

田野,姚雯,尹佳莉,等. 不同闪电跃增算法在北京地区应用效果对比. 应用气象学报,2021,32(2):217-232.

DOI: 10.11898/1001-7313.20210207

不同闪电跃增算法在北京地区应用效果对比

田野¹⁾²⁾ 姚雯^{3)*} 尹佳莉¹⁾ 郅秀书⁴⁾ 曹海维¹⁾
李晋¹⁾ 袁善锋⁴⁾ 王东方⁴⁾

¹⁾(北京市气象探测中心,北京 100089)

²⁾(北京城市气象研究院,北京 100089)

³⁾(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081)

⁴⁾(中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室,北京 100029)

摘 要

基于 S 波段多普勒天气雷达基数据、北京闪电定位网全闪定位数据和北京地区降雹的人工观测结果,对比分析 Gatlin 和 σ 两种闪电跃增算法在不同配置下对北京地区 2015—2018 年共 177 次冰雹天气过程的预警效果。结果表明:不同倍数的 σ 算法预警结果差别很大, 2σ (要求当前闪电频数变化率超过之前平均闪电频数变化率两倍标准差) 在 σ 算法中的预警效果最佳;不同 N (总闪频数变化率的数量) 配置下的 Gatlin 算法的预警结果差别不大,其中当 $N=6$ 时的预警效果最佳。 2σ 算法的命中率、虚警率和临界成功指数分别为 80.2%、41.6% 和 51.1%, $N=6$ 的 Gatlin 算法的相应结果分别为 82.5%、62.0% 和 35.2%。另外,详细分析了一次多单体雷暴过程和一次飑线过程中两种算法的应用情况,结果也表明 Gatlin 算法比 2σ 算法的命中率略高,但虚警率偏高很多,临界成功指数偏低。综合 Gatlin 算法和 σ 算法对冰雹预报结果评估情况,发现 2σ 闪电跃增算法更适于对北京冰雹天气的预警,对提升闪电数据在北京地区冰雹预报业务的可用度有一定参考价值。

关键词: 闪电跃增; 冰雹; 预警; 2σ 算法; 强对流

引 言

夏季强对流系统中的降雹是一种小尺度天气现象,通常持续时间较短。冰雹天气系统会产生降雹、强降水、6 级以上大风和闪电等灾害性天气,对农业生产造成严重损失,对人类生命财产造成严重危害。对冰雹落区和降雹时间的精细化预报是业务难点。北京市气象局主要利用模式计算的冰雹潜势产品进行冰雹预警,其预警效果尚待进一步提升。近年,大量观测揭示强雹暴期间的闪电活动特征,如高比例云闪和低频率地闪,与普通雷暴云中的闪电活动特征不同^[1],且在冰雹天气发生前,总闪数量(云闪数与地闪数之和)急剧上升^[2-6]。除通过冰雹识别算法利用天气雷达进行冰雹云的识别和降雹概率的估算

外^[7-10],闪电频数的变化趋势可成为冰雹天气预警及决策的有利工具。

Kane^[11]发现地闪频数峰值出现后 10~15 min,台风和大冰雹才发生。Williams 等^[12]研究美国佛罗里达州强雷暴中的总闪活动特征,发现在灾害性天气,如强地表风、冰雹和台风到达前 1~15 min,雷暴云中总闪频数快速增长,称为闪电跃增,总闪频数从 20 min^{-1} 增加到超过 100 min^{-1} ,强雷暴天气总闪频数一般超过 60 min^{-1} ,甚至达到 500 min^{-1} 。Metzger 等^[13]在灾害性天气和非灾害性天气中均发现闪电跃增现象,这与前人研究结果类似^[12,14-15],冰雹云中的闪电跃增表现为云闪频数快速增加而地闪频数降低或者不变。Wapler^[16]分析德国 600 个雹暴数据,发现闪电跃增出现时刻比降雹现象发生提前 0~45 min。

2020-09-29 收到,2020-12-23 收到再改稿。

资助项目: 灾害天气国家重点实验室开放课题(2019LASW-B07)

* 通信作者, 邮箱: yaowen@cma.gov.cn

国内相关研究也发现类似现象。陈哲彰^[17]分析 20 个冰雹大风实例,发现地闪开始时间与雷雨同步,比冰雹提前平均约 25 min,出现在雹云前进方向的右侧(下风方)10~50 km。周筠珩等^[18]观测发现地闪频数骤然升高的时刻比降雹提前 30 min。蔡晓云等^[19]研究认为闪电定位数据比雷达数据在降雹、雷雨过程中至少存在 1~3 h 的提前量。冯桂力等^[20]应用闪电定位系统、卫星和雷达观测数据分析一次大范围冰雹强对流天气过程后发现闪电跃增发生在冰雹前 20~30 min。冯桂力等^[21-22]和 Liu 等^[23]分析山东地区冰雹云中闪电活动特征后指出,降雹前地闪频数明显跃增,且降雹过程中正地闪频数较高。

目前用于计算闪电跃增现象的算法主要有两种:一种是 Gatlin 算法^[24],另一种是 Schultz 等^[15,25]在 Gatlin 算法基础上改进的 σ 算法。

Schultz 等^[15]选取美国田纳西流域和华盛顿地区 85 例灾害性天气(冰雹和龙卷风),统计检验闪电跃增算法的应用效果,认为 2σ 闪电跃增算法(要求当前闪电频数变化率超过之前平均闪电频数变化率两倍标准差)命中率为 87%,虚警率为 33%。

Yao 等^[26]利用 SAFIR(Systeme d'Alerte Fondre par Interferometrie Radioelectrique)总闪数据和 ADTD(ADvanced TOA and Direction system)地闪数据,结合京津冀地区 14 次孤立降雹雷暴云的观测结果,通过 2σ 闪电跃增算法分析得到总闪和地闪出现跃增现象比观测到冰雹现象分别提前 32.2 min 和 25.4 min,认为雹暴中总闪和地闪的特征对比可作为降雹预报的有利手段。基于 3 种不同闪电定位系统的总闪活动数据,Chronis 等^[27]将 σ 算法拓展到 $\alpha\sigma$ 算法($\alpha=0.5\sim 4$),发现包含更高闪电频数和更高 α 值的闪电跃增的雹暴能够产生尺寸更大生命周期更长的冰雹。Tian 等^[28]利用 2σ 算法分析 2015—2017 年北京地区闪电跃增现象对 144 例冰雹天气的预警情况,发现 2σ 算法能够有效预警 81.8% 的降雹个例,且平均预警提前时间为 27.1 min。

上述研究表明,通过分析闪电跃增特征和冰雹活动关系可预警冰雹天气。目前国内主要利用 2σ 算法对降雹个例进行预警研究,Gatlin 算法应用报道鲜见,何种闪电跃增判别方法适合预警北京地区雹暴过程, 2σ 指标是否为北京地区利用闪电数据进行冰雹预报的合理指标尚需进一步研究,因此本文选取 2015—2018 年北京地区 177 次冰雹过程,对比

分析 σ 算法和 Gatlin 算法及在多种条件配置下对北京冰雹天气预警的效果,旨在现有冰雹业务预报的基础上,增加闪电跃变特征作为提高冰雹预警能力的指标,得到利用闪电数据进行冰雹预报的最优算法与配置,提升闪电数据在北京地区冰雹预报业务中的可用度,为冰雹预警提供支持。

1 数据和跃增算法

1.1 数据

本文使用 2015—2018 年北京市冰雹天气观测记录、S 波段多普勒天气雷达基数据和北京闪电定位网(Beijing Lightning Network, BLNET)闪电定位数据。冰雹天气观测记录来自北京市气象局,并已剔除冰雹直径小于 5 mm 的记录,当冰雹发生时无相应的雷达数据(故障维修)或者闪电定位数据(系统未运行)的记录也剔除,最终得到北京地区 177 次冰雹天气过程。

中国科学院大气物理研究所建立的 BLNET 2015 年形成了 16 个测站的站网布局,包括大气所站、大兴站、房山站、古将站、怀柔站、密云站、南苑站、平谷站、上甸子站、三河站、石景山站、顺义站、通州站、香河站、延庆站、真顺站,其中香河站和三河站位于河北省境内,其余探测子站分布于北京各区气象局或人工影响天气炮点(如图 1 所示)。BLNET 覆盖范围东西向 110 km,南北向 120 km。平均基线长度约 45 km,属于短基线定位系统^[29],探测范围可覆盖北京及部分京津冀地区。BLNET 是区域性的、研究和应用相结合的闪电定位系统,采用时差法(time of arrival, TOA)对北京地区的总闪活动(云闪与地闪之和)进行实时定位^[30],对总闪、云闪和地闪的探测效率分别是 93.2%,97.4%和 73.9%^[31]。

BLNET 输出的二维闪电定位结果包括每个辐射源脉冲的发生时刻、经纬度、类型、极性和电流强度。采用如下标准将一次雷暴过程的所有辐射源定位结果聚类为闪电:首先提取 BLNET 定位结果中的地闪脉冲,将距首个地闪脉冲 10 km 范围内且发生时间差不超过 0.5 s 的其他地闪脉冲归为同一个地闪,再将上次聚类之后剩余辐射源脉冲中的第 1 个地闪脉冲作为聚类参考,以此往复。归类后,基于每个地闪中首地闪脉冲的经纬度和时间信息,将云闪脉冲也利用 10 km 和 0.5 s 的时空判断标准聚类为同一个地闪。在最后剩余未聚类的云闪脉冲中,

