

南京地区大气电特征及电场仪预警效果的分析研究

刘 佼¹, 韩照全¹, 鲁 蓉², 吴长慧³

¹南京市气象服务中心, 江苏 南京

²南京市气象台, 江苏 南京

³南京市气象防灾减灾中心, 江苏 南京

Email: wenwenliujiao@163.com

收稿日期: 2021年2月28日; 录用日期: 2021年3月23日; 发布日期: 2021年3月30日

摘 要

本文利用2016~2017年6~8月南京各站大气电场仪资料, 并结合雷达以及闪电定位资料得出南京市夏季雷暴过程大气电场变化特征, 并在此基础上确定了南京本地大气电场仪预警时刻各项预警参数值以期尝试研究大气电场资料在雷电预报预警中的应用前景。根据首次地闪的发生时刻对南京各站雷暴过程进行细划研究, 分析得出各个预警阶段大气电场变化与各预警范围内发生的闪电之间的关系。进而发现南京本站以及高淳站大气电场仪预警准确率总体上在10~15 km范围效果较好, 其余各站基本上预警准确率随着预警半径范围的缩小, 预警准确率也是增加的; 南京各测站临界成功指数在10~15 km范围内的探测效率较好。

关键词

大气电场, 雷暴, 预警

Analysis and Research on Atmospheric Electrical Characteristics and Early Warning Effect of Electric Field Meter in Nanjing

Jiao Liu¹, Zhaoquan Han¹, Rong Lu², Changhui Wu³

¹Nanjing Meteorological Service Center, Nanjing Jiangsu

²Nanjing Meteorological Observatory, Nanjing Jiangsu

³Nanjing Meteorological Disaster Prevention and Mitigation Center, Nanjing Jiangsu

Email: wenwenliujiao@163.com

Abstract

This paper obtains the characteristics of atmospheric electric field changes in summer thunderstorm process in Nanjing by using the data of atmospheric electric field instruments from June to August in 2016 and 2017 and the data of radar and lightning location. On this basis, the early warning parameter values of Nanjing local atmospheric electric field instruments at the early warning time were determined to try to study the application prospect of atmospheric electric field data in lightning forecast and early warning. We obtained the relationship between the changes in the atmospheric electric field at each early warning stage and the occurrence of lightning at the same time by a detailed study of the thunderstorm process in Nanjing stations according to the occurrence time of the first ground flash. We found that the early warning accuracy of the atmospheric electric field instrument at Nanjing Station and Gaochun Station is better in the range of 10~15 km. The accuracy of early warning in other stations is increased with the reduction of the radius of early warning. The critical success index of each station in Nanjing is better in the range of 10 km to 15 km.

Keywords

Atmospheric Electric Field, Thunderstorm, Early Warning

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

雷电是自然界中的一种长距离瞬时放电现象，也是大气科学的重点研究对象。长期以来，伴随闪电探测手段的提高，相关研究人员对雷暴云电特性以及雷电临近预报方面做了大量深入的研究工作并取得了丰硕的研究成果。Murphy 等[1]利用大气电场仪、雷达等多种探测资料开发了雷电预警系统。Harnwell [2]、罗福山、张腾飞等人[3] [4]对电场仪的标定方面做了进一步的改进工作。张义军等通过对青藏高原东部地区大气电特征的分析发现，雷暴云电结构的差异所呈现出的不同大气电场特征[5]。吴健等认为大气电场预警指标应以电场强度的阈值、以及电场特征曲线有无快变抖动为预判指标[6]。王凯、朱浩等统计分析了黄山风景区雷暴过程近地表静电场特征，并建立本地雷电预报方程进而发现本地雷暴地面电场特征主要以负地闪为导向[7]。相关文献[8] [9] [10] [11] [12]将大气电场数据等多种资料融合来提高雷电监测和预警能力。

深入了解大气电场的变化特征对于本地雷电的认识以及雷电警报阈值的确定至关重要，此外也有助于不同强对流天气的过程分析以及气候特征的研究。本文利用 2016~2017 年南京本地各站夏季雷暴大气电场资料并结合闪电定位、雷达资料重点分析雷暴过境时大气电场特征，在此基础上根据首次地闪发生时刻分析南京本地化各项预警因子阈值，以期尝试探索大气电场资料在改进雷电预报预警中的应用前景。

