苟阿宁,吴翠红,袁延得,等,2022. 基于雷达参量的湖北地闪预警方法及效果检验[J]. 气象,48(7):878-890. Gou A N, Wu C H, Yuan Y D, et al, 2022. Early-warning method and effect test of cloud-to-ground lighting using Doppler radar data parameters in Hubei Province[J]. Meteor Mon, 48(7):878-890(in Chinese).

# 基于雷达参量的湖北地闪预警方法及效果检验*

苟阿宁[1,2] 吴翠红[2] 袁延得[3] 冷 亮[1] 朱传林[4] 韩芳蓉[2] 吴 涛[2]

1 中国气象局武汉暴雨研究所,武汉 430205
2 武汉中心气象台,武汉 430074
3 青海省气象灾害防御技术中心,西宁 810001
4 湖北省防雷中心,武汉 430074

**提 要:** 利用天气雷达、探空资料,采用成熟的雷暴识别外推技术,比较有、无地闪活动时的概率密度分布和隶属度特征差异,提取雷达参量,采用模糊逻辑原理建立临近 1 h 地闪预警方法。分析表明,-25~-10℃高度层最大反射率因子(REF)和回波顶高是湖北地闪预警的最佳因子,尤以 $REF_{-15℃}$、$REF_{-20℃}$ 和 $REF_{-25℃}$ 表现最佳,$REF_{-10℃}$ 效果次之,垂直积分液态含水量对雷电指示意义较小,根据不同因子贡献不同给与了不等权重分配,并通过雷电样本阈值分布规律,采用动态权重系数进行细化,实现了地闪未来 1 h 的临近落区预报。利用每 6 min 滚动预报未来 1 h(6 min 间隔)的临近预报结果和实况进行 1 km 网格点对点综合评分,30 min 击中率(POD)可达 50%以上,临界成功指数(CSI)为 30%左右,POD 和 CSI 随预报时效缓慢降低。通过个例预报检验,发现该预报方法在大范围雷暴天气预报评分较高,而局地对流的预报评分偏低。该研究说明基于雷达参量的模糊逻辑地闪预警方法基本合理可靠,可用于湖北雷电短时临近自动预报预警及决策服务。

**关键词:** 地闪,临近预报,模糊逻辑,决策服务

**中图分类号:** P412,P427 **文献标志码:** A **DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.031001

# Early-Warning Method and Effect Test of Cloud-to-Ground Lighting Using Doppler Radar Data Parameters in Hubei Province

GOU Aning[1,2] WU Cuihong[2] YUAN Yande[3] LENG Liang[1]
ZHU Chuanlin[4] HAN Fangrong[2] WU Tao[2]

1 Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430205
2 Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074
3 Qinghai Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Xining 810001
4 Hubei Lightning Protection Centre, Wuhan 430074

**Abstract:** Based on the weather radar and radiosonde data, a widely used thunderstorm identification and extrapolation algorithm is used in this paper to compare the characteristic difference of probability frequency and membership for thunderstorms with or without cloud-to-ground (CG) lightning activity, and a one-hour warning method is established on the principle of fuzzy logic by extracting the radar parameters. The analysis results show that the maximum radar reflectivities in the -25℃ to -10℃ layer and at the height

* 国家自然科学基金项目(41620104009)、2019 年湖北省气象局研究型业务发展专项(2019YJ01-1)和中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室 2021 年开放课题(2021LASW-B03)共同资助
2021 年 5 月 24 日收稿; 2021 年 12 月 27 日收修定稿
作者简介:苟阿宁,主要从事雷电预报预警技术方法研究. E-mail:aning0770@163.com
通讯作者:吴翠红,主要从事中尺度分析和强对流预报研究. E-mail:wuch_wh@yeah.net

of echo top (ET) are the best factors for CG warning in Hubei Province. In particular, $REF_{-15℃}$, $REF_{-20℃}$ and $REF_{-25℃}$ have the best performance, followed by $REF_{-10℃}$. By contrast, vertically integrated liquid is less indicative of lightning activity. Thus, according to the different contributions of these factors, the unequal weight distribution is given, and the dynamic weight coefficient is used to finally achieve the location forecast of CG lightning in the future one hour. In addition, the 1 km grid point-to-point verification is performed by using the 1 h (6 min interval) nowcasts and in-site observations, and the results indicate that the probability of detection (POD) can reach more than 50% in 30 min, and the critical success index (CSI) is about 30%. However, POD and CSI decrease slowly with the increasing lead time of forecasts. Through the test of individual forecast case, it is found that this method is more suitable for the large-scale thunderstorm system, but relatively poor for local convective system. This finding illustrates that the fuzzy logic CG lightning warning method based on radar parameters is reasonable and reliable, and can be used for automatic warning and decision-making service in Hubei Province.

**Key words**: cloud-to-ground lighting (CG), nowcasting, fuzzy logic algorithm, decision-making service

## 引　言

雷暴泛指深厚湿对流(deep moisture convection,DMC)(Doswell Ⅲ,2001),可以伴有雷电,也可以没有雷电活动,王秀明等(2014)则认为雷暴伴有测站"闻雷"。雷电放电过程中,呈现出电磁效应、热效应以及机械效应,对于人员生命、建筑物和电器设备有很大的危害性。能否及时在雷电发生之前进行精准预警,提前做好防护,对于防雷减灾工作的开展和确保社会安全生产具有十分重要的意义。雷达能较好地观测云中粒子的一些宏观特征,其时空分辨率高、实时性强,且已有比较成熟的算法和各类产品,可以用来预警雷电。早在 20 世纪 40 年代,Workman and Reynolds(1949)、Laksen and Stansbury(1974)、Marshall and Radhakant(1978)、Dye et al(1986;1989)和 Goodman et al(1988)发现混合相态粒子与起电有着紧密联系,利用雷达数据推断不同环境高度的等温层可能存在多种混合相态粒子,并通过不同高度的雷达反射率值来预报雷电,这一发现对使用雷达数据进行雷电临近预报起到重要的启示作用。随后,Buechler and Goodman(1990)、Michimoto(1991)、Hondl and Eilts(1994)、Gremillion and Orville(1999)、Vincent et al(2005)、Clements and Orville(2008)尝试使用温度层结高度结合雷达回波强度进行雷电预报研究,并通过效果检验发现,−10℃等温层结合 40 dBz 是 CSI(critical success index)评分较高的关键影响因子。与此同时,Watson et al(1995)使用雷达其他导出参数,如垂直积分液态含水量(vertically integrated liquid,VIL)预报雷电,认为雷电和 VIL 在 1～15 kg·m$^{-2}$对应较好,但随着 VIL 值的增加,雷电的发生有了很大的分散性,并总结出 VIL 不能单独用于预报雷电(Watson et al,1995;MacGorman et al,2007),以上研究成果表明雷达资料对雷电临近预报技术的快速发展起到了很好的促进作用。

国内学者针对不同区域雷暴系统的雷达回波特征进行分析,找出大量的雷电临近预警指标。比如华北地区的闪电多发生在 30 dBz 强回波高度超过−10℃的时段内(张义军等,1995),飑线系统 6 min 地闪频数和雷达回波顶高有很好的对应关系等(易笑园等,2009),王飞等(2008)、石玉恒等(2012)利用全闪资料通过大量个例分析得出了北京地区的雷电预警雷达回波特征参量。华中地区,罗树如等(2005)认为江西对流初生发展阶段正地闪多于成熟和消亡阶段,而负地闪集中在成熟阶段;孙凌等(2012)则从地闪频数指数入手,提出了湖南地区地闪活动等级预报诊断指标。华东地区,江苏 40 dBz 回波高度突破−10℃温度层结高度的时间提前于第一次地闪(钟颖颖等,2012),而山东地闪主要集中发生在 6 km 高度上雷达回波≥35 dBz 的区域(吴学珂等,2013)。以上研究对中国地区的雷电预警特征有了更深入的发现,诸如此类的研究成果为雷达资料应用于雷电临近预报奠定了良好的基础。香港天文台(Li and Lau,2008)使用雷达外推技术,建立了雷电群临近外推预报系统(Short-range Warnings of Intensity Rainstorm in Localized System,SWIRLS)。吕伟涛等(2009)将雷达作为主要工具,

