

基于多种观测资料的雷电临近预警方法的研究

刘 佼^{1*}, 韩照全¹, 陈 曲¹, 姜有山^{2#}, 毛宇清², 李 聪²

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

收稿日期: 2023年1月8日; 录用日期: 2023年2月6日; 发布日期: 2023年2月14日

摘 要

近年来, 由雷电导致的经济损失及社会影响的危害面几乎涉及到各行各业, 为此加强雷电预警预报工作及其相关的科学研究, 对气象防灾减灾工作有着重要意义。本文利用南京本站、江宁站、昆仑路站、奥体中心站、高淳站、溧水站、浦口站、六合站大气电场仪资料, 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。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, 并在此基础上确定了南京本地大气电场仪预警时刻的各项预警参数值以及雷达回波特征。以期尝试探索多源观测资料在改进雷电预警工作中的应用前景, 并以此弥补单一大气电场资料在雷电预警工作中的不足。以江宁站为试点建立雷电预警方程得出最佳预警因子参数, 结果表明当江宁站电场仪预警阈值持续时间达到16.43分钟左右, 该站大气电场增大倍数为晴天大气电场的10.95倍以上, 电场阈值分钟变化平均值达到1.7 kv/m, 雷达组合反射率因子达到30 dBZ以上, 回波顶高达到7 km左右时的预警指标后, 该地区将在25分钟左右后发生闪击。通过对江宁站夏季雷暴样本检验的基础上得出此方法准确率达到62%。

关键词

大气电场, 雷暴, 雷电临近预警, 预报方程

Research on Lightning Early Warning Method Based on Multiple Observation Data

Jiao Liu^{1*}, Zhaoquan Han¹, Qu Chen¹, Youshan Jiang^{2#}, Yuqing Mao², Cong Li²

¹Nanjing Meteorological Service Center, Nanjing Jiangsu

²Nanjing Meteorological Observatory, Nanjing Jiangsu

Received: Jan. 8th, 2023; accepted: Feb. 6th, 2023; published: Feb. 14th, 2023

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 刘佼, 韩照全, 陈曲, 姜有山, 毛宇清, 李聪. 基于多种观测资料的雷电临近预警方法的研究[J]. 气候变化研究快报, 2023, 12(2): 225-236. DOI: 10.12677/ccrl.2023.122023

Abstract

In recent years, the economic losses and social impacts caused by lightning almost involve all walks of life. Therefore, it is of great significance for meteorological disaster prevention and mitigation to strengthen the early warning and prediction of lightning approach and related scientific research. Based on the data of atmospheric electric field instrument at Nanjing Station, Jiangning Station, Kunlun Road Station, Olympic Sports Center Station, Gaochun Station, Lishui Station, Pukou Station, Liuhe Station, combined with radar and lightning location data, the characteristics of atmospheric electric field variation during summer thunderstorms in Nanjing are obtained. According to the occurrence time of the first ground flash, the thunderstorm process of Nanjing stations was analyzed in detail, and on this basis, the early warning parameters and radar echo characteristics of the local atmospheric electric field instrument in Nanjing were determined, in order to explore the application prospect of multi-source observation data in improving the lightning early warning work. It can make up for the deficiency of single atmospheric electric field data in lightning warning work. Taking Jiangning Station as a pilot, the lightning approaching warning equation was established to obtain the best warning factor parameters. The results show that when the warning threshold duration of the electric field instrument at Jiangning Station reaches about 16.43 minutes, the increase factor of the electric field instrument at the station is more than 10.95 times that of the electric field instrument on sunny days, and the average change of the electric field threshold in minutes reaches 1.7 kv/m. When the radar combination reflectance factor reaches above 30 dBz and the echo top height reaches about 7 km, the area will blitz about 25 minutes later. Based on the test of summer thunderstorm samples at Jiangning station, the accuracy of this method reaches 62%.

Keywords

Atmospheric Electric Field, Thunderstorm, Lightning Early Warning, Prediction Equation

Copyright © 2023 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

伴随现代科技的飞速发展,使得近年来由雷电导致的经济损失及社会影响几乎涉及到各行各业[1]。在过去的几十年间,我国因雷击造成的直接经济损失高达数十亿元,有的甚至高达上百亿元。南京市地处江苏省西南部,全市年均雷暴日数为 34.4 d。南京境内内丘陵起伏,四周多山,复杂的地形使得南京夏季频频发生雷暴天气。为此加强雷电预警预报工作及其相关的科学研究,对于防灾减灾以及减少雷电造成的人员财产损失方面有着重要意义。近年来,国内外很多研究人员深入研究了雷暴云电特性及雷电临近预报工作,取得了显著的研究成果[2] [3] [4] [5]。

过去,国外相关学者在单独利用闪电定位资料进行雷电预警工作时,通过闪电定位数据的研究得出了闪电与降水的关系,如 Serge 等的研究表明闪电与降水在空间上表现为高度的一致性[6]。此外,也有相关学者发现闪电频数峰值时间的出现较之于降水强度峰值的出现时间是提前的[7]。以上的诸多研究中所提出的具体的闪电发生时与降水的特征对雷电预警来说也是很有警示意义的。