2. 资料来源

1) 本文使用的数据来源于南京地区大气电场仪(Pre-storm2.0 型)观测。在对数据进行质量控制的基础

上, 选取了南京市及周各站观测数据资料, 其大气电场仪位置分布见图 1。

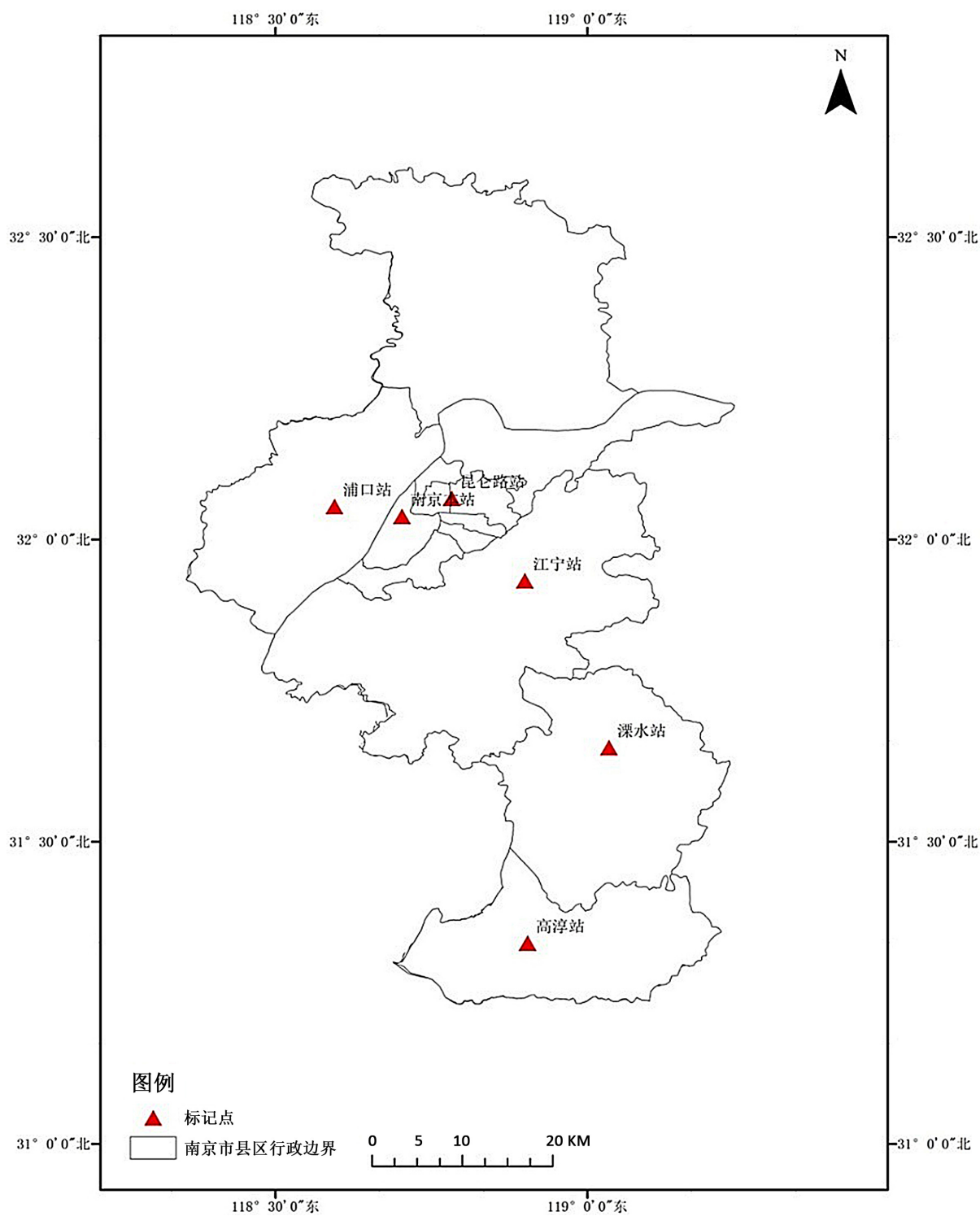


Figure 1. Distribution of atmospheric electric field instrument stations

图 1. 大气电场仪站点分布

本文地面电场特征的研究范围定义为 $31.3328^{\circ}\text{N}\sim 32.0681^{\circ}\text{N}$ 、 $118.5947^{\circ}\text{E}\sim 119.0343^{\circ}\text{E}$ (见图 1)。大气

电场仪(Pre-storm2.0 型)的性能参数见表 1。

Table 1. Main performance index of 1pre-storm2.0 Atmospheric Electric Field Instrument

表 1. Pre-storm2.0 型大气电场仪主要性能指标

性能参数	指标
探测半径	15~20 km
电场探测范围	-300~300 kv/m
电场分辨率	<10 v/m
响应时间	5 ms
电场探测频率	1 次/5 ms

2) 本文所使用的闪电定位资料来源于江苏省气象局闪电定位仪。

3) 本文雷达数据来自于南京多普勒天气雷达站，其探测范围为 230 km。

3. 南京地区雷暴天气大气电特征分析

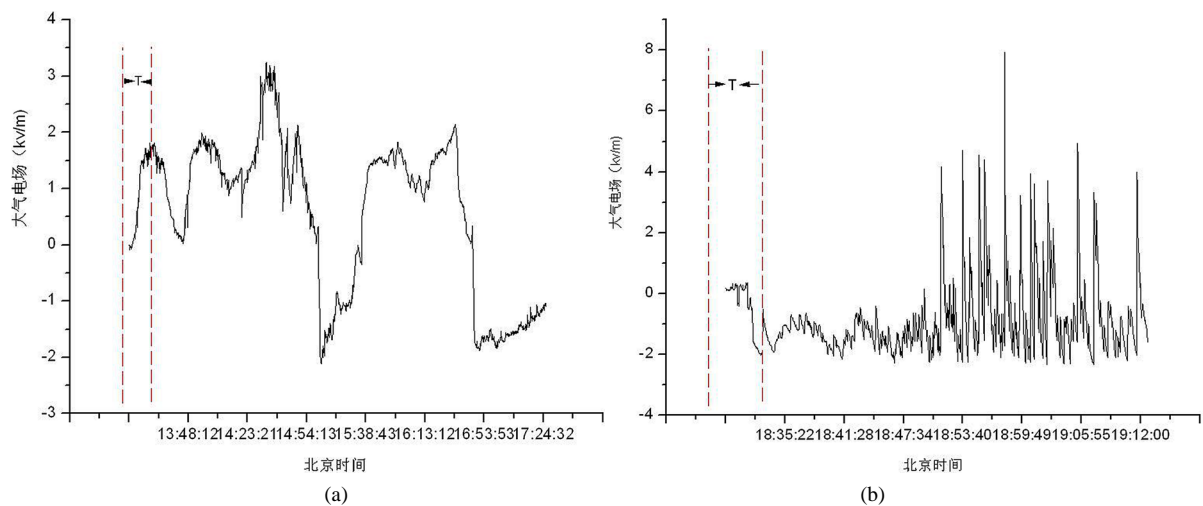
大气电场是大气电学的一个基本的参数，通过对地面大气电场变化特征的研究有助于强对流天气发生时的雷暴监测预警。通过对南京各测站 2016~2017 年夏季积累的大气电场资料的观测分析，发现南京本地在发生单体雷暴过程时，地面电场主要有以下几个变化特征：

