

张萍萍, 刘文婷, 章翠红, 等, 2021. 一次强降水过程中 FY-4A 闪电成像仪观测特征分析[J]. 气象, 47(11): 1391-1401. Zhang P P, Liu W T, Zhang C H, et al, 2021. Observation characteristics of FY-4A lightning mapping imager during a severe rainfall[J]. Meteor Mon, 47(11): 1391-1401(in Chinese).

# 一次强降水过程中 FY-4A 闪电成像仪观测特征分析<sup>\*</sup>

张萍萍<sup>1</sup> 刘文婷<sup>2</sup> 章翠红<sup>2</sup> 明绍慧<sup>2</sup> 董良鹏<sup>2</sup>

1 山东省威海市气象局, 威海 264200

2 武汉中心气象台, 武汉 430074

**提 要:** FY-4 闪电成像仪(lightning mapping imager, LMI)能够对闪电活动进行连续不间断的观测, 在强天气监测预警中具有很大的应用潜力。以 2019 年 5 月 25 日强降水过程为研究个例, 利用 FY-4 LMI 资料、ADTD(advanced time of arrival and direction)系统资料、FY-4 红外云图资料、雷达资料和其他常规观测资料, 研究 FY-4 LMI 数据在不同性质、不同演变阶段对流系统的观测特征。结果表明: 在对流迅速发展的初期, LMI 闪电观测出现超前于 ADTD 闪电观测的特征, 并且锋面降水阶段中这种超前特征持续时间更长一些; 无论是暖区降水还是锋面降水阶段, 当同时刻 LMI 闪电观测位于当前对流云团移动的前方时, 未来 1 小时内 LMI 闪电分布区域出现明显的云顶温度变率, 积云有发展趋势; 当雷达反射率垂直剖面上最强回波出现向移动方向前倾结构时, LMI 闪电观测往往出现在雷达观测对流系统移动方向的前方, 此时 LMI 闪电观测对于对流系统发展演变有较好的提前指示意义; 而当雷达反射率垂直剖面上最强回波出现垂直结构时, LMI 闪电观测往往与雷达观测对流系统较重合, 此时 LMI 闪电观测对于对流系统发展演变的提前指示意义偏弱。

**关键词:** 闪电成像仪(LMI), ADTD, 云顶温度变率, 监测预警

**中图分类号:** P412

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.11.008

## Observation Characteristics of FY-4A Lightning Mapping Imager During a Severe Rainfall

ZHANG Pingping<sup>1</sup> LIU Wenting<sup>2</sup> ZHANG Cuihong<sup>2</sup> MING Shaohui<sup>2</sup> DONG Liangpeng<sup>2</sup>

1 Weihai Meteorological Office of Shandong Province, Weihai 264200

2 Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074

**Abstract:** The FY-4 lightning mapping imager (LMI) can continuously observe the lightning activity, having great application potential in severe convective weather monitoring and warning. Taking the heavy rainfall process on 25 May 2019 as an example, this paper studies the observation characteristics of the convective system in different properties and evolution stages with the data of FY-4 lightning imager, ADTD (advanced time of arrival and direction) system, FY-4 infrared cloud image, radar and other conventional observation data. The study shows that in the early stage of the rapid development of convection, LMI lightning observation is ahead of ADTD lightning observation, and this advance feature lasts longer in the frontal precipitation stage. When the LMI lightning observation is located in front of the current convective cloud cluster movement at the same time, there will be obvious cloud top temperature variability in the LMI lightning distribution area in the next hour, and cumulus has a development trend. When the strongest echo on the vertical section of radar reflectivity appears to move forward, the LMI

<sup>\*</sup> 湖北省气象局科技基金项目(2020Y02)资助

2020 年 9 月 17 日收稿; 2021 年 8 月 11 日收修定稿

第一作者: 张萍萍, 主要从事极端降水、卫星资料应用分析研究. E-mail: zpp7117@126.com

lightning observation often appears in front of the moving direction of the convective system observed by radar. At this time, the LMI lightning observation has a good early indication for the development and evolution of the convective system. When the strongest echo on the vertical section of radar reflectivity shows up quasi vertical structure, the LMI lightning observation often coincides with the radar observation of the convective system. At this time, the LMI lightning observation has a weak indication for the development and evolution of the convective system.

**Key words:** lightning mapping imager (LMI), advanced time of arrival and direction (ADTD), cloud top temperature variability, monitoring and warning

## 引 言

20 世纪 90 年代以来,随着电子、信息技术的迅速发展,人们对于云顶闪电光学辐射的时空特征和光谱特征有了更新的认识,星载闪电观测技术有了很大发展和进步。根据卫星所处轨道高度不同,卫星闪电观测分为低轨道卫星(极轨卫星)平台闪电观测和高轨道卫星(静止卫星)平台闪电观测。前者以装载于热带降水测量计划任务卫星(TRMM)上的闪电成像仪(lightning imaging sensor, LIS)为代表,其观测资料被广泛应用。Boccippio et al(2002)利用 LIS 分析了全球闪电活动及其地域差异。Ma et al(2004)分别对中国及周边闪电密度的气候分布进行了研究,郅秀书和 Toumi(2003)利用 LIS 资料分析了青藏高原雷电活动特征。戴建华等(2005)利用 LIS 资料分析了长江三角洲地区的闪电时空分布特征。袁铁和郅秀书(2010)利用 LIS 资料对一次发生在中国华南的强飚线研究发现,飚线系统附近闪电活动较一般雷暴要活跃得多。

由于 LIS 观测精度受轨道周期的限制,只能提供区域内平均意义上的闪电分布信息,而静止卫星闪电成像仪能够实现对闪电的连续监测,是卫星闪电观测的新方向。2016 年底我国自主研制并发射了新一代静止卫星 FY-4,其上搭载的闪电成像仪(lightning mapping imager, LMI)在仪器研究和产品生成算法等方面都处于国际前沿,具有广阔的应用前景(梁华等,2017)。FY-4 卫星是我国第二代静止轨道气象卫星,第一颗星被命名为 FY-4A,为科研试验卫星,于 2016 年 12 月 11 日成功发射。FY-4A 采用三轴稳定姿态控制的大型遥感平台,装载多种有效载荷,包括多通道扫描成像辐射计、干涉式大气垂直观测仪、LMI 及空间环境监测仪器(张鹏等,2016)。其中 LMI 数据利用闪电光辐射在 777.4 nm 中性氧

原子近红外吸收谱线最强这一特征,实现对闪电的分钟级、长时间连续光学观测(曹冬杰,2016),能够对闪电、强对流等进行实时动态监测,同时由于 LMI 是在云顶观测闪电,观测包括云闪、云间闪和地闪在内的总闪电(徐国强等,2020),且对云闪更加敏感,而云闪信息也更具有强对流发展的预警意义。因此 FY-4 星载 LMI 产品对于研究强对流天气过程,实现雷暴预警和预报、对流初生判断、强风暴活动的提前预警等有重要的应用价值。支树林等(2019)对 2018 年第 22 号台风飚线过程的 FY-4A 闪电资料进行了分析,发现伴随的雷暴大风大都发生在卫星闪电密集区的前沿;张晓芸等(2019)将 FY-4 闪电资料与地基闪电进行数据融合,并研究了融合产品在厦门一次强降水预警中的作用。任素玲等(2020)研究认为 FY-4A LMI 产品较地面闪电观测产品能够观测到更多的闪电。王清平等(2019)发现 FY-4 卫星的闪电定位监测数据能更好地识别强对流云团分布范围。由于 LMI 产品投入业务应用时间非常短,相关产品对于雷暴的消演变、强天气的预警时间提前量等关系仍不明确,因此 LMI 产品在对流性天气监测和预警中的应用还有待进一步开展。