在利用大气电场资料进行雷电预警工作方面,相关工作人员[8] [9]进一步改进了电场仪的标定工作,为电场测量数据的可信度提供了一定的理论依据。Pustovalov 和 Nagorskiy 对孤立对流单体通过时的地面电场中的波形变化响应形式进行分类研究并得出其变化特征,确定了 9 种类型的 $r\Phi$ 缓慢变化形式与积雨云发展不同阶段的关系[10]。此外,国内相关学者尝试利用电场阈值以及极性反转法等进行雷电预警[11]

[12]。而电场仪自身对环境引起的电场变化这一敏感的缺陷使得相关学者在单独利用大气电场资料进行预警时因为气象资料的单一性而得到的虚警率较高。

针对以上电场仪探测资料在空间方位上的不足之处，雷达资料发挥出了明显的优势。国内外相关学者也进行了大量的研究，结果表明：雷达参数中不同高度的不同反射率的因子可以用于雷电预警工作中。同时大量研究结果也得出了环境温度为 -10°C ，雷达反射率因子为 40 dbz 时是最好的雷电预警因子[13]。吕伟涛等利用闪电定位数据与雷达回波阈值结合的方式对闪电进行预报[14]。

虽然天气雷达观测资料的研究和应用，已经取得了丰硕的研究成果，但雷达因其探测范围广的特点使得其在雷电短临预警方面也存在一定的弱点。对此，相关学者尝试融合更多的闪电观测资料进行雷电预警[15][16]。王凯等通过分析黄山风景区的雷暴过程近地面静电场特征，得出本地雷暴地面电场以负地闪为导向[17]。虽然上述研究中已尝试将大气电场资料和雷达以及闪电定位资料结合进行预警，但目前而言就某一地区的雷电预警的研究工作尤其是在利用多站大气电场资料的变化特征，同时结合雷达、闪电定位仪等多源观测资料进而得出一系列具体预警指标的研究进展相对较少。而对某地雷电的认识以及雷电警报阈值的确定总体上是基于该地多站大气电场仪数据的联网以及融合雷达、闪电定位仪等气象数据的观测。

因此，本文试图尝试立足于多普勒雷达、江苏省闪电定位资料同时结合多站大气电场资料，通过对近年来南京市的雷暴个例进行研究，结合首次发生地闪的时刻计算出南京本地各项雷电预警因子的阈值并以此为基础建立雷电预报模型，以期尝试探索多源观测资料如何在雷电预报预警工作中发挥出更为有效的应用前景。

2. 数据与方法

2.1. 数据来源

本文中使用的资料包括：

1) 2016~2018年6~8月南京各站(南京本站、江宁站、昆仑路站、奥体中心站、高淳站、溧水站、浦口站、六合站)电场数据资料。南京各站大气电场仪位置分布如图1所示。

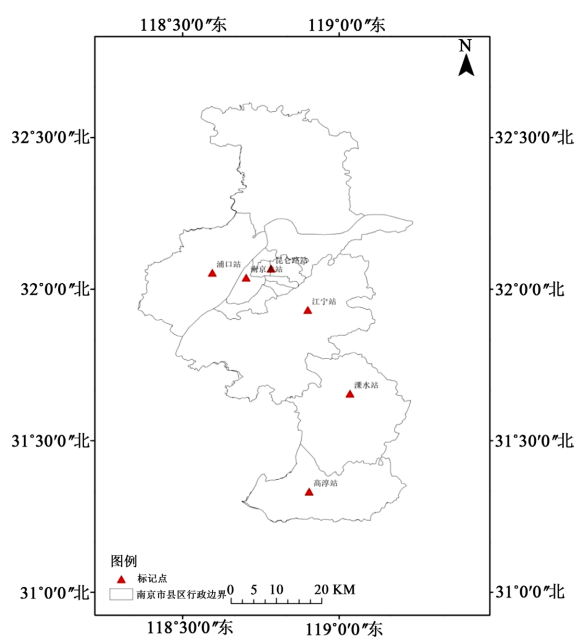


Figure 1. Distribution of atmospheric electric field instrument stations
图 1. 大气电场仪站点分布

表 1 所示为南京大气电场仪的具体性能参数。

Table 1. Main performance indexes of Pre-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/5ms

2) 2016~2018 年 6~8 月江苏省闪电定位资料：该闪电探测系统单站的探测范围约为 150 km，闪电资料提供的信息有：闪电的发生时间、电流幅度、发生闪击时的经度以及纬度等。闪电定位资料所提供的探测范围为(113°E~122°E)、(28.5°N~38°N)。

3) 雷达资料：本文所采用的雷达数据时段为 2017~2018 年 6~8 月，来自于南京多普勒天气雷达站(32.191°N, 118.697°E)，其探测范围为 230 km，南京周边各站大气电场仪测区均覆盖在雷达的探测范围内。