1) 正向增大型：表明此时电场已经发生了瞬间倒转，一般发生在先导闪电发生后，如图 2(a)江宁观测站一次雷暴过境时的电场变化，此时雷暴云底部和地面之间的电势差已经达到了击穿场强。

2) 负向增大型：图 2(b)所示为江心洲站一次雷暴过程时地面电场负向增大型变化，当对流云团逐渐向测站靠近时，伴随雷暴云底部聚集的负电荷逐步累积，大气电场强度随即负向增加，如图中“T”所示的区域部分。

3) 正负交替型：当雷暴云已经进入电场仪预警范围内并发生对地放电时，主要表现为图 2(c)所示的昆仑路测站的正负交替型电场特征。

此外多单体雷暴过境时的地面电场变化主要是由多个单体雷暴在经过不同的生消发展阶段并且对地放电时电场极性的频繁快速反转进而呈现出的综合效果[13] [14] [15]。如图 2(d)所示为六合观测站探测到的一次多单体雷暴发生时的电场变化特征曲线图。



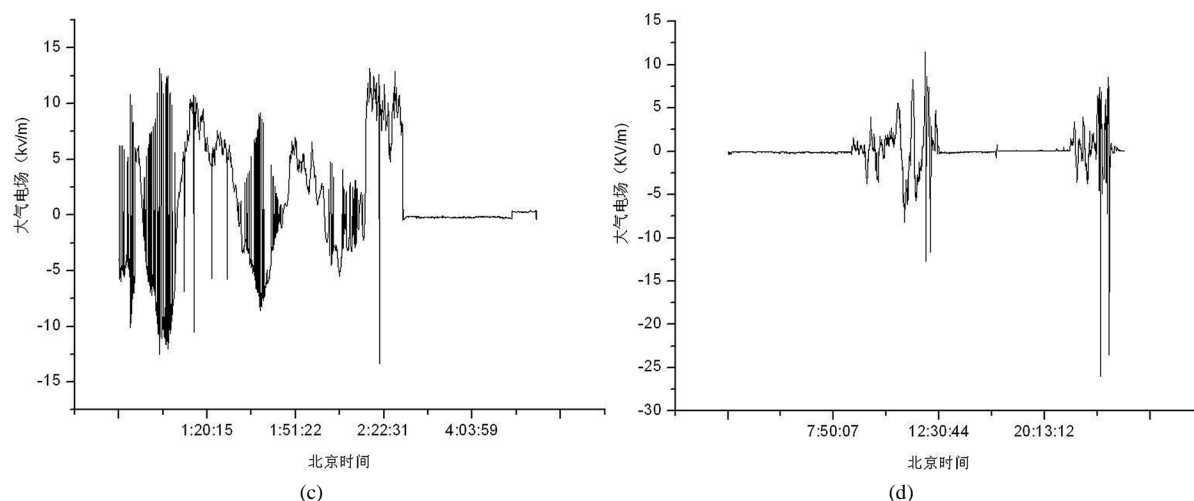


Figure 2. (a) A thunderstorm at Jiangning station is increasing the magnitude of the electric field; (b) negative increasing electric field during a thunderstorm at Jiangxinzhou station; (c) an alternating electric field during a thunderstorm at Kunlun Road Station (d) Luhe Station Multicellular thunderstorm process electric field

图 2. (a) 江宁站一次雷暴过程正向增大型电场; (b) 江心洲站一次雷暴过境时负向增大型电场; (c) 昆仑路站一次雷暴过程正负交替型电场; (d) 六合站多单体雷暴过程电场

4. 雷暴过境时地面电场变化特征分析

4.1. 雷暴过程电场变化的阶段特征分析

一般而言,大气电场仪的有效探测范围为以站点为圆心,半径为 15 km 以内雷暴云电荷量变化情况,故而可以将距测站 15 km 范围内的区域叫做预警区域(Row),在对 2016~2017 年 6~8 月南京地区 140 个雷暴天气电场样本详细研究分析的基础上,根据发生闪电时的位置距电场测站的距离得出雷暴过程中的大气电场变化大致有如下阶段:

第一阶段:无雷暴云影响或者闪电发生在距电场仪较远处的阶段,此时电场的快变抖动主要围绕在零点附近,相应的电场幅值变化也不太明显;

第二阶段:雷暴云逐渐向测站靠近的阶段,闪电在 15 km 范围内发生,伴随云底聚集的电荷累积电场幅值渐渐增大,当先导闪电发生时,电场迅疾发生极性翻转;而后伴随雷暴云更进一步的临近,电场曲线表现为频繁上下跳动;

第三阶段:雷暴云继续发展移近到电场仪 5 Km 范围内,电场曲线变化抖动剧烈;

第四阶段:雷暴云离境阶段,这个阶段的地面电场经过一段时间震荡后,电场幅值也渐渐恢复到晴天的电场值,雷暴过程进入消亡阶段。

以 2016 年 7 月 15 日南京江宁测站的一次雷暴过程电场资料为例,设闪电定位仪探测到某电场仪站点 15 km 内首次闪击的时刻为 t_1 ,探测到该站点 10 km 内首次闪击的时刻为 t_2 ,探测到该站点 5 km 内首次闪击的时刻为 t_3 。则上述各个阶段的电场曲线变化特征见图 3(a)。其电场幅值的变化情况也与雷暴云的逐渐临近密切相关,见图 3(b)和图 3(c)。由图 3(a)可以看出 15:20 分之前雷暴云逐渐移近江宁观测站,随后电场反向增大,主要是受雷暴云所带正电荷所致;当 15:10 分左右雷暴云抵达测站附近区域时,此时大气发生了明显的击穿放电现象(首次闪击发生在 15:12 分),主要表现为图 3(a)中较为明显的针状脉冲凸起,伴随第一次充放电的完成,从图中可以看出后续也发生了多次闪击,主要为负地闪,电场也主要呈现出明显的负向增大特征。在此过程中与之相对应的雷达回波的强度也是明显加强的,图 3(b)所示的为此次雷暴过程临近测站时的回波变化发展情况,伴随闪电的临近,回波面积逐步增大,回波强度加强。

