

长沙地区基于闪电定位与雷达资料的初闪发生预报研究

聂新宇^{1,2}, 张婷³, 刘盼⁴, 黄浩^{1,2}

¹湖南省气象灾害防御技术中心, 湖南 长沙

²气象防灾减灾湖南省重点实验室, 湖南 长沙

³宁远县气象局, 湖南 永州

⁴湖南长昊气象科技有限公司, 湖南 长沙

收稿日期: 2022年6月10日; 录用日期: 2022年7月6日; 发布日期: 2022年7月18日

摘要

本文利用2021年夏季长沙地区的闪电定位资料及雷达资料, 统计了11个雷暴单体和5个非雷暴单体的回波顶高, 包括30 dBZ、35 dBZ和40 dBZ三种雷达反射率, 通过相关性分析, 对0℃、-10℃和-20℃的温度层结高度上超过上述三种雷达反射率因子的回波面积和闪电频次进行讨论。从结果中可以得出: 在40 dBZ情况下, 两种单体超过三种温度层高的比例差最大。可通过-10℃层上40 dBZ回波顶高来对两种单体进行区分, 此条件下的回波面积至少大于47.84 km²。

关键词

初闪预报, 回波顶高, 回波面积

Study on Prediction of Initial Lightning Based on Lightning Location and Radar Data in Changsha

Xinyu Nie^{1,2}, Ting Zhang³, Pan Liu⁴, Hao Huang^{1,2}

¹Hunan Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Changsha Hunan

²Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Mitigation in Hunan Province, Changsha Hunan

³Ningyuan Meteorological Bureau, Yongzhou Hunan

⁴Hunan Changhao Meteorological Technology Co., Ltd., Changsha Hunan

Received: Jun. 10th, 2022; accepted: Jul. 6th, 2022; published: Jul. 18th, 2022

文章引用: 聂新宇, 张婷, 刘盼, 黄浩. 长沙地区基于闪电定位与雷达资料的初闪发生预报研究[J]. 气候变化研究快报, 2022, 11(4): 473-480. DOI: 10.12677/ccrl.2022.114050

Abstract

Based on the lightning location data and radar data in Changsha in the summer of 2021, the echo top heights of 11 thunderstorm cells and 5 non-thunderstorm cells, including 30 dBZ, 35 dBZ and 40 dBZ radar reflectivity, are counted. Through correlation analysis, the echo area and lightning frequency of 0°C, -10°C and -20°C temperature stratification heights that exceed the above three radar reflectivity factors are discussed. It can be concluded from the results that under the condition of 40 dBZ, the proportion difference between the two monomers with more than three temperature layer heights is the largest. The two monomers can be distinguished by the 40 dBZ echo top height on the -10°C layer, and the echo area under this condition is at least greater than 47.84 km².

Keywords

Initial Flash Prediction, Echo Top Height, Echo Area

Copyright © 2022 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

通常而言, 在对流发展旺盛的雷暴云容易形成闪电, 闪电过后所形成的暴雨和大风, 给人们的生产生活带来不利影响, 因此如何提高闪电预警的准确率一直是国内外研究的重点。一些学者发现[1]-[7], 闪电的频数变化与强对流天气发生有一定的相关性, 闪电频数与雷暴云顶高度之间存在 5 次方的函数关系[8]; 在-10°C层以上有两个连续的雷达体扫达到了 ≥ 40 dBZ 的回波反射率, 是夏季雷暴预警指标中最优的[9]; 雷达反射率为 40 dBZ 处的回波顶高 $\geq -10^\circ\text{C}$ 层可作为雷电预警的阈值[10] [11]; 地闪频次与 > 65 dBZ 的回波面积之间存在反相关, 系数为-0.74 [12]。

由于不同区域内雷暴过程中的闪电活动特征存在差异, 使得雷电预警指标有所不同, 故有必要开展不同区域的雷暴过程研究。通过对闪电定位、探空、多普勒雷达等资料的利用, 选取了长沙地区 2021 年夏季 16 个单体进行研究, 包括 11 个雷暴单体和 5 个非雷暴单体, 寻找能够对初次闪电进行临近预报的指标, 以期为该地区的雷电预警工作提供参考。

