 和 $E_{i2}(x,y,z)$ 分别为任意相邻的时刻电场。

由式(1)可以看到,电场时序差分与电场差值及 Δt 有关。雷暴云强弱不仅表现在电场幅值而且表现在电场变化幅度和频数上。所以,本文选取 2 个雷达体扫时间内电场差分绝对值超过一定阈值的次数达到设定次数时作为电场差分阈值。与电场幅值阈值类似,通过统计对不同电场差分阈值和不同的超过电场差分阈值个数发现,在 2 个雷达体扫时间内差分幅值绝对值超过 0.15kV/m 的次数达到 2 次为适合观测区域的电场差分阈值。该结论与刘欣生等^[24]的估算得到的电场变化量一致。

2.2 雷达预警阈值

许多学者^[11,25-26]对不同高度雷达回波反射率与闪电初始特征的关系研究揭示出雷暴发生时其必然反映为较强回波上升到一定高度之上。也有一些学者^[12-13]研究了不同高度、不同反射率因子在雷电预警中的应用。对于使用雷达数据预报闪电,通过增加雷达反射率阈值可以减少虚假预警数量,但也将减少探测到雷暴初生信号和首次出现地闪之间的提前时间;反之亦然。由于电场资料反应了雷暴云电荷情况,本文在前人研究基础上,以 5km 高度以上的雷达回波反射率因子达到一定体积(库)作为雷达预警阈值。至于选择这个高度,由 2009 年 6—8 月的探空资料统计(图 2),发现 5km 约为 0℃ 温度区左右。5k 高度以上的 0—15℃ 温度区是非感应起电机制中冰晶和霰碰撞后携带不同极性电荷的翻转温度区,是雷暴起电的一个特征区域。

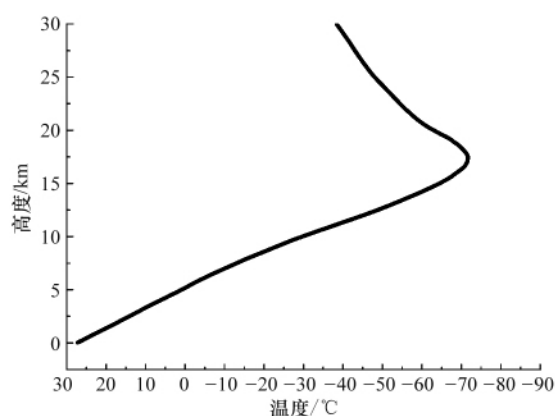


图 2 2009 年 6—8 月平均温度廓线

Fig. 2 Average temperature profile in June to August of 2009

3 预警检验和区域雷电预警

3.1 独立检验

为检验上述预报方法效果,本文对 2009 年 6—8 月的电

场和雷达资料进行分析,除了电场失效和闪电数据缺失个例外,其中经过该区域发生闪电的雷暴过程 21 个。同时,除晴天和阴天无闪电发生天气外,很多都为具有强雷达回波但电场并未达到设定阈值,闪电定位数据也显示无闪电发生的天气现象。根据以上提出的方法对这些资料进行分析发现,该时间段内预报对 94 次,报错或晚报 23 次,探测概率约为 80%。图 3 为 2009 年 6—8 月独立检验的预警时间分布图。图中,独立检验的预警时间为每 10min 统计 1 次而得,平均预警时间约为 14min。同时统计可得,0—10、10—20、20—30、30—40 和 >40min 的预警时间的比例分别为 30.9%、27.7%、20.2%、18.1% 和 2.1%。可见,此方法得到的预警时间主要集中于 0—40min。

