

新型静止气象卫星对流初生识别展望

崔林丽

(上海市生态气象和卫星遥感中心, 上海 200030)

摘要: 着眼于强对流天气监测预警服务需求, 对标国内外卫星遥感对流初生(CI)识别关键技术, 分析探讨了基于卫星多光谱通道信息的CI识别和基于新型卫星探测仪器的CI识别研究进展, 并给出了未来提高CI识别时效性及准确性的发展思路。加强卫星多通道、多传感器数据的融合以及与天气雷达的结合, 并充分利用机器学习、大数据处理等分析技术, 是有效提升CI监测预警服务能力的必要途径。

关键词: 静止卫星, 对流初生, 识别, 展望

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.05.011

Prospect of Convective Initiation Identification Based on New Generation Geostationary Meteorological Satellite

Cui Linli

(Shanghai Ecological Forecasting and Remote Sensing Center, Shanghai 200030)

Abstract: To meet the service demand of severe convective weather monitoring and early warning, the key technologies of convective initiation (CI) identification based on satellite remote sensing at home and abroad are compared and the research progress of CI identification based on satellite multispectral channel information and on different space-borne satellite observation instruments are also analyzed and discussed. The future development for improving the timeliness and accuracy of CI identification is proposed accordingly. It is necessary to strengthen the fusion of satellite multi-channel and multi-sensor data and the integration with weather radar, and to make full use of machine learning, big data processing and other analysis technologies so as to improve the capability of CI monitoring and warning services effectively.

Keywords: geostationary satellite, convective initiation (CI), identification, prospect

0 引言

强对流天气主要包括短时强降水、雷暴大风、龙卷风、冰雹和飏等, 是夏季发生频率最高、危害最严重的灾害性天气系统之一。强对流天气的准确预报对于公共安全、减灾抗灾和军事行动等方面具有重要的意义^[1-2]。对流初生(Convective Initiation, CI)是对流天气开始活动的标志和强对流风暴发生初期的状态。对CI的准确识别和追踪是提高局地突发强对流天气短时临近预报水平的关键^[3], 也是中尺度气象界研究的重点、难点和热点^[4-5]。

由于新生对流空间尺度小、发展变化快, 常规气象观测很难对CI进行有效的监测和预警^[6], 但高时空分辨率的天气雷达和静止气象卫星能够观测到边界层

辐合线和积云快速发展等用于评估CI发生条件的前兆信号, 从而为定时定点的CI临近预报提供有力支撑^[7]。静止气象卫星能够早于雷达探测到积云^[4]和有效监测对流从积云到积雨云的发展历程, 且卫星辐射传感器比地基雷达覆盖范围广、信息收集量大、可观测通道丰富(包括可见光、近红外、红外波段)^[8], 因此, 利用静止气象卫星数据实现CI监测预警, 具有其他气象资料无法比拟的优势^[3, 9]。近年来, 随着静止气象卫星的更新换代^[10], 如我国风云静止气象卫星由第一代风云二号(FY-2)系列升级为第二代风云四号(FY-4); 美国地球静止环境业务卫星(GOES)由第一、第二代的GOES-N系列升级为第三代GOES-R系列; 欧洲气象卫星组织(EUMETSAT)静止气象卫星由第一代的Meteosat系列升级至MSG系列, 新一代静止轨道气象卫星MTG系列^[11]也在研制中; 日本由第一代GMS、第二代MTSAT系列升级至第三代“葵花(Himawari)”系列, 以及俄罗斯、印度、韩国等均有不同的提升计划。新一代卫星多光谱成像仪的时空分辨率和产品精度显著提升^[12], 光谱通道数也持续增加, 同时高光谱

收稿日期: 2021年10月14日; 修回日期: 2022年4月19日
作者: 崔林丽(1975—), Email: cllcontact@163.com
资助信息: 中国气象局风云卫星应用先行计划(FY-APP-2021.0106);
上海市自然科学基金项目(18ZR1434100); 上海市
科技计划项目(20232410100, 19DZ1203400)