2. 资料来源与处理

本文的闪电数据来自于湖南省雷电探测系统, 通过该系统开展云对地的闪电探测工作, 对闪电发生的各方面的信息进行记录, 包括陡度、时间、经纬度等, 时间精度为 10^{-7} s, 探测效率可达 80%及以上, 定位精度小于 300 m, 本次研究对资料的质量进行了控制。

雷达基数据来源于长沙市气象局 CINRAD/SA 雷达, 体扫时间为 5~6 min, 230 km 为有效探测半径, 本文所使用的单体均落于该半径范围内。参考文献[13]对雷达基数据进行 $1\text{ km} \times 1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的插值, 转换成笛卡尔坐标系。选取的单体个例满足如下条件: 当组合反射率因子 ≥ 35 dBZ 时, 该回波可被确定为单体[10]; 非雷暴单体定义为在一个体扫周期内地闪出现次数在 3 次以下的单体, 反之则为雷暴单体[11]。表 1 为本研究选取的 11 个雷暴单体和 5 个非雷暴单体的描述汇总。

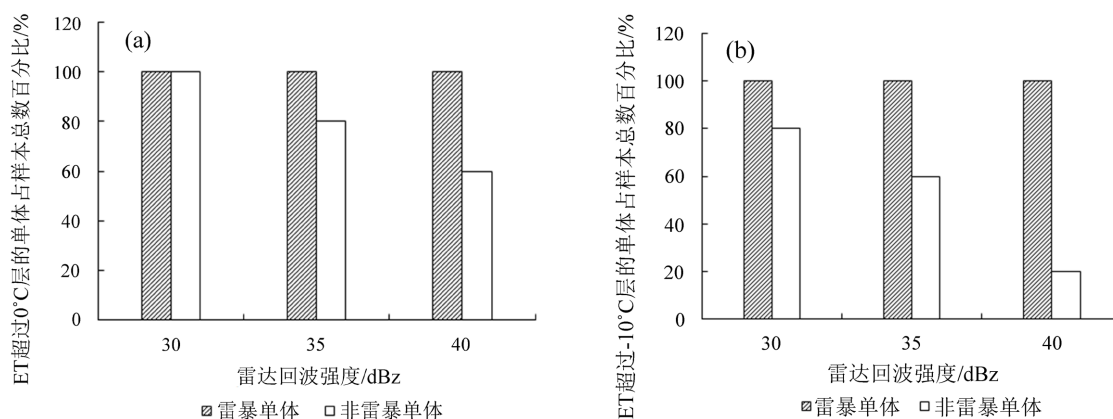
Table 1. Summary of 16 monomers in Changsha in 2021 summer
表 1. 2021 年夏季长沙地区 16 个单体汇总

单体序号	发生日期	单体类型	雷达体扫数	单体持续时间(北京时间)	地闪发生次数
1	6月10日	多单体雷暴	13	09:15~10:28	86
2	6月12日	多单体雷暴	48	17:25~22:05	598
3	6月17日	孤立单体雷暴	7	17:12~17:48	40
4	6月17日	孤立单体雷暴	2	19:30~19:40	16
5	7月18日	多单体雷暴	14	00:16~01:36	118
6	7月20日	孤立单体雷暴	6	12:42~13:11	25
7	7月20日	多单体雷暴	37	14:43~18:14	283
8	7月30日	多单体雷暴	8	12:46~13:31	37
9	8月9日	多单体雷暴	36	14:41~18:05	602
10	8月10日	孤立单体雷暴	7	23:20~23:56	26
11	8月17日	多单体雷暴	29	15:18~18:01	139
12	7月17日	非雷暴单体	7	13:59~14:30	8
13	8月10日	非雷暴单体	4	17:21~17:43	4
14	8月12日	非雷暴单体	5	04:30~04:55	4
15	8月16日	非雷暴单体	9	16:42~17:31	6
16	8月20日	非雷暴单体	3	02:33~02:46	4