如何更好地利用 FY-4 LMI 产品,使其在对流性天气监测和预警中发挥更好的作用是目前急需解决的一个难题。本文利用 FY-4 LMI 产品,结合 ADTD(advanced time of arrival and direction)资料、FY-4 红外云图资料、雷达资料以及其他常规观测资料,对 2019 年 5 月 25 日出现在湖北的一次强降水事件进行分析,来揭示 FY-4 LMI 产品在对流系统演变以及短时强降水监测和预警中的作用,为强天气监测和预报提供更为有用的参考依据。

## 1 过程实况

2019 年 5 月 25 日 08 时至 26 日 08 时,湖北省中

东部出现区域性暴雨到大暴雨天气。全省 19 个国家站、439 个区域站出现大暴雨(图 1a),最强降水中心位于江汉平原地区,最大累计降水量为 276 mm(潜江县渔洋站)。主要强对流类型以短时强降水为主,主要短时强降水时段包括:第一个强降水时段是 5 月 25 日 08—17 时,受到槽前西南急流中南风脉动以及边界层辐合线的共同影响,江汉平原一带有近似圆形对流云团生成并逐渐东移,导致江汉平原南部至鄂东南南部一带出现短时强降水(图 1b),降水性质以暖区对流性降水为主,最大小时雨强为  $60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (潜江县渔洋站);第二个强降水时段是 5 月 25 日 18—23 时,受到低涡切变线以及冷空气的共同影响,江汉平原南部再度有东北—西南向对流云系生成并缓慢东移,导致江汉平原南部至鄂东一带出现大范围短时强降水(图 1c),降水性质以锋面降水为主,最大小时雨强达到  $81.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (潜江县渔洋站)。

由图 1 可看出,不同降水性质、不同对流形态的对流云团均在江汉平原及其以东地区产生了显著的

短时强降水,从短时强降水与 FY-4 红外云图亮温的演变图可看出(图略),短时强降水区域主要位于强对流云团的中心区域或者梯度大值区(万夫敬和刁秀广,2018)。显然,FY-4 红外云图资料对短时强降水监测及预警具有一定的指示性。但是由于红外通道对云没有穿透性,只能获取云顶信息,很难将强对流云团从卷云特别是密实的厚卷云中完全分离出来,因此 FY-4 红外云图资料在短时强降水监测预警上具有一定的局限性。而搭载在 FY-4 卫星上的 LMI 能够对强对流天气系统实现更强时间分辨率(逐 10 min)实时连续监测,逐渐成为强对流云团监测的另外一种有效手段,而 LMI 产品对于不同降水性质、不同对流形态下的对流云团监测及预警作用是否具有不同的特征,也是本文研究的重点。

## 2 FY-4 LMI 产品简介

中国新一代静止卫星 FY-4 LMI 是我国第一次自主研发的星载闪电成像仪,主要包括用于观测闪

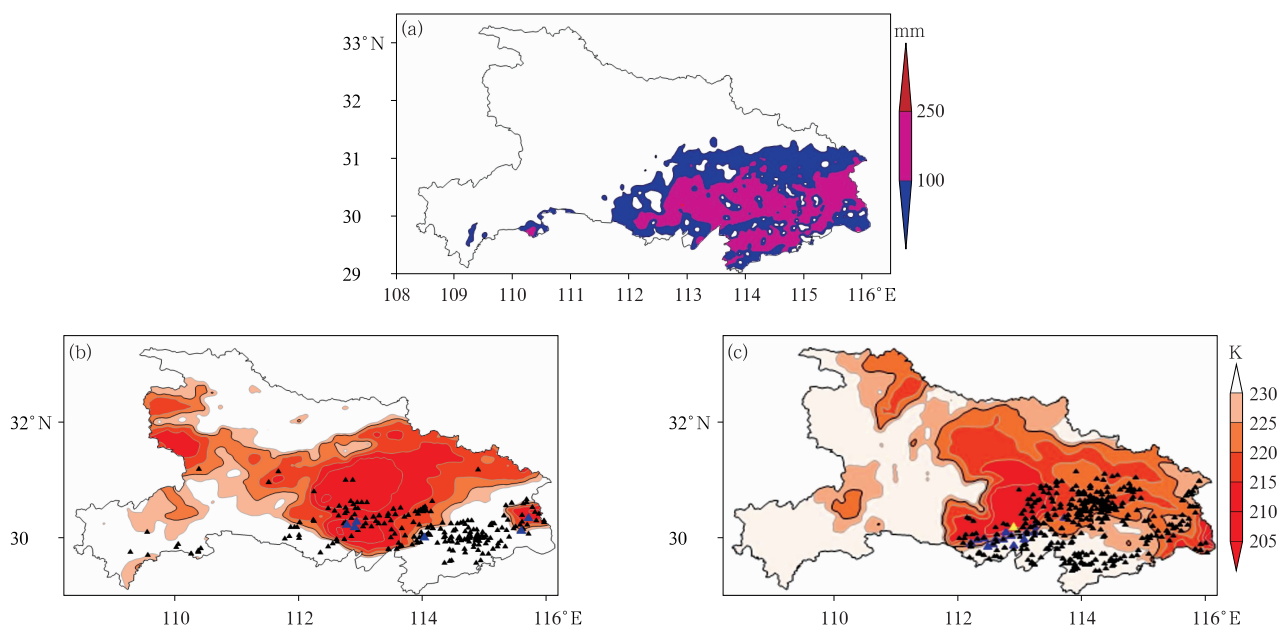


图 1 2019 年 5 月(a)25 日 08 时至 26 日 08 时加密雨量,(b)25 日 08 时 FY-4 红外云顶亮温(填色)与 08—17 时短时强降水落区,(c)25 日 18 时 FY-4 红外云顶亮温(填色)与 19—23 时短时强降水落区(黑色三角:雨强为  $20 \sim 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,蓝色三角:雨强为  $50 \sim 80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,黄色三角:雨强  $> 80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )

Fig. 1 (a) The observed accumulated precipitation from 08:00 BT 25 to 08:00 BT 26, (b) FY-4 infrared cloud top brightness temperature (colored) at 08:00 BT 25 and the short-term severe precipitation area in 08:00—17:00 BT 25, (c) FY-4 infrared cloud top brightness temperature (colored) at 18:00 BT 25 and the short-term severe precipitation area in 19:00—23:00 BT 25 May 2019 (black triangle: rainfall intensity in  $20 \sim 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ , blue triangle: rainfall intensity in  $50 \sim 80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ , yellow triangle: rainfall intensity greater than  $80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )

电光辐射的电荷耦合器件观测阵列 (CCD) 面阵, 以及用于星上数据预处理和背景信号滤除的星上实时事件处理器 (RTEP) (惠雯等, 2016)。其中 LMI 的核心传感器是 CCD 面阵, 面阵大小为  $400 \times 600$ , 探测中心波长为  $777.4 \text{ nm}$ , 星下点空间分辨率为  $7.8 \text{ km}$ , 带宽为  $\pm 1 \text{ nm}$ 。1 分钟能够连续观测 30 000 帧图像, 单帧图像积分时间约为  $1.875 \text{ ms}$ , 远大于一次闪电放电过程约  $400 \mu\text{s}$  的持续时间。RTEP 接收 CCD 面阵并行输出的原始观测数据, 经信号接收与限幅、多帧平均背景估值、背景信号去除等处理, 实现对闪电信号的捕捉。RTEP 系统输出的原始观测数据, 经过处理, 输出包含闪电“事件”“组”和“闪电”的发生时间、位置等信息。当 LMI CCD 面阵单个像元观测到的闪电光辐射的辐散度高于背景阈值时, 定义为一次闪电“事件”; 对应 CCD 面阵该像元中心位置即为这次闪电“事件”位置。同一帧 CCD 图像上的多个相邻微小像元观测到的闪电“事件”组成一个“组”; 对应于地闪的一次回击或云闪的一次 K 变化, 满足一定阈值条件的多个“组”定义为一次真实的“闪电”过程。由于“闪电”具有时间和空间上的延展性, 可以看做传统意义上的一次闪电, 基于此将“闪电”作为 LMI 产品的主要参量。

### 3 FY-4A LMI 观测特征分析

#### 3.1 LMI 闪电观测适用性分析

闪电观测技术发展至今已有几十年的历史, 主要观测方式分为地基闪电观测和卫星闪电观测两种。其中地基闪电监测是通过 ADTD 闪电定位系统连续、实时地记录和分析波形特征点的到达时间和位置 (惠雯等, 2016), 而卫星闪电观测则通过观测雷暴云中闪电发出的强烈光脉冲, 利用闪电信号与背景信号在时间空间和光谱特性方面的差异, 通过 CCD 面阵观测器, 利用光谱滤波、空间滤波等技术获取闪电信号。二者在观测原理上有明显的差异, 因此在 FY-4 LMI 产品应用分析之前, 需要通过对分析 LMI 和 ADTD 数据在不同降水阶段的异同点, 从而对 LMI 产品在此次过程中的观测能力进行有效的评估。由于星地闪电观测技术在原理、特性、方法、数据格式、度量单位、观测范围等方面都不相同, 因此在开展对比研究前, 要进行科学的数据预处理, 通过一定的转换方法, 将不同来源的数据进行时

空范围的有效匹配。根据本文的研究需求, 确立评判星地观测数据一致性时间窗口  $\leq 1.0 \text{ s}$ , 空间窗口纬度  $\leq 0.5^\circ$ , 经度  $\leq 0.5^\circ$ 。为对 LMI 产品与 ADTD 产品进行一定时间段内总体形态上的对比, 因此选取 10 min 内闪电累积分布图进行对比分析。

图 2 分别给出了 5 月 25 日 08、11、14、18、20、23 时 LMI 前 10 min 闪电数据 (黑点) 和 ADTD 闪电数据 (红点) 的分布。从闪电分布的总体趋势来看, 无论是暖区降水阶段还是锋面降水阶段, LMI 闪电观测的分布区域与 ADTD 闪电观测的分布区域大体是一致的, 因此这次过程中 LMI 闪电资料具有一定的适用性。由于观测机理的不同, LMI 闪电观测与 ADTD 闪电观测具有一些不同点: 首先, 从 LMI 闪电观测与 ADTD 闪电观测的总体数量来看, 由于 LMI 闪电能够实现总闪 (“云闪” 和 “地闪”) 观测, 因此此次过程中, LMI 闪电观测比 ADTD 闪电观测到的闪电数据更多。此外, 从相对位置来看, LMI 闪电观测和 ADTD 闪电观测也具有一定的差异性。25 日 08 时, 暖区对流在江汉平原一带发展, 该地区对应出现了明显的闪电 (图 2a)。其中 LMI 闪电观测区域 (黑色方框) 较 ADTD 闪电观测区域 (红色方框) 位置更偏东。由于对流系统的移动方向是自西向东, 因此 25 日 08 时, LMI 闪电观测区域略超前于 ADTD 闪电观测。此后, 随着对流系统的东移, LMI 闪电观测的这种超前表现趋于减弱 (图 2b, 2c)。18 时前后, 受到锋面系统的影响, 东北—西南向的锋面对流系统在江汉平原再度发展, 对应上述地方再度出现明显的闪电 (图 2d)。从江汉平原 LMI 闪电观测和 ADTD 闪电观测的相对位置看, 25 日 18 时, LMI 闪电观测再次出现超前于 ADTD 闪电观测的特征, 这种超前特征一致持续到 20 时前后 (图 2e), 20 时之后, 随着对流系统的东移减弱, LMI 闪电观测的这种超前表现再次趋于减弱。

由上述分析可看出, 在对流迅速发展的初期, LMI 闪电观测出现超前于 ADTD 闪电观测的特征, 并且锋面降水阶段中这种超前特征持续时间更长一些。之所以出现这样的观测差异, 这是由于 LMI 闪电观测主要是云顶观测, 观测包括云闪、地闪在内的总闪, 而且对云闪更加敏感, 而 ADTD 闪电观测主要以地闪为主。在雷暴系统中, 云闪的数量多大于地闪, 云内的第一个闪电几乎总是云闪, 有些雷暴云