之后随着雷暴云的过境与离开, 电场曲线波动也会逐渐回到 0 轴附近, 在 15:48 分以后(见图 3(a))是雷暴云的消散阶段, 从图 3(c)上也能看出此阶段的雷达回波也是逐渐减弱并消散的。

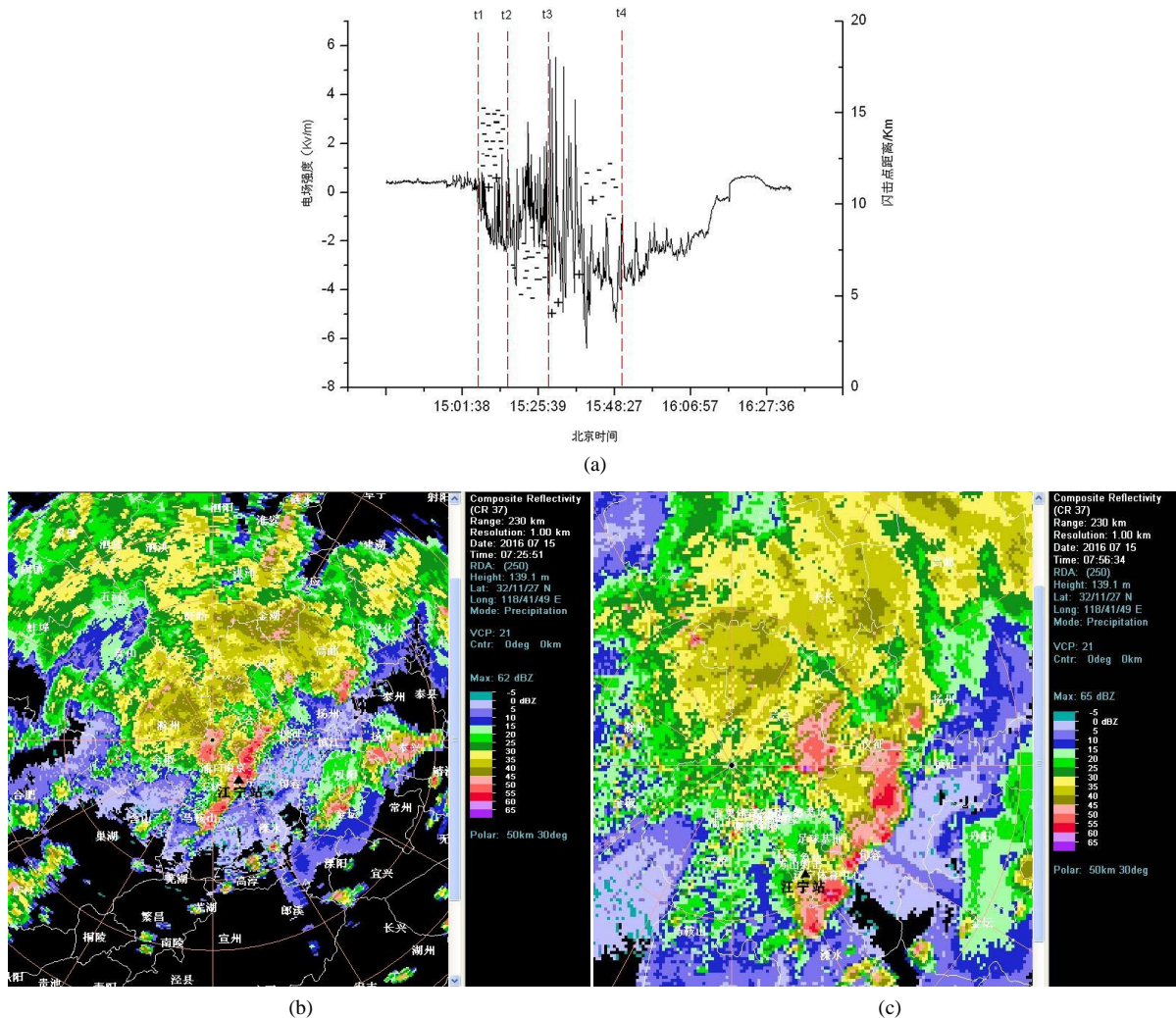


Figure 3. Electric field variation and radar echo during a thunderstorm at Jiangning station on 15 July 2016; (a) the electric field curve and the distance from the flash point to stage T of a thunderstorm at Jiangning Station on 15 July 2016 are descending waveforms; (b) radar echo at 15:25 minutes within 10 km of the second stage of the station; (c) radar echo at 16:02 hours during phase IV thunderstorm cloud dispersal phase

图 3. 2016 年 7 月 15 日江宁站一次雷暴过程电场变化及雷达回波图; (a) 2016 年 7 月 15 日江宁站雷暴过程电场曲线和闪击点距离 T 阶段为下降型波形; (b) 测站第二阶段 10 km 内 15:25 分雷达回波图; (c) 第四阶段雷暴云消散阶段 16:02 分雷达回波图