为了研究南京市雷暴过程地面电场的特征，本文将研究的范围定义为 31.931°N~32.068°N、118.702°E~118.899°E。

2.2. 数据质量控制与资料处理方法

本文针对大气电场、闪电定位数据以及雷达资料质量控制与数据处理的基础上，确保研究数据准确、有效，所进行的预警流程如下：首先判定大气电场仪数据是否达到具体设定的阈值指标，如若达到则发出预警，尚未达到阈值则继续判断下一时刻数据情况，直到发出预警或者雷暴结束。用每个测站内的闪电定位数据来检验该站预报效果。闪电定位数据的处理工作具体如下：1) 对南京各站大气电场仪 15 公里探测范围内的闪电数据进行筛选；2) 利用雷达资料来检验每一个闪电；3) 筛选出南京各电场测站每一次雷暴过程的 15 km、10 km、5 km 范围内的首次闪电。

大气电场仪数据在使用过程中需注意与雷达资料每六分钟体扫的时段相对应，如果在此时段内大气电场数据缺失较多，则剔除该时段内的数据，以保证其能与雷达资料有效对接。

为便于计算和分析，本文在使用雷达数据资料时，首先对雷达基数据插值转化为笛卡尔坐标系下水平分辨率为 1 km × 1 km，高度分辨率为 0.5 km × 0.5 km 的三维格点场数据。由于雷达产品每隔 6 分钟生成一次，故而可以选取雷达图生成时 6 分钟内的地闪资料以及大气电场仪数据与雷达资料进行对应。这样，可以保证本文中所有雷暴天气过程中的大气电场仪观测资料、闪电定位仪资料无重复地与雷达资料相对应。

本文将市区内在同一时间段内出现两次闪电以上定义为一次雷暴过程，将两次地闪的时间间隔超过 2 h 定义为两次不同雷暴过程。

3. 南京地区雷暴天气大气电特征分析

本文通过对南京各站夏季大气电场资料的分析，如图 2(a)~(d)所示，发现雷暴过境时，南京本地大气电场主要变化特征表现如下：

1) 正向增大型：如图 2(a)所示为江宁观测站的一次雷暴过境时的电场变化，此时大气电场已经发生了翻转。

2) 负向增大型: 如图 2(b)所示的江心洲站电场变化示意图, 图中“T”所示的区域部分表明若对流云团靠近测站时, 雷暴云底部积累了大量负电荷, 大气电场强度出现负向增加。

3) 正负交替型: 当雷暴云已进入到电场仪预警范围内且开始对地放电时, 伴随其靠近测站, 地面大气电场主要表现为无规则的上下震荡。如图 2(c)所示的昆仑路测站一次雷暴过程中表现出的正负交替型电场特征。

4) 多单体雷暴变化电场: 当由多个单体雷暴叠加而形成多单体雷暴时, 地面电场会表现为由不同的单体雷暴分别经过生消、发展、消亡阶段进而叠加而成的综合效果, 其总体变化特征如图 2(d)所示。