3. 雷达回波特征分析

3.1. 回波顶高分析

在 30 dBZ、35 dBZ 和 40 dBZ 中, 对 16 个单体的回波顶高(表现形式为 H_{30} 、 H_{35} 、 H_{40} , 下同)进行计算, 同时与三种温度层高度(即 0°C 、 -10°C 和 -20°C) (用 h_0 、 h_{-10} 、 h_{-20} 表示, 下同)进行对比。结果发现, 11 个雷暴单体中 H_{30} 、 H_{35} 、 H_{40} 均超过了 h_0 、 h_{-10} , 且 H_{30} 全都高于 h_{-20} , 有 90.91% 的雷暴单体 H_{35} 高于 h_{-20} , 81.82% 的雷暴单体 H_{40} 突破了 h_{-20} ; 非雷暴单体中 H_{30} 超过 h_0 、 h_{-10} 、 h_{-20} 的比例为 100%、80%、80%, H_{35} 超过 h_0 、 h_{-10} 、 h_{-20} 的比例为 80%、60%、40%, H_{40} 超过 h_0 、 h_{-10} 、 h_{-20} 的比例依次为 60%、20%、0。计算两种单体之间的比例差值, 从图 1 可以看出, 两种单体 H_{40} 超过 h_0 、 h_{-10} 、 h_{-20} 的比例差最大, 为 40%、80%、81.82%。



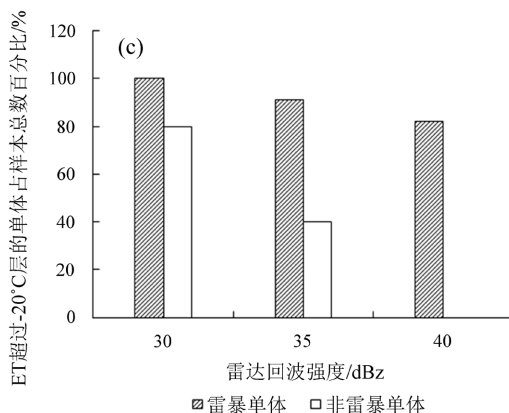


Figure 1. The proportion of H_{30} , H_{35} , H_{40} reached h_0 (a), h_{-10} (b), h_{-20} (c) in 16 individual cases of Changsha in 2021
图 1. 2021 年长沙地区 16 个单体个例中 H_{30} 、 H_{35} 、 H_{40} 突破 h_0 (a)、 h_{-10} (b)、 h_{-20} (c) 所占比例

3.2. 40 dBZ 回波顶高分析

表 2 为 11 个单体 H_{40} 与 h_0 、 h_{-10} 、 h_{-20} 的对比分析结果，由表可知：

1) 统计时段为初闪发生时前 1 h 内的雷达体扫：

11 个雷暴单体 H_{40} 均突破了 h_0 ；10 个雷暴单体(除 1#外) H_{40} 突破了 h_{-10} ，所占比例为 90.91%；5 个雷暴单体(3#、7#~9#、11#) H_{40} 突破了 h_{-20} ，所占比例为 45.45%。

4 个非雷暴单体(除 16#) H_{40} 突破了 h_0 ，所占比例为 80%；1 个非雷暴单体(14#) H_{40} 突破了 h_{-10} ，占非雷暴总个例的 20%； H_{40} 均低于 h_{-20} 。

因此，雷暴单体和非雷暴单体 H_{40} 突破了 h_0 的比例差为 20%，突破了 h_{-10} 的比例差为 70.91%，突破了 h_{-20} 的比例差为 45.45%。

2) 统计时段为初闪发生前一个雷达体扫：

11 个雷暴单体 H_{40} 均突破了 h_0 和 h_{-10} ；9 个雷暴单体(除 1#和 10#外) H_{40} 突破了 h_{-20} ，所占比例为 81.82%。

4 个非雷暴单体(除 16#) H_{40} 突破了 h_0 ，所占比例为 80%；1 个非雷暴单体(14#) H_{40} 突破了 h_{-10} ，占非雷暴总个例的 20%； H_{40} 均低于 h_{-20} 。

因此，雷暴单体和非雷暴单体 H_{40} 突破了 h_0 的比例差为 20%，突破了 h_{-10} 的比例差为 80%，突破了 h_{-20} 的比例差为 81.82%。