垂直探测仪、闪电成像仪等新型传感器的出现也进一步增强了卫星识别CI优势和潜力,有望为突发强对流天气监测和气象灾害防御提供重要的支撑。

鉴于此,本文围绕基于静止气象卫星的CI识别这一关键技术,从传统卫星多光谱通道信息CI识别和卫星新型观测仪器CI识别两方面综述国内外主要进展,并对未来研究进行思考与展望,以期对CI实时监测和短时临近预报提供借鉴。

1 基于卫星多光谱通道信息的CI识别

使用地球静止轨道气象卫星多通道资料进行CI研究识别算法目前已经比较成熟,并在美国^[9,13]、法国^[14]以及日本^[15]等国家形成了一定的业务支撑能力,国内应用最广泛的是借鉴美国阿拉巴马大学Mecikalski等^[9,13]提出的SATCAST (Satellite Convection Analysis and Tracking) 算法。

SATCAST算法最早采用美国静地运行环境卫星GOES-12的空间分辨率为4~8 km的3个红外通道资料,通过获得各个通道的亮温(IR-TBB),提取出用于描述对流云性质、发展和演变的8个指标,包括云顶亮温、多通道差和云顶亮温时间变化趋势等,然后计算8个指标并与设置的阈值进行对比评估,最终通过阈值评分法来区分CI和快速发展对流^[9],可以提前约30~45 min预测出CI^[9,13]。对2007年欧洲地区213例CI事件的验证分析表明,准确率为80.75%^[4]。之后,Siewert等^[16]利用欧洲第二代气象卫星(MSG)中6个红外通道将8个指标扩展为17个,用于刻画CI过程中云顶高度、云顶冻结效应和垂直发展强度3种积云发展特征。Mecikalski等^[17]进一步总结了MSG卫星所有8个红外通道所能提供的67个指标,并通过相关分析和主成分分析筛选出分别最能表征以上3种积云发展特征的6个、7个和8个指标。

该算法不需要建立复杂的天气活动模型,直接使用云图进行CI预测。我国学者利用该算法也进行了较多的CI识别实践,如宋珍妮^[18]基于FY-2C卫星数据,利用Mecikalski等^[9]提出的指标计分统计法并对部分指标阈值调整,开展京津地区一次强对流天气的CI预警试验,结果表明,该方法可以提前30 min实现强对流天气预警。刘健等^[19]利用FY-2C提供的平均10 min观测间隔的局地扫描数据对强对流天气进行分析,结果也表明,静止气象卫星的高时间分辨率观测能有效地监测CI和快速发展的对流。周鑫等^[20]基于FY-2F提供的2015年5—9月的6 min高分辨率数据,分析和比较了深、浅对流在CI至发展阶段中云顶高度、云顶快速降温率以及多通道差值等云顶物理量特征的变化

异同。卜茂宾等^[21]基于FY-2G卫星数据和Mecikalski等^[9]提出的八分法,利用多小波融合、积云掩膜、金字塔图像和面积重叠法得到CI预警算法,并对北京地区两次强对流天气过程进行CI预警研究,结果表明,预警算法能够提前30~40 min预警出北京地区的CI过程。李五生等^[2]利用MTSAT-1R卫星资料中的红外1(10.3~11.3 μm)、红外2(11.5~12.5 μm)和水汽通道(6.5~7.0 μm)亮温数据,在目标云块识别对比的基础上计算并修正了SATCAST算法中CI预报的8个指标阈值,并对2006—2007年京津地区进行17日次CI预报试验,结果表明,该预报方法能够对1 h内的CI进行有效预报。

研究表明,经过适当的阈值调整或方法改进(如结合机器学习方法),SATCAST算法也能够有效地移植到与GOES卫星具有相当探测能力的其他静止卫星上用于CI预报,如MSG^[22]、FY-2F^[20]、FY-2G^[21]、日本多功能运输卫星(MTSAT)^[2,23]、韩国通信、海洋和气象卫星(COMS)^[24]、日本新一代静止气象卫星葵花8号(Himawari-8)^[25]等。由于使用了可见光通道数据,Mecikalski算法仅能在白天对CI进行预测,而对夜间发生的CI无法进行提前预测。