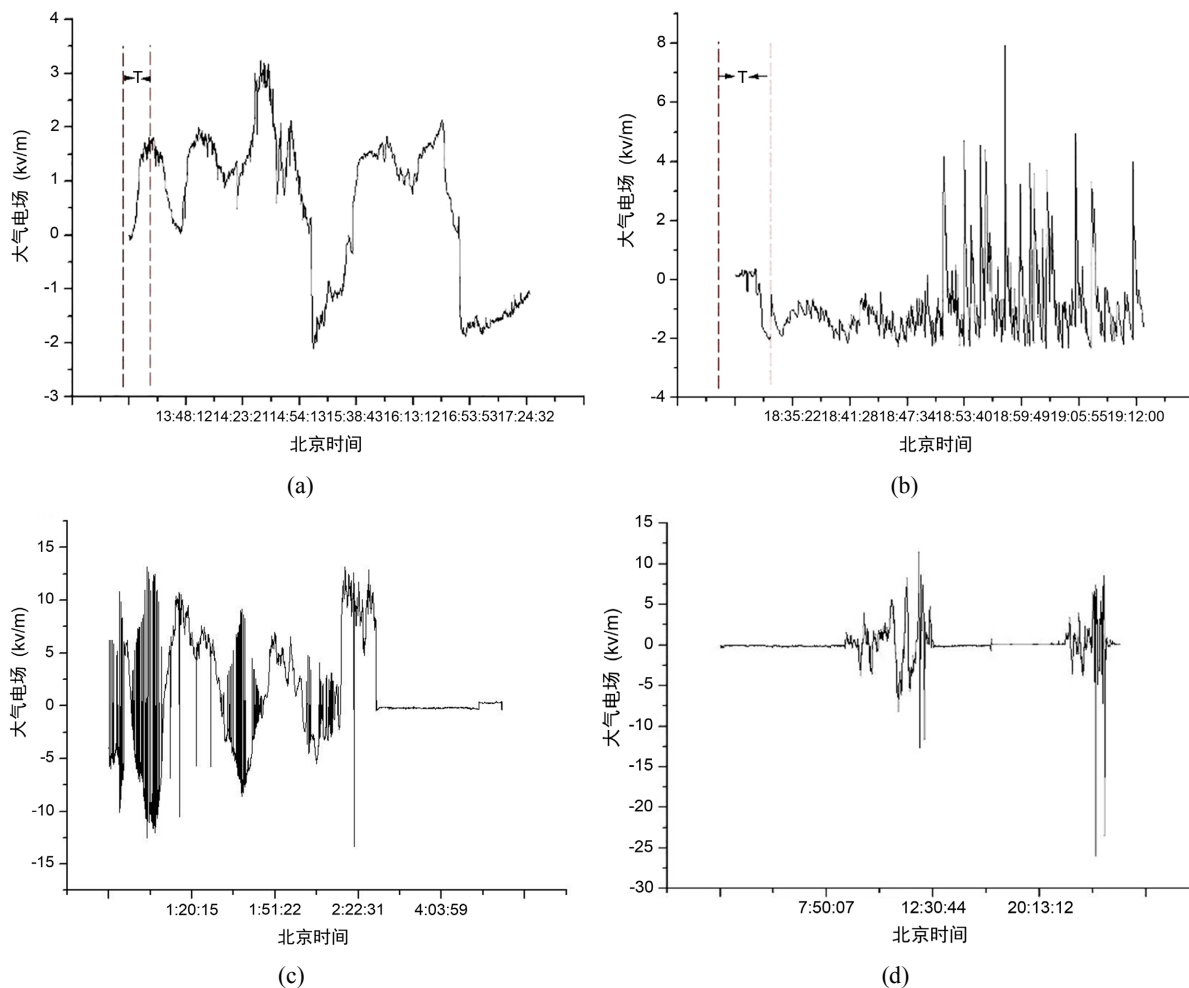


Figure 2. Waveform of characteristic changes of atmospheric electric field during the passing of a thunderstorm ((a) positive increase of large electric field during the thunderstorm process at Jiangning Station, (b) negative increase of large electric field during the thunderstorm process at Jiangxinzhou Station, (c) positive and negative alternating electric field during the thunderstorm process at Kunlun Road Station, (d) Multi-cell thunderstorm electric field at Liuhe Station)

图 2. 雷暴过境时大气电场特征变化波形图((a) 江宁站雷暴天气过程正向增大型电场、(b) 江心洲站雷暴天气过程负向增大型电场、(c) 昆仑路站雷暴天气过程正负交替型电场、(d) 六合站多单体雷暴过程电场)

4. 雷暴天气过程的电场变化特征

4.1. 雷暴电场的各阶段特征

设一次雷暴天气过程中, 在距离测站电场仪 15 km、10 km、5 km 范围内闪电定位仪探测到首次闪击

的时刻分别是 t_1 、 t_2 、 t_3 ，以 2016 年 7 月 15 日的南京江宁测站雷暴过程为例(如图 3 所示)具体分析雷暴电场各阶段变化特征:

1) 无雷暴云影响或闪电发生位置距电场仪较远的时段，此时电场幅值未发生明显变化。

2) 雷暴云临近阶段，伴随雷暴云底部电荷不断积聚直至产生放电击穿现象主要出现在测站 15 km 的范围内，且电场幅值逐渐增大。图 3 所示为南京江宁站一次雷暴天气过境时电场变化曲线图，从中可以看出伴随雷暴云逐渐靠近江宁站，电场曲线开始出现明显抖动，当其进一步靠近测站附近，时间在 15:10 分左右，同时电场幅值达到了击穿场强的幅值，大气发生了击穿放电现象，经闪电定位仪探测到的首次闪击发生在 15:12 分，距离江宁站 13.1 km，在此阶段内共探测到 42 次闪击，主要表现为图 3 中较为明显的针状脉冲凸起。

3) 雷暴云到达阶段，此时雷云已进入测站 5 km 的范围内，电场曲线的变化出现剧烈抖动。图 3 所示闪电定位仪在 15:30 分时探测到距离江宁站 4.4 km 处发生闪电。

4) 雷暴云消亡阶段，此时地面电场历经了一段时间震荡后，电场幅值也逐渐恢复到零轴附近。如图 3 所示的雷暴云消散阶段在 15:48 分之后，经闪电定位仪探测到此时段内距离测站 5 km 范围内发生最后一次闪击，随后，电场曲线波动趋近于零轴附近。