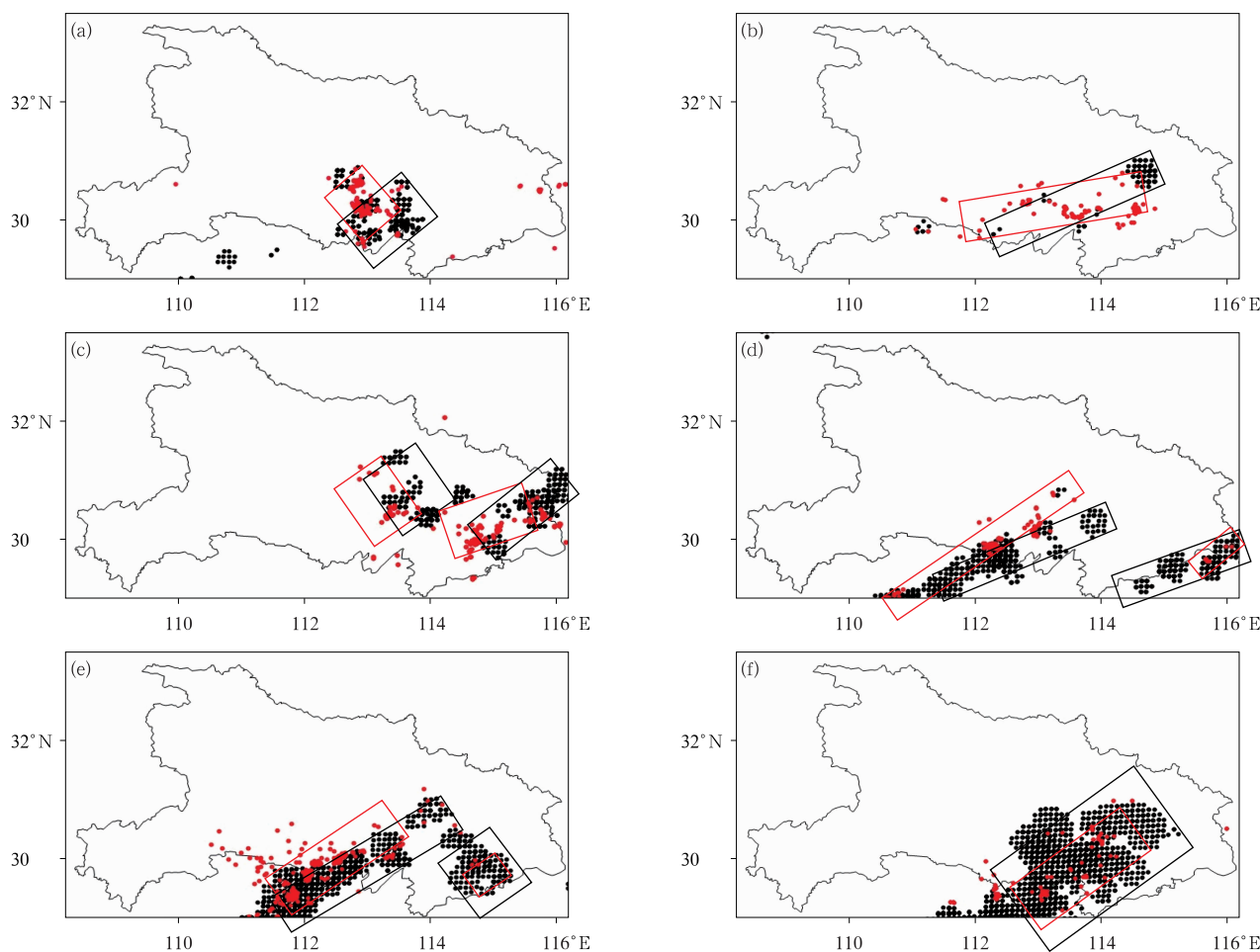


图 2 2019 年 5 月 25 日 (a) 07:50—08:00, (b) 10:50—11:00, (c) 13:50—14:00, (d) 17:50—18:00, (e) 19:50—20:00, (f) 22:50—23:00 的 LMI 和 ADTD 闪电观测  
(黑色圆点和方框: LMI 闪电观测, 红色圆点和方框: ADTD 闪电观测)

Fig. 2 LMI and ADTD lightning observations of (a) 07:50—08:00 BT, (b) 10:50—11:00 BT, (c) 13:50—14:00 BT, (d) 17:50—18:00 BT, (e) 19:50—20:00 BT, (f) 22:50—23:00 BT 25 May 2019  
(black dot and box: LMI lightning, red dot and box: ADTD lightning)

中的闪电可能全部为云闪,云中放电比云地放电平均时间具有一定的超前性(副岛毅和奥山和彦, 1998),因此导致 LMI 闪电观测会出现超前于 ADTD 观测的特性,而这种超前性对于对流活动的监测具有重要的预警意义。为进一步研究此次过程中 LMI 数据与对流系统发展演变之间的关系,下文将对 LMI 数据与红外云顶温度变率、雷达反射率等数据进行对比分析。

### 3.2 LMI 闪电观测在积云发展演变中的作用分析

Roberts and Rutledge(2003)指出红外云图上出现低于  $0^{\circ}\text{C}$  且范围较大的云顶温度变率是积云快速发展的信号之一。本文将首先选取红外云顶温度

变率代表积云发展信号,验证 LMI 闪电观测在积云对流发展中所起到的作用。本文所使用的红外云图资料来自于 FY-4A 多通道扫描成像辐射计红外通道(波长约为  $10.8\ \mu\text{m}$ )。因此在本文中,用当前红外云顶亮温、未来 1 小时内红外云顶温度变率(后一时刻云顶亮温与初时刻云顶亮温之差)表示对流云团发展演变的指标。

25 日 08 时前后,在较好的不稳定和水汽条件下,受到南风气流中动力辐合作用的影响,江汉平原一带有团状对流云团生成并东移。08—09 时是江汉平原一带云团发展的最强盛时刻。从 08 时 FY-4 红外云顶亮温可看出(图 3a),江汉平原附近形成一个中尺度对流云团,红外亮温最低值达到 205 K。

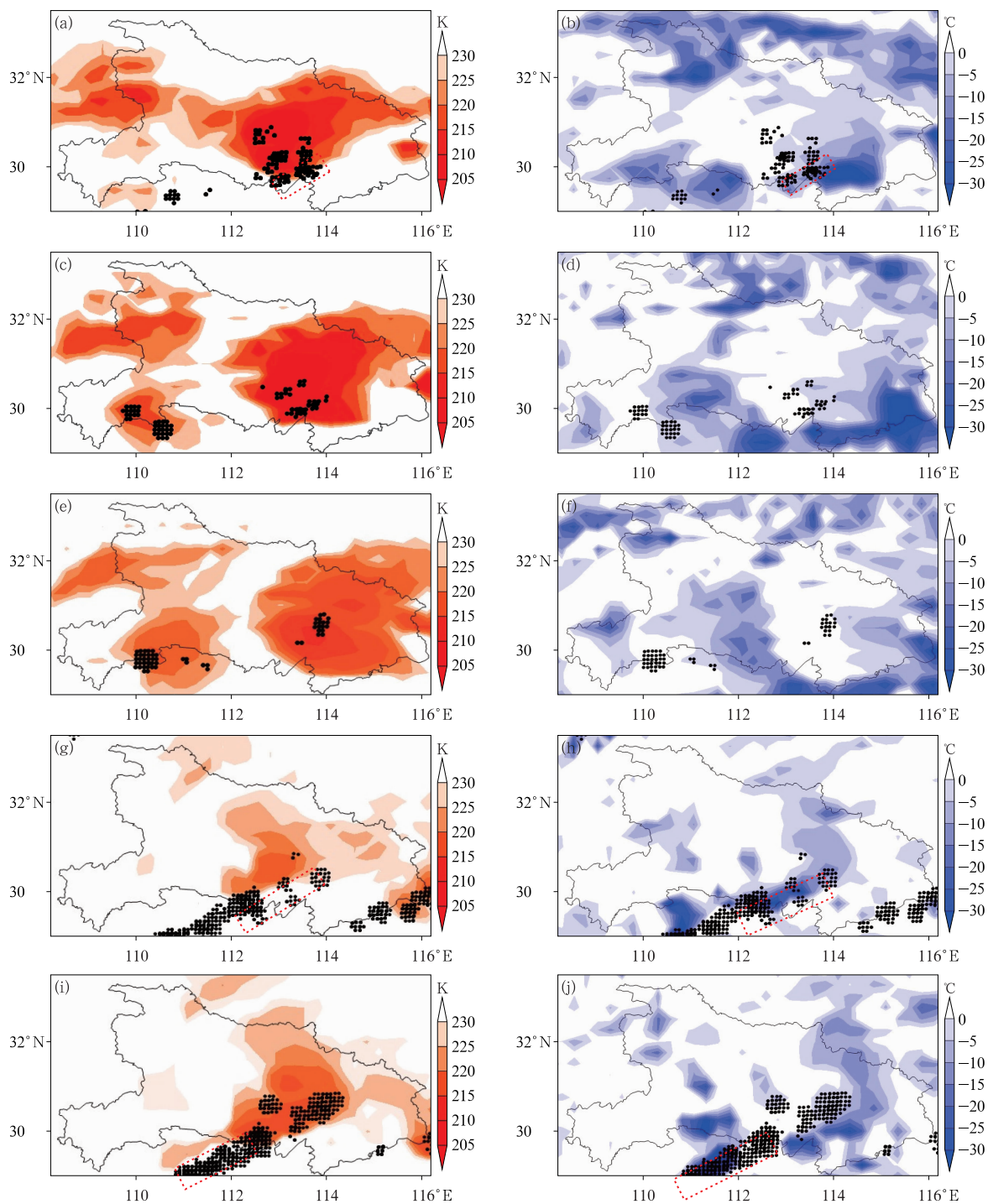
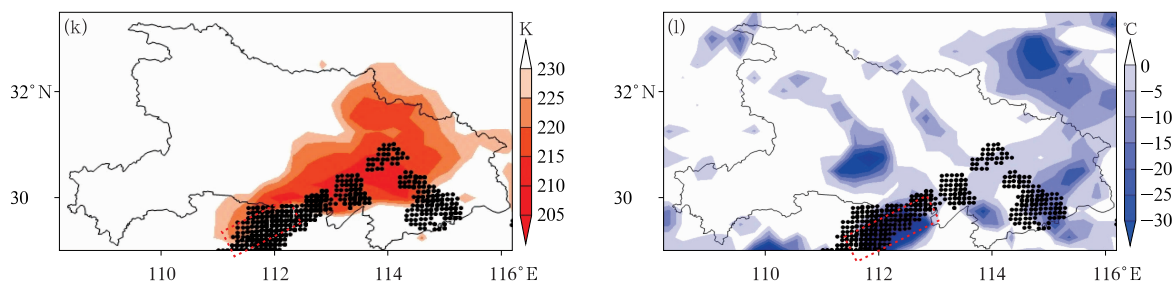