2 新型卫星观测仪器的CI识别

2016年11月19日,美国新一代地球静止轨道环境业务卫星(GOES-R)首颗星GOES-16发射升空,卫星装载的有效载荷包括先进基线成像仪(ABI)、闪电成像仪(GLM)以及空间环境探测仪器^[26]。2016年12月11日,我国也成功发射了新一代静止轨道气象卫星风云四号首颗业务星FY-4A,其携带先进静止轨道多通道扫描辐射成像仪(AGRI)、静止轨道干涉式红外探测仪(GIIRS)、闪电成像仪(LMI)和空间环境监测仪4种主要观测仪器,并于2018年5月1日正式投入业务应用,其中,将高光谱分辨率红外干涉式大气垂直探测仪搭载在静止轨道气象卫星上,这在国际上尚属首次。这些新一代静止卫星所携带的新型传感器将对CI监测和强对流天气短时临近预报提供极大的数据支撑和算法突破。

2.1 卫星闪电成像仪

闪电是对流系统发展的“示踪器”,卫星闪电成像仪可以实现对云中闪电的实时监测,为对流系统预警提供重要支撑。早期主要搭载在低轨道卫星上,包括装载于Microlab-1卫星上的闪电光学瞬变探测器(OTD)和装载于热带降水测量任务(TRMM)卫星上的闪电成像仪(LIS)^[27-30]。这些低轨道卫星虽然能够提供更高空间分辨率的云图,但其重复观测间隔太长

(12 h), 难以对同一个对流过程进行连续监测。

FY-4A/LMI闪电观测时间上可精确到1 min, 空间分辨率精确到7.8 km, 不仅能够对大尺度对流系统中的闪电活动进行连续不间断的观测, 而且能够对局地小对流云团中的闪电活动进行监测^[31]。在对流迅速发展的初期, LMI对闪电的观测超前于ADTD雷电定位系统, 并且锋面降水阶段中这种超前特征持续时间更长一些^[32]。因此, LMI 闪电探测产品对于CI判识和强天气监测预警具有很大的应用潜力^[31-32]。林小红等^[33]研究表明, FY-4A LMI闪电频次的时空变化与2019年台风“利奇马”台前爬线的演变过程相一致, LMI闪电爆发对台前爬线强度增强具有提早约1 h的指示作用。张晓芸等^[34]以2018年5月7日厦门暴雨为研究个例, 研究FY-4A LMI闪电数据在强降水监测预警中的应用, 结果表明, 闪电强度与雨强成正比, 且闪电频数峰值多出现在降水峰值前45 min左右。任素玲等^[35]利用FY-4A AGRI和LMI数据, 分析了反演产品在强雷暴天气中的应用, 表明LMI产品较地面闪电探测产品能够探测到更多的闪电, 对新生对流和较弱对流产生的闪电监测具有优势。

2.2 卫星垂直探测仪

卫星成像仪主要是观测与CI相关的积云发展过程, 卫星垂直探测仪则能够通过获取大气温度和湿度廓线来评估积云发展和CI发生前的环境条件^[7]。自从1994年以来, 美国GOES系列静止卫星搭载的红外探测仪(Sounder)开始为北美地区及其附近海域提供1次/h、10 km空间分辨率的大气温湿廓线及其衍生产品^[36], 初步解决了常规探空和低轨道卫星观测间隔长(通常1次/2 d)、不能够有效地监测对流的快速变化过程的问题, 但GOES Sounder仅配置18个较低光谱分辨率的红外宽波段通道, 对于获取大气精细化廓线尤其是底层信息仍然有限^[7]。相对于具有较粗光谱分辨率的GOES Sounder, 高光谱分辨率垂直探测仪可以更精确获取CI前环境条件, 如大气稳定度指标——对流有效位能(CAPE)和抬升指数(LI), 从而对CI潜势具有重要的指示作用^[37-40]。Apke等^[41]分析了对流环境对于CI的作用, 结果表明, CAPE和对流抑制能量(CIN)对于改进卫星的CI预报具有积极的作用。在高CAPE、低CIN的环境下, 对流初生具有更好的预报性。