随机选取第1个脉冲作为参考标准,也以10 km和0.5 s的时空判断标准将其聚类为云闪。所有脉冲聚类完成后,取每个闪电中第1个脉冲的经纬度和时间信息代表整个闪电过程的经纬度和时间信息。

S波段多普勒天气雷达位于北京市气象探测中

心院内(图1中南苑站位置),其体扫周期为6 min,最大探测距离为460 km,库长为1 km,扫描方式为11层体扫。本文采用S波段雷达的基数据进行分析。



图1 北京闪电定位网(BLNET)站点分布

Fig. 1 Distribution map of BLNET stations

1.2 强对流单体识别方法

强对流单体识别是实现对流追踪和研究单体内闪电频数变化的基础。本文采用双阈值 TITAN (thunderstorm identification tracking analysis and nowcasting)^[32] 风暴识别方法对强对流单体进行识别:①在识别风暴之前,将雷达体扫得到的极坐标数据转化为笛卡尔坐标数据(网格分辨率为1 km×1 km),并求取组合反射率因子。②设置第1个雷达反射率因子判断阈值为35 dBZ,在东西方向的数据网格中找到组合反射率因子超过35 dBZ的格点,将相邻格点组合成一个区域,在南北方向重复此操作。将有连接重合部分的相邻区域组合成为更大的区域,并剔除掉网格内孤立格点,即识别出组合反射率因子超过35 dBZ的连续区域。③上述方法得到

组合反射率因子大于等于35 dBZ的连续区域,若该连续区域包含最大反射率因子大于等于45 dBZ的格点则该连续区域识别为强对流单体,否则该连续区域不识别为强对流单体。本研究统计落在强对流单体网格内的云闪频数和地闪频数作为该单体内的总闪频数。

1.3 σ 算法

σ 算法^[33]主要步骤:统计强对流单体内每分钟总闪频数(F ,单位为 min^{-1}),求出相邻2 min内每分钟平均总闪频数($\bar{F}$)(式(1)), $\bar{F}$ 的时间间隔为2 min。本文利用BLNET总闪定位数据计算总闪频数:

$$\bar{F}(t) = \frac{F_t + F_{t-1}}{2} \quad (1)$$

同样地, $t-2$ 时刻的平均总闪频数:

$$\bar{F}(t-2) = \frac{F_{t-2} + F_{t-3}}{2}. \quad (2)$$

因此, 在 14 min 时间段内, 可以求出 7 组平均闪电频数: $\bar{F}(t), \bar{F}(t-2), \bar{F}(t-4), \bar{F}(t-6), \bar{F}(t-8), \bar{F}(t-10)$ 和 $\bar{F}(t-12)$ 。相邻两个总闪频数求差, 可得总闪频数随时间变化率, 称为 D , 单位为 min^{-2} , 这样可得到 6 组 D 值。 t 时刻的 D 由式(3)计算:

$$D_t = \frac{\bar{F}(t) - \bar{F}(t-2)}{2}. \quad (3)$$

总闪频数变化率 D 可量化分析闪电跃增的趋势。式(4)判断是否满足跃增条件,

$$D_t > \alpha \sigma(D_{t-2, t-4, t-6, t-8, t-10}). \quad (4)$$

式(4)中, D_t 表示当前时刻(t)的总闪频数随时间的变化率。 $\sigma(D_{t-2, t-4, t-6, t-8, t-10})$ 表示当前时刻前 2 min 到 12 min 内总闪频数随时间变化率的标准差。由于涉及 14 min 内的总闪频数, 所以 σ 算法均在 14 min 时段内进行。 $D_t > \alpha \sigma$ 的 t 时刻即为一次闪电跃增事件的时刻。本文对比分析当 α 分别取 1, 2, 3 和 4 时的预警效果。

1.4 Gatlin 算法

Gatlin 算法中 D 的表达式为

$$D(t) = \frac{f(t+\Delta t) - f(t)}{\Delta t}. \quad (5)$$

式(5)中, f 是总闪频数, 单位为 min^{-1} 。式(5)右边约等于 f 的时间导数, 即总闪频数的变化率 D , 单位为 min^{-2} 。 Δt 可以取 1 min 或 2 min。Gatlin 等^[34]证明采用 2 min 平均的总闪频数的预警结果优于 1 min 平均, 所以本文 Gatlin 算法也采用 2 min 计算总闪频数, 与 σ 算法一致。

闪电跃增的阈值可表示为

$$D_0(t) = \frac{\overline{D(t)} + 2\sigma(D(t)) + D_0(t-1)}{2}. \quad (6)$$

式(6)中, $\sigma(D(t))$ 是总闪频数变化率的标准差, $\overline{D(t)}$ 是总闪频数的滑动平均, 单位为 min^{-1} 。式(6)相当于取 t 时刻跃增阈值与 $t-1$ 时刻跃增阈值的平均值作为最终 t 时刻的跃增阈值, 可避免受总闪频数扰动导致的虚警率偏高。 $\sigma(D(t))$ 和 $\overline{D(t)}$ 的表达式分别为

$$\overline{D(t)} = \frac{1}{N} [D(t) + D(t-\Delta t) + D(t-2\Delta t) + \cdots + D(t-(N-1)\Delta t)], \quad (7)$$

$$\sigma(D(t)) = \left\{ \frac{1}{N} [(D(t) - \overline{D(t)})^2 + \right.$$

$$(D(t-\Delta t) - \overline{D(t-\Delta t)})^2 + \cdots +$$

$$(D(t-(N-1)\Delta t) - \overline{D(t-(N-1)\Delta t)})^2] \Big\}^{\frac{1}{2}}. \quad (8)$$

式(7)和式(8)中, N 为 t 时刻前总闪频数变化率 D 的数量, Gatlin 等^[34]建议标准差和滑动平均的计算时间长度范围为 12~20 min, 当 Δt 为 2 min 时, N 为 6~10。本文研究不同 N 条件下, Gatlin 算法的冰雹预警效果。

Gatlin 等^[34]认为应考虑之前时刻的闪电跃增阈值对当前时刻阈值的影响, 通过使用权重滑动平均实现。 t 时刻之前的 t' 时刻的权重因子表示为

$$w_{t'} = 1 - \frac{t-t'}{N\Delta t}. \quad (9)$$

因此, 最终闪电跃增阈值为

$$D_0(t) = \frac{1}{N} [D_0(t)w_t + D_0(t-\Delta t)w_{t-\Delta t} + \cdots + D_0(t-(N-1)\Delta t)w_{t-(N-1)\Delta t}]. \quad (10)$$

由式(10)可见, 越接近 t 时刻对最终的阈值贡献越大。如当 $\Delta t=2$, N 取 4 时, 在 $t-6, t-4, t-2$ 和 t 时刻 $w_{t'}$ 分别为 1/4, 2/4, 3/4 和 1。当 t 时刻的总闪频数变化率超过 t 时刻的跃增阈值时, 记为一次闪电跃增事件。

尽管两种算法 D 计算方法相同, 但两种算法的闪电跃增阈值计算方法不同, Gatlin 算法认为之前时刻的闪电跃增阈值对当前时刻的闪电跃增阈值有影响, 并采用滑动权重平均体现影响程度, 而 σ 算法则摒弃该思路, 认为各时刻跃增阈值相互独立。

为避免低闪电频数扰动造成的误预警, 只有总闪频数大于闪电频数阈值时, σ 算法和 Gatlin 算法才启动。Schultz 等^[15, 25, 33]将闪电频数阈值设为 10 min^{-1} 。本文闪电频数阈值采用 Tian 等^[28]的结果, 即当强对流单体中心位于城六区、昌平区、顺义区、大兴区和通州区时, 闪电频数阈值为 10 min^{-1} , 在其余地区时, 闪电频数阈值则为 4 min^{-1} 。

1.5 算法效果评估

本研究采用命中率(probability of detection, POD), 虚警率(false alarm rate, FAR)和临界成功指数(critical success index, CSI)3 个参量评估两种跃增算法对预警北京地区冰雹天气的效果。其中, 1 次冰雹个例发生前 60 min 内有闪电跃增事件为 1 次命中, 60 min 与 Tian 等^[28]采用的时间保持一致, 是经验统计结果; 1 次冰雹个例发生前 60 min 内无闪电跃增事件为 1 次漏报; 闪电跃增事件之后 60 min 内无冰雹个例则为 1 次虚警。预警效果最佳时, 命中率最

高,虚警率最低且临界成功指数最高。

2 跃增算法对比和个例分析

2.1 不同算法和不同配置对比

σ 闪电跃增算法中,取 σ , 2σ , 3σ 和 4σ 不同阈值对比分析跃增算法对北京地区冰雹天气的预警效果

(图2)。 σ 阈值下的跃增算法命中率在 2015, 2016, 2017 年和 2018 年分别大于、小于、等于和小于 2σ 阈值下的命中率,且均大于 3σ 和 4σ 阈值下的命中率。随着跃增阈值增大,算法的虚警率逐渐递减(2018 年除外)。4 年中, 2σ 阈值和 3σ 阈值的临界成功指数相差不大,且均远大于 σ 阈值的临界成功指数。从 4 年平均结果看, σ 阈值的虚警率最高,为

