张萍萍,林修栋,张莉萍,等.一次 TS 型线状对流不同阶段 LMI 闪电特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2024,18(2):99-106. doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2024.02.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



一次 TS 型线状对流不同阶段 LMI 闪电特征分析

张萍萍^{1,2},林修栋²,张莉萍²,连 帆²,刘文婷³

(1.山东省气象防灾减灾重点实验室,山东 济南 250031;2.威海市气象局,山东 威海 264200;
 3.武汉中心气象台,湖北 武汉 430074)

摘 要:以2019年一次尾随层状(TS)型线状对流为研究个例,利用 FY-4A 闪电成像仪(LMI) 观测资料、雷达组合反射率因子资料、地基闪电定位(ADTD)观测资料、FY-4A 云顶亮温(TBB)资 料和其他常规观测资料,对比分析 LMI 闪电数据在 TS 型线状对流 3 个不同演变阶段的数据可靠 性及观测特征。结果表明:TS 型线状对流不同演变阶段 LMI 观测的闪电具有一定的时空连续性, 其分布与 ADTD 的闪电分布总体一致;对流发展阶段,LMI 闪电位置略超前于 TS 型线状对流前 导对流线,对未来 0~1 h 对流发展具有提前指示意义;对流成熟阶段,LMI 观测的闪电与前导对流 线位置较为一致,对线状对流发展具有监测意义;对流减弱阶段,LMI 闪电一部分位于减弱的 前导对流线中,另一部分位于其后侧尾随的积层混合云中。给出 TS 型线状对流不同演变阶段 LMI 闪电特征模型图,为 LMI 闪电产品在对流天气监测预警中的应用提供一定参考。

关键词:闪电成像仪;线状对流;监测预警 中图分类号:P458.3 ______文献标识码:A

闪电是指发生在不同极性电荷之间的放电现 象,瞬间释放出来的能量具有强大破坏力^[1-2]。闪电 的发生通常与中尺度对流系统形成发展相伴随,其 中线状中尺度对流系统影响过程中闪电活动非常活 跃,危害不容忽视^[3-4]。目前闪电资料观测方式主要 有地面闪电观测和卫星闪电观测方式,地面闪电观 测基于电磁场探测原理,统计云的散射和吸收在放 电过程中闪电的次数^[5]。我国地面闪电观测系统主 要有国家级闪电定位系统(Active Directory Topolopy Diagrammer, ADTD)、电力部门闪电定位系统 (Lighting Location System, LLS)等^[2];卫星闪电观测 采用光学成像探测原理,探测云顶闪电放电过程中 产生的辐射信号,分为极轨卫星观测和静止卫星观

收稿日期:2023-01-11;修回日期:2023-04-11

作者简介:张萍萍(1980—),女,正高级工程师,主要从事极端降水、 卫星资料应用分析研究。E-mail:zpp7117@126.com 测。极轨卫星中的闪电探测仪以TRMM卫星携带的 LIS(Lighting Imaging Sensor)为代表,静止卫星则以 FY-4A LMI (Lighting Mapping Imager)和美国的 GOES-R卫星的GLM(Geostationary Lighting Mapper) 为代表^[2]。极轨卫星闪电成像仪只能提供区域平均 范围的闪电分布信息,而静止卫星闪电成像仪可实 时、连续监测闪电活动,实现对闪电的分钟级、长时 间连续光学探测^[6-7]。2016年12月11日,我国新一 代静止轨道气象卫星风云四号 A 星(FY-4A)发射 升空,该卫星搭载的闪电成像仪(Lightning Mapping Imager,LMI)是我国第一次自主研制的星载闪电成 像仪^[8],能够实现对强对流天气的连续监测,在强对 流天气预警方面具有很好的应用前景。

文章编号:1002-0799(2024)02-0099-08

在 FY-4A LMI 闪电数据应用的过程中,一些学 者对 LMI 数据的可靠性进行了分析。邹耀仁等¹⁹对 黄渤海一次雷电过程中的地基闪电观测数据与 LMI 闪电观测数据进行对比,发现二者的空间位置比较

基金项目:山东省气象局基金项目(2021SDYD36)