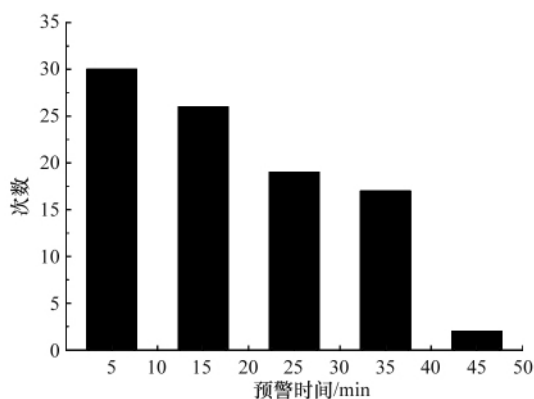


图 3 2009 年 6—8 月预警时间分布

Fig. 3 Distribution of warning time in June to August of 2009

分析预警失败原因发现,错报的个例大多发生在强降水天气过程中。推测可能的原因是强降水的发生导致电场失效而无法探测到雷暴云电荷;同时,由于强降水的存在,地面电场很容易被云底降水粒子所屏蔽。另一方面,实测与预报结果不符合的个例很可能源于 Vincent 等^[27]所指出的运用雷达进行雷电预警存在的局限性,即由于雷达体扫本身固有的局限性导致在一定距离外雷达资料无法完整反映雷暴回波情况而造成的。

从总体上看,检验该预警方法的数据偏少,还需要继续收集更多数据加以补充和完善,才能实现对该预报方法效果更精确的评估,但从已有检验结果中仍可看出,该预报方法对综合利用地面大气电场及雷达数据进行预警还是具有较好的预报效果。

3.2 区域雷电预警

单站地面电场仪能够对一定区域的雷暴云电荷情况进行实时监测,从而在一定程度上实现了对雷电的预警。但其缺点是无法知道雷暴的移动方向和发生位置,也无法知道下一时刻雷暴云强弱情况,所以单独运用电场进行短时雷电预警的准确率较低。由于电场联网可以增强大气电场仪的功能和扩大电场的监测范围,提高雷电的预警能力,本文尝试将

上述方法运用于区域雷电预警。假设某一电场站点无触发电场阈值时,其预警范围以透明灰色表示;如果某站电场触发阈值,则以透明黄色表示;如果某站电场触发阈值同时其雷达也达到预警阈值,则该站发出预警,以透明橙色表示;如果该站发生闪电,则以红色表示。这样就可以直观地呈现雷暴云和闪电发生发展情形,对发生闪电的潜在区域也能够直观判断。本文以 2009 年 8 月 26 日典型的雷暴过程为例进行区域雷电预警分析。

2009 年 8 月 26 日一雷暴云从安徽地区由西北方向移向并随后经过测区。在 19:30—22:00(北京时间,下同)期间,在本研究的观测区域(31.65°N—32.777°N,118.27°E—119.437°E)发生了 3594 次地闪,其中负地闪 3428 次,占总地闪的 95.38%;正地闪 166 次,占总地闪的 4.62%。图 4 为该过程每 6min 统计一次的测区闪电频数。可以看出,19:30 前,闪电为零星发生;19:30 后,闪电频数快速增加并于 20:00 达到一个个峰值;峰值过后闪电有所下降,但约在 21:00 后,该过程的闪电又开始剧烈增加,最高频率超过 300 次/6min;21:30 后闪电频数急剧减少并于 22:00 后趋于零,与雷暴处于消亡阶段相对应。由闪电频数图还可以看出,雷暴过程的负地闪频数很大而正地闪较少,使得负地闪频数变化曲线几乎与总闪电频数变化曲线重合,可见该过程发生的闪电以负闪为主。同时,由闪电频数和雷达回波演变过程可以看出,该过程为一次典型的强雷暴过程。