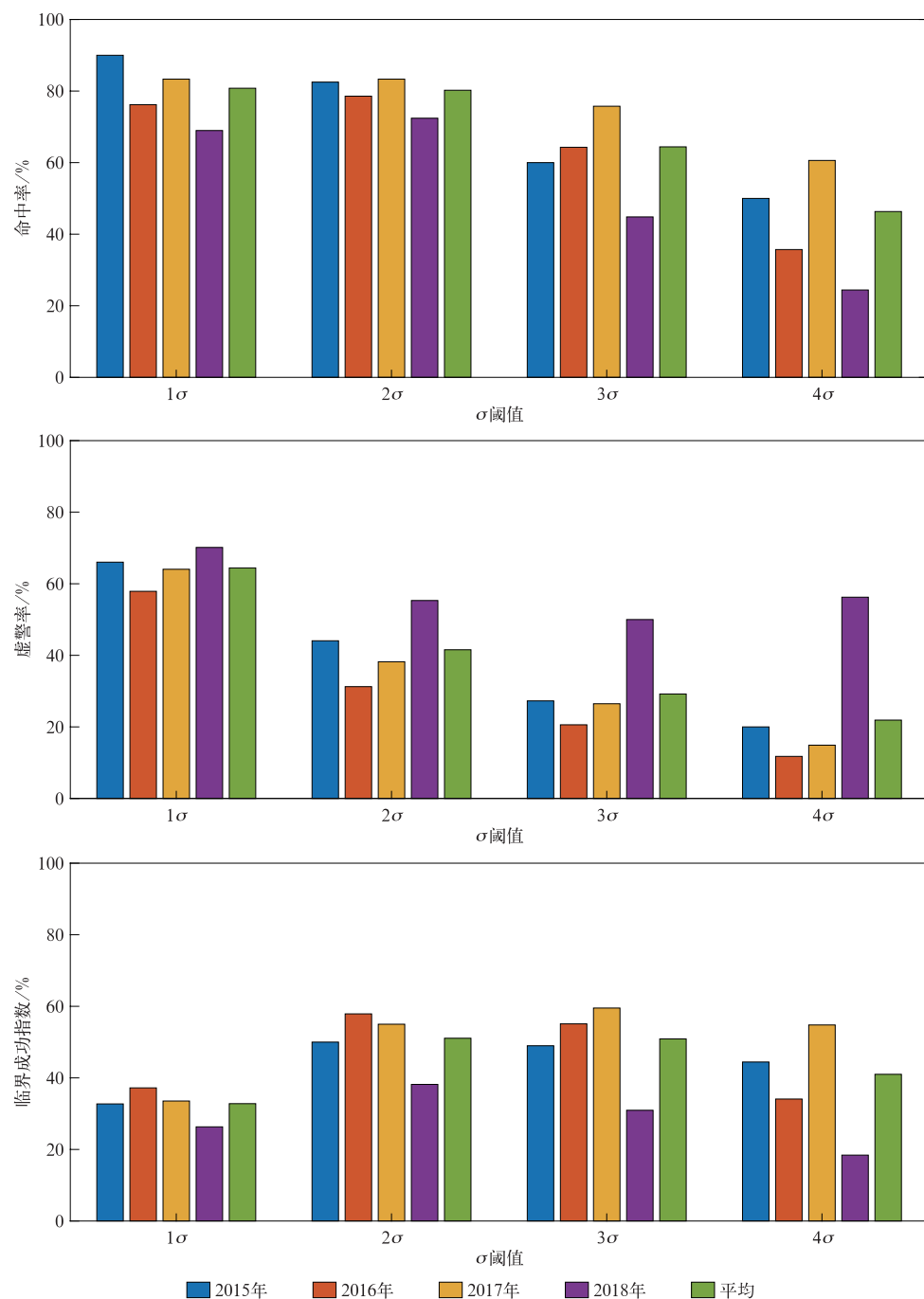


图2 不同 σ 阈值的预警效果

Fig. 2 Comparison of early warning effects of different σ thresholds

64.43%,表现最差;2 σ 阈值和3 σ 阈值的平均临界成功指数接近,分别为51.1%和50.9%。虽然3 σ 阈值的虚警率较低,为29.2%,但其平均命中率(64.4%)低于2 σ 阈值的平均命中率(80.2%)。另外,虽然4 σ 阈值的虚警率(21.9%)最低,但其命中率(46.3%)也最低。综合考虑3个评估参量,预警算法应保证

较高的预警命中率与合理的虚警率,2 σ 跃增算法的命中率较高且虚警率(41.6%)较合理,是4种阈值中表现最好的。

图3是Gatlin算法总闪频数变化率的数量 N 分别取6,7,8,9和10的预警效果。总体上不同 N 值效果接近。 N 取6,7和8时的平均预警命中率相同,

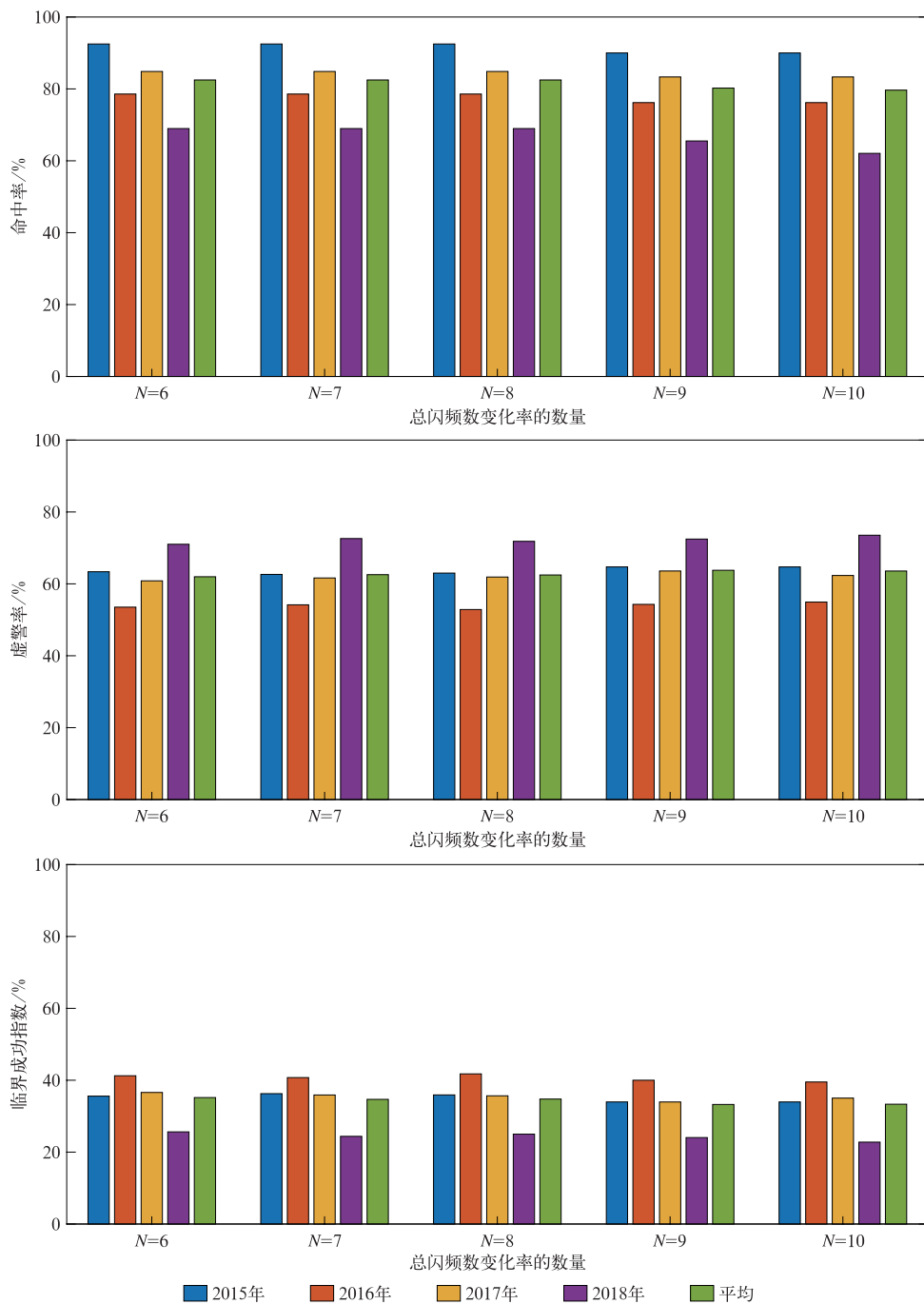


图3 Gatlin算法中总闪频数变化率 D 数量 N 不同取值的预警效果

Fig. 3 Comparison of the early warning effects of Gatlin algorithm with different N of D

均为82.5%, N 取9和10的平均预警命中率分别为80.2%和79.7%。对应 N 取6,7,8,9和10的平均虚警率分别为62.0%,62.6%,62.5%,63.8%和63.6%,其中 N 取6的平均虚警率最低,但远大于 2σ 算法(41.6%)。对应 N 取6,7,8,9和10的平均临界成功指数分别为35.2%,34.7%,34.8%,33.3%和33.3%, N 取6的临界成功指数最高。综合看, N 取6时,Gatlin算法的预警表现最佳。由于Gatlin算法使用跃增判定的滑动阈值,虽然 N 取6的预警命中率(82.5%)略高于 2σ 算法(80.2%),但是其虚警率(62.0%)明显高于 2σ 算法(41.6%)。另外,Gatlin算法的临界成功指数(35.2%)远低于 2σ 算法(51.1%),综合177次冰雹过程的分析, 2σ 算法为适合北京地区预警冰雹天气现象的闪电跃增算法。