一致。曹冬杰等¹⁰⁰发现地基闪电数据和 LMI 闪电数 据反映的闪电密度高值区较为一致。支树林等¹¹¹对 一次台风飑线过程 LMI 闪电与地基闪电产品进行 对比,发现二者的时间变化及其表征出的对流云尺 度均相似。Hui 等¹¹²将青藏高原上 LMI 与 TRMM 卫 星上搭载的 LIS 数据进行对比,发现二者观测的闪 电频次空间分布较为一致。以上分析均表明,FY-4A LMI 闪电资料的空间分布与地基闪电资料在总 体趋势上一致,因此 LMI 产品在实际天气分析中具 有适用性。

还有一些学者对 LMI 闪电资料在对流天气监 测及预警中的作用进行了分析。林小红等¹¹³指出FY-4A LMI 闪电频次的时空变化与台前飑线的演变过 程一致,能起到一定的监测作用。张晓芸等¹¹⁴指出 LMI 闪电强度与雨强相关性较好,闪电频数峰值经 常出现在降水峰值前 45 min 左右,对降水发展演变 具有一定的指示作用。王清平等¹¹⁵发现风云四号卫 星的闪电观测数据对强对流云团的分布有较好的识 别效果。任素玲等¹¹⁶指出闪电成像仪产品对新生对 流和较弱对流产生的闪电监测具有优势。徐国强 等¹¹⁷将 LMI 闪电数据引入到 GRAPES_Meso 模式的 云分析系统中,发现 LMI 闪电事件对强降水有较好 的指示作用。

LMI 闪电产品在对流天气监测及预警应用方面 具有一定的优势,但是目前关于 LMI 闪电产品在线 状对流系统演变过程中的特征研究较少。本文利用 FY-4A 闪电成像仪资料、雷达组合反射率因子资 料、地基闪电定位资料(ADTD)、FY-4A 云顶亮温 (TBB)资料和其他常规观测资料,对 2019 年 5 月 25 日湖北省一次尾随层状云(Trailing Stratiform,简 称"TS")线状对流系统演变过程中,不同阶段 LMI 闪电观测的不同特征开展研究,以期为 LMI 闪电资 料在对流天气监测和预警中的应用提供更为科学的 参考依据。

1 数据和方法

1.1 闪电数据

卫星闪电数据来自 FY-4A LMI L2 级 1 min 探测产品。LMI 闪电成像仪采用 CCD 面阵和光学成像技术,对观测区域内包括云闪、云间闪、云一地闪在内的总闪电进行凝视观测,实现对雷暴系统的实时、连续监测和跟踪,为强对流天气监测、民航、铁路、电力等行业安全保障等提供服务。其中 CCD 面 阵大小为 400×600,成像速率为 500 帧/s,中心波长

为 777.4 nm, 星下点空间分辨率为 7.8 km, 总视场角 为 4.98°(南北) × 7.41°(东西)。

本文所使用的地基闪电数据来自我国气象部门 国家雷电监测网的探测数据。采用 ADTD (Advanced TOA and Direction system)闪电探测系 统,针对有效闪电回击数据,获取雷电发生时间、地 理位置等^[18]。

1.2 雷达数据

雷达反射率因子数据为 SWAN (Severe Weather Automatic Nowcast System)组合反射率因子图¹⁹,数据 间隔为 6 min,空间分辨率为 0.01°×0.01°。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 —^[20-21],本文主要利用雷达组合反射率因子的演变 作为线状对流系统发展变化的主要依据。

1.3 云顶亮温数据

云顶亮温(TBB)数据来自 FY-4A 辐射成像仪 (AGRI)波段 12(波长为 10.8 um)L1 级数据,空间分 辨率为 4 km,时间分辨率为 5 min。本文基于 TBB数 据,将 240 K 作为对流阈值,当 TBB≤240 K 时,代 表可能有对流云产生^[22]。