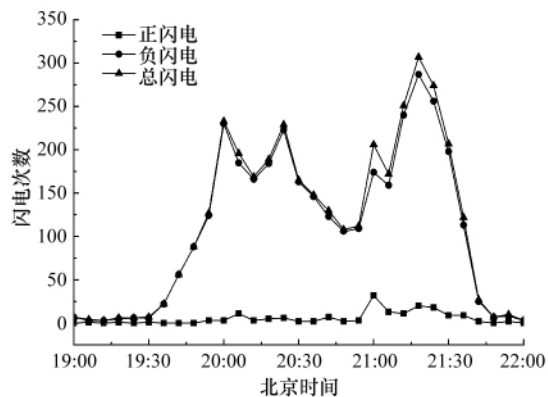


图 4 2009 年 8 月 26 日雷暴过程地闪频数

Fig. 4 Cloud-to-ground lightning frequency of thunderstorm on August 26, 2009

雷暴云由西北方向移向测区,测区的 NJLH 站电场差幅值在 19:45 率先达到阈值(图 5(a)),此时该站状态由灰色变为黄色,认为发生闪电的概率较大,如图 5(b)所示。而由该时刻之前的雷达回波(19:42,如图 5(b),图中黑色圆点为雷达站点,下同)可见,此时在预警范围内雷达回波未达设定阈值,但雷暴云强回波正逐渐向该站移近。由于该站电场已经达到设定阈值,认为在测站周围的雷暴云中存在较大电荷量或存在频繁放电情况,发生地闪的概率较大,于是继续判断下一体扫的雷达数据是否达设定阈值。在 NJLH 站电场达到

