

# 一次重大雷灾事故的雷暴特征分析

石湘波<sup>1,2</sup>, 张其林<sup>1</sup>, 王焕邦<sup>2</sup>, 郑玲<sup>2</sup> (1. 南京信息工程大学, 江苏南京 210044; 2. 浙江省宁波市气象局, 浙江宁波 315010)

**摘要** 通过对比分析闪电定位、多普勒雷达以及地面大气电场资料, 探讨2013年9月14日重大雷灾事故的致灾过程中雷灾事发的地闪活动和雷达回波之间以及地闪活动和地面大气电场之间的关系。结果发现, 当回波顶高从8 km达到13 km以及垂直积分液态含水量值由33 kg/m<sup>2</sup>跃升至48 kg/m<sup>2</sup>时, 发生初闪; 回波顶高的变化与地闪次数的变化呈正相关; 回波强度在达53 dBz以上后, 与地闪次数的变化无明显对应关系; 除峰值到达时间不一致外, 垂直积分液态含水量与地闪次数变化趋势基本相同; 地闪次数变化与地面大气电场场强值波动频率基本一致; 同一时间不同地面大气电场仪的地面大气电场场强值波动幅度大小可以表征该时刻发生的地闪与这些地面大气电场仪之间的距离远近。

**关键词** 重大雷灾事故; 雷暴特征; 雷达回波; 地闪活动; 地面大气电场

**中图分类号** S429 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2014)04-01114-03

## Analysis of Thunderstorm Characteristics of Disaster-inducing Lightning

SHI Xiang-bo et al (Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044)

**Abstract** Through contrastive analysis of lightning data, radar and ground atmospheric electric field data, the lightning disaster accident in Sep. 14, 2013 was explored to find the relationship among the lightning activities and radar echo and ground atmospheric electric field: when the echo tops break from 8 km to 13 km and the vertical integrated liquid water content values jump from the 33 kg/m<sup>2</sup> to 48 kg/m<sup>2</sup>, flash occurred; changes of radar echo top is related to lightning frequency; the tendency of liquid water content changes is the same as lightning frequency, in addition to the peak arrival time; there was simultaneous phenomenon of lightning frequency and ground atmospheric electric field value fluctuation frequency; different electric field equipment of ground atmospheric electric field value fluctuate at the same time, which can show the distance between this flash and these equipments.

**Key words** Disaster-inducing lightning; Thunderstorm characteristics; Radar echo; Ground flashes; Ground atmospheric electric field

宁波雷灾事故频发, 每年均有人员因遭受雷击而导致受伤或死亡。2013年9月14日北仑九峰山雷灾事故就是一次雷击致人伤亡的严重雷击事故。13:20左右, 北仑九峰山景区(图1)的“九峰之巅”景点的凉亭不幸被雷击中, 造成1死16伤。雷灾发生前, 市、区两级气象部门均发布雷暴预警信息。事实证明, 现阶段雷暴预报预警服务已无法满足日益重要的防雷需求。为了避免或减轻今后雷电灾害可能造成的损失, 有必要分析了解当地雷电发生发展规律, 掌握其监测预警的方法, 建立必要的服务体系, 提高防雷服务的能力和水平。宁波市近年来陆续建成新一代多普勒雷达、ADTD闪电定位系统以及覆盖全市的地面大气电场仪, 这为雷暴监测和预警提供了硬件支撑, 而针对宁波当地的雷暴精细化、准确化预报预警还处于探索阶段。笔者通过分析此次致灾雷暴过程中的各类数据, 了解其发展过程和特征, 探讨雷灾事发的地闪活动与雷达回波以及地面大气电场之间的关系。