3 未来工作展望

强对流天气研究的主要目的是提高其监测、预报和预警水平^[42], CI识别对强对流天气预测预报具有重要的意义。基于静止卫星的CI研究呈现出从定性到定量描述、从单一到多光谱通道联合运用、从仅使用光

学成像仪到不同星载仪器运用、从仅关注CI过程本身到关注CI前环境条件和CI后续对流强度的发展趋势^[7]。卫星观测通道和观测资料的要素不断增加, 时空分辨率从最初的小时级到现在的分钟级, 同时也解决了雷达受空间和时间的限制, 实现了连续性、大范围观测^[21], 应用前景很大。未来工作方向主要概况为以下两大方面。

3.1 综合光谱/闪电成像仪、大气垂直探测仪和天气雷达等, 实现CI协同观测和数据快速获取

新一代静止气象卫星在时间、空间和光谱分辨率、光谱通道数以及搭载仪器性能等方面都有质的提升^[7], 尤其是多通道的观测数据组合可更好地观测云的温度、微物理结构、相态等特征, 更准确地监测强对流天气^[35]。我国FY-4A是国际上首颗单星实现对地“多光谱二维成像+高光谱三维探测+超窄带闪电成像”综合观测的静止轨道气象卫星, 研究FY-4静止气象卫星搭载的多种传感器资料的使用, 可以提高强对流天气的预报水平和服务质量^[43]。将大气垂直探测仪获取的CI前环境信息和光谱/闪电成像仪获取的积云发展信息相结合, 建立不同星载仪器(成像仪和探测仪)对同一CI过程的协同观测和预报流程, 能够有效地改善CI预报的命中率和空报率^[44]。因此迫切需要充分挖掘新一代静止气象卫星高时空分辨率的优势, 为CI监测预警业务服务提供支撑。

随着卫星观测技术的发展和遥感仪器能力的提升, 高分辨率卫星云图监测的积云新生时间能够早于雷达观测到的新生单体的时间, 可以提前发现CI^[45]。例如, 张夕迪等^[46]利用日本Himawari-8资料对2016年汛期27次暴雨CI情况进行分析, 并与雷达进行了对比, 研究表明, Himawari-8卫星由于高频次观测的优势对暴雨对流强弱的变化刻画得更加细致, 在监测暴雨对流云团方面具有时间上的明显优势。然而, 静止气象卫星观测的主要是对流云顶的发生、发展特征, 无法实现对流系统内部的观测。天气雷达则可以观测对流风暴的内部分布特征, 较卫星观测资料更容易达到传统的CI判定条件^[43], 因此, 雷达观测资料能够与静止气象卫星数据形成互补, 实现对流系统的多方面观测, 从而为CI的精细化预报(甚至于后续对流的发展强度)提供指示作用。在CI研究和预报过程中, 未来需要依托先进的数据融合和同化系统, 实现雷达和卫星观测之间的联动, 如雷达上观测到的辐合线和对流过程与卫星上观测到的积云发展过程之间的串联^[7]。结合先进的资料同化方案(如集合卡尔曼滤波等), 在对流可分辨模式中同化高分辨率的雷达和卫星观测,

将有望进一步改善CI的临近预报能力^[47]。

考虑到CI预报的短时效性，要求卫星能够快速成像、观测数据能够尽快回传并能够进行近实时处理。2021年6月3日，我国风云四号B星（FY-4B）发射成功。在继承A星基础上，B星提升原有载荷性能，同时新增快速成像仪，在国际上首次实现静止轨道250 m空间分辨率全天时观测，通过长线条探测器和二维灵活扫描成像，实现更高分辨率、更灵活快速地对特定区域扫描成像，大幅提高了我国中小尺度灾害性天气观测能力。凭借最新搭载的快速成像仪，FY-4B可以实现对数百万平方公里区域1 min/次的成像，对中小尺度的天气系统具备更强的监测能力。因此，FY-4B快速成像仪数据产品在CI监测预报中的应用潜力也应重点关注。