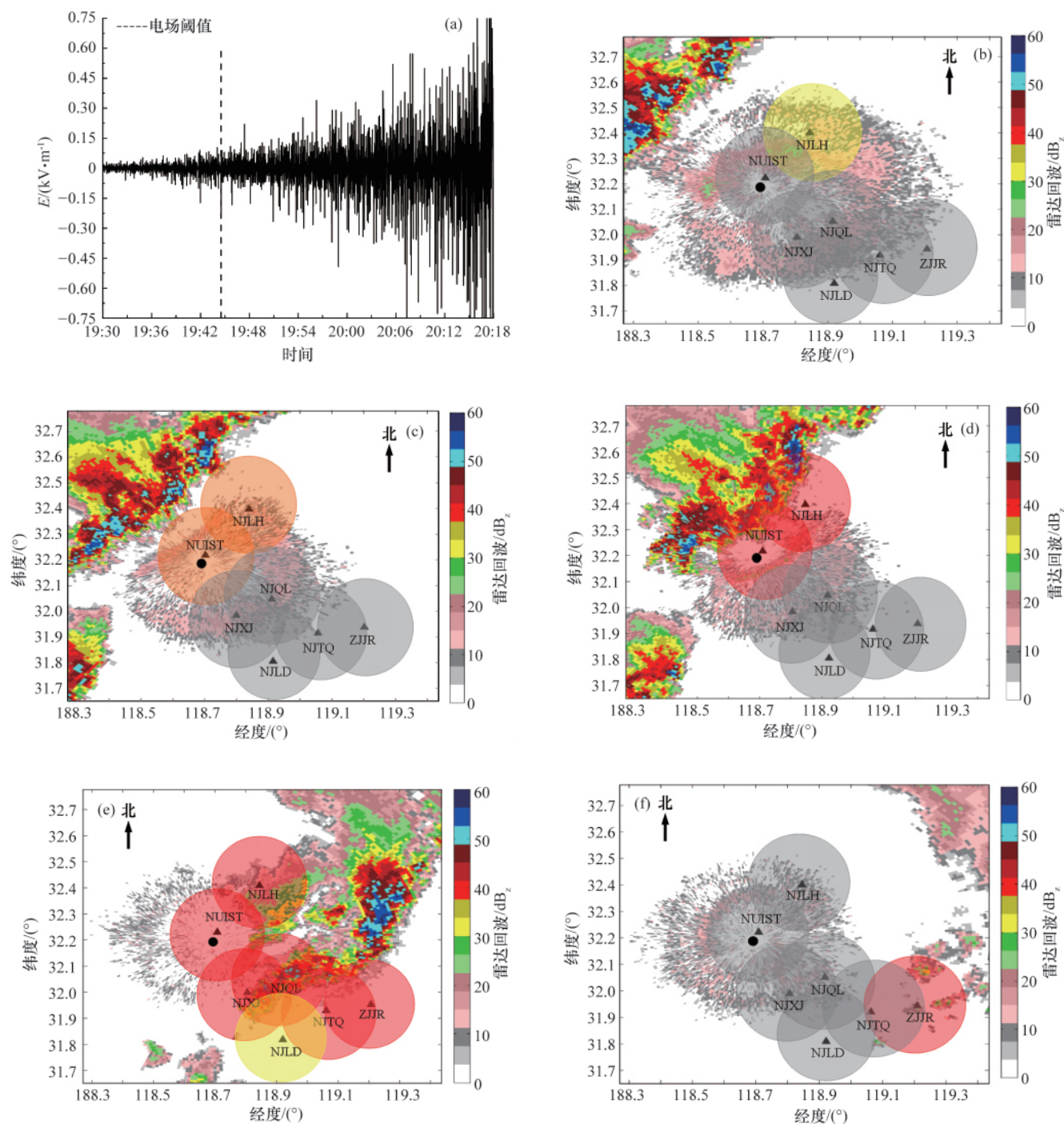


图5 2009年8月26日雷暴过程的测区预警情形。图(a)为NJLH站电场差幅值演变过程,图(b)一(f)为测区预警情况

Fig. 5 Warning evolution in observation on August 26, 2009. Figure (a) is the difference electric field evolution in NJLH station, and figures (b) to (f) are the warning evolution in observation of different time

阈值后 17min,NUIST 站也于 20:02 达到电场阈值。而在 20:06 时刻,NJLH 和 NUIST 两站的雷达回波均达到设定阈值,于是该两站发出预警,同时这两站状态变为橙色(如图 5(c)),认为在未来 0—40min 内发生闪电的概率很高。闪电定位数据显示,NUIST 站和 NJLH 站分别于 20:17、20:19 在其预警范围内发生首次闪电,两站从发出预警到闪电发生的时间间隔即

预警时间分别为 11min 和 13min。此时两站状态变为红色,如图 5(d)。随着雷暴云的继续移动,NJQL 站和 NJXJ 站电场于约 20:37 达到阈值,而雷达数据于 20:42 达到设定阈值。闪电数据显示,两站于 21:01 先后发生闪电,预警时间均为约 18min。图 5(e)为 21:12 时刻雷达回波和电场测站状态图,可见该测区电场测站基本发出了预警,而此时闪电频数(图 4

所示)在该区域也趋于极值。雷暴云旁经 NJLD 站,该站于约 21:00 电场达到阈值,其状态变为黄色,但并无雷达回波进入预警区域,无发出预警。闪电定位数据显示,该雷暴过程无闪电在 NJLD 预警区域发生。图 5(f)为 21:54 时刻雷达回波和电场状态图,由此可见雷暴云开始移出测区并逐渐消亡。

该过程共有 6 个站点成功提前发出预警,平均时间为 12min;NJLD 站未发出预警,该站区域也无闪电发生。从上面个例分析可以发现,随着雷暴云由远至近移过,不同区域电场先后发生响应,运用电场和雷达数据进行预警可以提前预警出闪电发生,同样收到较好的预警效果。区域雷电预警可以直观地呈现雷暴云和闪电发生发展情况,对发生闪电潜在区域也能直观判断。对于利用单站电场进行雷电预警,由于其探测范围的限制,其对于大范围的雷暴云而言属于一个“点”的探测。而如果在一个区域进行电场联网,其不但能实现对该区域的“面”进行监测预警,而且能实现时间上的连续性。因此区域预警不但能实现对一个地区进行预警,而且能对雷暴云的整个过程进行监测预警,具有单站电场所没有的优势。但在区域雷电预警中,电场和雷达的关系以及雷暴云过程不同电场测站关系仍需深入研究。

4 结论

本文根据雷暴云电场特征,提出用电场幅值阈值法和电场差分法两种方法相结合进行电场阈值判断。由于电场仪为无定向观测仪器,为了降低电场预警的虚警率,本文将地面大气电场和雷达等结合分析,提出一个测站一定范围内首次地闪的临近预报方法,即首先判断反映雷暴云电荷情况的电场资料是否达到了设定电场幅值阈值和电场差阈值,如果电场满足了这两个阈值中的任意一个阈值,然后判断该时刻前后预警范围内雷达回波是否达设定阈值进行预警。利用该方法对 2009 年 7 个站点数据进行预警分析,得到其探测概率约为 80%,平均预警时间约为 14min。

本文尝试用该方法对典型雷暴过程移过测区进行区域性雷电临近预报,发现区域雷电预警可以直观呈现雷暴云和闪电发生发展情况,对发生闪电潜在区域也能直观判断。同时区域预警可以增强大气电场仪的功能和扩大电场的监测范围,不但能实现对一个地区进行预警,而且能对雷暴云的整个过程进行监测预警,具有单站电场所没有的优势。这些方法的提出,为电场联网研究提供参考。