1.4 多源数据时间匹配方法

以雷达观测资料的时间分辨率为基准,以6min 作为时间步长,依据最邻近原则,分别将LMI数据、ADTD数据和TBB数据处理成以6min为时间步长的资料。

2 结果与分析

2.1 天气实况及线状对流演变

2019年5月25日08时—26日08时,受低涡 切变线和冷空气共同影响,湖北省中东部出现了一 次明显的线状对流过程。受其影响,江汉平原及鄂东 地区出现了大范围的短时强降水(图 1a),最大小时 雨强达 81.2 mm(潜江县渔洋站)。该过程影响系统 复杂,产生了多条线状对流,本文以一条产生降水 强度最大的线状对流作为主要研究对象(111°~ 114.5°E,29°~31.5°N),该线状对流从生成到减弱消 亡的时间段为5月25日17时—26日02时,移动 路径如图 1a 所示。参考 Parker 等[23]和王晓芳等[24]关 于线状对流分类方法,依据线状对流回波组织形态 及演变特征,发现该线状对流的发展过程中,线状对 流移动前侧有新单体生成,即向前传播形成前导对 流线,其后侧出现大范围层积混合云降水回波,因此 判定该线状对流属于尾随层状(TS)型线状对流。依 据雷达回波形态、强度随时间的变化,将此线状对流 分为3个阶段:发展阶段(25日17:00—20:00)、成熟 阶段(25日20:00—22:00)、减弱阶段(25日22:00— 26日02:00),从线状对流影响区域短时强降水站数 和最大小时雨强随时间变化可以看出(图1b),短时 强降水站数和最大小时雨强在第一阶段呈现上升趋 势,第二阶段达到最大峰值,第三阶段呈现下降趋 势。

2.2 对流发展阶段 LMI 闪电观测特征

5月25日17:00—20:00为TS型线状对流的 发展阶段。从图2可看出,在研究区域内出现了南北 两条线状对流,由于南部的线状对流呈现明显的发 展趋势,且产生的短时强降水强度较大,因此以该线 状对流作为主要研究对象(黑色框)。从线状对流形 态及演变可看出,强的回波位于系统移动的前方,反 射率因子梯度在对流线的前缘比后方要强,对流线 的后方为层积混合云区,判断该线状对流为尾随层 状(TS)型线状对流。由于该线状对流呈现向东移动 趋势,认为在线状对流所在区域及其东侧靠近区域 的 LMI 闪电可能与其相关联(蓝色框),将其作为 LMI 闪电研究对象。由18:06 雷达回波与同时刻 LMI 闪电活动的空间分布(图2a)可知,LMI 闪电分 布靠近线状对流前侧对流线,一部分闪电位于对流 线主体东侧,雷达反射率因子值为 20~30 dBZ,局部 超过 30 dBZ。随着线状对流的发展,18:30、19:00 (图 2b、2c),LMI 闪电观测出现同样的特征,LMI 闪 电分布区域并不全部分布在对流线上,部分 LMI 闪 电分布略超前于线状对流,位于其移动前方反射率 因子值为 10~30 dBZ。

出现这种现象可能存在两种原因:一是线状对 流主体前侧的 LMI 闪电为虚假闪电信号;二是位于 线状对流主体前侧的 LMI 闪电为真实闪电信号。为 分析线状对流发展阶段位于其移动前方的 LMI 闪 电是否为虚假信号,用两种方法进行判断:由于地基 ADTD 数据能够观测到由对流系统产生的地面闪电 特征,红外云顶亮温 TBB数据与对流演变关系密切, 因此首先将 LMI 闪电与 ADTD 闪电、TBB 数据进行 对比,分析同时刻三者分布特征;其次,由于真实闪 电具有一定的时间连续性,能够对对流发展起到一 定的指示意义^[25],因此可以通过对 LMI 闪电跟踪,分 析其对对流发展的指示作用,判断其是否为真实闪 电信号。依次选取这两种方法进行LMI 闪电信号的 虚假判断。





(a 中黑色方形为小时雨强 20~50 mm,蓝色方形为小时雨强 50~80 mm,黄色方形为小时雨强>80 mm, 红色实线为不同时刻线状对流的位置)



图 2 雷达反射率和 LMI 闪电分布

(a为18:06,b为18:30,c为19:00;阴影表示雷达反射率,黑色圆点表示LMI闪电, 黑色方框表示线状对流主体分布区域,蓝色方框表示LMI闪电分布区域)