3.2 引入机器学习、大数据挖掘等技术，探索卫星多源数据的融合和集成应用，提高CI识别时效性和精确性

数据分析处理方面，目前所用方法上无论是阈值法还是灰度一梯度共生矩阵法均仍是传统的分析方法为主。但随着卫星仪器的升级，其资料性能在波段、时间与空间三个维度均获得了极大的提升，直接导致数据量的激增，例如FY-4A和Himawari-8/9资料均比原来的FY-2和MTSAT多达上百倍，但多源观测数据表现形式、物理意义各异，如何将这些数据有效融合，也是当前面临的挑战之一^[7]。人工智能在大数据处理方面具有不可比拟的优势，不仅可以总结专家知识经验，还可以充分利用统计与数值模式中无法利用的抽象预报知识。作为一种实现人工智能的方法，机器学习算法能够自动学习并提取特征，为多源数据融合提供了新的思路。随机森林方法、卷积神经网络模型^[48]等已被初步证实灾害性天气监测中明显优于常规方法。Mecikalski等^[49]结合GOES-R静止气象卫星数据和数值天气预报（NWP）模式得到的对流环境预报场如CAPE、LI和风切变等数据，通过选取25个相关要素，并借助逻辑回归和随机森林方法，建立了一种CI概率预报系统，有效地减少了欧洲地区CI空报率。Ahijevych等^[50]利用随机森林方法，融合雷达、卫星云图和数值预报数据，预报未来0~2 h的CI，结果表明模型有效检测了99%以上（总数550个）的初生系统。Han等^[51]基于Himawari-8卫星数据，利用决策树、随机森林和逻辑回归等机器学习方法建立了CI预报模型，实现了算法性能的提升。刘子菁^[52]将Himawari-8先进成像仪（AHI）观测资料、数值模式场资料与深度机器学习的随机森林方法结合，建立起局地CI预警

模型，该模型能够在局地爆发对流系统前1~2 h将对流云团标记出来，模型的准确率为0.79，对强对流和中等强度对流的探测率可分别达到0.66和0.70。郑益勤等^[53]基于Himawari-8卫星数据构建了基于深度信念网络（DBN）的强对流云团自动识别法，该方法可以有效识别处于初生到消散不同阶段的强对流云团，提高了强对流云团的识别精度，并在一定程度上去除卷云。因此，在对一些天气现象发生的物理机理还没有完全理解的情况下，充分利用机器学习的大数据挖掘分析方法非常值得探索。