## 1 雷暴过程实况

2013年9月13、14日受副高边缘和低槽东移影响, 午后到夜里宁波市大部分地区出现雷阵雨天气。根据宁波闪电监测网显示, 全市共发生地闪2 662次, 其中负地闪2 453次, 地闪发生时段主要集中在14日13:00~15:00, 地闪主要分布在宁波的东部沿海地区和南部的宁海县; 北仑区全天发生地闪524次, 其中13:00~14:00共发生地闪498次, 占总数的95%。从强度分布来看, 50 kA以上的地闪有34次, 其中100 kA以上的1次; 从空间分布来看, 地闪集中在北仑中部、



图1 北仑区地形地貌

中东部地区, 当地地闪高密度区位于中部丘陵地区(图2), 雷灾事发地处于地闪高密度区, 该处地闪密度在6次/km<sup>2</sup>以上。

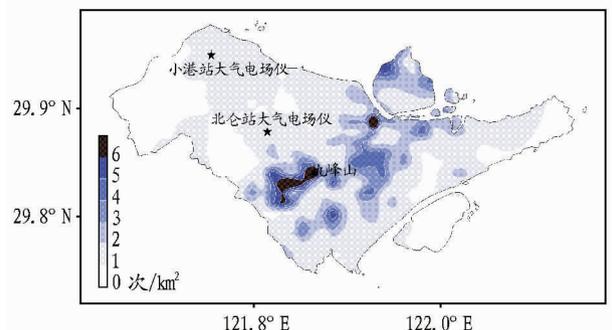


图2 2013年9月14日北仑单日地闪密度等值线

9月14日10:42:10起, 慈溪东南部及鄞州西部云层增厚、回波强度增强, 至11:15:39最大回波强度达53 dBz, 对流云团不断发展并向东移动, 12:00:22北仑东北区域开始有对