2.2 冰雹天气个例分析

2.2.1 多单体对流系统个例

2017年8月8日北京延庆区内的一个多单体对流系统降雹前后个别时刻的雷达组合反射率因子

见图4。图4中,18:00(北京时,下同)降雹强对流单体在北京边界外,周围分布多个强对流单体,降雹单体的超强对流区(大于60 dBZ)面积很小。降雹强对流单体逐渐向北京方向移动,18:36降雹单体的强对流区(大于45 dBZ)已到达北京边界。19:00强对流区位于延庆区内,且其与产生降雹位置距离很近。虽然此时强对流单体的整体面积变化不大,但超强对流区(大于60 dBZ)的面积逐渐增大。观测记录显示19:20—19:21延庆白草洼村出现玉米粒大小的冰雹。结合19:18的雷达图可知,降雹位置在超强对流区的边界,即处于反射率因子为50~55 dBZ的区域中。降雹后,该降雹单体面积增大并向东移动,由19:48雷达图可以看到,降雹单体分裂为两个单体,由于左侧单体略小,右侧单体较大,且右侧单体内闪电数(6 min内发生17次)高于左侧单体内的闪电数(0)(图6),因此,选择右侧单体为降雹单体的后续发展延伸。20:54延续的降雹单体已发展至北京中部地区,且其左侧存在一个较大对流单体。最后二者融合为一个强大对流单体。

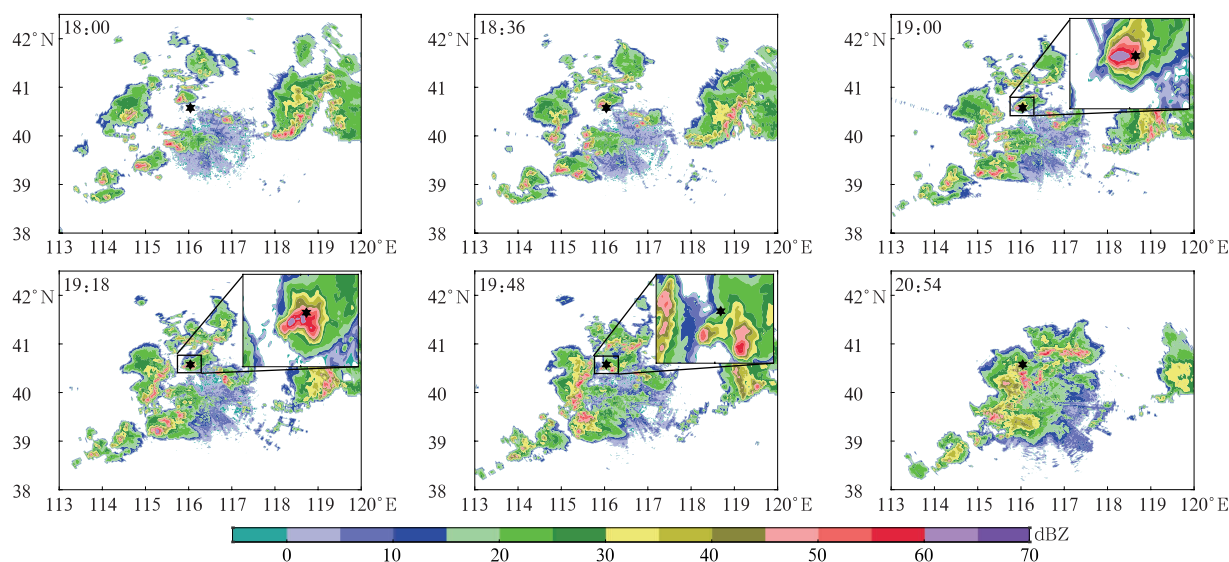


图4 2017年8月8日北京多单体对流系统的雷达组合反射率因子演变

(黑色六角形为降雹点)

Fig. 4 Radar composite reflectivity of a multi-cell convective system across Beijing on 8 Aug 2017

(the black six-pointed star indicates the hailfall position)

图5是这次过程雷暴强对流单体的识别结果,去掉组合反射率因子低于35 dBZ的部分,可更清晰地看到各个强对流单体发展情况。18:00—19:18北京周边地区存在多个分散的小对流单体,降雹单体(红色圈)从北京西北界外逐渐移入延庆区。

19:48原降雹单体分裂为两个小单体,且右边单体略强略大。左边小单体在20:12的雷达图中消散不见(图略)。截至20:54,右边单体的面积逐渐增大,同时其左侧的对流单体也逐渐增大。21:00降雹单体与其左侧的对流单体融合成一个更大的单体,表

明其生命期结束,闪电跃增算法停止计算。整体看, 18:00—21:00 北京及周边地区多个小对流单体逐渐融合发展成为 3 个较大的对流单体。

将前后 3 min 内 BLNET 定位得到的全闪数据叠加得到图 6。18:00 降雹单体内(蓝色圈)仅定位到 2 次正地闪,可能原因:一是雷暴单体较弱,产生

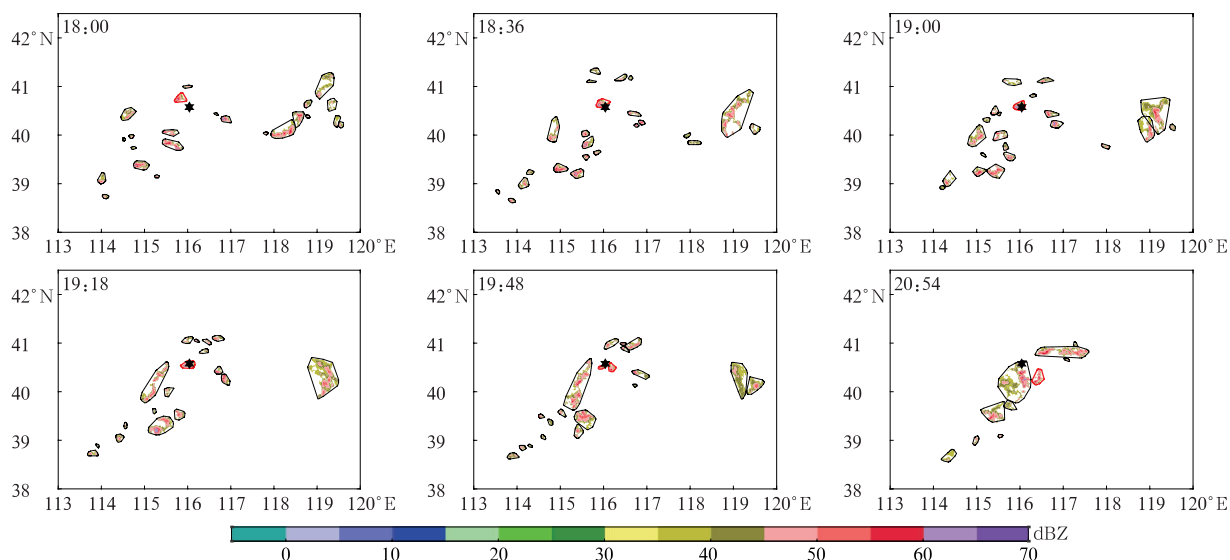


图 5 2017 年 8 月 8 日北京多单体对流系统识别结果

(红色圈为产生降雹的单体,黑色六角形为降雹点)

Fig. 5 Identification results of strong convection cells on 8 Aug 2017

(the red polygon marks the hail-producing convection cell, the black six-pointed star indicates the hailfall position)

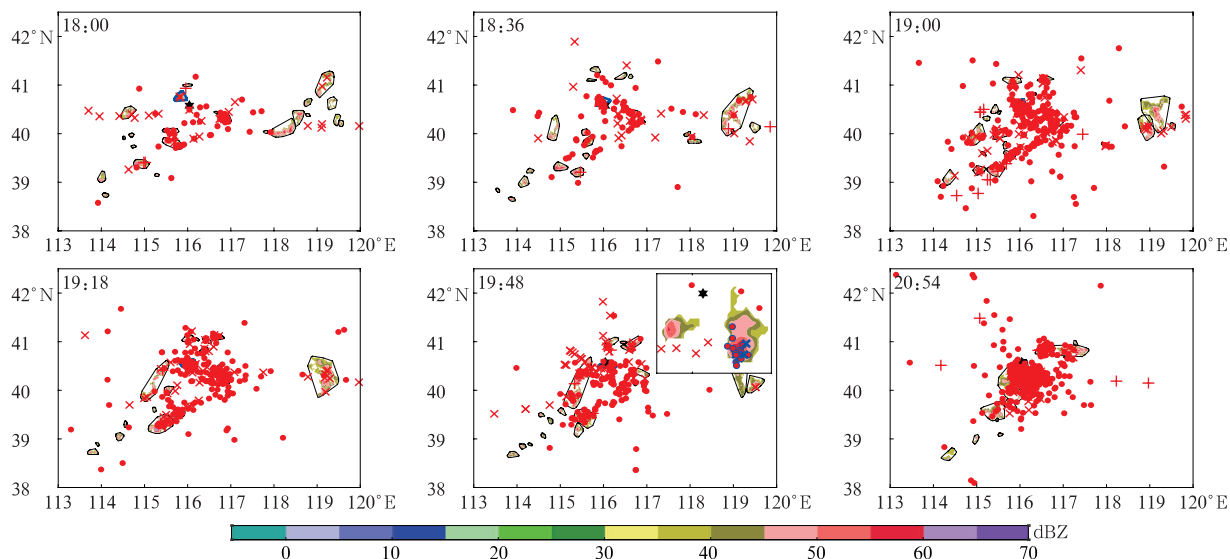


图 6 叠加前后 3 min 内总闪定位的 2017 年 8 月 8 日北京强对流单体识别结果

(红色圆点代表云闪,红色×表示负地闪,红色+表示正地闪;黑色六角形为降雹点,

19:48 图中插图为分裂单体与总闪定位结果叠加的放大图)

Fig. 6 Identified strong convection cells and the located total flashes in 3 min before and after the corresponding time