研发了重点区域雷电临近预警系统(Lightning Nowcasting and Warning System,CAMS_LNWS)。中央气象台基于闪电资料的雷暴单体识别和追踪等实时监测和外推预报技术,与相关省市等联合开发了灾害性天气短时临近预报业务系统(Severe Weather Alarm and Nowcasting,SWAN)(郑永光等,2010;韩丰和沃伟峰,2018;俞小鼎和郑永光,2020)。武汉中心气象台已利用数值模式预报资料,开发建立了湖北雷电潜势预报系统并投入业务运行,12 h间隔 TS(threat score)检验评分可达 70%以上,但临近预报仍依赖于单一的雷达反射率客观外推预报产品,预报效果有待提高。现有研究也表明不同地区受天气气候、地理环境影响,基于雷达参量的雷电预警指标不尽相同,需要明确本地化的特征。如何选择适合武汉及周边地区的雷达特征定量化指标,明确合理的雷电预警方案,还缺乏系统性的研究。

要解决这些问题,开展观测研究,包含大量历史个例的统计分析、算法选取和预警效果检验显得尤为重要。基于以上原因,本文应用新一代多普勒天气雷达和二维地闪观测资料,对湖北中东部 2013—2018 年 90 次雷暴个例开展分析研究,其中 2013—2015 年 62 次雷暴个例作为分析统计样本,2016—2018 年 28 次个例进行预报效果检验。首先将雷达基数据从极坐标转换为直角坐标数据,进而使用 SCIT(storm cell identification and tracking)算法多阈值识别思路(Johnson et al,1998)对有地闪和无地闪活动时的雷达特征量进行提取,主要包含 0℃等温层以上最大反射率因子(REF)、回波顶高(ET)和 VIL 等 9 组雷达参数,通过分析比较有、无地闪活动时的雷达参量概率密度函数和隶属度特征差异,选取预警因子,采用模糊逻辑原理建立未来 1 h 地闪预警方法。最后通过点对点评分检验,证明这种预报方法在湖北中东部是切实可行的,可为湖北雷电临近预警方法研究以及防雷减灾提供重要的技术支撑。

# 1 资 料

文中使用湖北 2013—2018 年雷电高发季节 6—8 月的雷暴个例作为研究对象。雷达资料采用武汉新一代多普勒天气雷达 CINRAD-SA(图 1)的基数据,将极坐标转换成直角坐标,包含反射率因子、径向速度、回波顶高和垂直积分液态含水量等产品,其中反射率因子水平分辨率为 0.01°×0.01°,高度垂直分辨率为 1 km,时间分辨率为 6 min。闪电数据为湖北省 ADTD(advanced TOA and direction system)二维地闪定位系统监测数据(图 1),采用时差法和定向时差联合法进行闪电定位,共 13 个探测子站,能探测正、负地闪,包含经纬度、发生时间、强度、陡度等参数,网内定位精度小于 500 m,时间精度为0.1 μs,整体探测效率超过 80%,剔除了可能由云闪造成的 15 kA 以下的正地闪及定位误差导致的 300 kA 以上的大电流异常数据。使用武汉站每日 08 时和 20 时(北京时,下同)的探空资料提取不同等温层高度。另外,使用了湖北省民政灾情资料,包含强对流灾害性天气的类型、发生时间、涉及范围、影响程度及价值评估等,进一步对雷暴个例中的强对流类型进行细化。

# 2 个例选取和方法

## 2.1 雷暴个例选取

考虑到 2013 年之后取消雷暴人工观测,为保证样本丰富,综合利用常规气象观测、雷达回波、二维闪电定位观测(本文中的闪电统一指地闪的回击位置及相关属性,下同)和民政灾情等资料进行雷暴个例筛选。雷暴个例选取原则:(1)整个雷暴生命期至

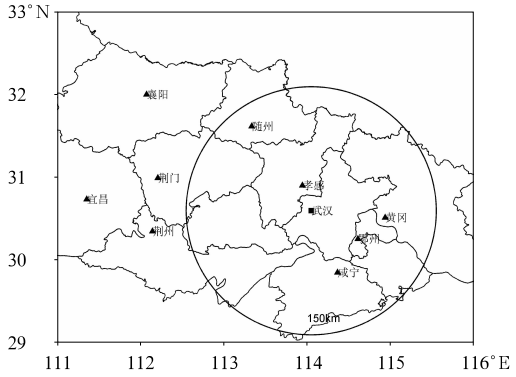



图 1 武汉新一代多普勒天气雷达半径 150 km 探测范围(黑色圆圈)和二维闪电定位仪站点分布("■"为武汉雷达位置,"▲"为二维地闪探测仪分布位置)

Fig. 1 Radarscope of Wuhan Radar out to the radius of 150 km range (black circle) and 2-dimansional lightning locator station (■: Wuhan Doppler Weather Radar, ▲: cloud-to-ground lightning detector station)

少监测到 3 个及以上地闪发生;(2)雷暴过程伴有任意尺寸冰雹观测记录、自动站 8 级以上(≥17.2 m·s$^{-1}$)瞬时大风、测站闻雷清楚(距离测站半径 50 km 范围、时间间隔小于 1 h,ADTD 观测到 10 次以上的地闪)、≥30 mm·h$^{-1}$的短时强降水等任意一种以上的强对流天气,满足以上两个条件的雷暴过程定义为一次雷暴个例。对于出现多种强对流现象的个例,按照冰雹、大风、闻雷、短时强降水的等级顺序,判定为一次雷暴个例。为了保证数据的有效性和个例的普适性,研究样本控制在以武汉雷达为中心半径 150 km 范围内。按照以上选取标准,共选出 2013—2018 年夏季 6—8 月 90 次雷暴个例作为研究对象,详见表 1。

**表 1　2013—2018 年 90 次雷暴个例特征(单位:个)**

**Table 1　Identified characteristics of 90 thunderstorm cases from 2013 to 2018 (unit: number)**

| 年份 | 冰雹 | 8 级以上的大风 | 测站闻雷清楚 | 短时强降水 |
|---|---|---|---|---|
| 2013 | 2 | 1 | 2 | 13 |
| 2014 | 1 | 3 | 8 | 12 |
| 2015 | 1 | 5 | 3 | 11 |
| 2016 | 0 | 2 | 1 | 9 |
| 2017 | 1 | 2 | 3 | 5 |
| 2018 | 1 | 1 | 1 | 2 |

### 2.2　雷暴单体识别算法

使用反射率因子强度及面积阈值,采用空间连续性原则识别雷暴三维结构,用椭圆拟合雷暴外形并计算特征量。在识别过程中,为分割相互粘连的多个雷暴,本文借鉴 WSR-88D 系统 SCIT 算法多阈值法提取雷暴核思路(Johnson et al,1998),使用二级阈值,初始最大反射率因子强度阈值是 25 dBz,在此基础上使用第二级最大反射率因子强度阈值(默认为40 dBz)。对所有雷暴体的水平投影面(即组合反射率)进行雷暴面的二次识别,如在某一个雷暴体投影面中识别出多个雷暴中心,且每一个满足一定的面积阈值,则判别该雷暴体为多核雷暴,使用子雷暴投影面对组成整个雷暴体的雷暴段在垂直方向进行分割,由分割后的雷暴段重新构成各子雷暴,具体参数详见表 2。

### 2.3　雷暴单体和闪电相关性的判定

针对每个体扫阶段的雷达数据,进行 SCIT 雷暴单体识别,获得初生到消亡阶段所有单体,并获得所有单体的时间和空间信息。和雷达体扫时间保持一致,将雷达开始体扫时间 6 min 单体区域内是否有地闪回击监测数据作为地闪实况,对 SCIT 所有识别出来的单体根据时间和空间信息与相应时段内的地闪数据进行匹配。若地闪回击位置发生在单体中,则认为该单体是有地闪的雷暴单体样本,否则为无地闪的雷暴单体样本,分别统计有地闪单体和无地闪单体对应的雷达各特征参量最大值。当两个或以上的单体存在时,用单体几何中心和地闪的距离来判断,取距离和时间间隔最近的单体作为地闪归属对象。