对于用于检验预报效果的闪电定位数据,本文用雷达资料进行了筛选。但因闪电在小的回波反射率因子也有可能是真实的闪电,所以该做法有可能对预报结果产生一定的影响。实际预警应用中,由于雷达数据传输滞后,可能电场达到阈值的时刻无雷达数据可分析。但可以结合雷达资料中雷暴云的移动和移动方向等信息,分析更大范围(相对于电场探测范围)、更早时刻的雷达数据,也可以对预报的效果进行修改,这些均需深入研究。同时从总体上说,本文所用检验预警

方法和区域预警的数据还不够多,仍需继续收集更多数据加以补充和完善,实现对这些预报方法效果更精确评估。

参考文献 (References)

- [1] 吴健,陈毅芬,曾智聪. 利用地面电场仪与闪电定位资料进行短时雷电预警的方法[J]. 气象与环境科学, 2009, 32(1): 47-50.
Wu Jian, Chen Yifen, Zeng Zhicong. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2009, 32(1): 47-50.
- [2] Silomon R, Baker M. Electrification of New Mexico thunderstorms[J]. *Monthly Weather Review*, 1994, 122(8): 1878-1886.
- [3] Wagner T J, Feltz W F, Ackerman S A. The temporal evolution of convective indices in storm-producing environments [J]. *Weather Forecasting*, 2008, 23(5): 786-794.
- [4] Dixon M, Wiener G. Titan: Thunderstorm identification, tracing, analysis and nowcasting—A radar-based methodology [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1993, 10(6): 785-797.
- [5] Tuttle J W, Foote G B. Determination of the boundary layer airflow from a single Doppler radar [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1990, 7(2): 218-232.
- [6] Wilson J W, Roberts R D. Evaluation of radar and other variables of the 0-2 hr forecast of thunderstorms [C]//Proceedings of the 29th International Conference on Radar Meteorology. Boston, MA: American Meteorological Society, 1999: 5-8.
- [7] Saxen T R, Mueller C K, Jameson T C, et al. Determining key parameters for forecasting thunderstorms at white sands missile range [C]//Proceedings of the 29th International Conference on Radar Meteorology. Boston, MA: American Meteorological Society, 1999: 9-12.
- [8] 裴丽丝. 一次多单体风暴和弓形回波过程的多普勒雷达探测特征研究[J]. 科技导报, 2006, 24(9): 13-15.
Pei Lisi. *Science and Technology Review*, 2006, 24(9): 13-15.
- [9] 裴丽丝. 云娜台风加强及特大暴雨过程的多普勒速度场特征研究[J]. 科技导报, 2006, 24(10): 11-15.
Pei Lisi. *Science and Technology Review*, 2006, 24(10): 11-15.
- [10] 周淑玲, 刘澈, 李韬, 等. 黄河下游夏初一次强对流天气过程成因分析[J]. 科技导报, 2010, 28(24): 57-61.
Zhou Shuling, Liu Che, Li Tao, et al. *Science and Technology Review*, 2010, 28(24): 57-61.
- [11] Buechler D E, Goodman S J. Echo size and asymmetry: Impact on NEXRAD storm identification[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1990, 29(9): 962-969.
- [12] Hondl K D, Eilts M D. Doppler radar signatures of developing thunderstorms and their potential to indicate the onset of cloud-to-ground lightning [J]. *Monthly Weather Review*, 1994, 122 (8): 1818-1836.
- [13] Grenillion M S, Orville R E. 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 [J]. *Weather and Forecasting*, 1999, 14(5): 640-649.
- [14] Aranguren D, Montanya J, Sola G, et al. On the lightning hazard warning using electrostatic field: Analysis of summer thunderstorms in Spain[J]. *Journal of Electrostatics*, 2009, 67(2-3): 507-512.
- [15] 刘春泉, 厚军学, 刘凯. 利用大气电场资料进行雷暴预警预报 [J]. 宁夏工程技术, 2010, 9(3): 202-205.
Liu Chunquan, Hou Junxue, Liu Kai. *Ningxia Engineering Technology*, 2010, 9(3): 202-205.
- [16] 柴瑞, 王振会, 肖稳安, 等. 大气电场资料在雷电预警中应用[J]. 气象