分别选取 18:06 和 19:00 进行 LMI 闪电、 ADTD 闪电和红外云顶 TBB 数据的叠加(图 3),18:06 LMI闪电活动内(蓝框)的北部区域存在 ADTD 闪电 (图 3a),说明该区域 LMI 闪电分布为真实闪电可能 性较大, 蓝框南侧虽然没有出现ADTD 闪电, 但是 TBB数据显示大部分低于 240 K, 表明该处有对流 云产生,证明该时刻研究区域内的 LMI 闪电为真实 闪电的可能性较大;进一步验证 19:00 LMI 闪电数 据的真实性。从图 3b 可看出,在 LMI 闪电观测区域 北端(A处蓝框),LMI闪电与ADTD闪电的位置分 布较为一致,A处蓝框内TBB≤240K,所以该处 LMI 闪电可能为真实闪电信号。在 LMI 闪电观测区 域南端(B处蓝框),LMI闪电数据分布区域TBB在 240~250 K,属于层状云和对流云混合云区,同时发 现有一部分 ADTD 闪电数据与 LMI 闪电重合。有研 究¹²⁰指出,闪电有可能发生在中尺度对流系统前方 层状云和对流云混合云区,对对流有很好的指示作 用。综上,推断该区域内LMI闪电可能为真实闪电。

根据顾媛等^[27]对南京一次雷雨天气的研究,闪 电对回波的未来移向有指示意义,为验证本次过程 LMI闪电能否对未来回波发展有指示意义,分别将 18:06 和 19:00 的 LMI 闪电与未来 1 h 内 19:00 和 20:00 的线状对流主体对应的雷达组合反射率因子 演变进行对比。发现 18:06 LMI 闪电出现区域, 54 min 后(19:00),雷达组合反射率因子强度由初 时刻 20 dBZ 增强至 50 dBZ(图 4a),回波向着初时 刻(18:06)LMI 闪电指示区域(蓝框)进行移动和增 强。由 19:00 LMI 闪电与 20:00 的雷达组合反射率 因子进行对比发现,雷达回波同样向着初时刻 LMI 闪电指示的方向发展(图 4b)。由此判断对流发展阶 段,位于对流主体前侧的 LMI 闪电并不是没有意义的虚假信号,而是能引导对流系统发展和演变的有 意义的客观观测数据。

为什么在对流发展阶段,LMI 闪电没有出现在 对流核心区,而是出现在线状对流主体前侧较低反 射率因子区? 陈英英等^[28]指出,在对流发展阶段,会 出现对流云体在垂直方向上向移动方向倾斜和伸展 的现象。孙哲等^[29]指出,在雷暴的发展阶段,闪电可 能发生在雷暴云伸展方向的一侧,位于雷达反射率 因子强回波区的外围,具有引导雷达回波的作用。这 是因为在对流发展阶段,风暴体前部强烈的上升气 流与云内强下沉气流共同作用,使得云内过冷水滴



图 3 LMI、ADTD 与 TBB 叠加

(a为18:06,b为19:00;黑点表示LMI闪电,蓝点表示ADTD闪电,阴影表示TBB,蓝色方框表示LMI闪电分布区域)



(黑点表示 LMI 闪电,蓝色方框表示初始时刻 LMI 闪电分布区域)

与雹粒剧烈碰撞,表面形成冰壳,在此过程中释放潜 热,使冰壳内部增温,形成外冷内热的温度差,从而 使冰壳带正电,内部带负电,随后冰壳内部不断冻 结,体积膨胀,最终冰壳破裂,冰屑飞溅出去,飞溅出 去的冰屑带正电,导致有一部分地闪可能落在远离 强回波中心的区域。