**表 2　雷暴单体识别方法**

**Table 2　Identification method of thunderstorm cells**

| 序号 | 雷暴识别参数 | 阈值 |
|---|---|---|
| 1 | 初始最大反射率因子阈值/dBz | 25 |
| 2 | 初始最大反射率因子体积/km$^3$ | 100 |
| 3 | 初始最大反射率因子 VIL/(kg·m$^{-2}$) | 2.0 |
| 4 | 高度层数/层 | 24 |
| 5 | 高度分辨率/km | 1.0 |
| 6 | 雷暴段最小长度/km | 2 |
| 7 | 雷暴面的最小面积/km$^2$ | 5 |
| 8 | 组成雷暴的最小高度层数/层 | 1 |
| 9 | 雷暴段重叠的最小长度/km | 2 |
| 10 | 垂直分层最高高度/km | 20.0 |
| 11 | 垂直分层最低高度/km | 1.0 |
| 12 | 垂直分层高度分辨率/km | 1.0 |
| 13 | 第二级最大反射率因子阈值/dBz | 40 |
| 14 | 第二级最大反射率因子区域最小面积/km$^2$ | 50.0 |
| 15 | 第二级最大反射率因子区域所占最小比例/% | 10 |

## 3　雷达与地闪的相关性研究

### 3.1　地闪的雷达指示因子

电荷中心的位置与温度垂直分布有关,其主要的负电荷中心位于－25～－5℃混合相态层(Mason,1953;Moore and Vonnegut,1977;Jayaratne,2003),故本文选取的地闪雷达指示因子主要有:0℃高度层以上不同等温层最大反射率因子及 0℃高度层以上最强回波所在高度、回波顶高、不同高度垂直积分液态含水量等。经过不同高度、不同强度等级筛选,共 9 组、65 个雷达参数(表 3)进行统计分析。统计结果显示,2013—2015 年 62 次雷暴个例共识别出 42025个单体,将是否发生地闪作为因变量,6 min 为一个时间样本,统计发生有地闪活动的样本为 26122 个、无地闪活动的样本为 15903 个。

表3 地闪活动时的雷达指示因子

Table 3 Radar parameters in case of cloud-to-ground lightning

| 序号 | 雷达参量 | 初选阈值 |
|---|---|---|
| 1 | −10℃、−15℃、−20℃、−25℃高度层最大反射率因子($REF_{-10℃}$、$REF_{-15℃}$、$REF_{-20℃}$、$REF_{-25℃}$)/dBz | 20、25、30、35、40、45、50 |
| 2 | 0℃高度层最大反射率因子/dBz | 30、35、40、45、50、55 |
| 3 | 0℃高度层最大反射率因子所在高度/km | 4.5、5.0、5.5、6.0、6.5、7.0 |
| 4 | 回波顶高(ET)/km | 6、7、8、9、10、11、12、13、14 |
| 5 | 海平面至18.3 dBz回波最大高度VIL/(kg·m$^{-2}$) | 5、10、15、20、25、30、35、40 |
| 6 | 0℃高度层至18.3 dBz回波最大高度VIL/(kg·m$^{-2}$) | 5、10、15、20、25、30、35、40 |

### 3.2 预警因子提取方法

概率密度函数数学上描述的是一个连续随机变量的输出值,必须有确定的有界区间,对区间积分形成的面积就是事件在这个区间的概率,常以 $f(x)$表示,$0\leqslant f(x)\leqslant 1$。而概率分布函数 $F(x)$则是给出取值小于某个值的概率,$\mathrm{d}F(x)/\mathrm{d}x=f(x)$。隶属度采用周康辉等(2017)的方法,通过得到有地闪的概率分布函数 $F_Y(x)$和无地闪的概率分布函数 $F_N(x)$,计算隶属度 $MF(x)$,即:

$$MF(x)=\frac{F_Y(x)}{F_Y(x)+F_N(x)} \tag{1}$$

地闪实况作为评判是否发生雷电的标准,有地闪为1,无地闪则为0,统计表3中每一个雷暴单体的雷达参量,计算有、无地闪的概率密度函数,通过比较两者重叠面积的大小选取最佳预报因子和阈值,再利用隶属度,将其转化为无量纲的可能性预报因子场。

#### 3.2.1 不同等温层最大反射率因子(REF)

混合相态层中霰粒与冰晶发生碰撞导致正负电荷的产生,同时两者也是正负电荷的载体,是雷暴闪电的基本要素。−25～−5℃等温层是雷暴起电的主要区域,蕴含大量湿软雹及充沛过冷水。从−10、−15、−20和−25℃高度层附近的最大反射率因子$REF_{-10℃}$、$REF_{-15℃}$、$REF_{-20℃}$、$REF_{-25℃}$的概率密度分布和隶属度特征差异(图2)发现,$REF_{-15℃}$、$REF_{-20℃}$和$REF_{-25℃}$对地闪有很好的区分度,重叠面积分别为0.336、0.306和0.284,有、无地闪活动时的区分度较高。有地闪活动时样本的$REF_{-15℃}$、$REF_{-20℃}$、$REF_{-25℃}$主要分布在概率密度超过38、35和31 dBz,峰值为45、40和38 dBz的区间范围内,隶属度显示此阈值区间出现地闪的概率可达到0.6以上,而无地闪活动时样本的概率密度峰值仅为30、26和22 dBz,可作为地闪预警的重要参量。$REF_{-10℃}$重叠面积稍大,为0.362,且有、无地闪活动时样本的峰值较为接近,对地闪能否发生的区分度稍差,故选取$REF_{-15℃}$、$REF_{-20℃}$和$REF_{-25℃}$作为临近预警因子。

#### 3.2.2 雷达回波垂直积分液态含水量(VIL)

VIL表示积云内有充足的云水,有利于云冰、软雹形成和结淞,从而产生闪电,表现为较强的VIL,该特征量为垂直高度的积分量,可整体反映雷暴内部粒子聚集程度。图3中有地闪活动时样本峰值出现在海平面至18.3 dBz回波最大高度的VIL约为15～20 kg·m$^{-2}$的附近,隶属度为0.6,无地闪活动时样本则为5 kg·m$^{-2}$,大部分有地闪活动的样本发生在$VIL\approx$10～30 kg·m$^{-2}$的峰值区间,重叠面积为0.398(图3a,3b)。0℃等温线至18.3 dBz回波最大高度的VIL(图3c,3d)有、无地闪活动时的峰值都在5 kg·m$^{-2}$左右,重叠面积为0.367,10 kg·m$^{-2}$以下的VIL几乎没有任何区分度。两种VIL有、无地闪活动时的重叠面积稍大,峰值较为接近,综合考虑VIL对地闪活动的识别能力稍稍偏弱。由于ADTD资料只能观测地闪的接地位置,而非起电位置,接地位置上空很可能并不是主要的起电区,放电区域上空的VIL与起电区的VIL会存在差异,有可能导致地闪位置上空的VIL与地闪活动相关性偏弱。

#### 3.2.3 雷达回波18.3 dBz回波顶高(ET)

较高的ET暗示有强大的上升气流,上升气流将较轻带电粒子带到高层,导致过冷水区域正负电荷粒子垂直分离,电荷在不同高度聚集而形成不同极性的净电荷层,激发闪电。因此产生闪电时,雷暴内部应具备较强上升运动,在实际雷达观测中反映为较强的回波上升到一定高度之上。从图4a中ET

概率密度函数的分布来看,有地闪活动时样本峰值在 17 km 左右,隶属度(图 4b)在 0.8 以上,无地闪活动时的样本峰值在 8 km,之后随着 ET 增大,无地闪样本数量迅速较少,ET 逐渐增大到 10 km 之后两者的区分性能迅速变好,但 8 km 高度的隶属度仅 0.2,12.5 km 迅速接近 0.6,两者的重合面积较小,仅为 0.303。因此,ET 对于有、无地闪活动具有较好的区分性,$ET \approx 12.5$ km 是预警的另外一个重要雷达参量。

