

文章编号:2096-5389(2018)04-0037-06

一次强对流天气过程的闪电与雷达回波特征分析

黄钰^{1,2,3}, 曾勇^{1,3}, 周苑⁴, 李丽丽^{1,5}

(1. 贵州省冰雹防控技术工程中心, 贵州 贵阳 550081; 2. 中国气象局云雾物理环境重点实验室, 北京 100081;
3. 贵州省气象灾害防御中心, 贵州 贵阳 550081; 4. 贵州省遵义市播州区气象局, 贵州 播州 563000;
5. 贵州省山地环境气候研究所, 贵州 贵阳 550002)

摘 要:利用贵州省三维闪电定位资料、C 波段 Doppler 天气雷达资料及探空资料对 2017 年贵州一次强天气过程中闪电特征及雷达回波特征的相关性进行分析。结果表明:回波顶高与闪电频数的相关性优于回波强度与闪电频次的相关性;不同温度层上, ≥ 30 dBz 的回波面积与总闪电频次和负地闪频次相关性都比较好, 其中零度层高度上 ≥ 30 dBz 的回波面积与总闪电频次相关性最好, 且多项式拟合效果优于线性拟合;最大回波强度、回波顶高以及 30 dBz 强度回波发展高度对闪电的发生具有一定的指示意义。

关键词:回波顶高; 闪电频次; 拟合

中图分类号:P458.1+2 **文献标识码:**A

Analysis of the correlation between lightning and radar echo in a strong convective weather process

HUANG Yu^{1,2,3}, ZENG Yong^{1,3}, ZHOU Yuan⁴, LI Lili^{1,5}

(1. Guizhou Hail Prevention And Control Technology Engineering Center, Guiyang 550081, China;
2. Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;
3. Meteorological Disaster Defense Technology Center of Guizhou Province, Guiyang 550081, China;
4. Bozhou District Bureau of Guizhou Province, Bozhou 563000, China; 5. Guizhou Institute of
Mountainous Environment and Climate, Guiyang 550002, China)

Abstract: Based on the three dimensional lightning location system, Doppler weather radar data and radio-sonde data in Guizhou, the correlation between lightning characteristics and radar echo characteristics in a strong weather process in Guizhou was analyzed. The results show that the correlation between the top layer of ech and lightning frequency is better than that between echo intensity and lightning frequency; The echo area that greater than or equal to 30 dBz tends better correlation with total lightning frequency and negative lightning frequency in different temperature layer, in the zero layer, correlation between echo area greater than or equal to the 30 dBz and total lightning frequency is the best, well, polynomial fitting is better than the linear fitting; The maximum echo intensity, echo top height, the development height of 30 dBz is an indicator of the occurrence of lightning.

Key words: echo top height; lightning frequency; fitting

1 引言

雷暴云的每个雷暴单体的生命史可分为发展、

成熟和消散 3 个阶段, 每个阶段持续十几分钟至半
小时左右。在不同的阶段雷暴云的结构有不同的
特征, 表征在雷达回波图上的特征亦各不相同。目

收稿日期: 2017-12-22

第一作者简介: 黄钰(1989—), 女, 工程师, 主要从事闪电活动特征、雷电监测预警工作, E-mail: 812203502@qq.com。

资助项目: 中国气象局云雾物理环境重点实验室开放课题(批准号: 2017Z01603); 黔中地区雷达、闪电资料对降雹的指示作用研究。

前,已有不少研究者开展了闪电特征与雷达回波的相关性研究。一般而言,闪电次数和平均回波强度之间具有一定的相关性,但由于雷云的发展阶段、高度和结构都有差异,且降水与闪电之间的相互作用关系相当复杂,导致闪电次数和平均回波强度的相关性存在许多变数。李南^[1]等指出闪电发生的数目和变化与雷达回波顶高有较好的对应关系。杨国锋^[2]等发现闪电频数、强度和雷达回波强度在时间序列上有较好的一致性。易笑园^[3]等认为6 min内地闪频数与对流云回波顶高于11 km或12 km的回波面积有正相关关系。冯桂力^[4]等的研究结果表明闪电主要出现在强回波区及其周围。翟园^[5]等对湖南地区多普勒天气雷达回波与云地闪关系进行了研究,指出云地闪强度和雷达回波强度并不完全对应,只是云地闪强度越强,出现强回波的几率越大,但闪电频次和雷达回波面积存在明显对应关系,并且雷达回波位置与闪电发生区域具有很好的一致性。目前闪电活动特征与雷达回波特征的相关性分析多数基于二维的闪电资料^[6-7],且主要是基于负地闪资料,贵州省内三维的组网观测已经实现,数据更为广泛,云闪加入之后总闪、地闪、云闪与雷达回波特征谁的相关性最好,值得一探。