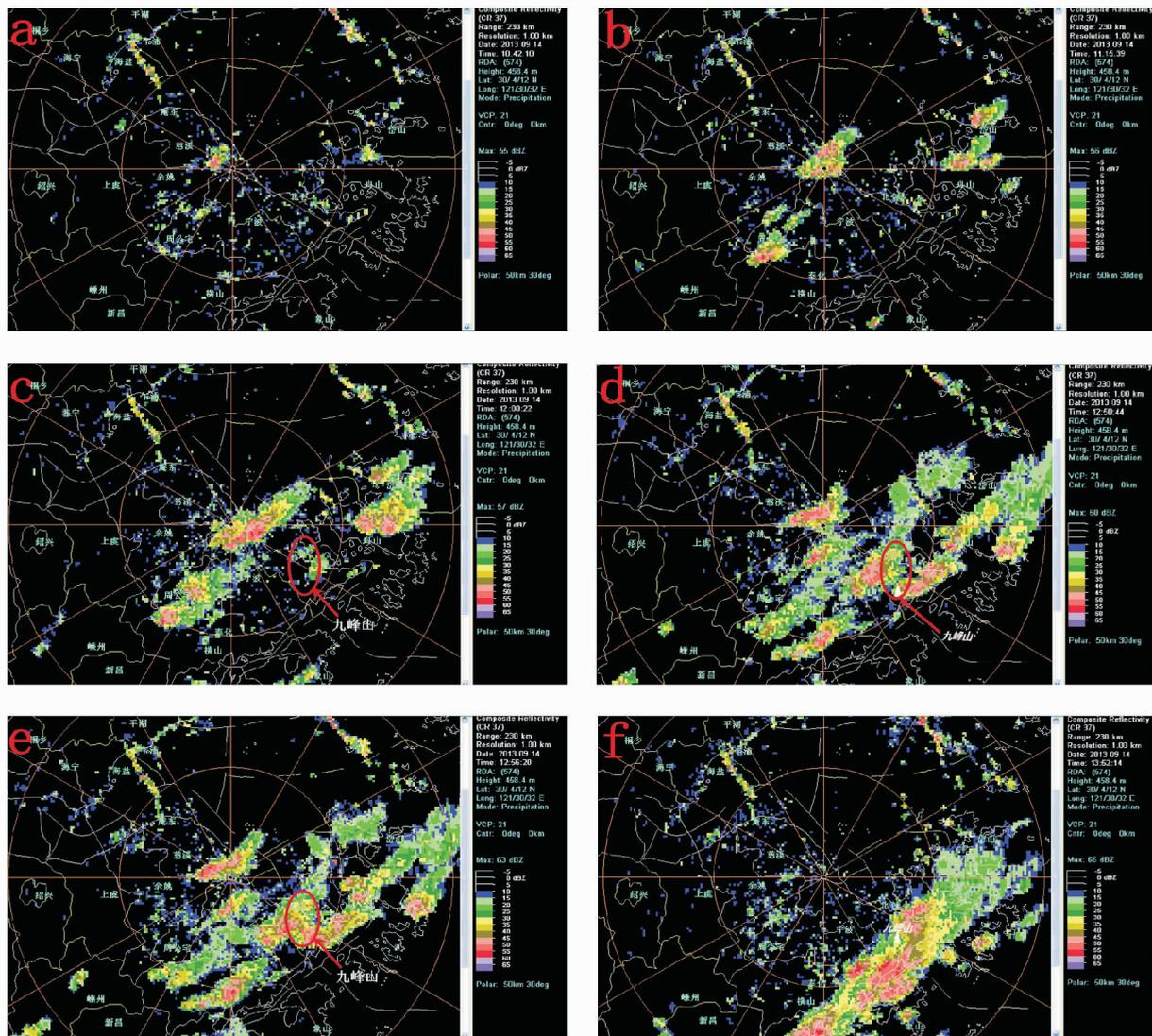
**基金项目** 宁波市气象局科技计划项目(NBQX2012010B)。

**作者简介** 石湘波(1980-), 男, 浙江宁波人, 工程师, 在读硕士, 从事雷暴监测工作。

**收稿日期** 2014-01-17

流云团生成,于 13:01:56 与东移对流云团合并,强回波区面积不断增大,回波最大强度达 58 dBz,覆盖北仑中部及东部地区,雷灾事发地正处于该强回波区(图 3)。将 14 日 12:56:20 雷达组合反射率(图 3e)与图 1 中地形对照可以清

楚地看到,回波的加强区与地势升高区相对应。14 日 13:52:14 对流云团移出雷灾事发地并与其他东移的对流云团融合,雷达回波呈东北—西南带状分布,向东移动进入东海后,强回波带面积减小,回波强度减弱。



注:a~f分别为 10:42:10、11:15:39、12:00:22、12:50:44、12:56:20、13:52:14。

图 3 2013 年 9 月 14 日 10:42~13:52 雷达组合反射率

## 2 雷达数据与地闪资料的对比分析

雷电的发生与中小尺度对流系统有密切联系。大量观察资料表明,雷电的发生与对流云发展的强度、高度、发展阶段、内部粒子相态、温度等密切相关<sup>[1]</sup>;回波强度、回波顶高、垂直积分液态含水量(VIL)与地闪活动关系密切<sup>[2-4]</sup>。为了更清楚地分析此次致灾雷暴过程的雷达回波和地闪活动的关系,选定雷灾事发地(121.858° E, 29.843° N)为中心,半径 3 km 范围内的区域作为分析区域(图 1 中圆形区域)。使用 14 日 12:50:44~13:41:06 共 10 个雷达体扫数据和对应时间段的地闪数据,为保证地闪数据与雷达数据的分析更符合实际情况,选取雷达体扫时间前后各 2 分 48 秒共 5 分 36 秒内的地闪数据与同一体扫时间的雷达数据进行分析。