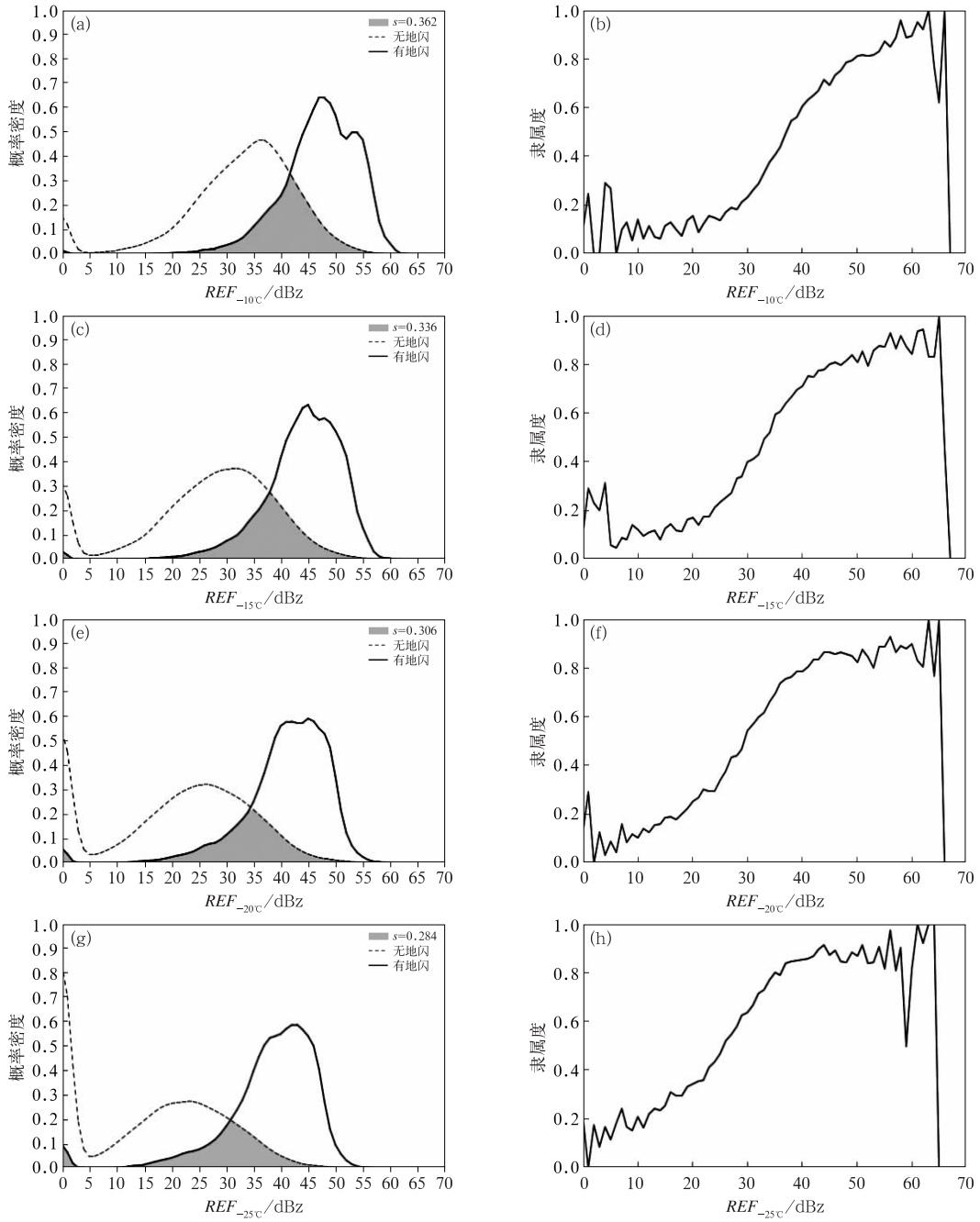



图 2　不同等温层最大反射率因子(a,b)$REF_{-10℃}$、(c,d)$REF_{-15℃}$、(e,f)$REF_{-20℃}$、(g,h)$REF_{-25℃}$的(a,c,e,g)概率密度和(b,d,f,h)隶属度

Fig. 2　(a, c, e, g) Probability frequency and (b, d, f, h) membership of the maximum radar reflectivities at different isotherm layers (a, b) $REF_{-10℃}$, (c, d) $REF_{-15℃}$, (e, f) $REF_{-20℃}$, (g, h) $REF_{-25℃}$

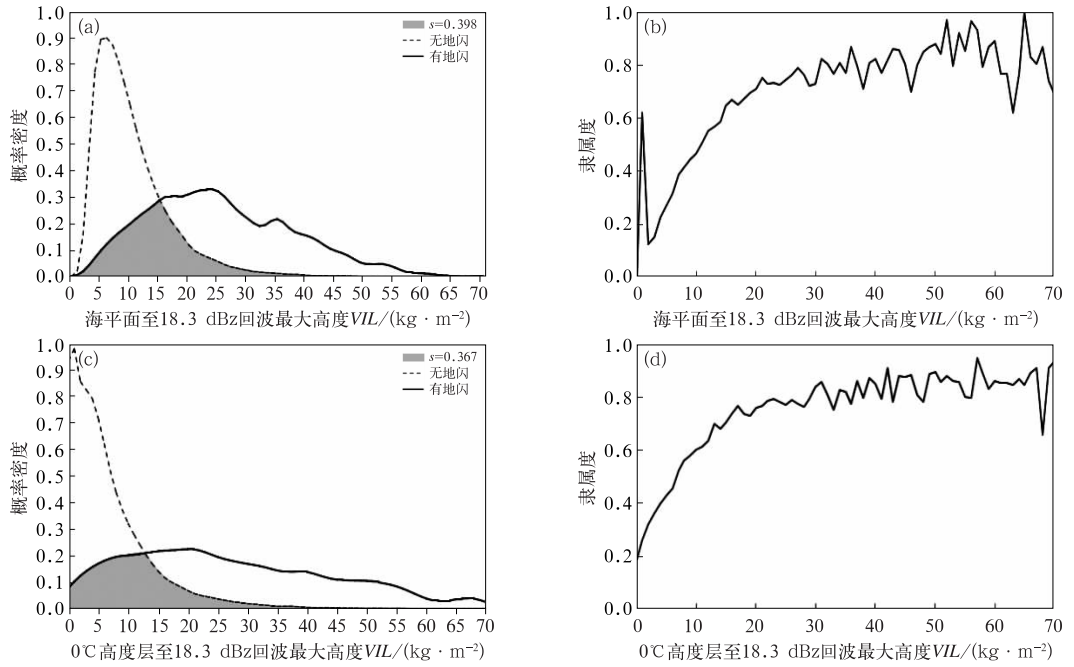



图3 雷达回波(a,b)海平面至18.3 dBz回波最大高度VIL和(c,d)0℃高度层至18.3 dBz回波最大高度VIL的(a,c)概率密度和(b,d)隶属度

Fig. 3 (a, c) Probability frequency and (b, d) membership of VIL (a, b) from sea level to maximum height of 18.3 dBz radar echoes and VIL (c, d) from 0℃ isotherm layer to maximum height of 18.3 dBz radar echoes

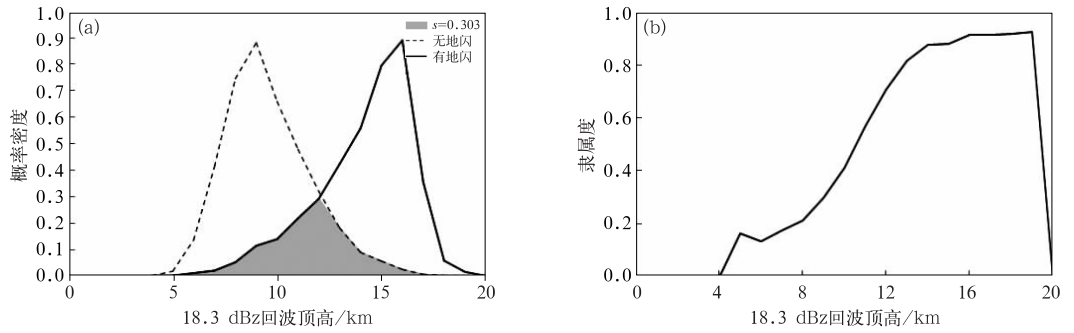



图4 雷达回波18.3 dBz回波顶高的(a)概率密度和(b)隶属度

Fig. 4 (a) Probability frequency and (b) membership of top height of 18.3 dBz radar echoes

3.2.4 雷达回波0℃高度层以上最大反射率因子$REF_{max\geqslant 0℃}$及所在高度

图5a中,有地闪与无地闪活动时的$REF_{max\geqslant 0℃}$的概率密度峰值较为接近,无地闪活动时的样本峰值为42 dBz,有地闪活动时的样本峰值为53 dBz,隶属度为0.6(图5b),无地闪活动时的样本在$REF_{max\geqslant 0℃}$超过48 dBz之后数量迅速较少,两者重合面积稍大,为0.416,识别效果相对偏弱。$REF_{max\geqslant 0℃}$所在高度的概率密度分布显示,两者样本几乎重合,峰值区域5 km,有地闪活动时的样本隶属度为0.5(图5c,5d),这一参量的区分度几乎很小,但可以发现湖北发生地闪的充分条件为,$REF_{max\geqslant 0℃}$必须达到48 dBz以上且48 dBz以上回波高度必须突破5 km。