2.3 对流成熟阶段 LMI 闪电观测特征

5月25日20:00—22:00为TS型线状对流的 成熟阶段,选取20:18和21:18研究LMI闪电分布 特征。由20:18和21:18的雷达回波与LMI闪电空 间分布(图5a、5b)可知,位于江汉平原一带的线状 对流逐渐发展成熟,与之相对应的LMI闪电活动变 得空间连续,分布范围与线状对流前侧的对流主体 较为吻合,从20:18和21:18LMI闪电、ADTD闪电 及TBB分布叠加(图5c)可知,大部分LMI闪电与 ADTD闪电分布密集区较为一致,位于TBB<240K的 对流云中。由此判断对流发展成熟阶段的LMI闪电 为真实闪电信号的可能性较大,与线状对流主体分 布区域较为重合,均位于TBB<240K的对流云中, 这个特征与对流发展阶段LMI闪电位于线状对流移 动前侧的特征明显不同。

在对流成熟阶段 LMI 闪电没有出现在对流主体前侧,而是与对流主体有较好的对应关系。原因可

能是雷暴成熟阶段下沉气流剧烈,下沉气流将雹块 等降水粒子带到高度较低的地方,由于温度较高使 得粒子表面融化,形成外热内冷的温度差,使粒子表 面带负电,内部带正电,在融化的过程中,粒子表面 会形成气泡,气泡破裂时使粒子表面的一部分负电荷 飞溅出去,余下部分带正电荷,由于成熟阶段风切变 不强烈,分离的电荷不容易被带到远离强回波区的 位置,因此闪电聚集在了强回波区及其附近区域^[29]。 2.4 对流减弱阶段 LMI 闪电观测特征

5月25日22时—26日02时是此次过程TS 型线状对流的减弱阶段。从5月25日23:36和26 日00:30的雷达反射率演变(图6)可知,江汉平原南 部的线状对流主体移动到了鄂东南地区(A区),对 流系统分裂,结构逐渐变得松散,强度逐渐减弱,在 线状对流减弱的过程中,对流线的后侧出现大片的 层积混合云区(B区)。LMI闪电有一部分分布在减 弱的A区对流带中,还有一部分位于对流系统后侧 B区积层混合云中。图6c、6d分别给出5月25日 23:36和26日00:30 LMI闪电、ADTD闪电和TBB 叠加图。尽管两个时刻B区内LMI闪电对应的回波 强度不强,但是均处在TBB<220 K的范围中,表明 虽然 B区内的对流活动减弱,但是层状云区仍有一 些对流云存在,因此出现了大片的LMI闪电活动。



图 5 雷达反射率和 LMI 闪电分布(a、b)及 LMI、ADTD 与 TBB 叠加(c、d) (a、c 为 20:18,b、d 为 21:18;黑点表示 LMI 闪电,蓝色方框表示 LMI 闪电分布区域;a、b阴影表示雷达反射率, c、d蓝点表示 ADTD 闪电,阴影表示 TBB)

综上,在 TS 线状对流减弱阶段,有一部分 LMI 闪电 出现在其前侧对流减弱区,还有一部分闪电出现在 后侧层积混合云区。

3 不同演变阶段 LMI 闪电观测特征模型

图 7 为本过程 TS 型线状对流不同演变阶段 LMI 闪电观测特征模型。在 TS 型线状对流的发展阶 段(图 7a),强的对流线位于系统移动的前方,该阶 段 LMI 闪电大部位于线状对流主体前侧,对未来 0~ 1 h 线状对流移动和强度演变具有引导作用;对流成 熟阶段(图 7b),TS 型线状对流发展较强,LMI 闪电 观测大部与对流主体位置较吻合,能够对对流起到 较好的监测作用;对流减弱阶段(图 7c),TS 型线状 对流前侧对流线上的对流结构变得松散、强度减 弱,同时后方的层积混合云区范围增大,LMI 闪电 一部分分布在线状对流前侧减弱的对流线中,另一 部分分布在线状对流后侧大片的层积混合云区中。 由于不同演变阶段 LMI 闪电观测特征不同,因此 在 LMI 闪电数据的实际使用过程中,应依据 LMI 观测的闪电特征、大气环境场特征及中尺度数值模 式的反射率因子预报等,分析线状对流演变的形 态、阶段,并依据不同演变阶段 LMI 闪电分布特征 及其对对流发展的作用,进行 LMI 闪电产品在对流 天气中的应用。