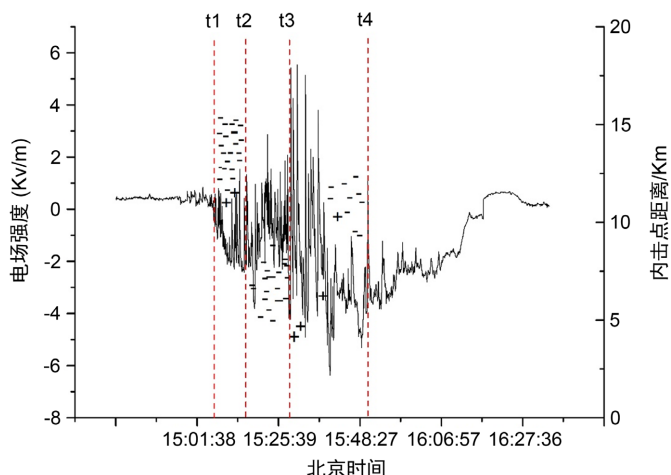


Figure 3. Variation waveform of electric field curve during thunderstorms at Jiangning Station on July 15, 2016
图 3. 2016 年 7 月 15 日江宁站雷暴过程电场曲线变化波形图

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

利用南京各站 2016~2017 年的夏季电场观测资料为样本(其中雷暴样本共 146 个),参考闪电定位仪数据,分析计算南京江宁等测站电场仪报警阈值、阈值分钟变化率、预警时间、阈值持续时间等各项预警参数。

将电场强度绝对值到达预警阈值的时刻设为 T ，对应着达到一级、二级、三级预警阈值的时刻分别为 T_1 、 T_2 、 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 ，对应的达到报警时刻 1 分钟内的平均阈值分别为 E_1/T_1 ， E_2/T_2 ， E_3/T_3 。基于上述标准参数的设定，观察分析得到的南京各站大气电场仪的各级预警阈值分析结果(表 2)。

从表 2 中可以看出，南京各站在 15 km、10 km、5 km 范围内预警阈值分别分布在 0.47~2.1、0.54~3.86、0.81~5.53 kv/m 之间；经计算得出与之相对应的预警范围内 1 分钟平均阈值分别为 1.25 kv/m、1.93 kv/m、2.51 kv/m 左右。

Table 2. Distribution of early warning threshold of electric field instrument at each measuring station in Nanjing
表 2. 南京地区各测站电场仪预警阈值分布

	江宁站	南京本站	昆仑路站	奥体站	高淳站	溧水站	浦口站	六合站
E_1 (kv/m)	1.96	1.42	2.10	0.47	0.70	1.69	1.67	0.6
E_2 (kv/m)	3.86	3.07	3.62	0.54	1.00	2.39	2.24	1.13
E_3 (kv/m)	4.76	4.85	5.53	0.81	1.54	2.67	2.97	1.38
E_1/T_1	1.65	1.33	2.01	0.43	0.78	1.61	1.6	0.64
E_2/T_2	2.83	2.34	3.46	0.49	0.99	2.19	2.11	1.09
E_3/T_3	3.20	3.36	4.79	0.71	1.41	2.54	2.78	1.39

4.2.2. 预警时间特征

计算 2016~2017 年的雷暴过程样本后得出南京各站大气电场仪的预警时间分布(表 3)。

Table 3. Distribution of early warning time of electric field instrument 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

从表 3 中得出南京各站 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; 各站阈值持续时间大致分布在 10~49 分钟左右。

4.2.3. 雷暴电场放大倍数分析

实践证明, 晴天大气电场主要呈现出变化平稳的趋势, 且幅值较小。发生雷暴天气时电场会呈现出明显的跳变及无规则的抖动。通常在发生雷暴天气时, 人们会根据当地大气电场仪预警时刻达到的幅值来定义该地雷电预警时的电场阈值。但在实际工作中, 由于电场仪工作会受到环境、地理位置、海拔高度等各种因素的影响, 如果以某一固定的电场阈值当作某地所有地区站点的预警阈值, 必然会降低电场仪的预警效果。

为此引入电场放大倍数概念: 发生雷暴时电场幅值变化的平均值与晴天大气电场平均幅值的比值, 弱化各站点因局地性差异造成的影响。其定义见公式(1) [18]

$$m_i = e_i / E_i \quad (1)$$

其中: e_i 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, E_i 为该站晴天大气电场幅值的平均值。

计算结果表明：146 个雷暴样本中，最小的电场放大倍数值为 0.6，出现在高淳站的雷暴电场变化过程；电场放大倍数最大值为 21.3，出现在浦口站的雷暴电场变化过程。

图 4 所示为 2016~2018 年南京各观测站点晴天大气电场幅值的平均值分布图，南京各站晴天大气电场主要分布在 0.106~0.388 kv/m 之间。

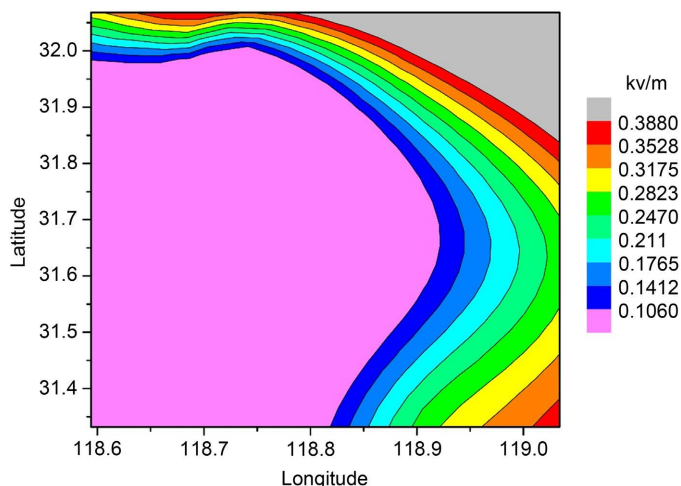


Figure 4. Average atmospheric electric field amplitude distribution in sunny days around Nanjing in summer 2016~2018 (Unit: kv/m)