综上所述，对初闪发生前 1 h 内的体扫周期进行统计，两种单体的比例在 h_{-10} 的相差最大，统计初闪发生前一个体扫周期，却发现该比例差最大出现在 h_{-20} 。故，仅用 H_{40} 是否突破 h_{-1} 作为雷暴单体和非雷暴单体的判别因子存在一定的局限性。

Table 2. The statistics of H_{40} and three temperature stratification of Changsha area in 2021

表 2. 2021 年夏季长沙地区 H_{40} 与三种温度层结的统计情况

单体序号	发生日期	三种温度层高度 h (km)			闪电发生前 1 h 内 $H_{40} > h$ 的个例所占比例			闪电发生前一个体扫周期的 H_{40} (km)	单体类型
		0°C	-10°C	-20°C	0°C	-10°C	-20°C		
1	6月10日	4.7350	6.8965	8.7845	100.00%	50.00%	0.00%	8.2263	雷暴单体
2	6月12日	5.2710	7.0004	8.5742	100.00%	100.00%	90.00%	8.9779	雷暴单体

Continued

3	6月17日	5.6870	7.3427	9.1495	100.00%	100.00%	100.00%	11.4563	雷暴单体
4	6月17日	5.6870	7.3427	9.1495	100.00%	100.00%	80.00%	9.4853	雷暴单体
5	7月18日	5.0910	6.9317	8.6136	100.00%	100.00%	50.00%	9.9541	雷暴单体
6	7月20日	4.6920	6.9365	8.6600	100.00%	100.00%	80.00%	13.8317	雷暴单体
7	7月20日	4.6920	6.9365	8.6600	100.00%	100.00%	100.00%	10.8414	雷暴单体
8	7月30日	5.0410	7.2610	8.8733	100.00%	100.00%	100.00%	10.5465	雷暴单体
9	8月9日	5.7080	7.4190	9.2532	100.00%	100.00%	100.00%	11.2977	雷暴单体
10	8月10日	5.5050	7.4040	9.1780	100.00%	100.00%	0.00%	9.1534	雷暴单体
11	8月17日	5.3880	7.1132	8.8057	100.00%	100.00%	100.00%	11.9088	雷暴单体
12	7月17日	5.6870	7.3427	9.1495	100.00%	90.00%	70.00%	6.7000	非雷暴单体
13	8月10日	5.1680	7.3820	9.3099	100.00%	90.00%	30.00%	7.0828	非雷暴单体
14	8月12日	5.2700	7.2621	9.1383	100.00%	100.00%	30.00%	7.6031	非雷暴单体
15	8月16日	5.4310	7.3330	8.7950	100.00%	90.00%	10.00%	5.5938	非雷暴单体
16	8月20日	5.2830	7.0698	8.8295	0.00%	0.00%	0.00%	3.5720	非雷暴单体

3.3. 回波面积分析

雷暴中的冰相粒子影响着 0℃层以上的回波面积，且粒子的浓度和大小可通过雷达反射率的强度来体现[14]。也有研究指出[15]，-15℃层以上的区域中 > 30 dBZ 的粒子主要是冰雹和冰晶，较大的冰相粒子则出现在 > 50 dBZ 的区域。

在 0℃、-10℃和-20℃三种温度层高度上，统计 11 个雷暴单体的雷达反射率分别超过 30 dBZ (S_{30})、40 dBZ (S_{40})、50 dBZ (S_{50})的回波面积，分析了发生在该面积范围内的闪电频次与相应回波面积的相关性(表 3)。由表 3 可知，相关系数平均值最大为 0.7149，出现在 S_{40} ，其次是 S_{30} ，而最差的为 S_{50} 。11 个雷暴单体中，在 0℃、-10℃和-20℃温度层高度上， S_{30} 的最大值出现在 6#雷暴单体-10℃层高度，为 0.7695； S_{40} 的最大值为 0.9034，出现在 6#雷暴单体 0℃层高度； S_{50} 的最大值出现在 6#雷暴单体-10℃层高度，相关系数为-0.8014，其中有 3 个雷暴单体与回波面积之间没有相关性。