(the red dot indicates the intracloud flash, the red × indicates the negative cloud-to-ground flash and the red + indicates the positive cloud-to-ground flash, the black six-pointed star indicates the hailfall position, the illustration is an enlarged view of superposition of the split cell and the total flashes in the figure of 1948 BT)

的云闪也不够强;二是由于单体距离 BLNET 略远,只有较强的地闪才能被 BLNET 至少 3 个站点探测到并定位。随后降雹单体内的闪电数逐渐增加,18:33—18:39 共定位到 12 次闪电。18:57—19:03 北京地区闪电数明显增多,降雹单体内的总闪数量达到 67 次,包括 53 次云闪、7 次负地闪和 7 次正地闪。产生降雹前后,北京界内雷电活动仍较强,降雹

单体内闪电数降至 51 次。降雹单体分裂时,北京界内闪电活动依然较强。降雹单体与其左侧的大对流单体融合前,北京界内的闪电活动再次明显增强,降雹单体内闪电数增至 161 次,包括 149 次云闪和 12 次负地闪。

由图 7 总闪频数变化可以看到,18:45 前降雹单体内的总闪频数(黑色实线)一直维持在较低的水

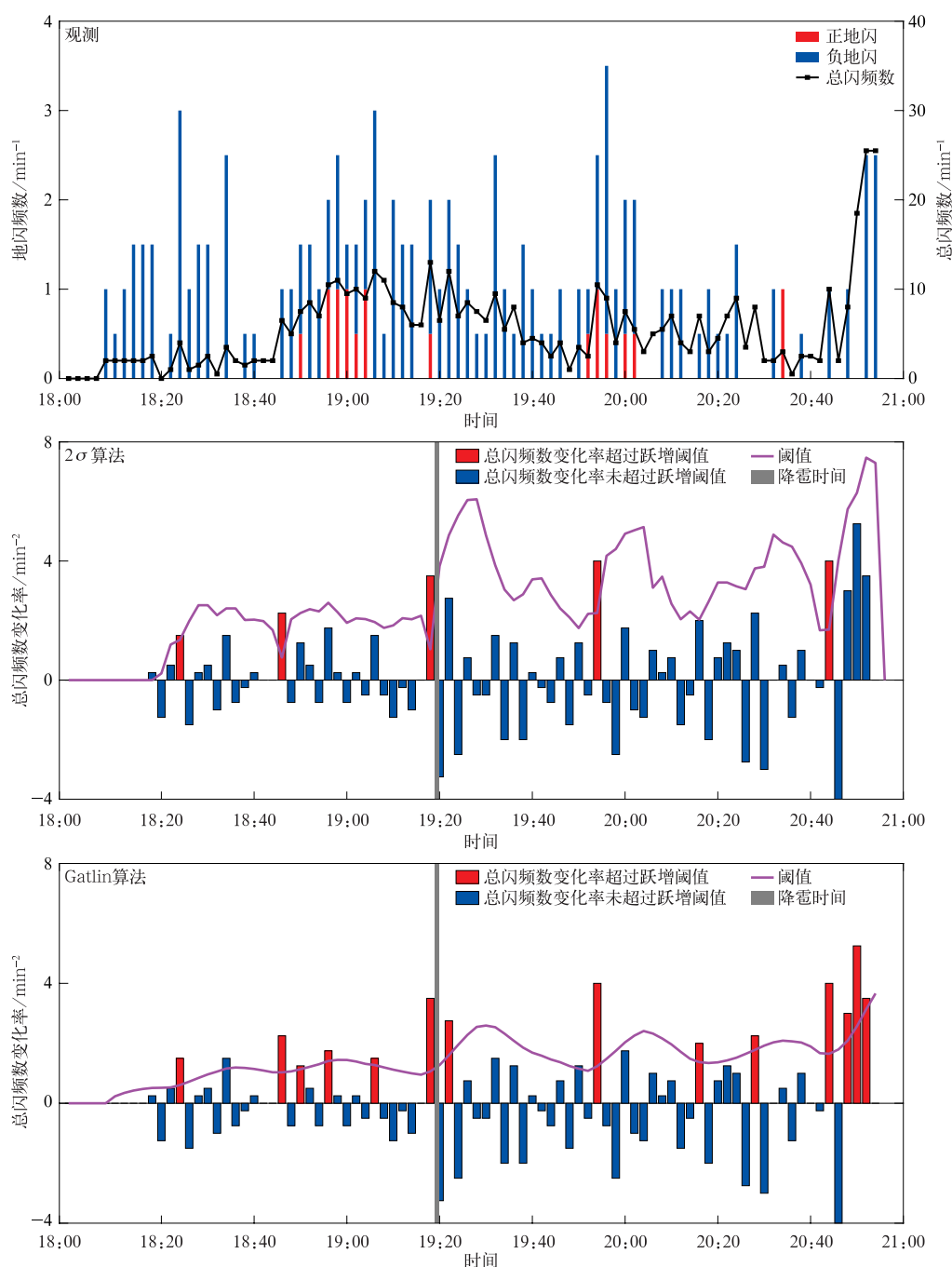


图 7 多单体对流系统降雹单体内的闪电频数变化和两种算法总闪频数变化率(柱状)和闪电跃增阈值(曲线)
Fig. 7 The lightning flash rate of the hail-producing cell of the multi-cell system and total flash rates(the columns) and jump thresholds(the pink curves) derived by 2 σ algorithm and Gatlin algorithm

平,不超过 4 min^{-1} ,而且其中的云地闪以负地闪(蓝色柱体)为主。之后,总闪频数迅速提升至 6.5 min^{-1} ,对应两种算法的 D 存在较大正值。随后总闪频数在 10 min^{-1} 附近波动。19:08—19:18 总闪频数逐渐下降,对应 D 为负值。19:19 总闪频数突然增大至 13 min^{-1} ,对应两种算法的 D 再次出现较大正值。降雹单体分裂后的 19:55,总闪频数突然增大, D 再一次出现局部峰值,且负地闪频数在 19:59 达到整个降雹单体生命期的峰值 3.5 min^{-1} 。在降雹单体与其左侧大对流单体融合之前,总闪频数猛增至 25.5 min^{-1} 。降雹单体生命期内正地闪频数(红色柱体)始终较低,为 1 min^{-1} ,甚至大部分时刻未能定位到正地闪。

图 7 中,Gatlin 算法使用权重滑动平均计算跃增阈值,其阈值曲线较 2σ 算法阈值曲线平滑。总闪频数超过算法启动阈值且 D 值超过跃增阈值的时刻就为闪电跃增的时刻(红色柱状)。降雹单体位于延庆区,总闪频数启动阈值为 4 min^{-1} 。 2σ 算法得到的闪电跃增时刻分别为 18:25,18:47,19:19,19:55 和 20:45。在降雹时间段 19:20—19:21 前,存在 3 次有效跃增时刻,取最早跃增时刻可得预警时间为 55 min;降雹之后有 2 次跃增时刻,均在北京界内,为 2 次虚警。Gatlin 算法阈值曲线较平滑,整体较低,所以闪电跃增的次数明显增多;降雹前后分别有 6 次和 8 次有效跃增,为 8 次虚警。其首个跃

增时刻也为 18:25,所以预警提前时间仍为 55 min。对于本次个例,两种算法都有效预警降雹事件,且预警提前时间一致,但 Gatlin 算法的虚警率较高,预警效果不如 2σ 算法。

2.2.2 飊线个例

2015 年 8 月 7 日北京界内发生 1 次飊线过程,共产生 6 次降雹事件。7 日 16:30 在朝阳区与昌平区交界处形成一个弱对流单体,直到 17:06,该单体持续增强,位置基本不变。此时该单体中心距离第 1 次降雹点约 14.6 km,其附近另有一个逐渐增强单体,二者于 17:12 合并为较大单体并迅速发展,17:42 在朝阳东湖地区产生第 1 次降雹,降雹点位于该单体边界。第 2 次降雹 18:00 开始,持续 6 min,昌平区香堂镇测得黄豆粒大小冰雹,降雹点也位于强对流单体边界。此时降雹单体较大较强,已初具飊线形状。随后该降雹单体继续发展,几乎覆盖北京中部地区,18:48 分裂成 3 个强对流单体,并在门头沟东山村降下黄豆粒大小冰雹,此为第 3 次降雹。3 个强对流单体于 18:54 再次合并成飊线并沿东南方向移动。朝阳区气象站 19:15—19:20 观测到直径约 1.5 cm 的冰雹,朝阳垡头街道 19:16—19:17 观测到冰雹,且这两次降雹均位于飊线移动方向前沿。随着飊线向东南方向移动,几乎覆盖北京四分之一的面积,19:58—20:01 在大兴区黄村镇降下黄豆粒大小冰雹。