图 4. 2016~2018 年夏季南京周边地区晴天平均大气电场幅值分布(单位: kv/m)

4.2.4. 雷暴过程 T 阶段雷达回波参数特征分析

在确定距离各测站 15 km 预警范围的基础上，对各站在此预警阶段内的雷达回波参数进行分析研究发现，当启动大气电场仪报警时，南京本地雷达回波反射率因子主要集中在 25~55 dbz 之间，如图 5 所示。因此可以把这些回波参数的特征引用到雷电预警的工作之中。

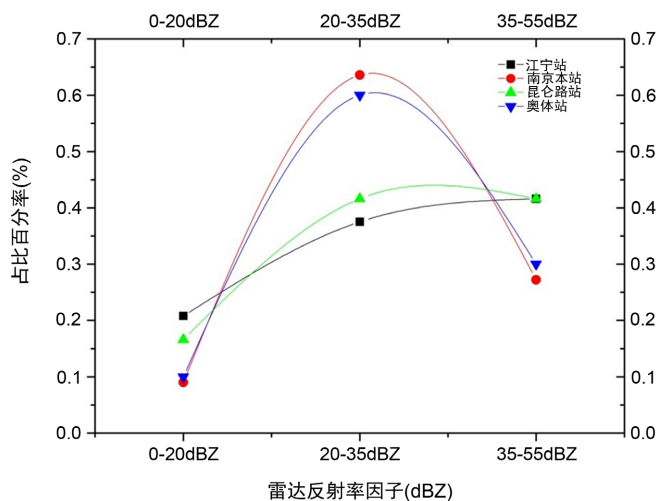


Figure 5. Distribution of radar echo reflectance factor in the 10 km early warning range of each station

图 5. 各站 10 km 临近预警范围雷达回波反射率因子占比分布

在以江宁站为例对 2016~2017 年雷暴过程中 T 阶段雷达回波参数的特征进行了分析研究，以闪击点为中心，10 km 范围内当大气电场仪达到报警门限时，所对应的雷达组合反射率因子主要集中在 30~50 dbz。

5. 单站雷电预报方程的建立与个例分析检验效果

通过研究分析 2016~2017 年南京夏季雷暴过程中 T 阶段电场特征, 针对预警时间 t 、阈值持续时间 tf 、电场阈值分钟平均值 ΔE 、电场增大倍数 m 、T 阶段雷达组合反射率因子 CR 、T 阶段雷达回波顶高 ET 等 6 个参数的特征, 以江宁测站为例建立预报方程, 进一步探讨大气电场仪资料在单站雷电预警中的初步应用, 进而为大气电场仪在雷电预警工作中的使用提供一定的方法和参考。

5.1. 雷电预警预报方程的建立——以江宁站为例

因变量 y 关于自变量 x_1, x_2, \dots, x_n 的多元回归方程如下:

$$y = w_0 + w_1x_1 + w_2x_2 + \dots + w_nx_n$$

其中, w_0, w_1, w_2, w_n 为回归系数, 离散化数据(m 组离散数据)代入, 可得:

$$y_1 = w_0 + w_1x_{11} + w_2x_{21} + \dots + w_nx_{n1}$$

$$y_2 = w_0 + w_1x_{12} + w_2x_{22} + \dots + w_nx_{n2}$$

.....

写成矩阵形式如下:

写成矩阵形式为:

$$Y = XW$$

$$Y = \begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11}, \dots, x_{n1} \\ 1 & x_{12}, \dots, x_{n2} \\ \vdots & \vdots \\ 1 & x_{1m}, \dots, x_{nm} \end{bmatrix}, W = \begin{bmatrix} w_0 \\ w_1 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix}$$

以上述方程理论为依据, 将 $t, tf, \Delta E, m, CR, ET$ 作为回归参数, 以江宁站雷暴样本为历史数据, 使用多元回归方法建立方程组, 得到上述 6 个参数之间的回归关系, 即:

$$\begin{cases} -t + 0.203tf + 33.227\Delta E - 0.907m + 0.499CR - 0.854ET = 33.624 \\ 0.093t - tf - 17.996\Delta E + 0.102m - 0.127CR + 0.76ET = -42.023 \\ 0.005t - 0.007tf - \Delta E + 0.033m + 0.0009CR - 0.019ET = -1.448 \\ -0.022t + 0.005tf + 4.531\Delta E - m + 0.182CR - 0.176ET = 0.538 \\ 0.055t - 0.03tf + 0.591\Delta E + 0.839m - CR + 1.985ET = -4.664 \\ -0.007t + 0.015tf - 0.981\Delta E - 0.067m + 0.163CR - ET = -4.713 \end{cases}$$