雷暴的产生区域特征很明显,石湘波^[8]等指出不同下垫面雷暴雷达回波特征与地闪的关系存在差异,贵州地形地貌特殊,强对流天气有着自己的特点^[9-10],开展闪电活动与雷达资料之间关系的研究,揭示强对流天气的雷电活动规律,为相关的雷电天气判别提供参考,提高对其的预报预警率,以达到最大程度上的减少雷灾事故,这对于防灾减灾是非常有意义的。

2 数据资料及天气过程概述

本文所用数据主要来自贵州多普勒雷达资料

以及贵州省三维闪电探测网数据。雷达采用的是CD格式的数据,其最大探测距离为150 km,共有9个探测仰角,分别为0.5°、1.5°、2.4°、3.4°、4.3°、6.0°、9.9°、14.6°、19.5°,雷达数据时间为北京时。贵州省气象局三维雷电探测系统组网可覆盖全省,数据时间为北京时,除了发生的经纬度、强度、陡度之外还能探测到云闪发生的高度。

2017年4月5日傍晚开始,整个贵州发生了强对流天气过程,基于当日雷达资料,16时左右在毕节纳雍地区、黔西与织金交界处,有块状对流回波生成,之后不断向东移动增强,云团所经之处,带来了强雷电、强降水等强对流天气。

3 闪电特征与雷达回波相关性分析

对2017年4月5日16时—6日04时闪电资料进行统计分析,该次过程共探测到闪电11 992次,闪电主要集中在毕节地区(3 909次),贵阳(2 308次)次之。本文将主要选取毕节、贵阳的闪电资料与雷达资料进行相关分析。

3.1 闪电特征分析

闪电定位资料:2017年4月5日16时—6日04时毕节市共探测到闪电3 909次,其中地闪2 928次,占总闪的74.9%,负地闪2 733次,占地闪总数的93.3%,平均负地闪强度为-21.9 kA,最大负地闪强度为-163.1 kA,平均正地闪强度为35.2 kA,最大正地闪强度为141.4 kA。地闪主要发生在织金和纳雍地区,且负地闪占绝大多数,金沙、大方和毕节市地闪总数虽然不多,但是正负地闪比率却非常高,分别为71.43%,36.67%和112.5%(图1a)。取1 h为间隔对整个时段的闪电频次初步分析,如图1b所示,可以看到闪电主要集中在4月5日17时—4月6日00时,同时负地闪频次的变化和地闪总频次甚至总闪的变化非常一致,峰值均出现在20时。