综上所述,$REF_{-15℃}$、$REF_{-20℃}$、$REF_{-25℃}$、ET对地闪的区分度较高,识别效果较好,可作为地闪临近预警的主要参量,VIL和$REF_{max\geqslant 0℃}$效果次之,可作为辅助参量。

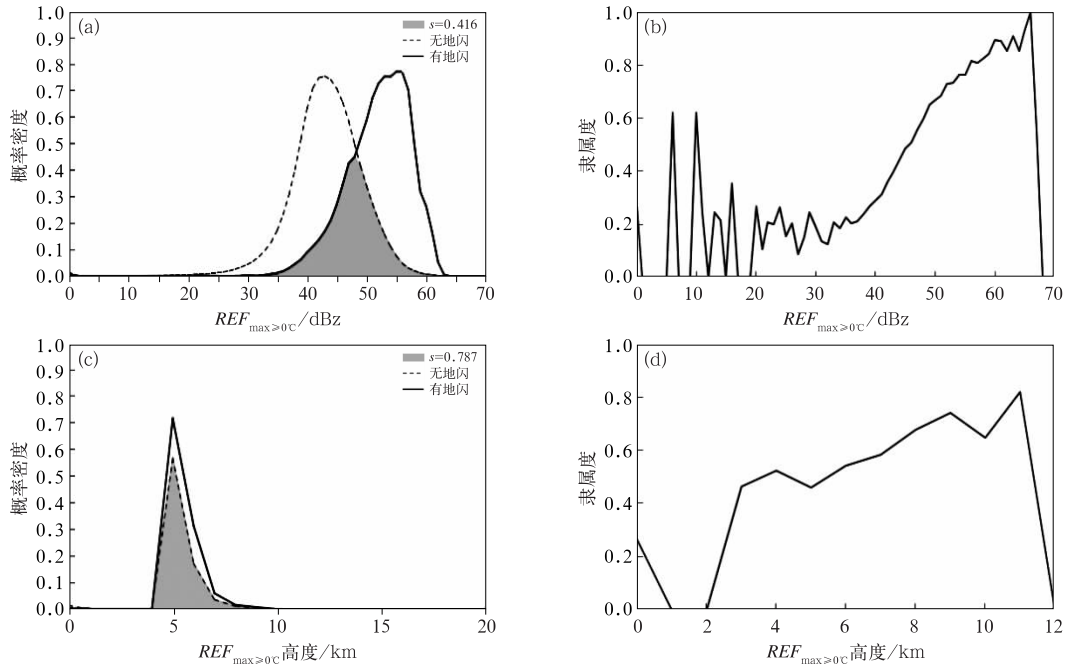



图 5　雷达回波(a,b)0℃高度层以上最大反射率因子 $REF_{max\geqslant 0℃}$ 和(c,d)$REF_{max\geqslant 0℃}$ 所在高度的(a,c)概率密度和(b,d)隶属度

Fig. 5　(a, c) Probability frequency and (b, d) membership of $REF_{max\geqslant 0℃}$ (a, b) the maximum radar reflectivities above 0℃ isotherm layer and (c, d) its altitude

## 4　预警方案的确定

### 4.1　权重系数

根据有、无地闪活动时的样本统计(图 2～图 5)对预警指标分别赋予下限和上限两个阈值,动态权重可分三级,当预警指标低于阈值下限时,对应的权重为 0,当预警指标高于阈值上限,对应的权重为 1;当预警指标介于阈值上、下限之间时,对应的权重按线性插值计算。$REF_{-15℃}$、$REF_{-20℃}$、$REF_{-25℃}$、ET 和 $REF_{max\geqslant 0℃}$ 的地闪样本均呈正态分布,样本随着雷达回波强度增强和回波高度迅速增多,之后出现峰值,到达一定强度阈值、回波高度超过一定高度之后,地闪样本数量反而减少。通过 90%地闪样本分布得到 6 个预警指标对应的模糊逻辑隶属度权重系数,解析如下:

$$f=\begin{cases}0 & x\leqslant b\\ \dfrac{x-b}{a-b} & b<x<a\\ 1 & x\geqslant a\end{cases} \tag{2}$$

$$f_1=\begin{cases}0 & x\leqslant 15\ \text{dBz}\\ \dfrac{x-b}{a-b} & 15\ \text{dBz}<x<33\ \text{dBz}\\ 1 & x\geqslant 33\ \text{dBz}\end{cases} \tag{3}$$

$$f_2=\begin{cases}0 & x\leqslant 10\ \text{dBz}\\ \dfrac{x-b}{a-b} & 10\ \text{dBz}<x<30\ \text{dBz}\\ 1 & x\geqslant 30\ \text{dBz}\end{cases} \tag{4}$$

$$f_3=\begin{cases}0 & x\leqslant 10\ \text{dBz}\\ \dfrac{x-b}{a-b} & 10\ \text{dBz}<x<25\ \text{dBz}\\ 1 & x\geqslant 25\ \text{dBz}\end{cases} \tag{5}$$

$$f_4=\begin{cases}0 & x\leqslant 10\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\\ \dfrac{x-b}{a-b} & 10\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-2}<x<15\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\\ 1 & x\geqslant 15\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\end{cases} \tag{6}$$

$$f_5=\begin{cases}0 & x\leqslant 5\ \text{km}\\ \dfrac{x-b}{a-b} & 5\ \text{km}<x<10\ \text{km}\\ 1 & x\geqslant 10\ \text{km}\end{cases} \tag{7}$$

$$f_6=\begin{cases}0 & x\leqslant 30\ \text{dBz}\\ \dfrac{x-b}{a-b} & 30\ \text{dBz}<x<45\ \text{dBz}\\ 1 & x\geqslant 45\ \text{dBz}\end{cases} \tag{8}$$

式中：$f$ 为权重系数；$a$、$b$ 分别为阈值下限和上限；$x$ 为雷达回波参数阈值。$f_1$～$f_6$ 分别代表 $REF_{-15℃}$、$REF_{-20℃}$、$REF_{-25℃}$、ET、VIL 和 $REF_{max≥0℃}$ 的动态权重系数。以上雷达特征因子分析和权重系数提供当前雷暴信息，为地闪外推预报提供基础支撑。

### 4.2 预警方案

模糊逻辑算法广泛用于气象等领域(Cho et al，2006；Gourley et al，2007)。临近预报利用概率密度函数和隶属度特征，经过权重系数将预报因子进行组合，使用 TITAN(thunderstorm identification，tracking，analysis and nowcasting)算法(Dixon and Wiener，1993)外推预报的雷达多个参数作为模糊逻辑的输入，将各个因子权重加在一起，超过一定阈值就可以判断地闪初生，之后地闪落区的移向移速及雷暴生成、加强、维持或者衰减阶段的落区变化，最终得到武汉地区每 6 min 滚动预报未来 1 h(间隔 6 min)的地闪落区临近预警方案，即：

$$y = f_1 \times REF_{-15℃} + f_2 \times REF_{-20℃} + f_3 \times REF_{-25℃} + f_4 \times ET + f_5 \times VIL + f_6 \times REF_{max≥0℃} \quad (9)$$

式中：$y$ 为预报概率，数值在 0～1.0(100%)，值越大，表明地闪出现的概率越高，$f_1$～$f_6$ 为动态权重系数，该临近预警方法在系统平台实时运行，每 6 min 一次滚动预报，预报间隔为 6 min，预报时效为 1 h。为保证追踪多单体雷暴和飑线的增长速度，而不仅仅局限于单体的移动，使用椭圆滤波器，很大程度上平滑和滤除了弱的和更易衰减的反射率因子场(Wolfson et al，1998)，所以本文采用细长的椭圆表示地闪预报落区。

总的来说，本文的研究目的是根据雷暴过程中当前雷达体扫数据情况，每 6 min 滚动预报研究范围未来 1 h 内哪些区域会发生地闪，哪些区域不发生地闪。即当前状态下，有的单体是可能发生地闪的，而有的单体仅是发生降水的单体，不会发生地闪。通过具体分析，试图获取有、无地闪发生的单体中雷达各特征参量的差异，利用这些统计结果明确预警指标，建立预警方案，每 6 min 对雷暴中各个单体区域未来 1 h 地闪活动做预报。对当前识别出的单体，利用成熟的区域识别外推算法(TITAN)，预报其未来 6 min 间隔单体的位置、形状、体积以及单体中各雷达参量的演变情况，然后对外推出的未来 6 min 间隔的雷达各参量应用文中获得的地闪预警方案，预报单体区域是否会发生地闪。