根据以电场仪测站为中心半径 15 km 的区域叫做预警区域(Row)定义的雷暴过程的四个阶段(见图 3(a)中 t_1 - t_4 阶段), 当发生闪击时距江宁电场测站的各阶段的具体闪电情况分析如下:

第一阶段(t_1 - t_2 时段): 闪电定位仪探测到的电场仪站点 15 km 内首次闪击发生在 15:12 (北京时, 下同), 距离江宁站 13.1 km, 这一阶段共探测到 42 次闪击, 距测站最近距离为 9.6 km。

第二阶段(t_2 - t_3 时段): 10~5 km 内首次闪击发生在 15:21, 此时进入雷云临近阶段。

第三阶段(t_3 - t_4 时段): 15:30 分闪电定位仪探测距测站 4.4 km 处闪击, 此时进入雷云到达阶段, 一直持续到 15:48, 该时刻探测到 5 km 范围内最后一次闪击。

第四阶段(t_4 时刻之后数 10 min): 雷暴云消散阶段, 电场曲线经过 30 min 左右震荡后渐趋于平稳。

4.2. 大气电场仪预警阶段特征分析

4.2.1. 电场幅值变化特征

以 2016~2017 年 6~8 月南京周边地区各站点的电场观测资料为样本(其中雷暴样本共计 140 个), 结合所有夏季雷暴过程中闪电定位仪定位到的以南京各测站为中心, 半径分别为 15 km、10 km、5 km 的首次闪击数据, 对南京八个测站的电场仪报警阈值以及阈值的分钟变化率、预警时间、阈值持续时间、T 阶段时间进行了统计分析, 在此设电场强度绝对值到达预警阈值开始预警时刻为 T, 则对应到达一级预警阈值的时刻为 T_1 , 到达二级预警阈值的时刻为 T_2 , 到达三级预警阈值的时刻为 T_3 ; 电场仪在 T_1 、 T_2 、 T_3 时刻达到的预警阈值分别为 E_1 、 E_2 、 E_3 , 与之相对应的到达报警时刻 1 分钟内平均阈值分别为 E_1/T_1 、 E_2/T_2 、 E_3/T_3 。

设实际地闪发生的时刻为 t , 则距大气电场仪 15 km、10 km、5 km 半径各区域内发生第一次地闪的时刻分别为 t_1 、 t_2 、 t_3 ; 以上述标准参数的设定为基础, 观察分析得到南京各站大气电场仪预警参数分析结果见表 2:

Table 2. Distribution of early warning thresholds of electric field meters in Nanjing area

表 2. 南京地区各测站电场仪预警阈值分布

	E_1 (kv/m)	E_2 (kv/m)	E_3 (kv/m)	E_1/T_1	E_2/T_2	E_3/T_3
江宁站	1.96	3.86	4.76	1.65	2.83	3.20
南京本站	1.42	3.07	4.85	1.33	2.34	3.36
昆仑路站	2.10	3.62	5.53	2.01	3.46	4.79
奥体站	0.47	0.54	0.81	0.43	0.49	0.71
高淳站	0.70	1.00	1.54	0.78	0.99	1.41
溧水站	1.69	2.39	2.67	1.61	2.19	2.54
浦口站	1.67	2.24	2.97	1.6	2.11	2.78
六合站	0.69	1.13	1.38	0.64	1.09	1.33

从表 2 中可以看出, 总体上南京各站在 15 km、10 km、5 km 范围内达到的平均阈值在 1.33 kv/m、2.23 kv/m、3.06 kv/m 左右; 与之相对应的 1 分钟平均阈值分别为 1.25 kv/m、1.93 kv/m、2.51 kv/m 左右。其中, 奥体站、高淳站、六合站达到的报警阈值相对较小。

大气电场的幅值大小可以作为雷电预警研究中的指标, 相关研究人员[16]也根据各地发生雷暴天气时大气电场仪预警时所达到的幅值来定义当地雷电预警时的电场阈值。然而现实中以某一固定电场阈值统一当作一个地区所有站点的报警门限值势必会影响电场仪在使用过程中的预警效果。因此可以引入电场放大倍数的概念, 即雷暴发生时, 电场幅值变化的平均值与非雷暴天气时大气电场幅值的比值(一般默认为晴天大气电场幅值), 可以在一定程度上弱化各测站因局地性差异带来的影响, 进而有效反映各个站点在雷暴过程中电场幅值变化的特征, 其定义见公式(1) [17]:

$$mi = ei/Ei \quad (1)$$

其中: ei 为某站点雷暴天气中电场仪预警时电场幅值变化的平均值; Ei 为该站晴天大气电场幅值的平均值。计算结果表明, 140 个雷暴样本中, 电场放大倍数 m 的最小值为 0.6, 最大值为 21.3, 分别出现在高淳站和浦口站的雷暴过程。根据相关理论对晴天的定义, 即不发生降水, 且当天云量少于 3/8, 平均风速小于 4 m/s, 统计分析得到近三年南京各站点晴天大气电场幅值的平均值分布(见图 4)。从中也可以看出