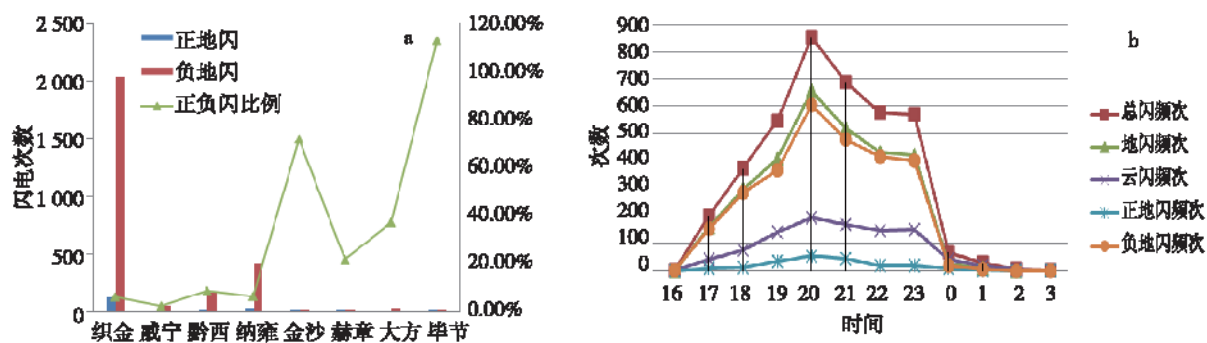


图1 闪电频次特征

Fig.1 Characteristic of the lightning frequency

3.2 闪电频次与雷达回波强度、顶高的关系

将闪电数据每 6 min 进行统计,以更好地与雷达数据进行比对分析。结合 16 时 36 分—20 时 00 分时段内的雷达回波和闪电活动频次分布规律,如图 2 所示,回波最大强度与闪电的发生频次并不是完全的对应,不少时段当组合反射率最大值 > 50 dBz 甚至 60 dBz 时,闪电频次很低,图 3 为织金地区 18 时 30 分—19 时 30 分时段内的雷达组合反射率图,从图中可以看出该时段内组合反射率因子都比较大,尤其是中间 4 个时间段,组合反射率最大已达到 65 dBz,而对应的时间段内在回波中心和周围无闪电发生或者闪电频次很低,故不能简单的作组合反

射率因子与闪电活动的相关性分析。

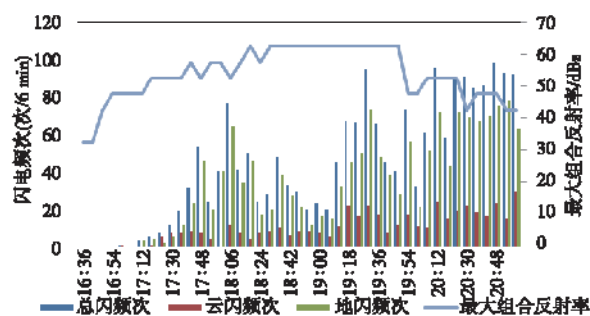


图 2 闪电频次与最大组合反射率关系

Fig. 2 Relationship between lightning frequency and maximum composite reflectivity

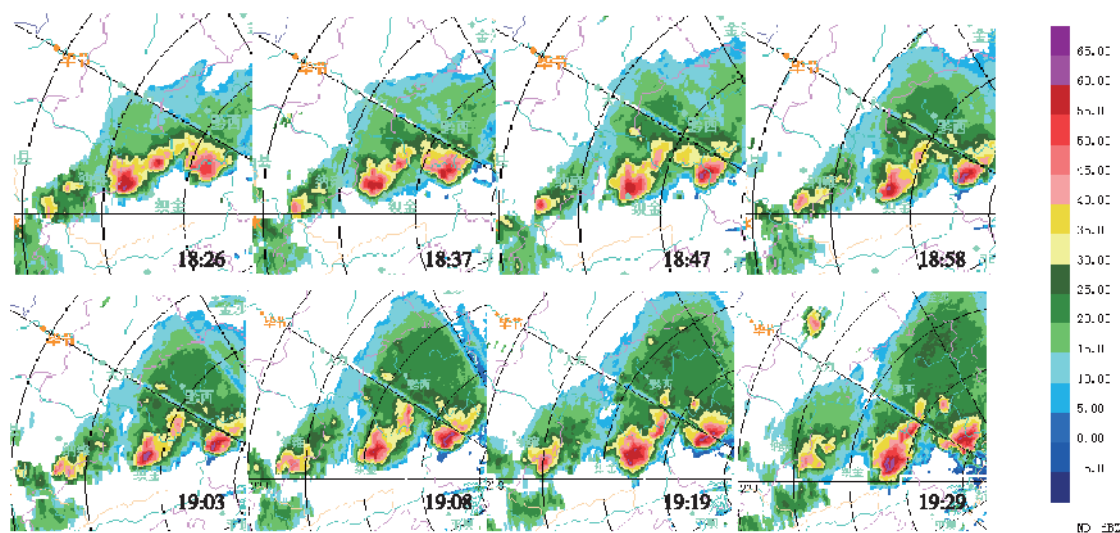


图 3 研究区域内 18 时 26 分,18 时 37 分,18 时 47 分,18 时 58 分,19 时 03 分,19 时 08 分,19 时 19 分,19 时 29 分的组合反射率

Fig. 3 Composite reflectivity of the study area at 18:26,18:37,18:47,18:58,19:03,19:08,19:19,19:29