图 3 2019 年 5 月 25 日(a)08 时,(c)09 时,(e)10 时,(g)18 时,(i)19 时,(k)20 时 FY-4 红外云顶亮温(填色)和 LMI 闪电分布;(b)08—09 时,(d)09—10 时,(f)10—11 时,(h)18—19 时,(j)19—20 时,(l)20—21 时 FY-4 红外 1 小时云顶温度变率(填色)和初时刻 LMI 闪电分布  
(黑色圆点:LMI 闪电,红色虚线框:积云发展标识)

Fig. 3 FY-4 infrared cloud top brightness temperature (colored) and LMI lighting at (a) 08:00 BT, (c) 09:00 BT, (e) 10:00 BT, (g) 18:00 BT, (i) 19:00 BT and (k) 20:00 BT 25 May 2019; FY-4 hourly cooling rate of infrared cloud top temperature (colored) and initial LMI lighting at (b) 08:00—09:00 BT, (d) 09:00—10:00 BT, (f) 10:00—11:00 BT, (h) 18:00—19:00 BT, (j) 19:00—20:00 BT and (l) 20:00—21:00 BT 25 May 2019  
(black dot: LMI lighting, red dotted box: cumulus development logo)



续图  
continued

从 08 时 LMI 闪电分布来看,一部分位于云团中心部分,还有一部分位于云团的移动前方(右侧)。从 08—09 时红外云顶温度变率(图 3b)看,云团右侧前方 LMI 闪电分布的区域出现了低于  $0^{\circ}\text{C}$  的云顶温度变率,表明出现在云团右侧前端的 LMI 闪电观测对于未来 1 小时内对流发展起到一定的指示作用,而出现在云团中心区域的 LMI 闪电分布区域并没有出现低于  $0^{\circ}\text{C}$  的云顶温度变率,因此这部分 LMI 闪电观测对于对流发展演变并没有明显的指示意义。09—10 时(图 3c, 3e)以及 11—17 时(图略), LMI 闪电主要分布在红外云团的中心区域,对于未来 1 小时的云顶温度变率来看(图 3d, 3f), LMI 闪电分布区域并没有出现低于  $0^{\circ}\text{C}$  的云顶温度变率,因此这个时段的 LMI 闪电观测对于对流发展演变并没有明显的指示意义。

25 日 18 时前后,受到低涡东移以及地面冷锋的影响,江汉平原一带有对流云团生成,并逐渐发展为东北—西南走向的对流云系并缓慢东移。18—20 时是该对流云系发展的最强盛时刻。从 18 时 FY-4 红外云顶亮温图和 LMI 闪电分布看(图 3g), LMI 闪电主要分布在红外云团的右侧(红色虚线框)。从 18—19 时红外云顶温度变率(图 3h)看,18 时云团右侧前方 LMI 闪电分布的区域出现了明显低于  $0^{\circ}\text{C}$  的云顶温度变率,最大降温率达到了  $-30^{\circ}\text{C}$ ,表明 LMI 闪电观测区域未来 1 小时内出现了明显的对流发展,进一步表明出现在云团右侧的 LMI 闪电观测对于未来 1 小时内对流发展起到一定的指示作用。19—20 时(图 3i, 3k),随着系统缓慢东移,原对流系统的尾部开始出现新的对流,此时 LMI 闪电分成两部分,一部分与对流云团大致重合,另外一部分则位于对流云系的右侧(红色虚线框)从未来 1 小时的云顶温度变率来看(图 3j, 3l),位于对流云团右侧的 LMI 闪电分布区域出现明显的云顶降温,而与云团大致重合的 LMI 闪电分布区域并没有出现低于  $0^{\circ}\text{C}$  的云顶温度变率。20—23 时(图略), LMI 闪电

主要分布在对流云团的中心区域,未来 1 小时内没有出现低于  $0^{\circ}\text{C}$  的云顶温度变率。

从以上分析可看出,此次过程中,无论暖区降水还是锋面降水阶段,当同时刻 LMI 闪电观测位于当前对流云团移动的前方时,未来 1 小时内 LMI 闪电分布区域出现了明显的云顶温度变率,表明 LMI 闪电观测对于未来 1 小时内对流发展起到一定的指示作用;而当 LMI 闪电观测与出现在对流云团的中部时,未来 1 小时内 LMI 闪电分布区域并没有出现低于  $0^{\circ}\text{C}$  的云顶温度变率,此时 LMI 闪电观测对于未来 1 小时内对流发展并没有明显的指示作用。为分析出现这种差异的原因,将分别选取暖区降水阶段的 08—09 时和锋面降水阶段 18—19 时这两个时段,采用时间分辨率更高的雷达资料(逐 6 min)和 LMI 资料(逐 10 min)进行对比分析。

### 3.3 LMI 闪电观测在对流系统演变中的作用分析

多普勒雷达观测是目前监测对流系统发生发展的有效手段之一(龙柯吉等, 2020)。为进一步判断 LMI 闪电观测在对流系统发生发展中所起到的作用,将选取时间分辨率更精细的雷达观测资料与 LMI 闪电观测资料进行对比分析。本文选取的雷达观测资料时间分辨率为 6 min,而使用的 LMI 闪电资料的时间分辨率为 10 min,因此以 LMI 闪电观测资料的时间分辨率为基准,将雷达观测资料的时间分辨率采用最邻近差值法进行差值,使其与 LMI 闪电观测资料的时间分辨率一致。为验证 LMI 闪电资料对于雷达反射率演变是否有提前指示性,分别选取暖区降水阶段和锋面降水阶段典型时刻的 LMI 闪电与雷达反射率的演变情况依次进行叠加显示。

暖区降水阶段:从 5 月 25 日 08:05 的 LMI 资料和雷达反射率资料叠加图可以看出(图 4a), LMI 与对流系统的对应关系分成两种, A 区内(黑色方框)有一明显的对流系统发展, LMI 闪电主要分布