对照地闪数据(图 4)发现,在 12:50:44 之前,宁波北部

地区偶有地闪发生;13:01:56 两处对流云团合并后,分析区域上空云层不断增厚对流加强,回波强度增强,最大强度达 58 dBz;回波顶高则从 12:50:44 的 5 km 增加至 13:01:56 的 8 km,此时分析区域内无地闪发生;13:04:59 该区域发生初闪,距离雷灾事发地 0.7 km 左右;而 13:07:32 回波顶高已跃增至 13 km,这也验证了雷暴初闪出现时回波顶高需要达 9 km 以上<sup>[5]</sup>,此时起地闪次数有明显增多。13:13:08 回波顶高为 16 km,达到峰值,同时该区域的地闪次数也达到峰值;13:41:06 回波顶高下降至 8 km 时,该区域已无地闪发生。这符合闪电的频率与回波顶高正相关的结论<sup>[3]</sup>。

垂直积分液态含水量(VIL)在对流云团融合发展过程中,是处于不断增长过程中。13:01:56 的 VIL 为 33 kg/m<sup>2</sup>,选定分析区域无地闪;13:07:32 的 VIL 突增至 48 kg/m<sup>2</sup>,达

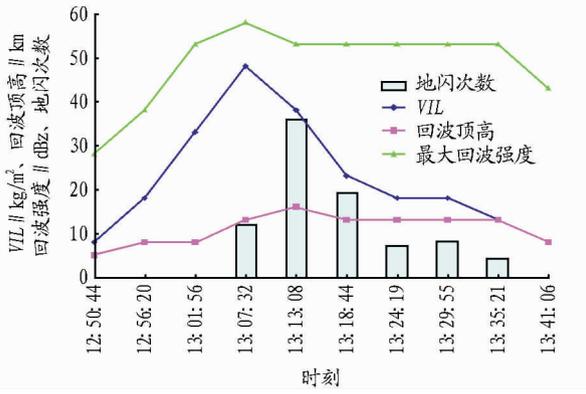


图4 2013年9月14日12:50:44~13:41:06分析区域的雷达数据和地闪数据对比分析

到最大值,该区域的初闪就在该体扫时间内发生,地闪次数的峰值则在随后一个体扫时间内达到。地闪次数随着VIL值下降同步下降,VIL值下降至 $13 \text{ kg/m}^2$ 以下时,无地闪发生。魏雪等分析认为垂直积分液态含水量达 $25 \text{ kg/m}^2$ 可作为一个预警因子,达 $40 \text{ kg/m}^2$ 可作为闪电发生的阈值<sup>[6]</sup>。这个结论与此次致灾雷暴过程中分析区域内初闪发生时的VIL值基本一致。由图4可知,回波顶高从8 km达到13 km以及VIL值由 $33 \text{ kg/m}^2$ 跃升至 $48 \text{ kg/m}^2$ 时,发生初闪;回波顶高变化与地闪频数的变化呈正相关;回波强度在达53 dBz以上后,与地闪次数变化无明显对应关系;VIL与地闪次数除峰值到达时间不一致以外,变化趋势基本相同。

### 3 大气电场与地闪资料的对比分析

利用地面大气电场仪又是一种有效探测雷暴发生发展的手段。地面大气电场仪通过监测云中电荷的变化对地面大气电场的影响,以获得雷暴发生发展的情况,其探测范围在0~20 km。马芳等根据雷暴发生发展过程中的地面大气电场变化特征,将地面大气电场变化过程划分为6个阶段<sup>[7]</sup>。当地面大气电场场强值超过 $1.5 \text{ kv/m}$ ,即属于地面大气电场异常现象<sup>[8]</sup>,可成为发布雷电预警的一个重要参考指标。单个地面大气电场仪可以连续监测有效探测范围内雷暴的发生发展过程,但也有其局限性。因为它是一种无定向探测设备,无法确定雷暴云的移动方向。为了弥补这个不足可将地面大气电场仪进行组网布设,通过不同测站的地面大气电场场强值时序变化来判断雷暴云的移动路径。