科学家们通过大量的试验研究已经普遍接受了一种雷电起电机理即一活跃的软雹和较小的冰粒子间的相互碰撞从而产生闪电,而软雹、冰粒子及过冷却的产生需要液态水的温度达到冰点以下。从大气层温度变化规律来看,在对流层中一般温度随高度的升高而降低,闪电发生前后,在某个温度层高度范围上雷达回波强度必然会表现为一定的特征量变化。35 dBz 是学者们普遍比较认可的强度特征值,但针对不同的地理环境和时间,尤其是像贵州这样特殊的地形地貌,海拔较高,0 °C 层高度、-20 °C 层高度有着自己的特征,对于闪电及雷达回波特征值的研究是十分有意义的。本文选取 17—20 时的闪电及雷达数据,将闪电数据每 6 min 进行统计。如上所述,雷暴的起电过程与温度有着密切的关系,在分析时,分为 0 °C, -10 °C 和 -20 °C

3 个温度层(基于当天探空资料),统计 3 个温度层以上超过 30 dBz、40 dBz 和 50 dBz 的面积(分别用符号 S30t00、S40t00、S50t00、S30t-10、S40t-10、S50t-10、S30t-20、S40t-20、S50t-20 来表示)并和闪电频次做相关性分析。

如图 4 所示在不同温度层上,闪电频次与不同强度回波面积的走向大致一致,但普遍回波面积的峰值落后于闪电频次峰值,且所处高度越高,落后的越少,同时也可以注意到前期云闪明显多于地闪。结合表 1 给出的具体相关性拟合数值(线性拟合),整体上都具有一定的相关性,0 °C 层上的各强度回波面积与各闪电频次(除正地闪频次之外)的相关性都比较好。如果用 S30 代表 S30t00、S30t-10 以及 S30t-20 的集合,用 S40 代表 S40t00、S40t-10 以及 S40t-20 的集合,用 S50 代表 S50t00、S50t-

-10 以及 S50t-20 的集合, S30 与各闪电频次(除正地闪频次之外)的相关性最好, S40 次之, S50 最差, 其中 S30t00 与总闪频次的相关性最好。云闪与不同强度回波面积的相关性拟合优度值变化幅度不大, 各层之间差异不明显。正地闪与 -20 °C 高度

层上不同强度的回波面积相关性较高, 这可能是由于正地闪多产生在雷暴云上部的云砧区, 少发生于底部的正电荷区, 并且正地闪多出现于雷暴的初始发生和消散阶段, 空间分布较负地闪而言弥散。

表 1 S30t00、S40t00、S50t00、S30t-10、S40t-10、S50t-10、S30t-20、S40t-20、S50t-20 与闪电频次的线性拟合优度
Tab.1 Goodness of linear fit between S30t00、S40t00、S50t00、S30t-10、S40t-10、S50t-10、S30t-20、S40t-20、S50t-20 and lightning frequency

	S30t00	S40t00	S50t00	S30t-10	S40-10	S50t-10	S30t-20	S40t-20	S50t-20
总闪频次	0.38	0.34	0.18	0.32	0.19	0.14	0.30	0.14	0.05
云闪频次	0.24	0.18	0.12	0.17	0.19	0.13	0.24	0.19	0.10
地闪频次	0.32	0.30	0.15	0.27	0.25	0.10	0.23	0.07	0.03
负地闪频次	0.32	0.31	0.15	0.28	0.25	0.10	0.22	0.06	0.03
正地闪频次	0.06	0.03	0.02	0.05	0.05	0.04	0.11	0.07	0.01