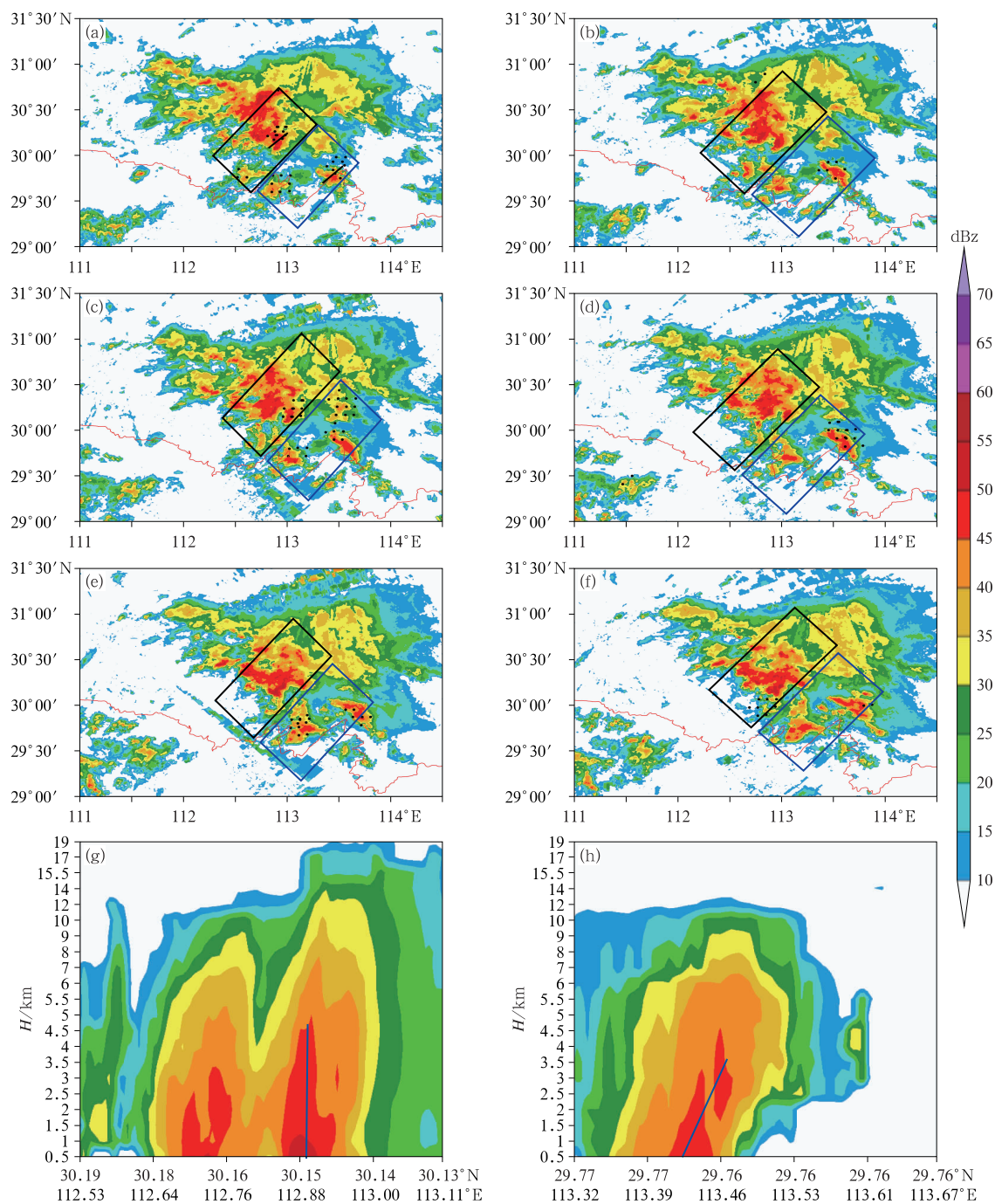


图 4 2019 年 5 月 25 日 (a)08:05, (b)08:15, (c)08:25, (d)08:35, (e)08:45, (f)08:55 LMI 的闪电和雷达反射率;

25 日 08:05 与图 4a 中 (g) 黑色方框和 (h) 蓝色方框剖线对应的雷达反射率垂直剖面

(填色: 雷达反射率, 黑色圆点: LMI 闪电, 黑色实线: 反射率剖面, 黑色方框: A 区, 蓝色方框: B 区;

图 4g, 4h 中的蓝色实线: 最强反射率因子垂直剖面特征线)

Fig. 4 LMI lighting and radar reflectivity at 6 min intervals at (a) 08:05 BT, (b) 08:15 BT,

(c) 08:25 BT, (d) 08:35 BT, (e) 08:45 BT and (f) 08:55 BT 25 May 2019;

radar reflectivity vertical profiles at 6 min intervals corresponding to the section lines

in the black box (g), and in the blue box (h) in Fig. 4a at 08:05 BT 25 May 2019

(colored; radar reflectivity, black dot: LMI lighting, black solid line: reflectance profile, black box: Zone A, blue box: Zone B;

blue solid line in Figs. 4g, 4h; vertical profile characteristic line of the strongest reflectivity factor)

在对流系统的内部,而 B 区内(蓝色方框)有两个尺度较小的对流单体,LMI 闪电主要分布在对流单体移动的前方;08:15(图 4b),A 区闪电活动不明显,B 区内北部对流系统附近继续出现闪电活动。与 08:05 对流系统相比,A 区内的对流系统变化不大,但是 B 区内对流单体向着 08:05 闪电出现的区域移动,并且强度加强;08:25—08:35(图 4c,4d),A 区内闪电活动不明显,B 区内在对流系统移动方向的前方(东北方)继续出现闪电活动。与 08:15 对流系统相比,A 区内对流系统变化不大,B 区内对流系统向着东北方向继续移动,强度进一步加强。08:45(图 4e),A 区内没有闪电活动,B 区内闪电活动与对流系统同步出现。与 08:35 对流系统相比,A 区内对流系统变化不大,B 区内对流系统开始变得松散,强度略有减弱。08:55(图 4f),A、B 区内闪电活动都不明显,B 区内对流系统继续变得松散,强度进一步减弱。

从以上分析可看出,B 区中 LMI 闪电活动出现的次数较多,主要出现在对流系统移动的前方,能够对流系统的发展演变起到一定的提前指示意义;而 A 区中 LMI 闪电活动出现的次数较少,主要出现在对流系统的内部,对对流系统的发展演变的指示意义偏弱。为什么会出现这样的差别呢?分别针对 A 区中的对流系统和 B 区中的北部对流系统沿着移动方向进行剖面(图 4g,4h),发现 A 区北部对流系统的雷达回波垂直方向上呈现准垂直型,云底反射率达到了 50 dBz 以上,云团发展旺盛,由于云体呈现准垂直型,因此卫星观测的 LMI 闪电与对流系统的发展几乎是同步的,LMI 闪电对于对流系统演变的提前指示意义偏弱;而 B 区对流系统的雷达回波垂直方向上呈现出沿着移动方向向前倾斜的特征,卫星观测 LMI 闪电首先观测到云中闪电,多普勒雷达稍后观测到反射率特征,因此此时 LMI 闪电对于对流系统演变具有一定的提前指示意义。

锋面降水阶段:18—20 时是锋面降水对流系统发展阶段,其中 19 时是对流系统最强烈发展阶段。从 5 月 25 日 19:05 的 LMI 资料和同时刻雷达反射率资料叠加图可看出(图 5a),江汉平原南部有明显的线状对流系统形成。LMI 闪电分布区域(蓝色方框内)位于对流系统的移动方向的前方;19:15,江汉平原线状对流系统缓慢向东移动,此时闪电继续出现在对流系统移动的前方;19:25,江汉平原线状对流系统继续缓慢东移,其北部形态开始变得有组织化,回波强度增强,此时闪电主体仍然出现在对流系统移动的前方;19:35—19:45,江汉平原线状对流系统呈现准静止型,强度维持,此时闪电主体仍然出现