求解该方程组后, 得到各个预报因子的值为:

$$\begin{cases} t = 25.47 \\ tf = 16.43 \\ \Delta E = 1.7 \\ m = 10.95 \\ CR = 30 \\ ET = 7 \end{cases}$$

即: 预警时间 $t = 25.47$ (min)、阈值持续时间 $tf = 16.43$ (min)、电场阈值分钟变化平均值 $\Delta E = 1.7$ (kv/m)、电场增大倍数 $m = 10.95$ 、T 阶段雷达组合反射率因子 $CR = 30$ (dbz)、T 阶段雷达回波顶高 $ET = 7$ (km)。

由此得到预警方法, 即从电场仪站点 15 km 范围内发生首次闪击开始, 假如闪电观测数据以及雷达资料出现以下特征: ① 电场阈值持续时间达到 16.43 分钟左右; ② 大气电场增大倍数为晴天大气电场的 10.95 倍以上; ③ 电场阈值分钟变化平均值达到 1.7 kv/m 以上; ④ 雷达组合反射率因子达到 30 dbz 以上, 回波顶高达到 7 km 左右, 即是该站发出预警的参考指标。预计达到上述预警指标后, 该地区将在 25 分钟后左右发生闪击。

5.2. 个例分析及检验效果

利用上述预报方程的计算结果试对 2018 年 6~8 月江宁站雷暴过程中的闪电进行检验, 以 2018 年 6 月 28 日的一次雷暴过程为例, 如图 6 所示。根据闪电定位仪探测到的记录, 6 月 28 日江宁共探测到 146 次地闪。结合电场曲线变化图发现伴随雷暴云逐渐靠近江宁观测站, 凌晨 4 点以后电场曲线逐渐转为正向增大的过程, 到 4 点 27 分电场的分钟变化率达到 1.85 kv/m, 到了 5 点左右电场曲线表现为向下发展的快变尖峰, 表明此时发生了云对地闪电, 雷暴云底部电荷得到了释放, 而这个时间与预报方程得到的电场仪 25 分钟以上的预警时间是基本吻合的。通过计算发现电场幅值的增大倍数约为 13.4 倍, 也满足预报方程关于电场增大倍数达到 10.9 倍以上的假设验证。在对江宁站 2018 年夏季其余雷暴样本进行逐个检验的前提下得出利用得出此方法准确率达到 62%。

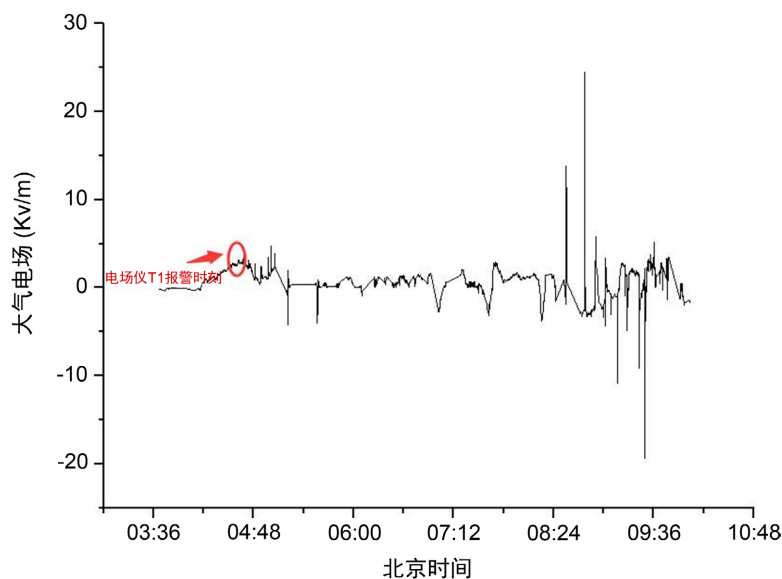


Figure 6. Variation curve of atmospheric electric field near the ground during a thunderstorm in Jiangning on June 28, 2018
图 6. 2018 年 6 月 28 日江宁一次雷暴过程大气电场近地面变化曲线

6. 结论与讨论

本文利用闪电定位仪、雷达与大气电场仪等多源观测资料对南京地区夏季雷暴雷电资料进行了深入的分析研究, 得出的主要结论如下:

1) 以南京各观测站 15 km、10 km、5 km 预警范围内的电场相关特征为基础, 对南京本地电场仪预警阈值进行了深入分析研究, 得到南京各测站在 15 km、10 km、5 km 范围内电场仪预警阈值分别分布在 0.47~2.1、0.54~3.86、0.81~5.53 kv/m 之间; 同时各站电场仪在上述预警范围内的预警时间分别为: 23~44 分钟、19~52 分钟, 13~53 分钟。