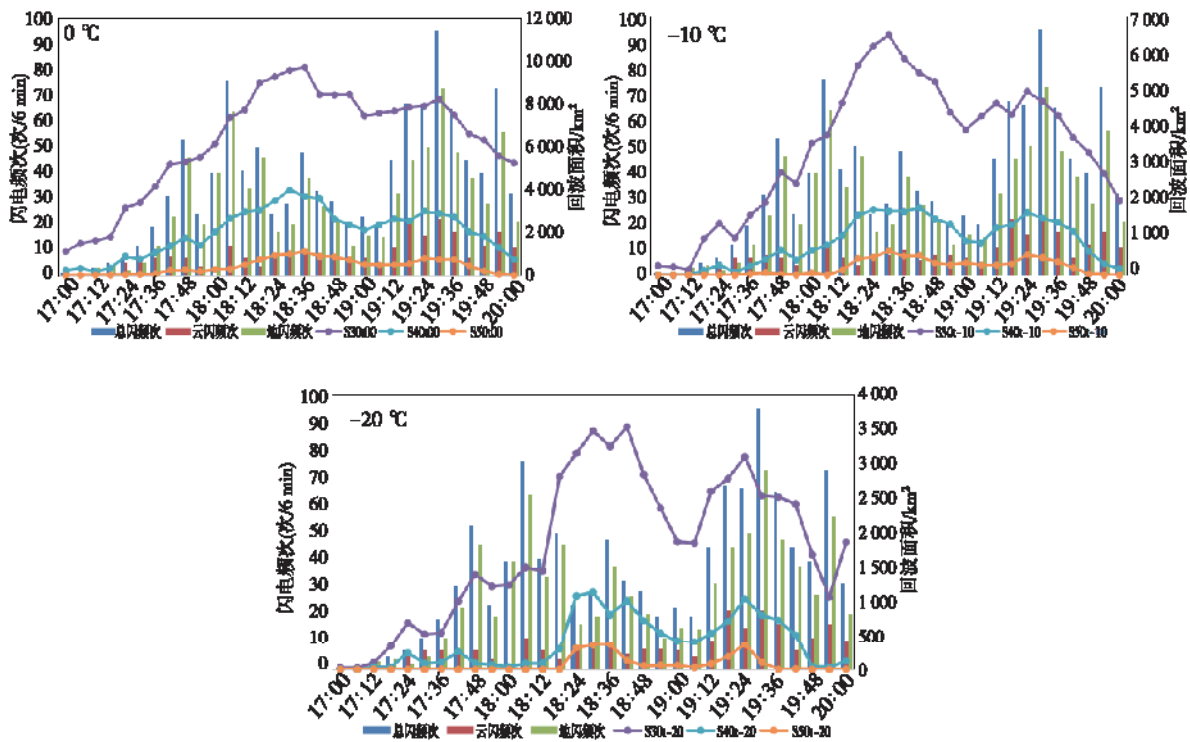


图 4 0 °C、-10 °C、-20 °C 层高度上, 闪电频次与不同强度回波面积的对比如

Fig. 4 Lightning frequency and different intensity echo area in 0 °C、-10 °C、-20 °C layer

在通常的雷电预警工作中都通过判断雷达回波强度是否达到某数值以及回波顶发展高度来识别有无闪电的发生。选取每 6 min 的闪电频次, 对云顶高度与闪电频次也进行了相关性分析。如图 5 所示, 云顶高度与闪电频次的对应关系明显优于回波面积与闪电频次的对应关系, 不管是总闪频次、云闪频次和地闪频次都有着很好的一致性。虽然在 18 时 40 分—19 时 10 分这一时间段云顶高度较高, 而闪电频次处于较低的状态, 但整个的涨消趋势十分一致, 在云顶高度处于大值时都对应着很大的闪电频次, 云顶发展越高, 说明发展剧烈, 闪电发

生的概率越大。结合表 2 给出的具体拟合优度的数值, 总闪频次、地闪频次、负地闪频次的拟合优度都比较高, 云闪次之, 但都大于闪电频次与不同温度层上不同强度雷达回波面积的拟合数值。

表 2 云顶高度与闪电频次的线性拟合优度
Tab.2 Goodness of linear fit between cloud top height and lightning frequency

	总闪 频次	云闪 频次	地闪 频次	负地闪 频次	正地闪 频次
云顶高度	0.693	0.447	0.689	0.664	0.296

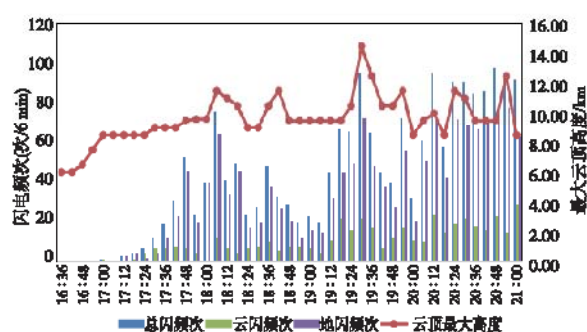


图5 云顶高度与闪电频次的对应关系

Fig. 5 Corresponding relation between cloud top height and lightning frequency

从图5中还可以看到云顶高度达8.5 km时产生第一次闪电,该闪电发生在纳雍地区,而此刻的0℃层高度上的回波强度已达到40 dBz,并且30 dBz强度的回波高度已达到8 km,超过了-20℃