总体来说， S_{30} 在三种温度层高度上的相关系数最大值出现在 S_{30t-20} ，为 0.6445； S_{40} 的相关系数最大值出现在 S_{40t-10} ，为 0.7741； S_{50} 的相关系数最大值出现在 S_{50t-10} ，为 0.3222。

Table 3. The correlation coefficients between echo area and CG lightning frequency of 11 thunderstorm cases over Changsha in 2021

表 3. 2021 年长沙地区 11 个雷暴单体的回波面积与地闪频次的相关系数统计

序号	S_{30}			S_{40}			S_{50}		
	S_{30t0}	S_{30t-10}	S_{30t-20}	S_{40t0}	S_{40t-10}	S_{40t-20}	S_{50t0}	S_{50t-10}	S_{50t-20}
1	0.3979	-0.5469	-0.5513	-0.5940	-0.6310	-0.2584	-0.4665	-0.2324	不存在
2	0.5171	0.6482	0.6655	-0.4706	-0.6684	-0.5663	0.5233	0.3851	不存在
3	0.0283	0.1173	0.2641	0.0235	0.0038	-0.1917	0.4262	-0.0384	-0.2500
4	-0.0357	0.3614	0.3337	0.3251	0.5133	0.5569	0.1968	0.3427	0.5430
5	-0.2261	-0.2639	-0.1378	-0.3269	-0.2427	-0.2161	-0.2970	-0.2951	-0.0970

Continued

6	0.7683	0.7695	-0.0638	0.9034	0.7738	-0.2382	-0.7921	-0.8014	不存在
7	0.1723	0.6542	-0.4509	-0.0883	-0.2626	-0.4478	0.1150	-0.6925	-0.2885
8	0.1542	-0.0869	-0.0559	-0.3068	-0.0814	0.2031	-0.0793	0.1876	-0.2157
9	0.0103	0.7623	0.1784	0.2225	-0.1920	-0.3348	0.3403	0.0101	0.6730
10	0.6189	0.5877	0.6919	0.5600	0.7319	0.5688	-0.4120	0.5781	0.1661
11	0.5214	0.4769	0.4474	0.5239	0.7109	-0.0402	-0.0402	-0.0402	-0.8515
总体	0.4569	0.6387	0.6445	0.6443	0.7741	0.7264	-0.1820	0.3224	0.0190
平均值		0.5800			0.7149			0.0531	

注： S 为回波面积，“t”左、右两侧数字分别代表回波强度和温度，表格首行的 S_{30t-20} 、 S_{40t-10} 、 S_{50t-10} 分别为第二行各部分的集合。

表 4 为上述三个拟合系数最大值 S_{30t-20} 、 S_{40t-10} 和 S_{50t-10} 与地闪频数 F 进行对数拟合和线性拟合的结果，均通过了 $F_{0.05}$ 显著性检验。由表 4 可知，两种方法中拟合结果最好的为 S_{40t-10} ，拟合优度分别为 0.72、0.84。

Table 4. The fitting result of the largest term of the correlation coefficient

表 4. 相关系数最大项的拟合结果

拟合方法	拟合方程	显著度 F	$F_{0.05}$	拟合优度(R^2)
线性拟合	S_{30t-20} $S = 2.75F + 87.71$	13.03	3.887	0.60
	S_{40t-10} $S = 19.15F + 89.68$	55.44	3.887	0.72
	S_{50t-10} $S = 1.46F + 19.23$	23.77	3.887	0.10
对数拟合	S_{30t-20} $S = 32.09\ln(F) + 54.65$	15.55	3.887	0.66
	S_{40t-10} $S = 80.26\ln(F) + 47.84$	32.46	3.887	0.84
	S_{50t-10} $S = 11.82\ln(F) + 11.26$	4.93	3.887	0.06