2) 以南京本地化的电场仪预警参数为基础, 尝试以江宁站为试点建立雷电预警方程进而确立了大气

电场仪单站预警思路：即：当江宁站自 15 km 范围内发生首次闪击开始，假如闪电观测数据以及雷达资料出现以下特征：① 电场阈值持续时间达到 16.43 分钟左右；② 大气电场增大倍数为晴天大气电场的 10.95 倍以上；③ 电场阈值分钟变化平均值达到 1.7 kv/m 以上；④ 雷达组合反射率因子达到 30 dbz 以上，回波顶高达到 7 km 左右时，为该站发出预警的参考指标，预计满足上述各项预警指标后，该地区将在 25 分钟后左右发生闪击。

3) 利用此雷电预警方程得出的预警指标对江宁站 2018 年夏季雷暴样本进行检验后发现此方法准确率达到 62%。同时江宁站预报预警方法的建立，其思路与方法可以为南京其它各站提供一定的参考。

本文在建立雷电预警方程时引入了雷达回波参数因子，完善了相关研究人员[19] [20]所提出的回归方程，对预警范围内雷达回波参数的引入，在一定程度上使得雷达、大气电场仪及闪电定位资料形成了更为有效的衔接，从而为预报员的短临预警工作提供了一定价值的参考意见。

但由于前期积累的雷暴过程资料尚不丰富，接下来的工作中，将试图利用更多的雷暴天气样本资料基于精细化的角度检验并修正本文得到的各项预警参数值，进而更好地为短临预报预警工作服务。

基金项目

- 1) 华东区域气象科技协同创新基金合作项目 QYHZ201604；2) 江苏省气象局面上项目 KM201909。

参考文献

- [1] 马明, 吕伟涛, 张义军, 等. 1997-2000 年我国雷电灾情特征[J]. 应用气象学报, 2009, 19(4): 393-400.
- [2] Pustovalov, K.N. and Nagorskiy, P.M. (2018) Response in the Surface Atmospheric Electric Field to the Passage of Isolated Air Mass Cumulonimbus Clouds. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **172**, 33-39. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.03.008>
- [3] Marshall, T., Bandara, S., Karunarathne, N., Karunarathne, S., Kolmasova, I., Siedlecki, R. and Stolzenburg, M. (2019) A Study of Lightning Flash Initiation Prior to the First Initial Breakdown Pulse. *Atmospheric Research*, **217**, 10-23. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.10.013>
- [4] Zhang, T., et al. (2015) Relationships between Cloud-to-Ground Flashes and Hydrometeors in a Thunderstorm in Fujian Province. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **154**, 226-235. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.11.007>
- [5] Cai, L., et al. (2020) Lightning Electric-Field Waveforms Associated with Transmission-Line Faults. *IET Generation, Transmission & Distribution*, **14**, 525-531. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.0736>
- [6] Soula, S. and Chauzy, S. (2001) Some Aspects of the Correlation between Lightning and Rain Activities in Thunderstorms. *Atmospheric Research*, **56**, 355-373. [https://doi.org/10.1016/S0169-8095\(00\)00086-7](https://doi.org/10.1016/S0169-8095(00)00086-7)
- [7] Piepgrass, M.V., Krider, E.P. and Moore, C.B. (1982) Lightning and Surface Rainfall during Florida Thunderstorms. *Journal of Geophysical Research*, **87**, 11193-11201. <https://doi.org/10.1029/JC087iC13p11193>
- [8] 罗福山, 何润晖, 张华伟, 等. 电场的标定方法[J]. 空间科学学报, 2007, 27(3): 223-226.
- [9] 张腾飞, 季盍源, 行鸿彦. 电场仪标定系统设计[J]. 气象水文海洋仪器, 2010(4): 67-72.
- [10] Pustovalov, K.N. and Nagorskiy, P.M. (2016) The Main Types of Electric Field Variations during the Passage of Cumulonimbus Clouds of Different Origins. *Atmospheric and Oceanic Optics*, **29**, 647-653.
- [11] 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.
- [12] 宋佳军, 马启明. DNDY 地面电场仪的研制及电场数据融合闪电数据进行雷电监测预警的研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2008: 40-41.
- [13] Vincent, B.R., Carey, L.D., Schneider, D., et al. (2004) Using WSR-88D Reflectivity for the Prediction of Cloud-to-Ground Lightning: A Central North Carolina Study. *National Weather Digest*, **27**, 35-44.
- [14] 吕伟涛, 张义军, 孟青. 雷电临近预警方法和系统研发[J]. 气象, 2009, 35(5): 10-18.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 王凯, 朱浩, 刘安平, 等. 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.
- [18] 周俊驰, 王振会, 冯民学, 等. 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.
- [19] 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.
- [20] 秦微, 张其林, 姜苏, 等. 基于大气电场资料的雷电临近预警研究[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2016, 8(3): 247-251.