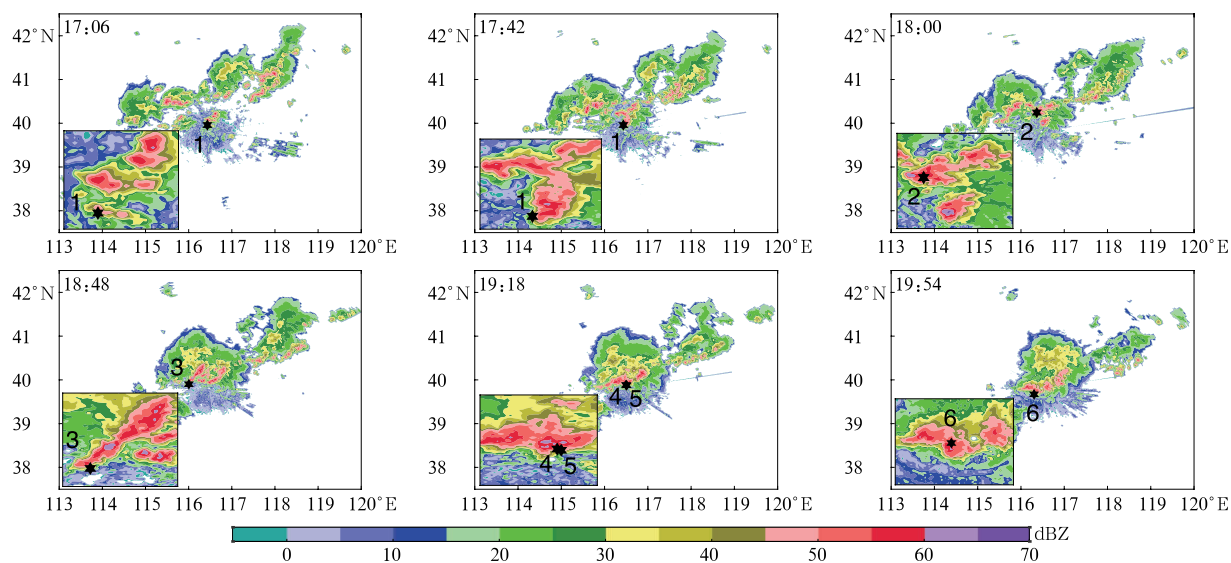


图 8 2015 年 8 月 7 日北京飊线过程的雷达组合反射率因子(黑色六角形为降雹点,数字代表降雹顺序)

Fig. 8 Radar composite reflectivity of a squall line across Beijing on 7 Aug 2015

(the black six-pointed star indicates the hailfall position, the number in each subgraph indicates the sequence of the hailfall events)

图9是此次飑线过程强对流单体识别结果。由图9可见,所有降雹点均位于强对流单体的前沿,这与文献[9, 35]对降雹位置的统计结果一致。17:06—18:48 多个单体在北京界内经过不断融合,

形成飑线锥形,19:18—19:54 强对流单体已发展成飑线。由于飑线过程闪电频数过多,因此未给出闪电叠加图。

图10表明,17:09开始降雹单体内总闪频数逐渐

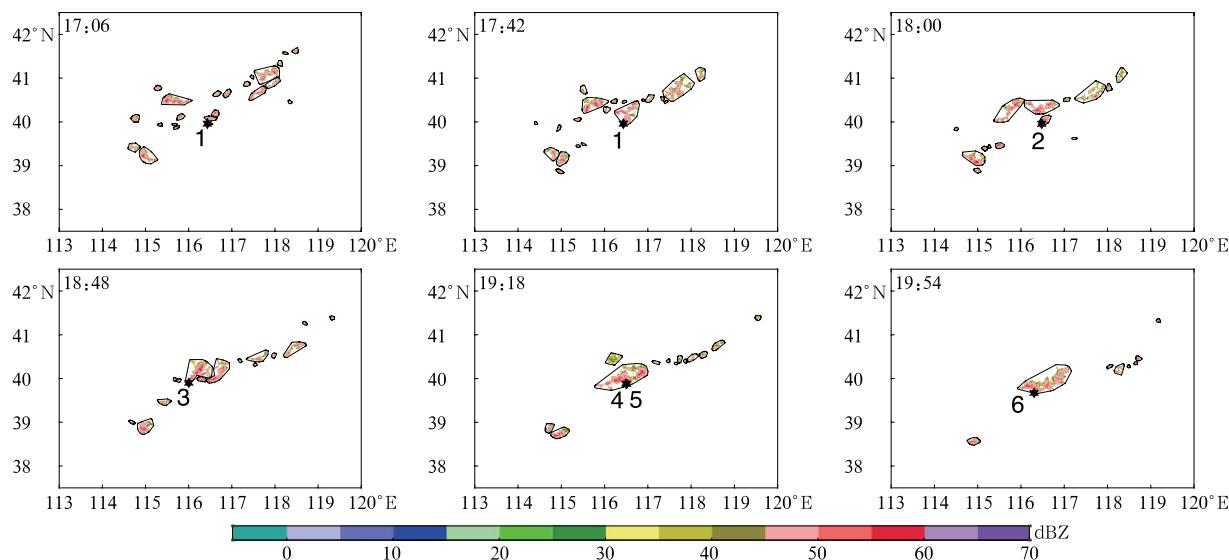


图9 飑线过程强对流单体识别结果(黑色六角形为降雹点,数字代表降雹顺序)

Fig. 9 Identification results of every strong convection cells during the squall line process

(the black six-pointed star indicates the hailfall position, the number indicates the sequence of the hailfall events)

增多,飑线形成时总闪频数达到顶峰 1113 min^{-1} ,之后总闪频数逐渐下降,20:15 总闪频数为 75.5 min^{-1} 。地闪频数峰值较总闪频数峰值出现晚,以负地闪为主。在雷暴消散期,正地闪占总地闪的比例达到峰值。

除第3次降雹位于门头沟区,启动阈值取

4 min^{-1} 外,其余冰雹个例的启动阈值均取 10 min^{-1} 。由图10可以看到,飑线中闪电频数极高,远超过算法的启动阈值。 2σ 算法的有效闪电跃增时刻和降雹时间段如表1所示。前5次降雹过程前1 h 均有闪电跃增现象,即5次命中,且降雹时刻前均有多次闪电跃增现象,同样选择最早的跃增时刻来计算预

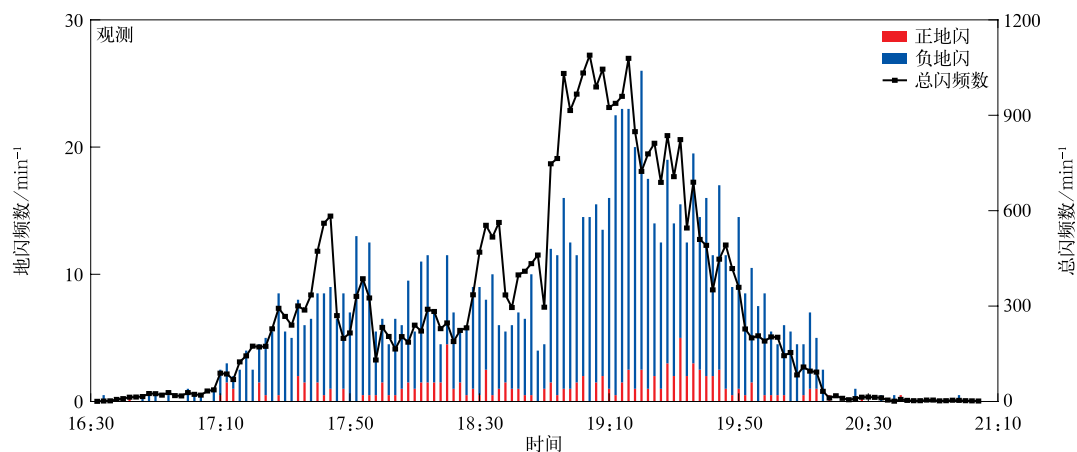
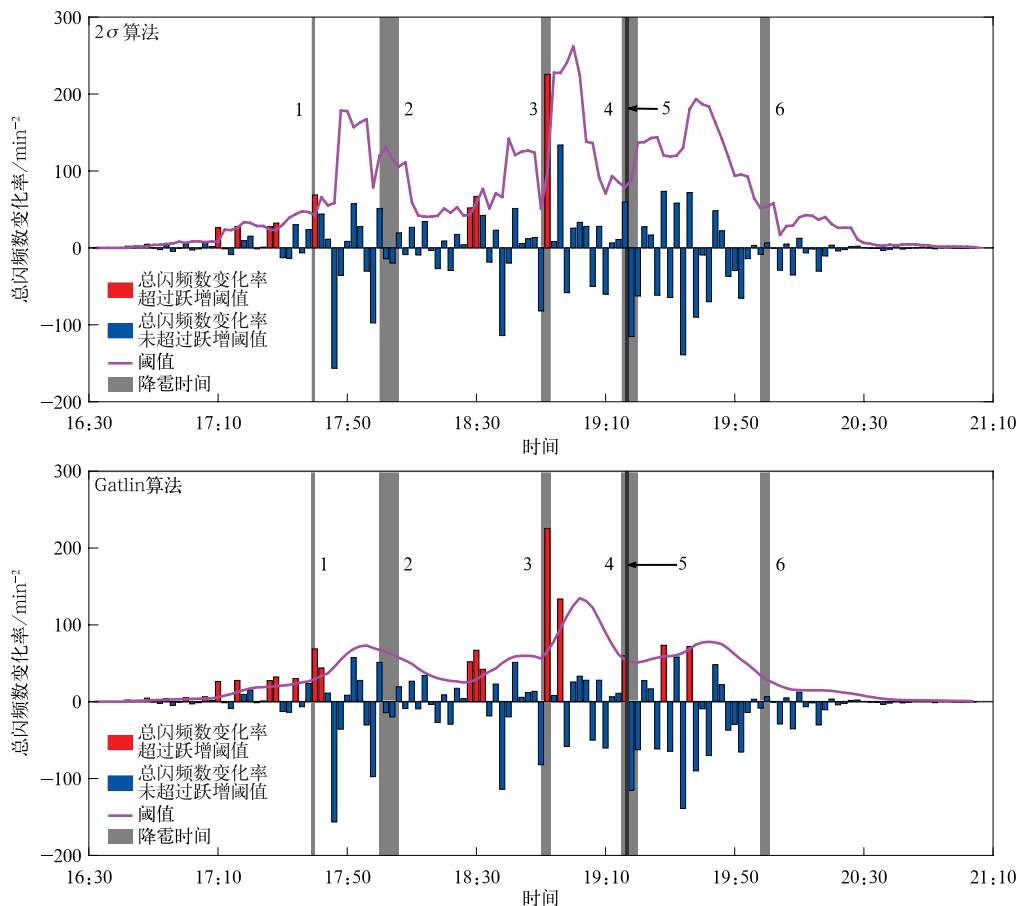