雷灾事发地附近有北仑站和小港站2个地面大气电场测站,两站与雷灾事发地直线距离分别为5 km和17 km(图2)。从北仑、小港两站9月14日11:30~15:00地面大气电场场强值时序变化(图5)可以看出,11:45左右小港站地面大气电场极性开始反转,这是由于雷暴云底电荷不断积累,使地面感应电场不断增大,地面大气电场场强值负向剧增,这是地闪发生初期(雷暴云逐渐靠近)的电场变化,这对雷电预警具有重要指示意义。当电荷累积到一定击穿场强时就会发生闪电,在地面大气电场场强值时序变化曲线上就表现为电场突变。11:43~12:01小港站地面大气电场场强值时序变化总体趋向负向增长时多次微弱的正向突变,是由离小港站15~19 km处的多次负地闪所引起的;12:30~12:52地面大气电场场强值时序变化曲线波动幅度大且频繁,这是因为距离小港站3~4 km处发生多次负地闪以及此时小港站附近多个雷暴云的融合发展引起的。北仑站地面大气电场场强值时序变化曲线在12:30前在0~ $1.5 \text{ kv/m}$ 范围内波动,12:30后开始向相反极性增长,13:00之前在曲线整体趋势负向增长时,亦有多次幅度较小的正向突变,这与小港站地面大气电场场强值变化曲线中13:00前时序变化规律相似,表明北仑、小港两站大气电场仪均探测到同一处地闪的发生。同一时间不同地面大气电场仪的地面大气电场场强值波动幅度大小可以表征该时刻发生的地闪与这些地面大气电场仪之间的距离远近,因此小港站13:00前的地面大气电场场强值时序变化曲线波动幅度较北仑站大,表示雷暴云离小港站近,这从12:56雷达组合反射率的强回波区所处位置(图3)也可以看出。13:01起北仑站地面大气电场场强值曲线发生幅度较大的正向突变,且频繁波动,地闪次数峰值是在13:01~13:40,以北仑站为中心,半径20 km范围内共发生地闪549次,地闪主要集中在距北仑站3~10 km的区域内,此时小港站为中心,半径10 km范围内无地闪发生。由图5可见,小港站的地面大气电场场强值变化曲线波动幅度明显小于北仑站;据统计,14日11:30~15:00分析区域共发生地闪84次,最大雷电流强度 $-74.3 \text{ kA}$ 。13:50小港站附近已无地闪发生,该站地面大气电场场强值不再发生脉冲变化。小港站地面大气电场场强值时序变化反映出大幅度长时间的起伏,这是雷暴消亡阶段的正弦波动,被称作雷暴消亡阶段电场的振荡(EOSO)<sup>[9]</sup>。