层高度(当日的-20℃层高度为7 450 m)。除此之外,选取织金地区的第一次闪电进行分析,图6为织金境内17时18分、17时24分、17时29分cappi图像(5 km,当日的0℃层高度为4 780 m)及17时24分的垂直剖面图,闪电定位仪探测到织金发生的第一次闪电时间为17时28分,云闪,发生位置在强回波中心的边缘。织金此次闪电发生时最强回波达到了45 dBz,并且30 dBz强度回波的高度已经超过-20℃层高度。统计贵阳、毕节其他地区第一次的发生时刻的雷达回波特征,发现云顶高度均超过9 km,最大回波强度均已达到40 dBz,并且30 dBz强度的回波高度均超8 km(即超过了-20℃层高度),35 dBz回波垂直高度超6 km。就该此过程而言,最大回波强度(≥ 40 dBz)、回波顶高(≥ 8.5 km)以及30 dBz强度回波发展高度对闪电的发生具有一定的指示意义。

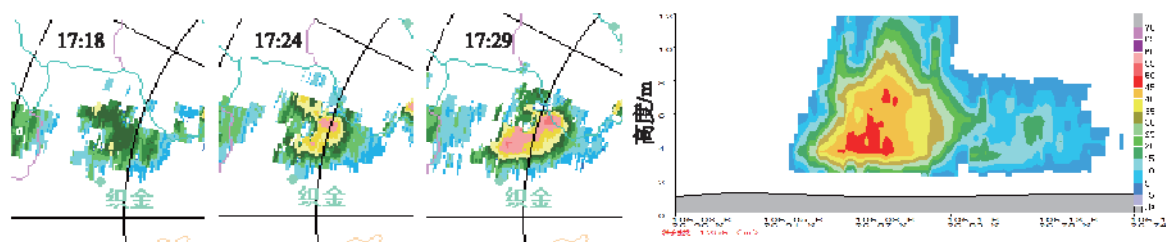


图6 织金境内17时18分、17时24分、17时29分cappi图像(5 km)及17时24分垂直剖面图

Fig. 6 Capi(5km) at 17:18,17:24 and 17:29 & vertical profile at 17:24 in Zhijin

选取相关系数最高的总闪频次与S30t00利用不同的拟合方法得到图7a,多项式拟合优度 $RP2 = 0.6253$ 优于线性拟合优度(RL2)及指数拟合优度(RX2),对总闪频次以及S40t00、S50t00、S30t-10、S40t-10、S50t-10、S30t-20、S40t-20、S50t-2之间的拟合选用了多项式拟合与线性结果进行比较,

结果见表3,多项式的拟合结果明显的优于线性拟合结果,但是S50t-20与总闪频次的相关性还是比较差。同样也对云顶高度与总闪频次进行了进一步的拟合分析,得到图7b,3种拟合方式效果都很好,指数及多项式的拟合结果略优于线性拟合。

表3 总闪频次与S30t00、S40t00、S50t00、S30t-10、S40t-10、S50t-10、S30t-20、S40t-20、S50t-2拟合优度对比结果

Tab. 3 Comparison of fit goodness between total lightning frequency and S30t00、S40t00、S50t00、S30t-10、S40t-10、S50t-10、S30t-20、S40t-20、S50t-2

	S30t00	S40t00	S50t00	S30t-10	S40t-10	S50t-10	S30t-20	S40t-20	S50t-20
线性拟合优度	0.38	0.34	0.18	0.32	0.19	0.14	0.30	0.12	0.05
多项式拟合优度	0.63	0.51	0.30	0.54	0.32	0.19	0.50	0.16	0.08

4 结论

本文通过三维闪电资料及多普勒雷达资料对闪电频次及雷达回波强度和云顶高度的相关性进行了分析。在不同温度层上,闪电频次与不同强度回波面积的变化趋势大致一致,但是回波面积的峰值落后于闪电频次峰值,并且所处高度层越高,落

后的越少; ≥ 30 dBz的回波面积与总闪频次和负地闪频次相关性都比较好,其中零度层高度上 ≥ 30 dBz的回波面积与总闪频次相关性最好,实际中若无法获得总闪频次,采用地闪或负地闪频次作为计算分析参数是可行的。回波顶高与闪电频数的分布有很好的相关性,初闪发生时,回波顶高度达到8.5 km以上,云顶高度较大时都对应着很高的闪电