该方法每隔 6 min 自动运行，预警未来 0～1 h 内地闪活动情况。若当前时刻地闪监测系统没有监测到地闪活动，但通过外推算法获得的单体，在未来 0～1 h 内达到文中预警方案中地闪发生的雷达参量阈值，则单体未来 0～1 h 内有闪电发生，且未来地闪发生位置为外推算法确定的区域；若未来 0～1 h 内未达到预警方案中地闪发生雷达参量阈值，则预报该单体不发生地闪。若当前时刻地闪监测系统已经监测到闪电活动，如果所在单体其外推获得的单体未来 0～1 h 能达到预报方案中的各项阈值，仍然预报该单体有闪电发生；如果其所在单体未达到预报方案中的各项阈值，则将预报该单体在未来 0～1 h 不发生闪电。实际应用中表明该方法能够对地闪在雷暴生命期的演变趋势预警有很好的指示作用。

## 5 检验评估

### 5.1 整体检验评估

(1)检验对象及实况：采用 1 km 格点对格点逐一对比的检验方法进行整体检验评估。使用 2016—2018 年 6—8 月 28 次雷暴个例，预报范围以雷达为中心 300 km×300 km 内，将此范围内每 6 min 滚动预报的未来 1 h(6 min 间隔)的预报产品(椭圆)1 km 格点化，椭圆边缘采用占每个格点的比例来判断该格点的归属。将预报范围内二维闪电定位实况数据采用邻近插值法插值到 1 km 网格点上，形成 6 min 累计的闪电次数格点化数据，对 1 km 网格内的预报和实况进行点对点评分。在 300 km×300 km 预报范围内预报能发生地闪的椭圆格点算预报有，计为 Hit；没有发生地闪的椭圆格点算预报无，计为 False；当单体 1 km 格点上出现地闪，而预报无地闪，计为 Failure；最后对三种格点数量进行整体统计，计算 Hit、False 和 Failure 格点数。

(2)评分指标：网格预报评分指标包括击中率(POD)，虚警率(FAR)和临界成功指数(CSI)，计算方式如下：

$$POD = \frac{Hit}{Hit + Failure} \quad (10)$$

$$FAR = \frac{False}{Hit + False} \quad (11)$$

$$CSI = \frac{Hit}{Hit + Failure + False} \quad (12)$$

式中：$Hit$ 为正确预报格点数，$False$ 为空报格点数，$Failure$ 为漏报格点数。$0 \leqslant POD/FAR/CSI \leqslant 1.0$，且 $POD$、$CSI$ 越接近于1.0，表明预报效果越

好,*FAR* 则相反。

用 28 次过程外推出每 6 min 间隔的雷达参量计算发生概率,雷电样本共 118 901 个,其中预报有、无地闪出现的样本分别为 85 601 个和 33 300 个。图 6 列出了 1 km 格点到格点 6 min 间隔临近预报的 POD、FAR 和 CSI 值,从网格点数的综合评分来看,1 h 预报时效每 6 min 间隔的临近预报结果 POD 和 CSI 分别可以达到 34%～52%和 23%～35%,随着预报时效增加,POD 和 CSI 缓慢下降,而 FAR 在 0～6 min 最低,为 45%左右,54～60 min 时增加到 65%,安徽姚叶青等(2011)采用 10 km 格点 0.5 h 和 1 h 的 POD、CSI 分别为 87%、63%和 76%、51%,本文 1 km 的综合评分结果比 10 km 网格结果偏低,这和网格的细化程度有关,整体结果较为满意。

### 5.2　个例评估情况

下面通过不同雷暴天气类型中地闪的临近预报结果进行检验说明,一次是 2018 年 5 月 18 日大范围中尺度对流系统(MCS)雷暴天气,另外一次是 2018 年 7 月 26 日的局地对流。检验时间间隔为 6 min,空间分辨率为 1 km,分别统计了雷暴生成、发展、成熟和消亡阶段的地闪预报情况。

受高空低槽和低层切变线共同影响,2018 年 5 月 18 日江汉平原至鄂东北先后经历了一次强雷电天气过程,MCS 持续了 5 h 左右,雷电由有组织性的 MCS 产生,分布范围广。而 7 月 26 日午后鄂东地区自南向北的一次雷电过程则是由副热带高压外围强烈静力不稳定的大气层结诱发的,雷电由分散性的脉冲风暴产生,局地性强。从图 7 两次雷暴生命史 6 min 滚动的预报情况来看,大范围 MCS 引发的雷电过程 POD 整体预报结果较为平稳,0～30 min 基本保持在 40%以上(图 7a),MCS 成熟期(09:00—10:30)30～60 min 预报时效的 POD 下降到 20%～30%。FAR(图 7c)在 MCS 整个阶段变化不大,整体保持在 40%～65%,CSI(图 7e)生命期维持在 30%左右,0～30 min 表现整体优于 30～60 min。7 月 26 日雷暴基本以孤立单体或者多单体为主,从 17:30—19:00 持续 90 min 的 1 个孤立的雷暴单体生消演变过程预报评分来看,雷暴成熟期(18:00)之后 0～30 min 的 POD 显著增加,最高可达 60%以上,而 30～60 min 变化较为平稳,稳定在 30%左右(图 7b)。FAR(图 7d)和 CSI(图 7f)变幅不大,整个生命期分别保持在 60%和 10%左右。

通过不同类型雷电天气生命史 6 min 滚动预报未来 1 h 评分及预报落区与地闪实况对比结果显示,该预报方法对大范围雷电天气的预报准确率较高(图 7g),对局地对流造成范围较小的雷电天气评分结果稍差(图 7h)。同时发现,该方法也有一些需要改进的地方,第一是为了保证初闪预报,模型阈值可能有所偏低,发展加强至成熟阶段前后造成的空报偏多;第二是预报落区采用椭圆表示,对局地对流来说,可能预报落区偏大,实况地闪数量相对较少,造成 1 km 格点评分空报较多,后续将使用更客观准确的落区表示方式进行改进。

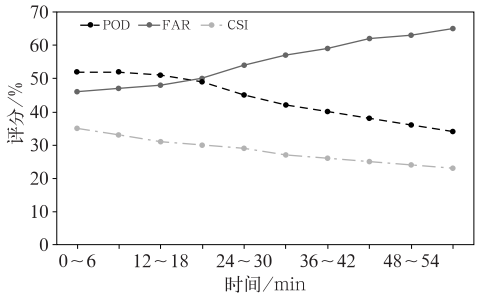



图 6　2016—2018 年 28 次雷暴个例每 6 min 滚动预报未来 1 h(6 min 间隔)的 POD、FAR 和 CSI 评分

Fig. 6　POD, FAR and CSI test scores of 1 h forecasts of 28 thunderstorm cases every 6 min from 2016 to 2018

## 6　结论与讨论

根据地闪和雷达参数的相关性,利用武汉新一代多普勒天气雷达数据,对 2013—2018 年发生在湖北 6—8 月以武汉雷达为中心半径 150 km 探测范围内的 90 次雷暴个例进行相关统计,通过湖北地闪雷达参数的定量化分析,采用雷暴识别和追踪技术,建立了基于雷达参数的地闪每 6 min 滚动预报未来 1 h 的本地化临近预报模型,从而得到地闪初生、移向移速及雷暴生命期过程中地闪变化的预报信息。最后对实际天气过程的临近预报结果和实况进行了网格点对点评分。得出以下结论:

(1)通过分析－10、－15、－20 和－25℃等温层高度的最大反射率因子 $REF_{-10℃}$、$REF_{-15℃}$、$REF_{-20℃}$、$REF_{-25℃}$ 的概率密度和隶属度分布,综合有、无地闪样本的峰值分布、概率密度重合面积和隶