(a、c为25日23:36,b、d为26日00:30;黑点表示LMI闪电,蓝色方框表示LMI闪电分布区域,a、b阴影表示雷达反射率, c、d 蓝点表示 ADTD闪电,阴影表示TBB)



图 7 线状对流不同演变阶段 LMI 闪电观测特征模型 (a为对流发展阶段,b为对流成熟阶段,c为对流减弱阶段;阴影表示反射率因子,绿色表示 25~35 dBZ, 黄色表示 35~45 dBZ,红色表示>45 dBZ,+表示 LMI 闪电分布,黑色箭头表示线状对流移动方向)

4 结论

利用 FY-4A LMI 闪电资料、红外云顶亮温(TBB) 资料、雷达及 ADTD 闪电等资料,研究了 2019 年 5 月 25 日一次 TS 型线状对流演变过程中,不同演变 阶段 LMI 闪电观测的可信度及其特征,得出以下结论:

(1)通过多源数据分析和验证发现,TS 型线状 对流演变过程中观测到的 LMI 闪电数据为真实闪 电信号的可能性较大,业务适用性较高。在线状对流 的不同演变阶段 LMI 闪电观测具有一定的时空连 续性,LMI 闪电分布与 ADTD 闪电分布总体较为一 致。

(2)在 TS 型线状对流发展的不同阶段,LMI 闪 电表现出不同的观测特征。对流发展阶段,LMI 闪电 观测大部位于 TS 型线状对流主体前侧,略超前于 雷达回波,对未来 0~1 h线状对流发展有引导作用; 对流成熟阶段,LMI 闪电观测与对流主体位置有较 好的对应关系,对对流发展有监测意义;对流减弱阶 段,LMI 闪电一部分分布在线状对流前侧减弱的对 流线中,另一部分则分布在线状对流后侧大片的层 积混合云区中。

(3)绘出 TS 型线状对流过程 LMI 闪电观测特 征模型图,能够为预报员有效判识不同对流发展阶 段 LMI 闪电观测特征,更加科学有效地利用 LMI 闪 电产品为对流天气的监测和预警提供一定参考。 参考文献:

- 陈光舟,王体健,娄珊珊,等.安徽闪电分布特征和不稳定 条件分析[J].气象科学,2014,34(5):543-548.
- [2] 钱勇,施俊杰,王延慧,等.星地多源闪电资料在新疆地区的应用分析[J].沙漠与绿洲气象,2021,15(3):122-128.
- [3] 易笑园,张义军,王红艳,等.线状中尺度对流系统内多个强降水单体的结构演变及闪电活动特征[J].气象学报, 2013,71(6):1035-1046.
- [4] RAKOV V A, UMAN MA.Lightning: physics and effects
 [M].Cambridge: Cambridge University Press, 2003:545 546.
- [5] 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.
- [6] CHRISTIAN H J,BLAKESLEE R J,GOODMAN S J.The detection of lightning from geostationary orbit[J].Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1989,94 (D11): 13329–13337.
- [7] YANG J, ZHANG Z, WEI C. et al. Introducing the new generation of Chinese geostationary weather satellites, Fengyun-4[J].Bulletin of the American Meteorological

Society, 2017, 98(8): 1637-1658.