在对流系统移动的前方;19:55,闪电主体分布区域与对流系统相重合,20 时之后(图略),对流系统在东移过程中逐渐减弱。

从以上分析可看出,19:05—19:45 这段时间内,LMI 闪电主要分布在对流系统移动的前方,此时对流系统处在强烈发展加强阶段;19:55 以后,LMI 闪电分布区域与对流系统出现区域较重合,此后,对流系统开始出现减弱趋势。可见在锋面降水过程中对流系统发展的不同阶段,LMI 观测与雷达观测区域的相对位置有所不同,LMI 闪电分布对于对流系统发展演变的关系也有所不同,为研究其原因,分别选取对流发展阶段(19:05)和对流趋于减弱阶段(19:55)的线状对流系统,沿着其移动方向做雷达反射率垂直剖面,发现 19:05(图 5g),在对流系统的强烈发展阶段,雷达反射率绘制剖面上回波整体出现向移动方向前倾的结构,有利于高空卫星首先观测到云闪的发生,因此可能导致出现 LMI 闪电分布位于同时刻对流系统移动方向的前方,并且对对流系统的发展演变有指示意义;而在对流趋于减弱的阶段(图 5h),雷达反射率垂直剖面上最强反射率因子垂直结构呈现准垂直型,此时高空卫星首先观测到云闪发生的时间几乎与地面同步,因此可能导致 LMI 闪电分布与同时刻对流系统位置较为一致,此时 LMI 分布对于对流系统发展演变的提前指示意义偏弱。

## 4 结 论

本文研究了 2019 年 5 月 25 日强降水过程中,FY-4 LMI 数据在不同降水性质、不同演变阶段对流系统的观测特征,得出如下结论:

(1) 从闪电分布的总体趋势来看,无论是暖区降水阶段还是锋面降水阶段,LMI 闪电观测的分布区域与 ADTD 闪电观测的分布区域大体是一致的,因而在这次过程中 LMI 闪电资料具有一定的适用性。此外,在对流迅速发展的初期,LMI 闪电观测出现超前于 ADTD 闪电观测的特征,并且锋面降水阶段中这种超前特征持续时间更长一些。

(2) 无论是暖区降水还是锋面降水阶段,当同时刻 LMI 闪电观测位于当前对流云团移动的前方时,未来 1 小时内 LMI 闪电分布区域出现了明显的云顶温度变率,积云有发展趋势;而当 LMI 闪电观测与出现在对流云团的中部时,未来 1 小时内 LMI 闪电分布区域并没有出现低于 0℃ 的云顶温度变率。

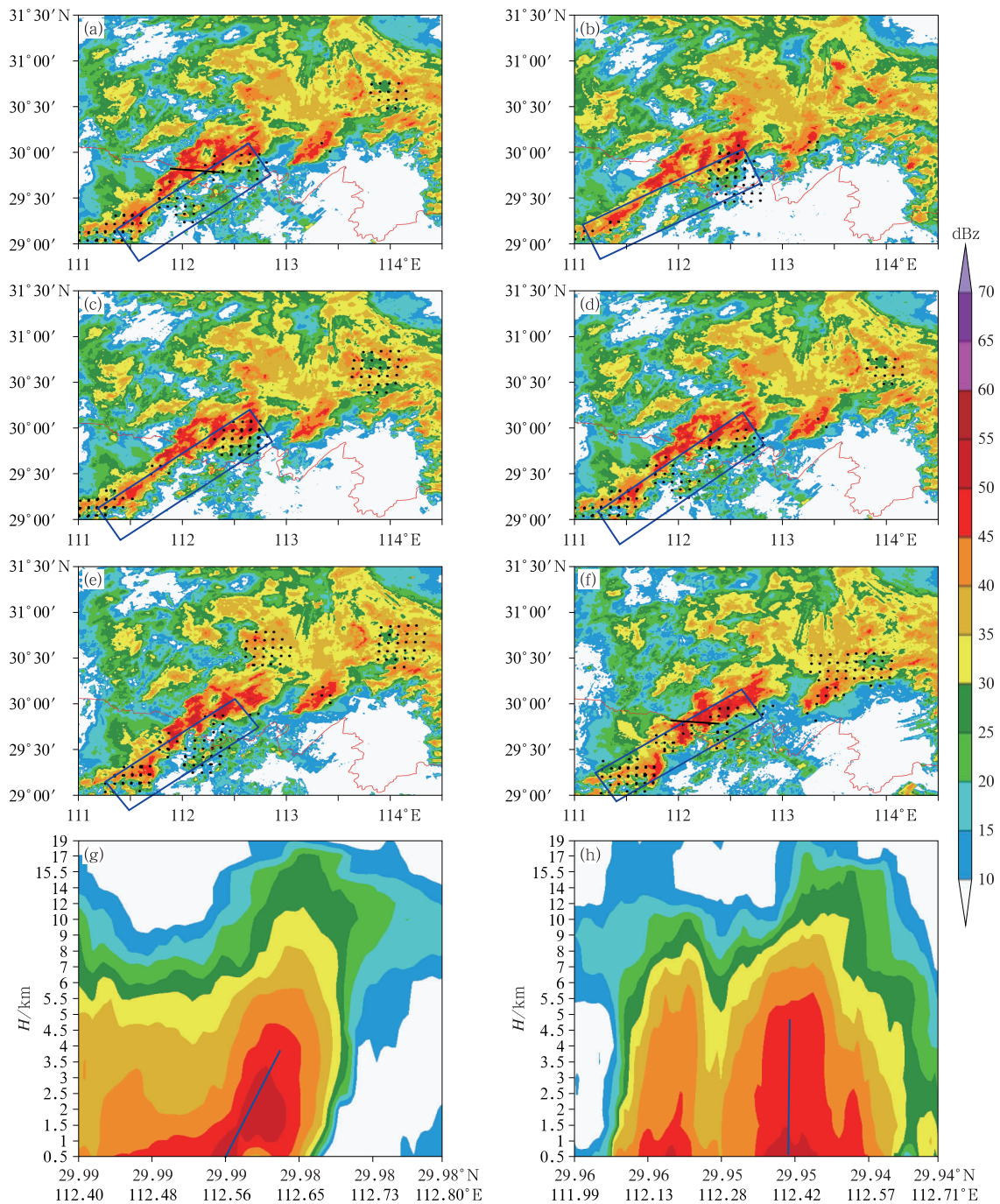


图 5 2019 年 5 月 25 日 (a)19:05, (b)19:15, (c)19:25, (d)19:35, (e)19:45, (f)19:55 的 LMI 闪电和雷达反射率;  
(g)19:05, (h)19:55 雷达反射率垂直剖面

(填色: 雷达反射率, 图 5a, 5f 中的黑色圆点: LMI 闪电, 黑色实线: 反射率剖面,

图 5g, 5h 中的蓝色方框: LMI 闪电分布, 蓝色实线: 最强反射率因子垂直剖面特征线)

Fig. 4 LMI lighting and radar reflectivity at 6 min intervals at (a) 19:05 BT, (b) 19:15 BT,

(c) 19:25 BT, (d) 19:35 BT, (e) 19:45 BT and (f) 19:55 BT 25 May 2019;

radar reflectivity vertical profiles at 6 min intervals at (g) 19:05 BT and (h) 19:55 BT 25 May 2019