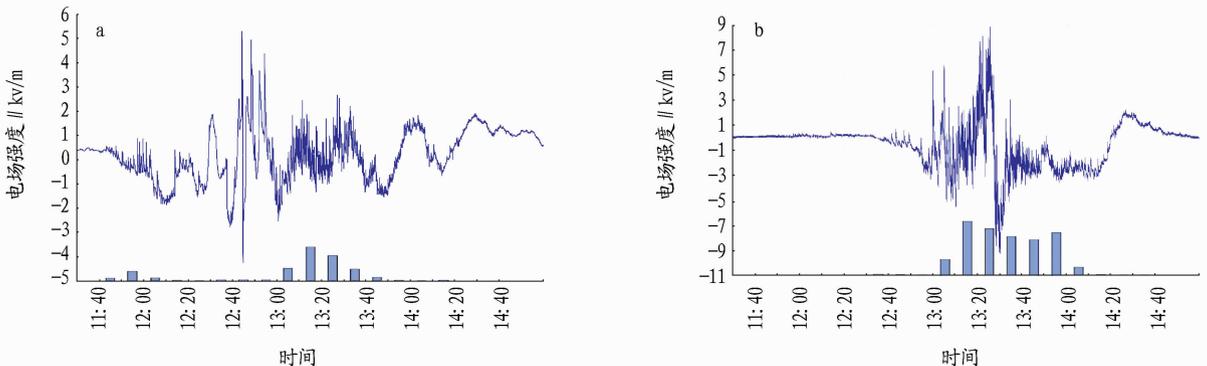


图5 2013年9月14日11:30~15:00小港站(a)和北仑站(b)地面大气电场场强值时序变化

实现,结合研究区域的实际情况将水源地内的部分区域规划成禁养区和适度养殖区。在禁养区内禁止任何养殖行为,已有的养殖户应限期关闭;在适度养殖区设置的养殖区域要逐步实现养殖业的转变,从起初分散零星的粗放饲养向规模化、集约化、标准化、生态型养殖转变,使畜牧养殖产生的非点源污染变为点源加以控制<sup>[9]</sup>。

(4)控制保护区周围农药、化肥的使用量,积极推广使用生物农药和有机肥料,防止农业非点源污染对河水水质的影响。同时,还要加强坡地农业生产管理,其工作重点是在修梯田、地埂、改垄等防控坡面径流和土壤、肥料、污染物迁移的基础上,采取减少径流产生的保护性耕作措施,如采用垄向区田、深松耕法、少耕法等,从而达到实现预防和控制面源污染的效果<sup>[16]</sup>。

(5)完善河流监测系统。建立先进的嘉定饮用水源保护区区域监控技术装备体系和质量管理体系,建立取水口周边连续自动实时监测系统,达到取水口周边水域监测科学化、自动化和现代化的目标。监测方式采用在线监测仪器、移动监测及实验室常规检验相结合。系统监测频次建议为一般每月一次,重点监测项目每周一次,特征污染因子监测每天一次,出现异常情况随时加测。监测项目按《地表水环境质量标准》GB3838-2002执行。区环境监测中心负责监控系统统一管理、质量监督和数据发布等。

(6)开展水源保护区隔离防护工程<sup>[17]</sup>。为分隔人类活动对嘉定水源保护区的干扰,最大可能地减少一切可能污染对保护区的危害,努力增加保护区内的生物多样性,提高其自然生态功能,增加地表水的入渗能力,涵养地下水源,必须对保护区实施隔离防护,如在干流蒲华塘、娄塘河和横沥河两岸开展物理隔离工程(护栏、围网等)和生物隔离工程(防

护林)。

## 参考文献

- [1] MEYBECK M. Global analysis of river systems: from Earth system controls to Anthropocene syndromes [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 2003, 358(1440): 1935-1955.
- [2] VÖRÖSMARTY C J, MCINTYRE P B, GESSNER M O, et al. Global threats to human water security and river biodiversity [J]. *Nature*, 2010, 467(7315): 555-561.
- [3] HASALKAR S, UPPAR Y, CHITAGUBBI G, et al. Water conservation, management and safe drinking water in the villages of Karnataka State [J]. *Journal of Human Ecology-New Delhi*, 2012, 39(3): 255.
- [4] RIBAUDO M, HORAN R D, SMITH M E. Economics of water quality protection from nonpoint sources: Theory and practice [R]. United States Department of Agriculture, Economic Research Service, 1999.
- [5] 洪阳, 栾胜基. 跨世纪的水资源管理 [J]. *世界环境*, 1999(1): 26-27.
- [6] 郭先华, 崔胜辉, 赵千钧. 城市水源地生态风险评价 [J]. *环境科学研究*, 2009, 22(6): 688-694.
- [7] 尹澄清, 苏胜利, 张荣斌, 等. 以河网作为城市水源的污染问题和湿地净化 [J]. *环境科学学报*, 2010, 30(8): 1583-1586.
- [8] 郑贵洲, 莫澜. GIS 图层在空间数据处理管理与分析中的作用 [J]. *测绘科学*, 2003, 28(3): 71-73.
- [9] 梁卓. 嘉定区水源保护区环境现状评价及污染控制对策研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2011.
- [10] 陆凤娟. 以嘉定区为例对上海市郊区饮用水源重金属进行健康风险评估 [J]. *中国环境监测*, 2013(2): 5-8.
- [11] 建设部城市建设司. GB/T 50331-2002. 城市居民生活用水量标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [12] 董红敏, 朱志平, 黄宏坤, 等. 畜禽养殖业产污系数和排污系数计算方法 [J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 303-308.
- [13] 农业部环保所. GB18596-2001. 畜禽养殖业污染物排放标准 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [14] 张加龙, 刘云根, 杨善, 等. 基于 GIS 的盘龙江水环境分析与预测研究, 以氨氮分析为例 [J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(12): 7360-7362.
- [15] 刘波. 农田径流人工湿地处理中磷的去除研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [16] 杜大仲. 河流型饮用水水源地安全保障体系构建及实证研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [17] 韩宁宁, 孙世群, 周晓铁, 等. 安徽省饮用水水源地污染现状调查评价及管理对策 [J]. *环境科学与管理*, 2010, 35(11): 147-150.