通过上述分析可知， F 和 S 之间存在相关性。当 F 取 0 时，可得出 S_{40t-10} 的拟合优度最高，落在 [47.84, 89.68] (km^2) 范围，47.84 km^2 可作为单体是否能够发展为雷暴单体的判别阈值。对 11 个雷暴单体在初闪发生前一个雷达体扫、初闪发生时所处雷达体扫内的回波面积进行统计，结果发现在两个统计时段中，分别有 3 个时刻的回波面积小于 47.84 km^2 。分别统计 5 个非雷暴单体在起始时间前一个雷达体扫、单体所处雷达体扫周期内的回波面积，发现仅有一个时刻的回波面积大于 47.84 km^2 。因此，可将 47.84 km^2 作为初闪发生预警的回波面积阈值。

4. 闪电预警步骤

通过上面的分析，提出初闪发生的预警步骤：

- 1) 计算某时刻的单体 H_{40} ，与该时刻 h_0 相比，若 $H_{40} > h_0$ ，则该单体存在发展为雷暴单体的可能；
- 2) 与该时刻 h_{-10} 相比，若 $H_{40} > h_{-10}$ ，对 S_{40t-10} 与 47.84 km^2 再进行对比，如果前者较大，可认为在该时刻后的一个雷达体扫周期内有闪电出现的可能。下图 2 为预警流程：

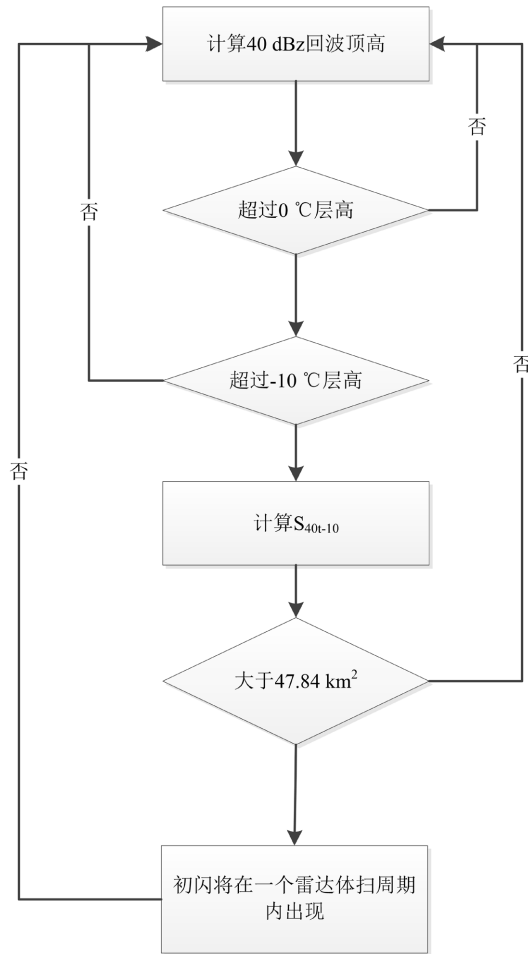


Figure 2. The flow chart of summer initial CG lightning warning in Changsha
 图2. 长沙地区夏季初闪发生预警流程

5. 结论与思考

1) 对比分析 2021 年夏季长沙地区 11 个雷暴单体与 5 个非雷暴单体 H_{30} 、 H_{35} 、 H_{40} 分别超过 h_0 、 h_{-10} 、 h_{-20} 的比例，两种单体比例的最大差值出现在 40 dBZ 回波顶高。

2) 对 11 个雷暴单体与 5 个非雷暴单体 H_{40} 和 h_{-10} 进行比较，有 10 个雷暴单体 H_{40} 突破了 h_{-10} ，非雷暴单体仅有 1 个 $H_{40} > h_{-10}$ 。

3) 分析 11 个雷暴单体在 0℃、-10℃和-20℃三个温度层结上的 S_{30} 、 S_{40} 、 S_{50} 与地闪频次 F 的相关性， S_{30} 、 S_{40} 、 S_{50} 中相关系数最大项分别出现在 S_{30t-10} 、 S_{40t-10} 、 S_{50t-10} 。从拟合优度看，对数拟合高于线性拟合，其中最高值为 S_{40t-10} ，判别两种单体的回波面积阈值为 47.84 km^2 。