参考文献

- [1] 蒋尚城. 应用卫星气象学. 北京: 北京大学出版社, 2006.
- [2] 李五生, 王洪庆, 王玉, 等. 基于卫星资料的对流初生预报及效果评估. 北京大学学报(自然科学版), 2014, 50(5): 819-824.
- [3] 崔新艳, 陈明轩, 秦睿, 等. 对流初生机理的研究进展. 气象, 2021, 47(11): 1297-1318.
- [4] 覃丹宇, 方宗义. 利用静止气象卫星监测初生对流的研究进展. 气象, 2014, 40(1): 7-17.
- [5] 刘国忠, 黄荣, 翟丽萍, 等. 卫星初生对流的业务应用技术研究. 气象研究与应用, 2016, 37(3): 109-111.
- [6] 马鹏辉, 杨燕军, 张剑. 基于卫星云图的对流初生预测技术综述. 气象与减灾研究, 2014, 37(1): 1-5.
- [7] 黄亦鹏, 李万彪, 赵玉春, 等. 基于雷达与卫星的对流触发观测研究和临近预报技术进展. 地球科学进展, 2019, 34(12): 1273-1287.
- [8] 许锐. 基于卫星数据的对流初生自动识别研究. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [9] Mecikalski J R, Bedka K M. Forecasting convective initiation by monitoring the evolution of moving cumulus in daytime GOES imagery. Monthly Weather Review, 2006, 134: 49-78.
- [10] 何兴伟, 冯小虎, 韩琦, 等. 世界各国静止气象卫星发展综述. 气象科技进展, 2020, 10(1): 22-41.
- [11] 陆燕. 欧洲MTG-I气象卫星主载荷FCI研制进展. 红外, 2020, 41(7): 47-48.
- [12] 崔林丽, 郭巍, 葛伟强, 等. FY-4A卫星云顶参数精度检验及台风应用研究. 高原气象, 2020, 39(1): 196-203.
- [13] Mecikalski J R, Bedka K M, Paech S J, et al. A statistical evaluation of GOES cloud-top properties for nowcasting convective initiation. Monthly Weather Review, 2008, 136: 4899-4914.
- [14] Morel C, Senesi S, Autones F. Building upon Saf-Nwc Products: use of the rapid developing thunderstorms (RDT) product in Meteo-France Nowcasting Tools. Proc 2002 Meteorological Satellite Data Users' Conf, Dublin, Ireland. EUMETSAT and Met Eirean, 2002: 248-255.
- [15] Okabe I, Imai T, Izumikawa Y. Detection of rapidly developing cumulus areas through MTSAT rapid scan operation observations. Meteorological Satellite Centre Technical Note, 2011, 55: 69-91.
- [16] Siewert C W, Koenig M, Mecikalski J R. Application of Meteosat Second Generation data towards improving the nowcasting of convective initiation. Meteorological Applications, 2010, 17: 442-451.
- [17] Mecikalski J R, MacKenzie Jr W M, Koenig M, et al. Cloudtop properties of growing cumulus prior to convective initiation as measured by Meteosat Second Generation. Part I: Infrared fields. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2010, 49(3): 521-534.
- [18] 宋珍妮. 基于网格的FY2C卫星对流初生预警. 科技信息, 2014, (5): 76-77.
- [19] 刘健, 蒋建莹. FY-2C高时间分辨率扫描数据在强对流云团监测中的应用研究. 大气科学, 2013, 37(4): 873-880.
- [20] 周鑫, 周顺武, 覃丹宇, 等. 利用FY-2F快速扫描资料分析对流初生阶段的云顶物理量特征. 气象, 2019, 45(2): 216-227.
- [21] 卜茂宾, 白洁, 周著华, 等. 基于FY-2G静止气象卫星资料的对流