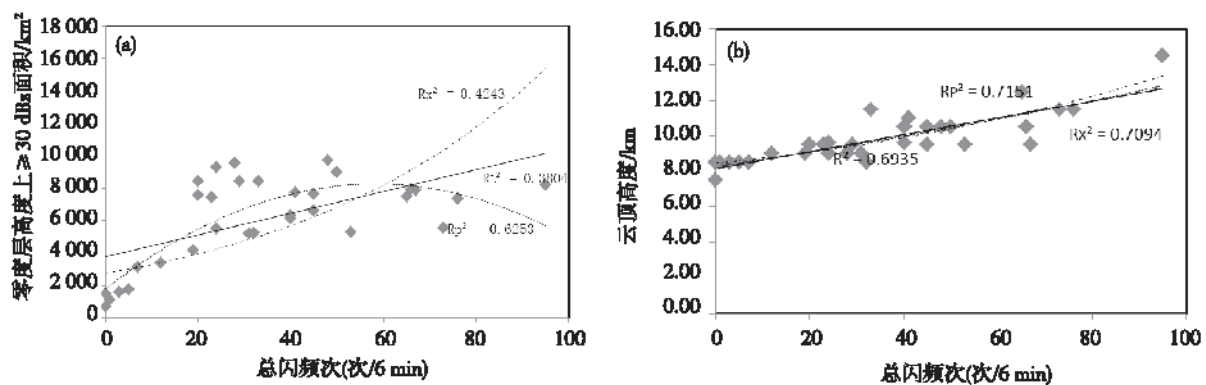


图7 总闪频次与S30t00的拟合(a);总闪频次与云顶高度的拟合(b)

Fig. 7 (a) Fitting curves of total lightning frequency and S30t00 (b) Fitting curves of total lightning frequency and cloud top height

频次。最大回波强度(40 dBz)、回波顶高(8.5 km)以及30 dBz强度回波发展高度对闪电的发生具有一定的指示意义。

本文只是针对了一次个例,更加确切的特征值应该基于更多的个例进行统计分析和对比,并且不同的天气过程闪电的活动特征亦可能会不同,这都有待于进一步的研究分析,这里提出了一种研究的思路和方法,揭示强对流天气的雷电活动规律,利用闪电频数和回波强度及云顶高度的相关性可以弥补系统故障造成的数据缺失或者进行数据验证:当闪电监测系统出现故障时,通过相关性可以把雷达数据反演得出闪电数据;反之,当雷达系统出现故障时,可以把闪电数据反演成雷达数据。

参考文献

- [1] 李南,魏鸣,姚叶青. 安徽闪电与雷达资料的相关分析以及机理初探[J]. 热带气象学报, 2006, 22(3): 265-272.
- [2] 杨国锋. 闪电定位资料与多普勒雷达资料的综合分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2005: 14-16.
- [3] 易笑园, 宫全胜, 李培彦. 华北飑线系统中地闪活动与雷达回波顶高的关系及预警指标[J]. 气象, 2009, 35(1): 39-43.
- [4] 杨超, 肖稳安, 冯民学, 等. 强对流天气雷达回波与闪电特征的个例分析[J]. 气象科学, 2009, 29(3): 403-407.
- [5] 翟园, 洪超, 乔娟, 等. 湖南地区多普勒天气雷达回波与云地闪关系研究[J]. 中国农学通报, 2016, 32(11): 115-120.
- [6] 冯桂力, 郑秀书, 袁铁, 等. 雹暴的闪电活动特征与降水结构研究[J]. 中国科学, D 辑地球科学, 2007, 3(1): 123-132.
- [7] 陈锐, 刘洲荣. 柳州市强对流暴雨的闪电和雷达回波特征及相关性研究[J]. 气象研究与应用, 2016, 37(2): 38-41.
- [8] 石湘波, 黄旋旋, 沈一平. 不同下垫面雷暴雷达回波特征与地闪的关系[J]. 气象科技, 2015, 43(5): 880-887.
- [9] 万雪丽, 周明飞, 曾莉萍, 等. 贵州春季强冰雹天气定量概念模型研究及试应用分析[J]. 贵州气象, 2017, 41(2): 1-7.
- [10] 邹书平, 田楠, 刘国强, 等. 一次强冰雹天气过程双雷达回波特征参数对比分析[J]. 贵州气象, 2012, 36(3): 12-14, 18.