4) 长沙地区初闪发生的预警方案为：1) 比较单体某个时刻的 H_{40} 与 h_0 ，如果 H_{40} 突破了 h_0 ，表明该单体可能发展成雷暴单体，反之则判断为非雷暴单体；2) 对比可能为雷暴单体的 H_{40} 与 h_{-10} ，如果在某个雷达体扫周期中 $H_{40} > h_{-10}$ ，那么可认为该单体会发展成为雷暴；3) 计算该单体的 S_{40t-10} ，与阈值 47.84 km^2 进行比较，如果前者较大，那么在此时刻之后的一个雷达体扫周期内会有闪电形成。

基金项目

湖南省气象局 2022 年短平快项目(XQKJ22B014)。

参考文献

- [1] 薛秋芳, 孟青, 葛润生. 北京地区闪电活动及其与强对流天气的关系[J]. 气象, 1999, 25(11): 15-19.
- [2] 郟秀书, 张义军, 张其林. 闪电放电特征和雷暴电荷结构研究[J]. 气象学报, 2005, 63(5): 646-658.
- [3] 李丹, 林文, 应达, 等. 福建中南部沿海不同强对流天气闪电活动特征分析[J]. 气象与环境科学, 2021, 44(6): 68-77.
- [4] 马超, 周雅蔓, 李伟. 闪电定位资料在天山北坡强对流天气短临预警中的分析及应用[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(1): 49-55.
- [5] 王婷波, 郑栋, 周康辉, 等. 暴雨和雹暴个例中闪电特征对比[J]. 应用气象学报, 2017, 28(5): 568-578.
- [6] Orville, R.E. and Silver, A.C. (1997) Lightning Ground Flash Density in the Contiguous United States: 1992-95. *Monthly Weather Review*, **125**, 631-638. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1997\)125%3C0631:LGFDIT%3E2.0.CO:2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1997)125%3C0631:LGFDIT%3E2.0.CO:2)
- [7] Perez, A.H., Wicker, L.J. and Orville, R.E. (1996) Characteristics of Cloud-to-Ground Lightning Associated with Violent Tornadoes. *Weather and Forecasting*, **12**, 428-437. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1997\)012%3C0428:COCTGL%3E2.0.CO:2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1997)012%3C0428:COCTGL%3E2.0.CO:2)
- [8] Williams, E.R. (1985) Large-Scale Charge Separation in Thunderclouds. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **90**, 6013-6025. <https://doi.org/10.1029/JD090iD04p06013>
- [9] Gremillion, M.S. and 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. *Weather and Forecasting*, **14**, 640-649. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1999\)014%3C0640:TCOCTG%3E2.0.CO:2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1999)014%3C0640:TCOCTG%3E2.0.CO:2)
- [10] 刘维成, 苟尚, 傅朝. 雷达资料在高原东北侧雷电预警中的应用[J]. 气象, 2015, 41(10): 1253-1259.
- [11] 李国梁, 李俊, 李享, 等. 武汉地区雷电预警阈值研究[J]. 气象科技, 2015, 43(5): 874-879.
- [12] Knupp, K.R., Paech, S. and Goodman, S. (2003) Variations in Cloud-to-Ground Lightning Characteristics among Three Adjacent Tornadoic Supercell Storms over the Tennessee Valley Region. *Monthly Weather Review*, **131**, 172-188. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2003\)131%3C0172:VICTGL%3E2.0.CO:2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2003)131%3C0172:VICTGL%3E2.0.CO:2)
- [13] 肖艳姣, 刘黎平. 新一代天气雷达网资料的三维格点化及拼图方法研究[J]. 气象学报, 2006, 64(5): 647-657.
- [14] Carey, L.D., Petersen, W.A. and Rutledge, S.A. (2003) Evolution of Cloud-to-Ground Lightning and Storm Structure in the Spencer, South Dakota, Tornadoic Supercell of 30 May 1998. *Monthly Weather Review*, **131**, 1811-1831. <https://doi.org/10.1175//2566.1>
- [15] 石玉恒, 张义军, 郑栋, 等. 北京地区雷暴的雷达回波特征与闪电活动的相关关系[J]. 气象, 2012, 38(1): 66-71.