- 初生预警. 气象水文海洋仪器, 2018, (1): 8-13.
- [22] Merk D, Zinner T. Detection of convective initiation using Meteosat SEVIRI: implementation in and verification with the tracking and nowcasting algorithm Cb-TRAM. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6(1): 1771-1813.
- [23] 刘京华, 王彬, 韩雷, 等. 京津地区一次强对流天气的初生预警技术研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 2012, 48(1): 42-46.
- [24] Han H, Lee S, Im J, et al. Detection of convective initiation using meteorological imager onboard communication, ocean, and meteorological satellite based on machine learning approaches. *Remote Sensing*, 2015, 7: 9184-9204.
- [25] 郭巍, 崔林丽, 顾问, 等. 基于葵花8卫星的上海市夏季对流初生预报研究. *气象*, 2018, 44(9): 1229-1236.
- [26] Goodman S J, Blakeslee R J, Koshak W J, et al. The GOES-R Geostationary Lightning Mapper (GLM). *Atmospheric Research*, 2013, 125-126: 34-49.
- [27] Christian H J, Discoll K T, Goodman S J, et al. The optical transient Detector (OTD). *Proceedings of the 10th International Conferences on Atmospheric Electricity*, Osaka, Japan. ICAE, 1996: 368-371.
- [28] Christian H J, Blakeslee R J, Goodman S J, et al. The Lightning Imaging Sensor. *Proceedings of the 11th International Conferences on Atmospheric Electricity*, Guntersville. ALICAE, 1999: 746-749.
- [29] Koshak W J, Stewart M F, Christian H J, et al. Laboratory calibration of the optical transient detector and the lightning imaging sensor. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2000, 17(7): 905-915.
- [30] Boccippio D J, Koshak W J, Blakeslee R J. Performance assessment of the optical transient detector and lightning imaging sensor. Part I: Predicted diurnal variability. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, 19(9): 1318-1332.
- [31] 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. *卫星应用*, 2018, (11): 18-23.
- [32] 张萍萍, 刘文婷, 章翠红, 等. 一次强降水过程中FY-4A闪电成像仪观测特征分析. *气象*, 2021, 47(11): 1391-1401.
- [33] 林小红, 张文娟, 范能柱, 等. FY-4A LMI观测的利奇马(2019)台前飚线闪电活动及其与对流演变的关系. *遥感技术与应用*, 2021, 36(4): 873-886.
- [34] 张晓芸, 魏鸣, 潘佳文. FY-4闪电资料在厦门强降水监测预警中的应用. *遥感技术与应用*, 2019, 34(5): 1082-1090.
- [35] 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. *海洋气象学报*, 2020, 40(1): 33-46.
- [36] Menzel W P, Holt F C, Schmit T J, et al. Application of GOES-8/9 soundings to weather forecasting and nowcasting. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79: 2059-2077.
- [37] Li J, Liu C Y, Zhang P, et al. Applications of full spatial resolution space-based advanced infrared soundings in the preconvective environment. *Weather and Forecasting*, 2012, 27: 515-524.
- [38] Schmit T J, Li J, Ackerman S A, et al. High-spectral- and high-temporal-resolution infrared measurements from geostationary orbit. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26: 2273-2292.
- [39] Sieglaff J M, Schmit T J, Menzel W P, et al. Inferring convective weather characteristics with geostationary high spectral resolution IR window measurements: A look into the future. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26: 1527-1541.
- [40] Li J, Li J, Schmit T J, et al. Warning information in preconvective environment from geostationary advanced infrared sounding system—a simulation study using the IHOP case. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011, 50: 766-783.
- [41] Apke J M, Nietfeld D, Anderson M R. Environmental analysis of GOES-R proving ground convection-initiation forecasting algorithms. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2015, 54(7): 1637-1662.
- [42] 俞小鼎, 郑永光. 中国当代强对流天气研究与业务进展. *气象学报*, 2020, 78(3): 391-418.
- [43] 周鑫, 刘杰, 王新敏, 等. “云雀”残涡影响下豫西南一次大暴雨过程特征分析. *气象与环境科学*, 2020, 43(3): 93-100.
- [44] Schmit T J, Li J, Ackerman S A, et al. High-spectral- and high-temporal-resolution infrared measurements from geostationary orbit. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26: 2273-2292.
- [45] 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. *海洋气象学报*, 2021, 41(2): 58-69.
- [46] 张夕迪, 孙军. 葵花8号卫星在暴雨对流云团监测中的应用分析. *气象*, 2018, 44(10): 1245-1254.
- [47] 张云济, 张福青. 集合资料同化方法在强雷暴天气预报中的应用. *气象科技进展*, 2018, 8(3): 38-52.
- [48] 崔林丽, 陈昭, 于兴兴, 等. 风云四号卫星东南沿海热带气旋强度深度学习估算. *遥感学报*, 2020, 24(7): 842-851.
- [49] Mecikalski J R, Williams J, Jewett C, et al. Probabilistic 0-1-h convective initiation nowcasts that combine geostationary satellite observations and numerical weather prediction model data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2015, 54: 1039-1059.
- [50] Ahijevych D, Pinto J O, Williams J K, et al. Probabilistic forecasts of mesoscale convective system initiation using the random forest data mining technique. *Weather and Forecasting*, 2016, 31(2): 581-599.
- [51] Han D, Lee J, Im J, et al. A novel framework of detecting convective initiation combining automated sampling, machine learning, and repeated model tuning from geostationary satellite data. *Remote Sensing*, 2019, 11(12): 1454.
- [52] 刘子菁. 新一代地球静止气象卫星观测在强对流识别和预警中的应用研究. 北京: 中国气象科学研究院, 2019.
- [53] 郑益勤, 杨晓峰, 李紫薇. 深度学习模型识别静止卫星图像海上强对流云团. *遥感学报*, 2020, 24(1): 97-106.