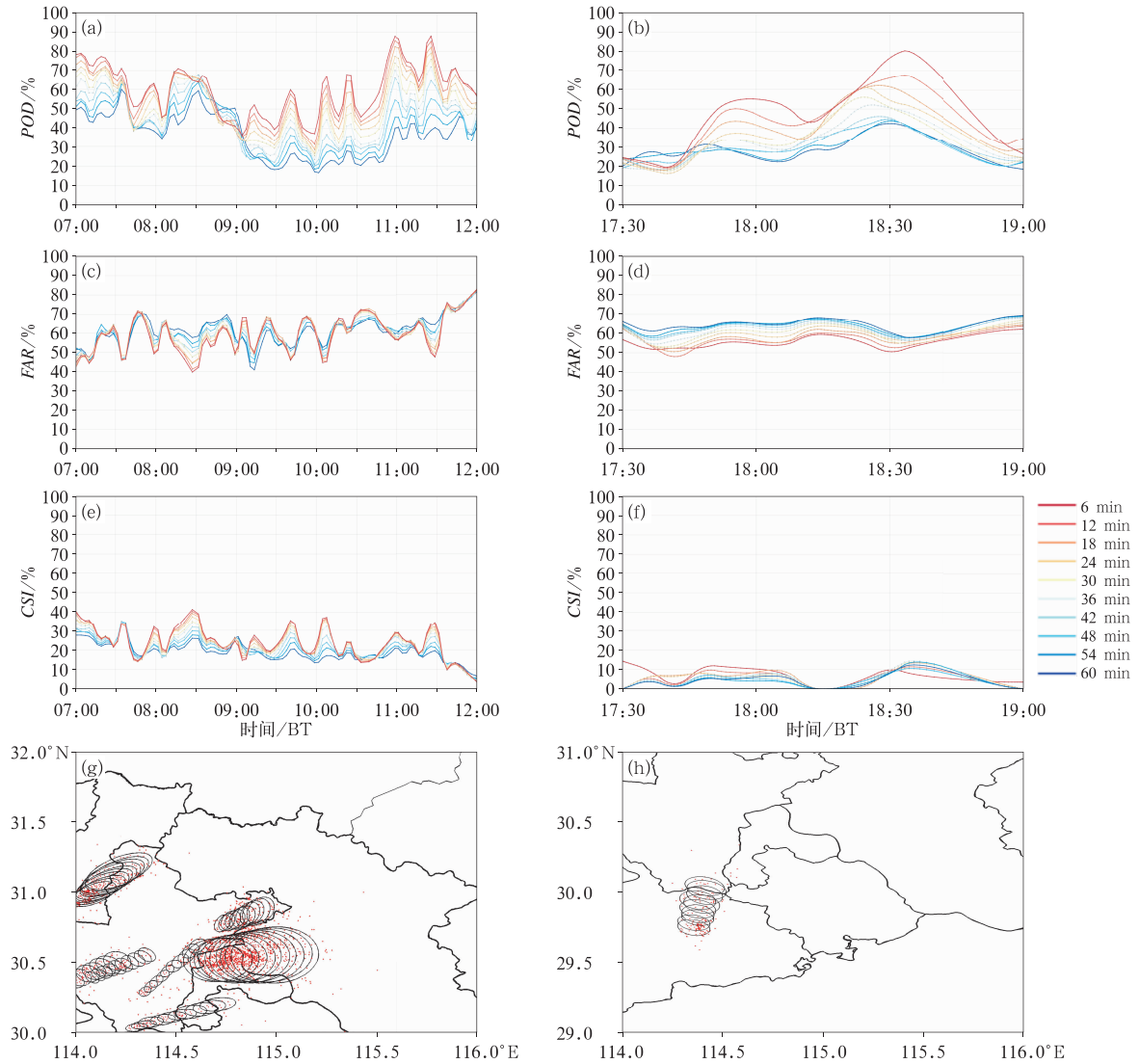



图 7 2018 年(a,c,e)5 月 18 日和(b,d,f)7 月 26 日两次雷暴生命史过程每 6 min 滚动预报(a,b)POD,(c,d)FAR,(e,f)CSI 评分,以及(g)5 月 18 日 10:30 和(h)7 月 26 日 18:30 未来 1 h 预报(每 6 min 预报为一个黑色椭圆)与地闪实况(红色圆点)对比

Fig. 7 Rolling prediction scores every 6 min of (a, b) POD, (c, d) FAR, (e, f) CSI during the life history of two thunderstorms on (a, c, e) 18 May and (b, d, f) 26 July 2018, and comparison between 1 h forecast every 6 min (black ellipse) and cloud-to-ground lightning (red dot) at (g) 10:30 BT 18 May and (h) 18:30 BT 26 July 2018

属度特征等,发现 $REF_{-15℃}$、$REF_{-20℃}$ 和 $REF_{-25℃}$ 是湖北地闪预警的最佳因子,$REF_{-10℃}$ 效果次之。综合 $REF_{max≥0℃}$ 分析,考虑湖北发生地闪的充分条件为,0℃等温线以上的最大反射率因子超过一定阈值,$REF_{max≥0℃}$ 达到 48 dBz 且 48 dBz 以上的回波高度突破 5 km(即强回波必须超过 0℃层等温线之上)。

(2)分析有、无地闪样本海平面至 18.3 dBz 回波最大高度 VIL 及 0℃至 18.3 dBz 回波最大高度的 VIL 的对应关系,发现 VIL 这一雷达参数对地闪识别能力较弱,地闪和无地闪重叠面积较大,且地闪发生峰值和无地闪峰值区域有较大重合,综合考虑 VIL 对地闪预警效果偏弱,预警方案中适当缩小其权重,这一研究成果与刘维成等(2005)指出的 VIL 对高原东侧雷电活动预警意义不大等结论吻合。

(3)ET 对于地闪具有较好的区分性。地闪样本概率密度函数峰值为 17 km,隶属度达 0.8 以上,无地闪样本峰值为 8 km,隶属度仅为 0.2,10 km 的隶属度迅速增加到 0.4,12.5 km 接近0.6。两者的

重合面积较小,ET≈12.5 km 是湖北地闪临近预警的另外一个重要雷达参量。

(4)根据以上地闪和雷达参数的分析,利用雷暴识别追踪技术,通过模糊逻辑方法,得到未来 1 h 地闪初生、地闪移向移速及雷暴加强、成熟和消亡阶段的地闪落区变化临近外推预报。该临近预报方法,每 6 min 滚动预报一次未来 1 h(间隔 6 min)的地闪落区,预报结果已投入业务运行,效果良好。

(5)通过对 2016—2018 年 28 次雷暴过程 1 km 网格点对点综合评分,未来 1 h 每 6 min 临近预报结果显示,POD、CSI 和 FAR 整体表现良好,可用于湖北雷电预报预警及决策服务。个例检验显示该方法对大范围雷暴天气产生的地闪预报评分较高,而对局地对流预报的评分稍低。

本文基于新一代多普勒天气雷达和地闪资料,实现了有、无地闪的有效区分。然而文中选取的个例均为致灾性的强雷暴个例,并在强雷暴过程中找寻能否发生地闪的单体,后续还应加强零星地闪的弱雷暴和没有地闪的雷暴个例分析,进一步获取闪电的初始发生条件。另外,雷电起电放电机制复杂,地闪不能代表闪电发生的全貌,以后还将利用全闪和湖北其他站点的雷达资料,在前期研究的基础上,建立更加完善的雷电临近预警方法,有效改善空报和漏报,进一步提高预报准确率。

## 参考文献


韩丰,沃伟峰,2018. SWAN2.0 系统的设计与实现[J]. 应用气象学报,29(1):25-34. Han F,Wo W F,2018. Design and implementation of SWAN2.0 Platform[J]. J Appl Meteor Sci,29(1):25-34(in Chinese).

刘维成,苟尚,傅朝,2015. 雷达资料在高原东北侧雷电预警中的应用[J]. 气象,41(10):1253-1259. Liu W C,Gou S,Fu Z,2015. Application of radar data in lightning warning over the northeast of Tibetan Plateau[J]. Meteor Mon,41(10):1253-1259(in Chinese).

罗树如,支树林,俞炳,2005. 强对流天气雷电参数和雷达回波特征个例分析[J]. 气象科技,33(3):222-226. Luo S R,Zhi S L,Yu B,2005. Analysis of radar echoes and thunder-lighting parameter characteristics of a severe convective weather event[J]. Meteor Sci Technol,33(3):222-226(in Chinese).

吕伟涛,张义军,孟青,等,2009. 雷电临近预警方法和系统研发[J]. 气象,35(5):10-17,131. Lyu W T,Zhang Y J,Meng Q,et al,2009. Development of lightning nowcasting and warning method and system[J]. Meteor Mon,35(5):10-17,131(in Chinese).

石玉恒,张义军,郑栋,等,2012. 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,38(1):66-71. Shi Y H,Zhang Y J,Zheng D,et al,2012. The relationship between lightning activity and radar echo characteristics of thunderstorm in Beijing Area[J]. Meteor Mon,38(1):66-71(in Chinese).