(colored: radar reflectivity, black dot: LMI lighting, black solid line in Figs. 5a, 5f: reflectance profile, blue box: LMI lighting, blue solid line in Figs. 5g, 5h: vertical profile characteristic line of the strongest reflectivity factor)

(3) 无论是暖区降水还是锋面降水阶段, LMI 观测与对流系统的相对位置有所不同, LMI 闪电分

布对于对流系统发展演变的关系也有所不同。当雷达反射率垂直剖面上最强回波出现向移动方向前倾

结构时,LMI 闪电观测往往出现在雷达观测对流系统移动方向的前方,此时 LMI 闪电观测对于对流系统发展演变有较好的提前指示意义;而当雷达反射率垂直剖面上最强回波出现准垂直结构时,LMI 闪电观测往往与雷达观测对流系统较重合,此时 LMI 闪电观测对于对流系统发展演变的提前指示意义偏弱。

本文通过对 2019 年 5 月 25 日强降水过程中 FY-4 LMI 产品在对流系统的监测及预报指示性进行分析,揭示了在对流系统演变中 LMI 闪电观测的提前预警意义,得出了一些有意义的结论,为新型卫星观测资料在强天气监测和预报中的应用提供了有用的参考依据。但是本文的研究仅局限于一个个例,后期将通过大量个例分析,进一步系统研究 LMI 产品在不同天气背景下、不同类型强对流天气中的监测及预警作用。

## 参考文献

- 曹冬杰,2016. FY-4 静止卫星闪电成像仪监测原理和产品算法研究进展[J]. 气象科技进展,6(1):94-98. Cao D J, 2016. The development of product algorithm of the Fengyun-4 geostationary lightning mapping imager[J]. Adv Meteor Sci Technol, 6(1):94-98(in Chinese).
- 戴建华,秦虹,郑杰,2005. 用 TRMM/LIS 资料分析长江三角洲地区的闪电活动[J]. 应用气象学报,16(6):728-736. Dai J H, Qin H, Zheng J, 2005. Analysis of lightning activity over the Yangtze River Delta using TRMM/LIS observations[J]. J Appl Meteor Sci, 16(6):728-736(in Chinese).
- 副岛毅,奥山和彦,1998. 雷检测系统(SAFIR)与雷短时预报[J]. 气象科技,26(3):50-54. Fu D Y, Ao S H Y, 1998. Safir and short term forecast of lightning[J]. Meteor Sci Tech, 26(3):50-54(in Chinese).
- 惠雯,黄富祥,朱杰,2016. 卫星闪电成像仪光学成像探测技术[J]. 光学精密工程,24(10s):361-369. Hui W, Huang F X, Zhu J, 2016. Technology of optical detection of lightning from space[J]. Opt Precis Eng, 24(10s):361-369(in Chinese).
- 梁华,鲍书龙,陈强,等,2017. FY-4 卫星闪电成像仪设计与实现[J]. 上海航天,34(4):43-51. Liang H, Bao S L, Chen Q, et al, 2017. Design and implementation of FY-4 geostationary lightning imager[J]. Aerosp Shanghai, 34(4):43-51(in Chinese).
- 龙柯吉,康岚,罗辉,等,2020. 四川盆地雷暴大风雷达回波特征统计分析[J]. 气象,46(2):212-222. Long K J, Kang L, Luo H, et al, 2020. Statistical analysis of radar echo characteristics of thunderstorm gales in Sichuan Basin[J]. Meteor Mon, 46(2):212-222(in Chinese).
- 郗秀书, Toumi R, 2003. 卫星观测到的青藏高原雷电活动特征[J]. 高原气象,22(3):288-294. Qie X S, Toumi R, 2003. Lightning activities on Qinghai-Xizang Plateau as observed by satellite-based lightning imaging sensor[J]. Plateau Meteor, 22(3):288-294(in Chinese).
- 任素玲,赵玮,曹冬杰,等,2020. FY-4A 白天对流风暴和闪电产品在华北强雷暴天气分析中的应用[J]. 海洋气象学报,40(1):33-46. Ren S L, Zhao W, Cao D J, et al, 2020. Application of FY-4A daytime convective storm and lightning products in analyzing severe thunderstorm weather in North China[J]. J Mar Meteor, 40(1):33-46(in Chinese).
- 万夫敬,刁秀广,2018. 两次 MCC 红外云图特征与天气实况异同性分析[J]. 气象,44(6):759-770. Wan F J, Diao X G, 2018. Comparative analysis on cloud evolution features and weather of two MCCs[J]. Meteor Mon, 44(6):759-770(in Chinese).
- 王清平,吴晓京,陈阳权,等,2019. FY-4A 卫星数据可视化及应用[J]. 气象科技,47(3):502-507. Wang Q P, Wu X J, Chen Y Q, et al, 2019. Visualization and application of FY-4A satellite data[J]. Meteor Sci Technol, 47(3):502-507(in Chinese).
- 徐国强,黄守友,赵晨阳,2020. FY-4A 闪电资料在对流天气数值预报中的影响研究[J]. 气象,46(9):1165-1177. Xu G Q, Huang S Y, Zhao C Y, 2020. Influence of FY-4A lightning data on numerical forecast of convective weather[J]. Meteor Mon, 46(9):1165-1177(in Chinese).
- 袁铁,郗秀书,2010. 基于 TRMM 卫星对一次华南飑线的闪电活动及其与降水结构的关系研究[J]. 大气科学,34(1):58-70. Yuan T, Qie X S, 2010. TRMM-based study of lightning activity and its relationship with precipitation structure of a squall line in South China[J]. Chin J Atmos Sci, 34(1):58-70(in Chinese).
- 张鹏,郭强,陈博洋,等,2016. 我国风云四号气象卫星与日本 Himawari-8/9 卫星比较分析[J]. 气象科技进展,6(1):72-75. Zhang P, Guo Q, Chen B Y, et al, 2016. The Chinese next-generation geostationary meteorological satellite FY-4 compared with the Japanese Himawari-8/9 satellites[J]. Adv Meteor Sci Technol, 6(1):72-75(in Chinese).
- 张晓芸,魏鸣,潘佳文,2019. FY-4 闪电资料在厦门强降水监测预警中的应用[J]. 遥感技术与应用,34(5):1082-1090. Zhang X Y, Wei M, Pan J W, 2019. Application of FY-4 lightning data in monitoring and warning a heavy precipitation in Xiamen on May 7, 2018[J]. Remote Sens Technol Appl, 34(5):1082-1090(in Chinese).
- 支树林,包慧濛,李婕,2019. FY-4A 卫星闪电资料在台风飑线天气监测中的应用能力分析[J]. 云南大学学报(自然科学版),41(6):1178-1190. Zhi S L, Bao H M, Li J, 2019. Application ability analyses of FY-4A satellite flashes data in typhoon squall line weather surveillance[J]. J Yunnan Univ: Nat Sci Ed, 41(6):1178-1190(in Chinese).
- Boccippio D J, Koshak W J, Blakeslee R J, 2002. Performance assessment of the optical transient detector and lightning imaging sensor. Part I: predicted diurnal variability[J]. J Atmos Ocean Technol, 19(9):1318-1332.
- Ma M, Tao S C, Zhu B Y, et al, 2005. Climatological distribution of lightning density observed by satellites in China and its circumjacent regions[J]. Sci China Series D: Earth Sciences, 48(2):219-229.
- Roberts R D, Rutledge S, 2003. Nowcasting storm initiation and growth using GOES-8 and WSR-88D data[J]. Wea Forecasting, 18:562-584.