- [8] 曹冬杰.风云四号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,2016,6(1):94–98.
- [9] 邹耀仁,王赟,王淑一,等.黄渤海地区 FY-4A 闪电成像 仪(LMI)探测效果评估[J].干旱气象,2021,39(4):662-669.
- [10] 曹冬杰,陆风,张晓虎,等.风云四号卫星闪电探测产品 在强对流天气监测中的应用[J].卫星应用,2018(11): 18-23.
- [11] 支树林,包慧濛,李婕.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),2019,41(6):1178-1190.
- [12] HYU W, HUANG F, LIU R.Characteristics of lightning signals over the Tibetan Plateau and the capability of FY -4A LMI lightning detecton in the plateau [J]. International Journal of Remote Sensing, 2020, 41 (12): 4605-4625.
- [13] 林小红,张文娟,范能柱,等.FY-4A LMI 观测的利奇马 (2019)台前飑线闪电活动及其与对流演变的关系[J].遥 感技术与应用,2021,36(4):873-886.
- [14] 张晓芸,魏鸣,潘佳文,等.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,2019,34(5): 1082-1090.
- [15] 王清平,吴晓京,陈阳权,等.FY-4A 卫星数据可视化及 应用[J].气象科技,2019,47(3):502-507.
- [16] 任素玲,赵玮,曹冬杰,等.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, 2020,40(1):33-46.
- [17] 徐国强,黄守友,赵晨阳.FY-4A 闪电资料在对流天气数值预报中的影响研究[J].气象,2020,46(9):1165-1177.
- [18] 高文俊.川西高原雷电监测数据应用研究[D].成都:电子 科技大学,2008.
- [19] 吴涛,黄小彦,牛奔.2012年7月12日鄂东北准静止强 降水中尺度对流系统分析[J]暴雨灾害,2014,33(3):228-238.
- [20] 侯淑梅,郭俊建,郭庆利,等.对流风暴的移动和演变对 下游地区对流降水影响的个例分析[J].海洋气象学报, 2021,41(2):58-69.
- [21] 侯淑梅,周成,韩永清,等.山东省线状中尺度对流系统
 与多单体风暴的合并特征[J].海洋气象学报,2020,40
 (1):57-65.
- [22] 刘一玮,孙建元,王颖,等.卫星遥感云分类和 TBB 产品 在天津地区云状识别的应用分析[J].气象,2016,42(8): 980-986.
- [23] PARKER M D, JOHNSON R H.Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems [J]. Mon Wea Rev, 128(10): 3413-3436.
- [24] 王晓芳,崔春光.长江中下游地区梅雨期线状中尺度对

流系统分析 I:组织类型特征[J].气象学报,2012,70(5): 909-923.

- [25] 杨学斌,代玉田,吕伟绮.闪电发生的环境场特征及闪电 活动的预报[J].海洋气象学报,2019,39(3):96-102.
- [26] 张琴,张晓,苟阿宁,等.山东两次强对流天气中尺度对 流系统的闪电特征分析[J].科学技术与工程,2018,18 (28):6-14.
- [27] 顾媛,魏鸣.南京一次雷雨的闪电特征与多尺度资料分析[J].气象科学,2013,33(2):146-152.
- [28] 陈英英,唐仁茂,李德俊,等.利用雷达和卫星资料对一次强对流天气过程的云结构特征分析[J].高原气象, 2013,32(4):1148-1156.
- [29] 孙哲,魏鸣.春季与夏季两次雷暴大气结构及地闪特征 对比[J].大气科学学报,2016,39(2):260-269.

LMI Lightning Observation Characteristics in Different Evolution Stages of a TS Type Linear Convection

ZHANG Pingping^{1,2}, LIN Xiudong², ZHANG Liping², LIAN Fan², LIU Wenting³

(1.Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031, China;

2. Weihai Meteorological Bureau, Weihai 264200, China;

3. Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074, China)

Using FY -4A lightning imager (LMI) data, radar combined reflectivity factor data, Abstract ground-based Active Directory Topolopy Diagrammer (ADTD) lightning location data, FY-4A cloud top brightness temperature (TBB) data and other conventional observation data, the reliability and observation characteristics of LMI lightning data in three different evolution stages of a trailing stratiform (TS) linear convection in Hubei province in 2019 were analyzed. The results show that LMI lightning observation has a certain degree of space-time continuity in different evolution stages of linear convection, and the distribution of LMI lightning is generally consistent with that of ADTD lightning; In the stage of convection development, LMI lightning observation is mostly located in the front of the TS type linear convection leading convective line, which is ahead of the convective line, indicating the convection development in the next 0-1 hours in advance; In the mature stage of convection, LMI lightning observation is often close to leading convection line, which is significant for monitoring the development of linear convection; In the stage of convection weakening, a part of LMI lightning is located in the weakened leading convective line, and the other part is located in the stratiform mixed cloud area behind the linear convection. Finally, the model graph of LMI lightning observation characteristics in different evolution stages of TS linear process were given, which provides some reference for the application of LMI lightning products in convective weather monitoring and early warning.

Key words lightning mapping imager; linear convection; monitoring and warning