孙凌,周筠珺,郭在华,2012. 雷暴持续时间与地闪活动的预报方法研究[J]. 气象科学,32(2):182-187. Sun L,Zhou Y J,Guo Z H,2012. Research on the forecasting method for thunderstorm duration and lightning activities[J]. J Meteor Sci,32(2):182-187(in Chinese).

王飞,张义军,赵均壮,等,2008. 雷达资料在孤立单体雷电预警中的初步应用[J]. 应用气象学报,2008,19(2):153-160. Wang F,Zhang Y J,Zhao J Z,et al,2008. The prelimiary application of radar data to the lightning warning of isolated storm cells[J]. J Appl Meteor Sci,19(2):153-160(in Chinese).

王秀明,俞小鼎,周小刚,2014. 雷暴潜势预报中几个基本问题的讨论[J]. 气象,40(4):389-399. Wang X M,Yu X D,Zhou X G,2014. Discussion on basical issues of thunderstorm potential forecasting[J]. Meteor Mon,40(4):389-399(in Chinese).

吴学珂,袁铁,刘冬霞,等,2013. 山东半岛一次强飑线过程地闪与雷达回波关系的研究[J]. 高原气象,32(2):530-540. Wu X K,Yuan T,Liu D X,et al,2013. Study of the relationship between cloud-to-ground lightning and radar echo of a severe squall line in Shandong Peninsula[J]. Plateau Meteor,32(2):530-540(in Chinese).

姚叶青,袁松,张义军,等,2011. 利用闪电定位和雷达资料进行雷电临近预报方法研究[J]. 热带气象学报,27(6):905-911. Yao Y Q,Yuan S,Zhang Y J,et al,2011. A study of lightning nowcasting method using LD-Ⅱ and CINRAD-SA radar data[J]. J Trop Meteor,27(6):905-911(in Chinese).

易笑园,宫全胜,李培彦,等,2009. 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,35(2):34-40. Yi X Y,Gong Q S,Li P Y,et al,2009. Analysis of correlation between cloud-to-ground lightning activity and echo top of Doppler-radar data in squall lines in North China[J]. Meteor Mon,35(2):34-40(in Chinese).

俞小鼎,郑永光,2020. 中国当代强对流天气研究与业务进展[J]. 气象学报,78(3):391-418. Yu X D,Zheng Y G,2020. Advances in severe convective weather research and operational service in China[J]. Acta Meteor Sin,78(3):391-418(in Chinese).

张义军,华贵义,言穆弘,等,1995. 对流和层状云系电活动、对流及降水特性的相关分析[J]. 高原气象,14(4):396-405. Zhang Y J,Hua G Y,Yan M H,et al,1995. The correlation analysis of electric activity,convection and precipitation in convective cloud and stratus[J]. Plateau Meteor,14(4):396-405(in Chinese).

郑永光,张小玲,周庆亮,等,2010. 强对流天气短时临近预报业务技术进展与挑战[J]. 气象,36(7):33-42. Zheng Y G,Zhang X L,Zhou Q L,et al,2010. Review on severe convective weather short-term forecasting and nowcasting[J]. Meteor Mon,36(7):33-42(in Chinese).

钟颖颖，冯民学，焦雪，等，2012. 两次雷暴过程的地闪及回波特征[J]. 气象科技，40(4)：620-626. Zhong Y Y，Feng M X，Jiao X，et al，2012. Characteristics of lightning and radar echoes of two thunderstorms[J]. Meteor Sci Technol，40(4)：620-626(in Chinese).

周康辉，郑永光，王婷波，等，2017. 基于模糊逻辑的雷暴大风和非雷暴大风区分方法[J]. 气象，43(7)：781-791. Zhou K H，Zheng Y G，Wang T B，et al，2017. Fuzzy logic algorithm of thunderstorm gale identification using multisource data[J]. Meteor Mon，43(7)：781-791(in Chinese).

Buechler D E，Goodman S J，1990. Echo size and asymmetry：impact on NEXRAD storm identification[J]. J Appl Meteor，29(9)：962-969.

Cho Y H，Lee G W，Kim K E，et al，2006. Identification and removal of ground echoes and anomalous propagation using the characteristics of radar echoes[J]. J Atmos Oceanic Technol，23(9)：1206-1222.

Clements N C，Orville R E，2008. The warning time for cloud-to-ground lightning in isolated，ordinary thunderstorms over Houston，Texas[C]//Proceedings of the 3rd Conference on Meteorological Applications of Lightning Data. New Orleans，LA：Amer Meteor Soc.

Dixon M，Wiener G，1993. TITAN：thunderstorm identification，tracking，analysis，and nowcasting—a radar-based methodology[J]. J Atmos Oceanic Technol，10(6)：785-797.

Doswell Ⅲ C A，2001. Severe Convective Storms[M]. Boston：American Meteorological Society：1-26.

Dye J E，Jones J J，Winn W P，et al，1986. Early electrification and precipitation development in a small，isolated Montana cumulonimbus[J]. J Geophys Res，91(D1)：1231-1247.

Dye J E，Winn W P，Jones J J，et al，1989. The electrification of New Mexico thunderstorms，1. Relationship between precipitation development and the onset of electrification[J]. J Geophys Res，94(D6)：8643-8656.

Goodman S J，Buechler D E，Wright P D，et al，1988. Lightning and precipitation history of a microburst-producing storm[J]. Geophys Res Lett，15(11)：1185-1188.

Gourley J J，Tabary P，du Chatelet J P，2007. A fuzzy logic algorithm for the separation of precipitating from nonprecipitating echoes using polarimetric radar observations[J]. J Atmos Oceanic Technol，24(8)：1439-1451.

Gremillion M S，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[J]. Wea Forecasting，14(5)：640-649.

Hondl K D，Eilts M D，1994. Doppler radar signatures of developing thunderstorms and their potential to indicate the onset of cloud-to-ground lightning[J]. Mon Wea Rev，122(8)：1818-1836.

Jayaratne R，2003. Thunderstorm Electrification Mechanisms[M]// Cooray V. The Lightning Flash. London，UK：The Institution of Electrical Engineers：17-44.

Johnson J T，MacKeen P L，Witt A，et al，1998. The storm cell identification and tracking algorithm：an enhanced WSR-88D algorithm[J]. Wea Forecasting，13(2)：263-276.

Laksen H R，Stansbury E J，1974. Association of lightning flashes with precipitation cores extending to height 7 km[J]. J Atmos Terr Phys，36(9)：1547-1548，IN23，1549-1553.

Li P W，Lau D S，2008. Development of a lightning nowcasting system for Hong Kong International Airport[C]//13th Conference on Aviation，Range and Aerospace Meteorology. New Orlean：American Meteorological Society.

MacGorman D R，Filiaggi T，Holle R L，et al，2007. Negative cloud-to-ground lightning flash rates relative to VIL，maximum reflectivity，cell height，and cell isolation[J]. J Light Res，1：132-147.

Marshall J S，Radhakant S，1978. Radar precipitation maps as lightning indicators[J]. J Appl Meteor，17(2)：206-212.

Mason B J，1953. A critical examination of theories of charge generation in thunderstorms[J]. Tellus，5(4)：446-460.

Michimoto K，1991. A study of Radar echoes and their relation to lightning discharge of thunderclouds in the Hokuriku District. Part I：observation and analysis of thunderclouds in summer and winter[J]. J Meteor Soc Jpn，69(3)：327-335.

Moore C B，Vonnegut B，1977. The thundercloud[M]//Golde R H. Lightning，Vol. 1：Physics of Lightning. San Diego：Academic Press：51-98.

Vincent B R，Carey L D，Schneider D，et al. 2005. Using WSR-88D reflectivity for the prediction of cloud-to-ground lightning：a central North Carolina study[C]//Conference on Meteorological Applications of Lightning Data. San Diego：American Meteorological Society：35-44.

Watson A I，Holle R L，López R E，1995. Lightning from two national detection networks related to vertically integrated liquid and echo-top information from WSR-88D radar[J]. Wea Forecasting，10(3)：592-605.

Wolfson M M，Forman B E，Hallowell R G，et al. 1998. The growth and decay storm tracker[C]//Proceedings of the 8th Conference on Aviation，Range，and Aerospace Meteorology. Dallas：Amer Meteor Soc：58-62.

Workman E J，Reynolds S E，1949. Electrical activity as related to thunderstorm cell growth[J]. Bull Amer Meteor Soc，30：142-144.

（本文责编：俞卫平）