南京各站晴天大气电场分布在 0.106~0.388 kv/m 之间。

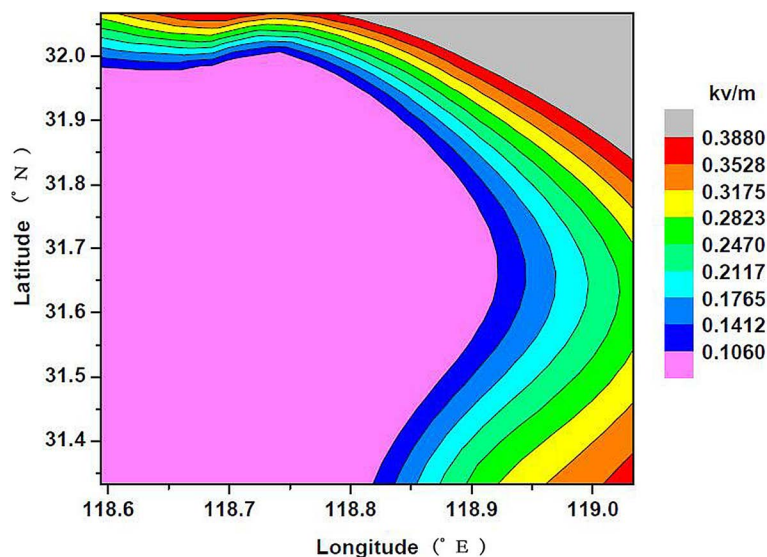


Figure 4. The distribution of the average atmospheric electric field volt value in KV/M during the summer of 2016~2017 around Nanjing

图 4. 2016~2017 年夏季南京周边地区晴天平均大气电场伏值分布(单位: kv/m)

4.2.2. 预警时间特征

由于大气电场仪的有效探测范围为 15 km 以内雷暴云电荷量变化情况，故而可以将距测站 15 km 范围内的区域叫做预警区域(Row)，可以将距测站 15 km 范围内的预警时间定义为 T_1 ，距测站 10 km 范围内的预警时间定义为 T_2 ，距测站 5 km 范围内的预警时间定义为 T_3 ，依据 2016~2017 年的雷暴过程样本计算分析可得南京各测站大气电场仪预警时间分布见表 3。

Table 3. Distribution of early warning time of electric field meter in Nanjing area

表 3. 南京地区各测站电场仪预警时间分布

站名/时间	预警时间(min)			阈值持续时间(min)
	T_1	T_2	T_3	T_c
江宁站	23	19	45	16.8
南京本站	32.5	24	52.5	15.8
昆仑路站	23.5	31.7	28.6	12.1
奥体站	43.6	27	13.6	49
高淳站	40.7	51.6	40.5	55.4
溧水站	39.2	37.2	47.8	22.8
浦口站	23.6	33.1	30.1	10.6
六合站	41	32.7	26.2	18.4

由图 5 可以看出南京各测站 15 km 范围内的预警时间发生在 23~44 分钟之间，10 km 范围内的预警时间在 19~52 分钟，5 公里范围内的预警时间在 13~53 分钟，阈值持续时间大致在 10~49 分钟左右，T 阶段时间在 15~47 分钟。

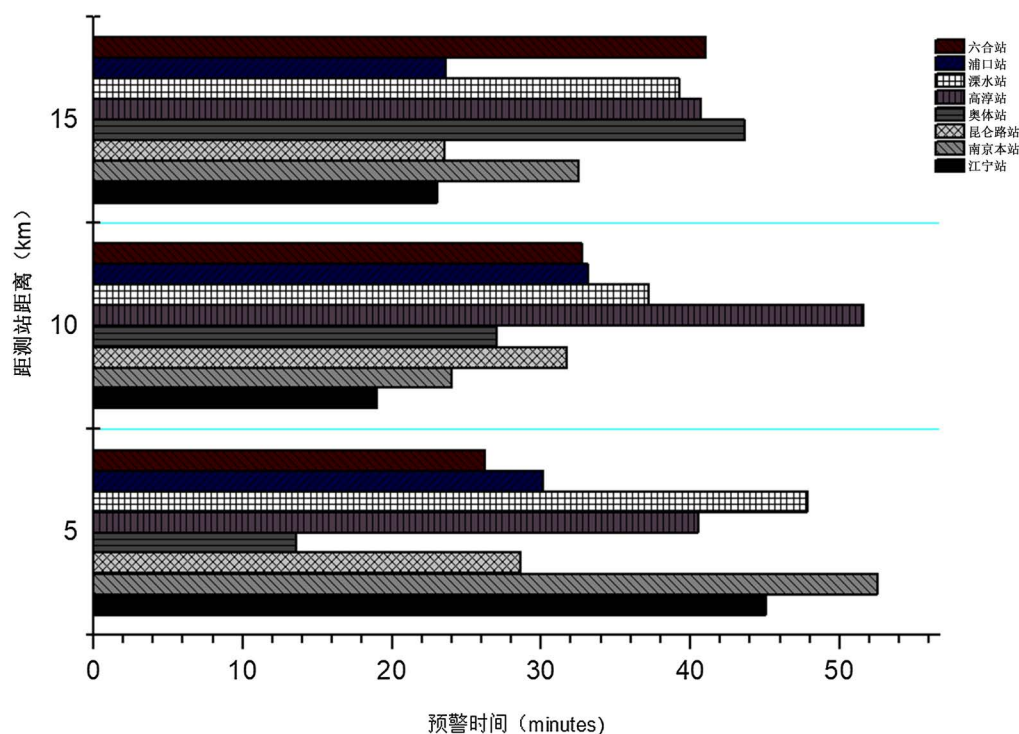


Figure 5. Distribution of early warning time of stations in Nanjing
图 5. 南京各测站预警时间分布

5. 各站大气电场仪预警效果分析

对 2016~2017 年 6~8 月南京观测区多个地面大气电场测站(南京本站、昆仑路站、奥体站、江心洲站等)和江苏省气象局闪电定位系统以及新一代天气雷达等资料的综合分析来进行预警研究。同时为了提高大气电场仪的探测效率,重点对以电场仪为中心,半径为 15 km 的范围(预警范围(ROW))进行分析。设电场强度绝对值到达预警阈值开始预警时刻为 T , 则对应到达一级预警阈值的时刻为 T_1 ; 到达二级预警阈值的时刻为 T_2 。设实际地闪发生的时刻为 t , 则距大气电场仪 15 km、10 km、5 km 半径各区域内发生首次地闪的时刻分别为 t_1 、 t_2 、 t_3 。 $T-t$ 为预警时间, 若 $T-t > 0$, 可以认为预警成功, 以 X 表示; 若 $T-t < 0$, 则预警未成功, 可以视为漏报, 以 Y 事件表示; 若 T 时刻后相关区域内并未发生闪电则可以视为空报, 以 Z 事件表示。