(上接第 1116 页)

从小港、北仑两站地面大气电场场强值时序变化曲线可以基本了解此次致灾雷暴云的移动方向和发展过程。由于地面大气电场仪布设数量有限,需要有一定密度组网布设,才能进行完整有效的监测。

## 4 结论与讨论

(1)通过对此次致灾雷暴过程的分析发现,当回波顶高从 8 km 达到 13 km 以及垂直积分液态含水量值由 33 kg/m<sup>2</sup> 跃升至 48 kg/m<sup>2</sup> 时,发生初闪;回波顶高的变化与地闪次数的变化呈正相关;回波强度在达 53 dBz 以上后,与地闪次数变化无明显对应关系;垂直积分液态含水量与地闪次数除峰值到达时间不一致外,变化趋势基本相同;地闪次数变化与地面大气电场场强值波动频率基本一致;同一时间不同地面大气电场仪的地面大气电场场强值波动幅度大小可以表征该时刻发生的地闪与这些地面大气电场仪之间的距离远近。

(2)目前由于应用多种资料进行雷暴预报预警还处于探索阶段,要进一步提高宁波地区的雷暴预报预警的准确性和

精细化水平,需要通过积累大量的个例,总结得出适合宁波当地的预警指标和预警阈值。

## 参考文献

- [1] 李芳, 黄兴友, 王振会, 等. 基于南京地区雷达资料的雷电识别指标初探 [J]. *气象科学*, 2010, 30(2): 202-207.
- [2] 付志康, 徐芬, 顾松山, 等. 南京地区夏季雷暴的雷达雷电特征分析 [J]. *气象科学*, 2010, 30(6): 841-845.
- [3] 居丽玲, 牛生杰, 陈连友, 等. 一次致灾雷暴过程的闪电雷达回波特征分析 [J]. *气象科技*, 2011, 39(4): 841-845.
- [4] 赵贤平, 许广浩, 王建新, 等. 一次强雷暴天气分析 [J]. *浙江气象*, 2011, 33(1): 11-14.
- [5] BUECHLER D E, GOODMAN S J. Echo size and asymmetry: Impact on NEXRAD storm identification [J]. *Applied Meteorology*, 1990, 29(9): 962-969.
- [6] 魏雪, 黄兴友, 孙伟, 等. 基于雷达资料的雷电特征分析及预警 [J]. *气象与环境科学*, 2011, 34(3): 31-36.
- [7] 马芳, 张腾飞, 王欣, 等. 雷暴过程中的大气电场特征与地闪活动分析 [J]. *气象水文海洋仪器*, 2011, 9(3): 117-121.
- [8] 黄宾柳, 刘彦民, 关继腾, 等. 雷电过程地面电场变化与油库雷电安全报警 [J]. *石油学报*, 2001, 22(3): 91-95.
- [9] 陈渭民. 雷电学原理 [M]. 北京: 气象出版社, 2006.