- 科技, 2009, 37(6): 724-728.
- Chai Rui, Wang Zhenhui, Xiao Wenan, *et al. Meteorological Science and Technology*, 2009, 37(6): 724-726.
- [17] 孟青, 吕伟涛, 姚雯, 等. 地面电场资料在雷电预警技术中的应用[J]. 气象, 2005, 31(9): 30-33.
- Meng Qing, Lu Weitao, Yao Wen, *et al. Meteorological Monthly*, 2005, 31(9): 30-33.
- [18] 高太长, 黄子洋, 张鹏, 等. 大气电场资料与雷达回波融合的一种方法[J]. 解放军理工大学学报, 2006, 7(3): 302-306.
- Gao Taichang, Huang Ziyang, Zhang Peng, *et al. Journal of PLA University of Science and Technology*, 2006, 7(3): 302-306.
- [19] 冯民学, 韦海容, 焦圣明, 等. 南京市闪电定位资料的对比分析[J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(2): 151-157.
- Feng Minxue, Wei Hairong, Jiao Shengming, *et al. Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2008, 31(2): 151-157.
- [20] Cummins K L, Murphy M J, Bardo E A, *et al. A combined TOA/MDF technology upgrade of the US National Lightning Detection Network*[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(D8): 9035-9044.
- [21] Wacker R S, Orville R E. Changes in measured lightning flash count and return stroke peak current after the 1994 US National Lightning Detection Network upgrade: 1. Observation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(D2): 2151-2158.
- [22] Saxen T R, Mueller C K, Jameson T C, *et al. Determining key parameters for forecasting thunderstorms at white sands missile range*[C] // *Proceedings of the 29th International Conference on Radar Meteorology*. Boston, MA: American Meteorological Society, 1999: 9-12.
- [23] 许小峰, 郭虎, 廖晓农, 等. 国外雷电监测和预报研究[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 305-361.
- Xu Xiaofeng, Guo Hu, Liao Xiaonong, *et al. Foreign research of lightning monitoring and forecasting* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003: 305-361.
- [24] 刘欣生, 郭昌明, 王才伟, 等. 闪电引起的地面电场变化与雷暴云下部的正电荷层[J]. 气象学报, 1987, 45(4): 500-504.
- Liu Xinsheng, Guo Changming, Wang Caiwei, *et al. Acta Meteorologica Sinica*, 1987, 45(4): 500-504.
- [25] Martinez M. The relationship between radar reflectivity and lightning activity at initial stages of convective storms [R]. SOARS Summer of 2001, Lubbock, TX: Texas Tech University, 2002.
- [26] Brownlee K A. Statistical theory and methodology in science and engineering[M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1965.
- [27] Vincent B R, Carey L D, Schneider D, *et al. Using WSR-88D reflectivity for the prediction of cloud-ground lightning: A central North Carolina study*[J]. *National Weather Digest*, 2003, 27: 35-44.

(责任编辑 朱宇)

·学术动态·

“中国电子学会电路与系统分会图论与系统优化专业委员会 2012 年学术年会”征文

“中国电子学会电路与系统分会图论与系统优化专业委员会 2012 年学术年会”由黄山市主办,拟于 2012 年 8 月 4—5 日在黄山市召开。

征文范围:(1) 图论的理论、算法和应用等;(2) 仿生计算(人工神经网络理论及其应用;进化计算理论及其应用;粒子群算法:理论及其应用;DNA 计算:理论及其应用;RNA 计算:理论及其应用;蛋白质计算:理论及其应用);(3) 优化计算:理论、方法及应用;(4) 电路与系统科学方法、理论及应用等;(5) 网络信息安全理论与技术等。

全文截稿日期:2012 年 6 月 4 日。

联系电话:0551-3861266。

通信地址:安徽大学计算机科学与技术学院,(磬苑校区)合肥市经济技术开发区九龙路 111 号(230601)。

电子信箱:gtso2012@163.com。