图10 飑线降雹单体内的闪电频数变化和两种算法总闪频数变化率(柱状)和闪电跃增阈值(曲线)

Fig. 10 The lightning flash rate of the hail-producing cell of the squall line system and total flash rates(the columns) and jump thresholds(the pink curves) derived by 2σ algorithm and Gatlin algorithm



续图 10

表 1 2015 年 8 月 7 日北京飑线过程的 2σ 算法闪电跃增信息Table 1 The lightning jump information of 2σ algorithm for a squall line process in Beijing on 7 Aug 2015

跃增时刻	降雹时刻	与首次跃增时刻相比得到的预警提前时间/min
16:42, 16:48	17:40—17:41	58
17:10, 17:16, 17:26, 17:28, 17:40	18:00—18:06	50
18:28	18:50—18:53	22
18:28, 18:30, 18:52	19:15—19:20	47
18:28, 18:30, 18:52	19:16—19:17	48
无	19:58—20:01	漏报

警的提前时间。第 1, 2, 4, 5 次降雹前的闪电跃增时刻较早, 因此提前时间均在 50 min 左右。第 3 次降雹与随后的两次降雹可共用一个闪电跃增时刻进行预警。值得注意的是, 第 6 次降雹产生在闪电频数减小的阶段, 2σ 算法的最后一次闪电跃增时刻为 18:52, 而降雹持续时间为 19:58—20:01, 间隔时间超过 60 min, 为 1 次漏报。

Gatlin 算法 ($N=6$) 有效闪电跃增时刻和降雹时间段如表 2 所示。由图 10 可以看到, 闪电跃增时

刻远多于 2σ 算法 (红色柱体多)。与 2σ 算法的结果相比, 第 1 次和第 3 次降雹的预警结果相同, 新增的 17:00 闪电跃增使得第 2 次降雹的预警时间提前至 60 min。由于第 3 次降雹后出现两次闪电跃增, 所以选择新的跃增时刻计算第 4 次和第 5 次降雹提前时间。值得注意的是, 与 2σ 算法的跃增阈值存在波峰不同, Gatlin 算法第 5 次降雹之后跃增阈值曲线处于较低值, 从而存在 19:28 和 19:36 两个时刻的跃增现象, 成功预警第 6 次降雹事件, 整个过程无漏

报。按 60 min 预报时效评估, 2σ 算法存在 1 次漏报, 因此本个例 Gatlin 算法 ($N=6$) 的预警命中率高, 预报效果略优于 2σ 算法。

表 2 2015 年 8 月 7 日北京界虬线过程的 Gatlin 算法闪电跃增信息

Table 2 The lightning jump information of Gatlin algorithm for a squall line process in Beijing on 7 Aug 2015

跃增时刻	降雹时刻	与首次跃增时刻相比得到的预警提前时间/min
16:42, 16:48, 16:54	17:40—17:41	58
17:00, 17:06, 17:10, 17:16, 17:26, 17:28, 17:34, 17:40, 17:42	18:00—18:06	60
18:28, 18:30, 18:32, 18:52	18:50—18:53	22
18:56, 19:16	19:15—19:20	19
18:56, 19:16	19:16—19:17	20
19:28, 19:36	19:58—20:01	30

3 结论与讨论

针对 2015—2018 年北京地区 177 例降雹事件, 本文对比分析取不同倍数阈值的 σ 算法和取不同总闪电频数变化率数量 N 的 Gatlin 算法的预警效果, 得到以下结论:

1) 2σ 算法和 Gatlin 算法 ($N=6$) 分别为各自算法的最优配置。以 1 h 内的预警效果评估, 2σ 算法的命中率、虚警率和临界成功指数分别为 80.2%, 41.6% 和 51.1%, Gatlin 算法 ($N=6$) 分别为 82.5%, 62.0% 和 35.2%。虽然 Gatlin 算法的命中率略高于 2σ 算法, 但其虚警率较高, 导致临界成功指数仅有 35.2%, 远低于 2σ 算法的 51.1%。

2) 两种闪电跃增最优算法配置在多单体雷暴过程和虬线过程的冰雹预警效果表明, Gatlin 算法的命中率等于或略高于 2σ 算法, 其虚警率高于 2σ 算法。

3) 综合 Gatlin 算法和 σ 算法对冰雹预警结果, 2σ 闪电跃增算法更适于对北京冰雹天气的预警。

尽管 2σ 的闪电跃增指标在实际应用中的 1 h 内降雹预报命中率达到 80.2%, 相较于当前业务化冰雹预警产品 70% 的命中率有较大提升, 但仍存在 41.6% 的虚警率。另外也发现一些闪电跃增现象出现在雷暴最后一次产生降雹过程之后。Xu 等^[36]利用三维总闪数据和雷达回波数据分析北京和天津强冰雹过程, 发现降雹前后均出现闪电跃增现象, 且降雹后闪电峰值比降雹前频数更大, 且两个个例动力和微物理过程差异很大: 北京雹暴在降雹后垂直对流增强, 从而降雹后闪电频数再次出现跃增, 主正电

荷区从雷暴中部上升至雷暴云上部; 天津雹暴是在降雹后下沉气流减弱的情况下, 小尺度带电冰粒子在中低层聚集形成高密度电荷区, 使闪电活动再次活跃起来, 因此尽管雹暴中均观测到闪电跃增现象, 但降雹前后闪电跃增形成的成因不同。此外, 在复杂地形条件下, 受站网布局限制, 闪电定位系统对闪电的探测效率未能均匀分布, 从站网外到站网内存在梯度。当雷暴从探测效率较低地区移至探测效率较高地区时也会导致闪电跃增现象。

本文基于闪电跃变特征与冰雹活动的关系, 在现有冰雹业务预报的基础上, 增加闪电跃增预警指标, 获取利用闪电资料进行冰雹预报的最优算法, 旨在将闪电跃变特征作为现有冰雹业务预警指标基础上提高冰雹预警能力的补充, 提升闪电资料在北京地区冰雹预报业务应用上的可用度。在闪电跃增算法方面, 下一步结合本文分析结果, 利用 Gatlin 算法 ($N=6$) 具有较高命中率和 2σ 算法具有较低虚警率的特点, 将二者融合使用以提高算法在预警冰雹天气的业务应用效果, 并结合人工智能技术, 通过机器学习建立闪电特征与冰雹预报的模型, 提升预报效果; 同时北京市气象局将要完成 11 部 X 波段双偏振天气雷达的架设, 未来可考虑利用该资料获取雹暴过程中对流系统内部的动力和相态结构, 研究闪电跃增的动力和微物理成因^[37-38]。在更精确地识别、判断雷暴单体活动基础上, 探索闪电数据预警冰雹活动方法, 以期提高冰雹预报的准确率和精细化预报水平。

致谢: 在本文完成过程中, 北京市气象台为本文提供了冰雹预警业务评估数据, 特此致谢!