通常用预报评分方法[18]中的探测概率、漏报率、虚警率以及临界成功指数等参数来评判预报效果, 其具体计算方法如下:

$$POD = \frac{X}{X+Y} \quad (2)$$

$$PO = \frac{Y}{X+Y} \quad (3)$$

$$FAR = \frac{Z}{X+Z} \quad (4)$$

$$CSI = \frac{X}{X+Y+Z} \quad (5)$$

在以上公式为理论基础的前提下, 结合闪电定位仪以及大气电场仪数据对南京地区 2016~2017 年各

站夏季雷暴过程的雷电预警效果进行了深入的分析研究, 进而得到南京八个测站大气电场仪的预警探测效率(POD)、漏报率(PO)、空报率(FAR)、临界成功指数(CSI)的结果见图 6(a)~(d)。

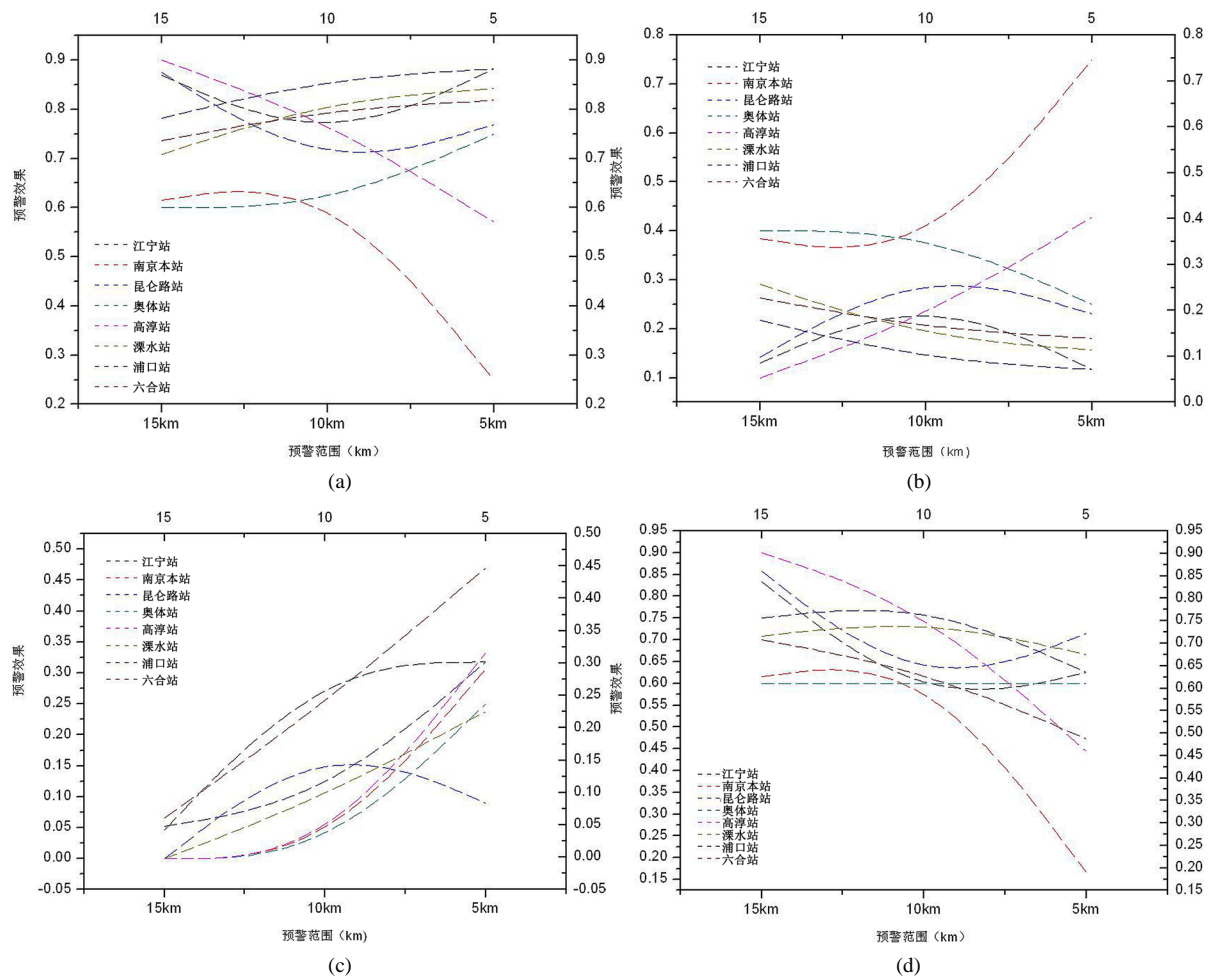


Figure 6. Distribution of early warning detection efficiency (POD), false alarm rate (PO), false alarm rate (FAR) and critical success index (CSI) of atmospheric electric field instruments at various stations in Nanjing; (a) The early-warning detection efficiency of Atmospheric Electric Field Instrument in Nanjing Stations (POD); (b) The rate of missing report of Atmospheric Electric Field Instrument in Nanjing Stations (PO); (c) Air-to-air reporting rate of atmospheric electric field instruments at various stations in Nanjing (FAR); (d) Critical Success Index of atmospheric electric field instruments at various stations in Nanjing (CSI)

图 6. 南京各测站大气电场仪的预警探测效率(POD)、漏报率(PO)、空报率(FAR)、临界成功指数(CSI)分布情况; (a) 南京各测站大气电场仪的预警探测效率(POD); (b) 南京各测站大气电场仪的漏报率(PO); (c) 南京各测站大气电场仪的空报率(FAR); (d) 南京各测站大气电场仪的临界成功指数(CSI)

从中可以看出: 1) 南京本站、高淳站大气电场仪预警准确率总体上在 15~10 km 范围效果较好, 其余各站基本上预警准确率随着预警半径范围的缩小, 预警率也是增加的;

2) 高淳站与南京本站的大气电场仪在使用过程中发现其漏报率较高, 分析其原因与这些站点的数据缺失有一定的关系;

3) 各站临界成功指数总体上在 15~10 km 范围内的探测效率较高。

6. 结论与讨论

1) 本文在结合闪电定位、雷达与大气电场仪数据的基础上对南京地区 2016~2017 年各站夏季雷暴过

程的大气电场特征进行了深入的分析研究, 得出电场变化与闪电发生时刻之间的关系;

2) 以各站夏季雷暴过程的电场观测资料为样本(其中雷暴样本共计 140 个), 结合闪电定位仪定位距各测站不同范围内的首次闪击数据, 对南京本地八个测站的电场仪报警阈值以及阈值的分钟变化率、预警时间、阈值持续时间、T 阶段时间进行了统计分析, 得出南京本地电场仪预警阶段的各项预警参数值;

3) 在此基础上对南京各测站大气电场仪的雷电预警效果进行了计算分析, 发现南京本站、高淳站大气电场仪预警准确率总体上在 10~15 km 范围效果较好, 其余各站基本上预警准确率随着预警半径范围的缩小, 预警准确率增加; 各站临界成功指数总体上在 15 km 范围内的探测效率较好;

4) 本文以 2016~2017 年夏季雷暴过程电场为样本资料, 分析得出南京本地化预警参数值并探讨了南京本地各站的电场仪预警效果, 由于目前积累的后续雷暴过程资料尚不丰富, 所以未能从预报方程的角度去检验各站预警参数值并予以修正; 接下来的工作中, 将试图融入雷达预警参数因子等建立南京本地化的雷电预报方程, 以便从更加精细化的角度来检验并修正本文得出的各项预警参数值。

基金项目

华东区域气象科技协同创新基金合作项目(QYHZ201604), 江苏省气象局面上项目“多源观测资料在雷暴云特征分析和预报技术中的应用研究”(KM201909)。

参考文献

- [1] Murphy, M.J. and Holle, R.L. (2006) Warning of Cloud-to-Ground Lightning Hazard Based on Combinations of Lightning Detection and Radar Information. *19th International Lightning Detection Conference*, Tucson, 24-25 April 2006, 24-25.
- [2] Harnwell, G.P. and Van Voorhis, V. (1933) Electrostatic Generating Voltmeter. *Review of Scientific Instruments*, **4**, Article No. 540. <https://doi.org/10.1063/1.1748995>
- [3] 罗福山, 何渝晖, 张华伟, 张健, 庄洪春, 胡圣波. 电场的标定方法[J]. *空间科学学报*, 2007, 27(3): 223-226.
- [4] 张腾飞, 季鑫源, 行鸿彦. 电场仪标定系统设计[J]. *气象水文海洋仪器*, 2010, 27(4): 67-72.
- [5] 张义军, 葛正谟, 陈成品, 孟青. 青藏高原东部地区的大气电特征[J]. *高原气象*, 1998, 17(2): 135-141.
- [6] 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.
- [7] 王凯, 朱浩, 刘安平, 孙浩, 程向阳. 黄山风景区雷暴电场特征及预警方法研究[J]. *气象与环境学报*, 2015, 31(5): 184-189.
- [8] 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(自然科学版)*, 2006, 7(3): 302-306.
- [9] 曾庆锋. 雷暴云地面电场特征和基于多源观测资料的雷电预警研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2013: 97-98.
- [10] 杨晓军, 刘维成, 宋强, 肖玮, 乔丫芸, 石延召. 甘肃中部地区短时强降水与闪电关系初步分析[J]. *干旱气象*, 2015, 33(5): 802-807.
- [11] 朱义青, 赵海军, 庄重, 高安春, 曹张驰, 张品竹. 山东中部一次强对流天气的中尺度结构和闪电特征分析[J]. *干旱气象*, 2015, 33(5): 830-837.
- [12] 韩文字, 杨丽丽, 杨毅. 一次强对流过程的多普勒雷达反演及预警分析[J]. *干旱气象*, 2014, 32(5): 810-818.
- [13] 朱男男, 宫全胜, 易笑园. 地面大气电场资料在强对流天气预报中的应用[J]. *气象科技*, 2010, 38(4): 423-426.
- [14] 孟青, 吕伟涛, 姚雯, 何平, 张义军, 刘强, 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.
- [15] 田琨, 郭凤霞, 曾庆峰, 龚嘉锵. 南京地区雷暴活动强度潜势预报[J]. *气象科技*, 2013, 41(1): 177-183.
- [16] 吴明江, 杜莉萍, 陈勇斌, 宋文英, 陈柏堃. 大气电场的特征及雷电预警技术研究[J]. *气象水文海洋仪器*, 2010,

1(1): 10-14.

- [17] 周俊驰, 王振会, 冯民学, 沈刚, 程琳, 张艳华. 南京周边地区雷暴过境时电场特征及其在预警中的应用[J]. 高原气象, 2013, 32(5): 1470-1477.
- [18] Mason, I. (1989) Dependence of the Critical Success Index on Sample Climate and Threshold Probability. *Australian Meteorological Magazine*, **37**, 75-81.