参考文献

- [1] 王婷波,郑栋,周康辉,等.暴雨和雹暴个例中闪电特征对比.应用气象学报,2017,28(5):568-578.
Wang T B,Zheng D,Zhou K H,et al. Contrastive analysis of lightning characteristics between rainstorm case and hailstorm case. *J Appl Meteor Sci*,2017,28(5):568-578.
- [2] Goodman S J,Christian H J,Rust W D. A comparison of the optical pulse characteristics of intracloud and cloud-to-ground lightning as observed above clouds. *J Appl Meteorol*,1988,27(12):1369-1381.
- [3] Lang T J,Rutledge S A. One Severe Storm with Two Distinct Electrical Regimes During its Lifetime:Implications for Now-casting Severe Weather with Lightning Data//Proceedings of 1st Conference of Meteorological Applications of Lightning Data,San Diego,CA,2005.
- [4] McKinney C M,Carey L D,Patrick G R. Total lightning observations of supercells over north central Texas. *Electronic J Severe Storms Meteor*,2009,4(2):1-25.
- [5] Darden C B,Nadler D J,Carcione B C,et al. Utilizing total lightning information to diagnose convective trends. *Bull Amer Meteor Soc*,2010,91(2):167-175.
- [6] Rudlosky S D,Fuelberg H E. Documenting storm severity in the mid-Atlantic region using lightning and radar information. *Mon Wea Rev*,2013,141(9):3186-3202.
- [7] 朱君鉴,刁秀广,黄秀韶.一次冰雹风暴的 CINRAD/SA 产品分析.应用气象学报,2004,15(5):579-589.
Zhu J J,Diao X G,Huang X S. Study of CINRAD/SA products for a hail storm. *J Appl Meteor Sci*,2004,15(5):579-589.
- [8] 王瑾,刘黎平. WSR-88D 冰雹探测算法在贵州地区的评估检验.应用气象学报,2011,22(1):96-106.
Wang J,Liu L P. The evaluation of WSR-88D hail detection algorithm over Guizhou region. *J Appl Meteor Sci*,2011,22(1):96-106.
- [9] 张秉祥,李国翠,刘黎平,等.基于模糊逻辑的冰雹天气雷达识别算法.应用气象学报,2014,25(4):415-426.
Zhang B X,Li G C,Liu L P,et al. Identification method of hail weather based on fuzzy-logical principle. *J Appl Meteor Sci*,2014,25(4):415-426.
- [10] 石宝灵,王红艳,刘黎平.云南多普勒天气雷达网探测冰雹的覆盖能力.应用气象学报,2018,29(3):270-281.
Shi B L,Wang H Y,Liu L P. Coverage capacity of hail detection for Yunnan doppler weather radar network. *J Appl Meteor Sci*,2018,29(3):270-281.
- [11] Kane R J. Correlating lightning to severe local storms in the northeastern United States. *Wea Forecasting*,1991,6(1):3-12.
- [12] Williams E R,Boldi B,Matlin A,et al. The behavior of total lightning activity in severe Florida thunderstorms. *Atmos Res*,1999,51(3/4):245-265.
- [13] Metzger E,Nuss W A. The relationship between total cloud lightning behavior and radar-derived thunderstorm structure. *Wea Forecasting*,2010,28(1):237-253.
- [14] Goodman S J,Blakeslee T R,Christian H,et al. The North Alabama lightning mapping array:Recent severe storm observations and future prospects. *Atmos Res*,2005,76(1/2/3/4):423-437.
- [15] Schultz C J,Petersen W A,Carey L D. Preliminary development and evaluation of lightning jump algorithms for the real-time detection of severe weather. *J Appl Meteorol Climatol*,2009,48(12):2543-2563.
- [16] Wapler K. The life-cycle of hailstorms:Lightning, radar reflectivity and rotation characteristics. *Atmos Res*,2017,193:60-72.
- [17] 陈哲彰.冰雹与雷暴大风的云对地闪电特征.气象学报,1995,53(3):367-374.
Chen Z Z. The characteristics of lightning from clouds to ground accompanying with hailstones, thunderstorms and gusts. *Acta Meteor Sinica*,1995,53(3):367-374.
- [18] 周筠珩,张义军,郗秀书,等.陇东地区冰雹云系发展演变与其地闪的关系.高原气象,1999,18(2):236-244.
Zhou Y J,Zhang Y J,Qie X S,et al. The relationship between the variation of hail cloud system and its cloud to ground lightning in the east part of Gansu province. *Plateau Meteor*,1999,18(2):236-244.
- [19] 蔡晓云,宛霞,郭虎.北京地区闪电定位资料的应用分析.气象科技,2001,29(4):33-35.
Cai X Y,Wan X,Guo H. Application analysis of lightning location data in Beijing area. *Meteor Sci Technol*,2001,29(4):33-35.
- [20] 冯桂力,边道相,刘洪鹏,等.冰雹云形成发展与闪电演变特征分析.气象,2001,27(3):33-37.
Feng G L,Bian D X,Liu H P,et al. The evolution of hail cloud system and characterof its cloud to ground lightning. *Meteor Mon*,2001,27(3):33-37.
- [21] 冯桂力,郗秀书,袁铁,等.一次冷涡天气系统中雹暴过程的地闪特征分析.气象学报,2006,64(2):85-94.
Feng G L,Qie X S,Yuan T,et al. A case study of cloud-to-ground lightning activities in hailstorms under cold eddy synoptic situation. *Acta Meteor Sinica*,2006,64(2):85-94.
- [22] 冯桂力,郗秀书,吴书君.山东地区冰雹云的闪电活动特征.大气科学,2008,32(2):289-299.
Feng G L,Qie X S,Wu S J. Cloud-to-ground lightning characteristics of hail clouds in Shandong province. *Chin J Atmos Sci*,2008,32(2):289-299.
- [23] Liu D,Feng G,Wu S. The characteristics of cloud-to-ground lightning activity in hailstorms over northern China. *Atmos Res*,2009,91(2-4):459-465.
- [24] Gatlin P N. Severe Weather Precursors in the Lightning Activity of Tennessee Valley Thunderstorms. Department of Atmospheric Sciences,University of Alabama,2007.
- [25] Schultz C J,Petersen W A,Carey L D. Lightning and severe

- weather: A comparison between total and cloud-to-ground lightning trends. *Wea Forecasting*, 2011, 26(5): 744-755.
- [26] Yao W, Zhang Y, Meng Q, et al. A comparison of the characteristics of total and cloud-to-ground lightning activities in hailstorms. *Acta Meteor Sinica*, 2013, 27(2): 282-293.
- [27] Chronis T, Carey L D, Schultz C J, et al. Exploring lightning jump characteristics. *Wea Forecasting*, 2015, 30(1): 23-37.
- [28] Tian Y, Qie X S, Sun Y, et al. Total lightning signatures of thunderstorms and lightning jumps in hailfall nowcasting in the Beijing area. *Atmos Res*, 2019, 230: 104646.
- [29] 张文娟, 孟青, 吕伟涛, 等. 时间差闪电监测网的误差分析和布局优化. *应用气象学报*, 2009, 20(4): 402-410.
- Zhang W J, Meng Q, Lü W T, et al. Error analyses and network optimization for time-of-arrival lightning locating system. *J Appl Meteor Sci*, 2009, 20(4): 402-410.
- [30] Wang Y, Qie X S, Wang D F, et al. Beijing lightning network (BLNET) and the observation on preliminary breakdown processes. *Atmos Res*, 2016, 171: 121-132.
- [31] Srivastava A, Tian Y, Qie X S, et al. Performance assessment of Beijing Lightning Network (BLNET) and comparison with other lightning location networks across Beijing. *Atmos Res*, 2017, 197: 76-83.
- [32] Dixon M, Wiener G. TITAN: Thunderstorm identification, tracking, analysis, and nowcasting—A radar-based methodology. *J Atmos Ocean Technol*, 1993, 10(10): 785-797.
- [33] Schultz C J, Carey L D, Schultz E V, et al. Kinematic and microphysical significance of lightning jumps versus nonjump increases in total flash rate. *Wea Forecasting*, 2017, 32(1): 275-288.
- [34] Gatlin P N, Goodman S J. A total lightning trending algorithm to identify severe thunderstorms. *J Atmos Ocean Technol*, 2010, 27(1): 3-22.
- [35] 蓝渝, 郑永光, 毛冬艳, 等. 华北区域冰雹天气分型及云系特征. *应用气象学报*, 2014, 25(5): 538-549.
- Lan Y, Zheng Y G, Mao D Y, et al. Classification and satellite nephogram features of hail weather in North China. *J Appl Meteor Sci*, 2014, 25(5): 538-549.
- [36] Xu S, Zheng D, Wang Y, et al. Characteristics of the two active stages of lightning activity in two hailstorms. *J Meteor Res*, 2016, 30(2): 265-281.
- [37] 胡胜, 罗聪, 张羽, 等. 广东大冰雹风暴单体的多普勒天气雷达特征. *应用气象学报*, 2015, 26(1): 57-65.
- Hu S, Luo C, Zhang Y, et al. Doppler radar features of severe hailstorms in Guangdong Province. *J Appl Meteor Sci*, 2015, 26(1): 57-65.
- [38] 刘泽, 郭凤霞, 郑栋, 等. 一次暖云强降水主导的对流单体闪电活动特征. *应用气象学报*, 2020, 31(2): 185-196.
- Liu Z, Guo F X, Zheng D, et al. Lightning activities in a convection cell dominated by heavy warm cloud precipitation. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(2): 185-196.

Comparison of the Performance of Different Lightning Jump Algorithms in Beijing

Tian Ye¹⁾²⁾ Yao Wen³⁾ Yin Jiali¹⁾ Qie Xiushu⁴⁾ Cao Haiwei¹⁾

Li Jin¹⁾ Yuan Shanfeng⁴⁾ Wang Dongfang⁴⁾

¹⁾ (Beijing Meteorological Observation Center, Beijing 100089)

²⁾ (Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089)

³⁾ (State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

⁴⁾ (Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation (LAGEO),
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract

Based on S-band Doppler weather radar raw data, the total lightning location data of Beijing Lightning Network (BLNET) and hailfall reports from Beijing Meteorological Service, two lightning jump algorithms, Gatlin algorithm and σ algorithm, with different configurations are compared and analyzed for early warning performance of 177 hailfall events in Beijing from 2015 to 2018. The results show that, the early warnings of different multiples of σ algorithm are quite different, 2σ (in this situation, the current changing rate of total flash exceeds two times of the standard deviation of total flash rate in previous time) has the best performance in the σ algorithm. That is to say, 2σ algorithm has the highest probability of detection (POD) and critical success index (CSI), as well as the lowest false alarm rate (FAR), comparing with σ , 3σ and 4σ algorithms. The early warnings of Gatlin algorithm under different N (which is the amount of samples before current time used to calculate the mean and standard deviation) configurations have little difference, and the early warning efficiency is best when $N=6$, comparing with $N=7, 8, 9$ and 10 . The POD, FAR and CSI of 2σ algorithm are 80.2%, 41.6%, and 51.1%, respectively. The corresponding results of the Gatlin algorithm with $N=6$ are 82.5%, 62.0%, and 35.2%, respectively. In addition, the applications of these two algorithms to a multi-cell thunderstorm process and a squall line process are analyzed in detail. The results also show that Gatlin algorithm with $N=6$ has a slightly higher POD than 2σ algorithm, but its FAR is much higher and its CSI is lower. Considering the evaluation of hail nowcast results by Gatlin algorithm and 2σ algorithm, 2σ lightning jump algorithm is more suitable for hail nowcasting in Beijing. And it is beneficial to improving the application of lightning data to hail nowcasting in Beijing.

Key words: lightning jump; hail; early warning; 2σ algorithm; strong convection