

文章编号: 1672-8785(2024)01-0043-10

基于 Himawari-8 静止卫星多通道资料的重庆地区短时强降水反演研究

王远谋^{1,2} 胡春梅^{1,3*} 王志毅^{1,3}

(1. 中国气象局气候资源经济转化重点开放实验室, 重庆 401147;

2. 重庆市气象服务中心, 重庆 401147;

3. 重庆市气象台, 重庆 401147)

摘 要: 收集了 2021 年重庆地区 8 次区域性暴雨天气过程中地面降水强度大于等于 20 mm/h 的数据, 匹配了相应时间空间范围的 Himawari-8 静止气象卫星多通道资料, 建立了降水强度与辐射特征一一对应的数据集。在此基础上采用单位特征空间归类分析法, 选择 0.64 μm 、1.6 μm 、3.9 μm 、6.2 μm 、7.3 μm 、10.4 μm 等多个通道组成二维光谱空间, 反演了强降水像素点的分布范围和集群特征, 并基于反演结果开展了重庆地区短时强降水识别研究。提出了一种基于卫星多通道资料的强降水落区阈值判识方案, 并利用该方案对 2021~2022 年重庆地区的 16 个强对流天气个例进行了检验。结果表明, 该方案能够实现全天 24h、逐 10 min 的强降水落区连续动态监测, 整点及整点前 10 min、前 30 min 的卫星资料对降水落区的反演准确率达到 70%~80%。

关键词: Himawari-8 卫星; 短时强降水; 卫星反演

中图分类号: P405 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.01.006

Research on Short-Term Strong Precipitation Retrieval in Chongqing Based on Multi-Channel Data of Himawari-8

WANG Yuan-mou^{1,2}, HU Chun-mei^{1,3*}, WANG Zhi-yi^{1,3}

(1. CMA Key Open Laboratory of Transforming Climate Resources to Economy, Chongqing 401147, China;

2. Chongqing Meteorological Service Centre, Chongqing 401147, China;

3. Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing 401147, China)

Abstract: In this paper, the data of surface precipitation intensity of not less than 20 mm/h during eight regional heavy rains in Chongqing in 2021 are collected, and the multi-channel data of the Himawari-8 geostationary meteorological satellite in the corresponding time and space are matched to establish the one-to-one correspondence dataset between precipitation intensity and radiation features. On this basis, by using unit feature

收稿日期: 2023-08-08

基金项目: 中国气象局复盘总结专项项目(FPZJ2023-107)

作者简介: 王远谋(1993-), 女, 重庆人, 工程师, 硕士, 主要研究方向为卫星气象与天气学分析。

*通讯作者: E-mail: 505287201@qq.com

space classification analysis, multiple channels such as $0.64\ \mu\text{m}$, $1.6\ \mu\text{m}$, $3.9\ \mu\text{m}$, $6.2\ \mu\text{m}$, $7.3\ \mu\text{m}$ and $10.4\ \mu\text{m}$ are selected to form two-dimensional spectral space, and the distribution range as well as cluster characteristics of heavy precipitation pixels are retrieved. Based on the inversion results, the short-time heavy precipitation identification research in Chongqing is carried out. A threshold identification scheme of heavy precipitation areas based on satellite multi-channel data is also proposed in this paper. This scheme is used to test 16 cases of severe convective weather in Chongqing from 2021 to 2022. The results show that the scheme can realize the continuous dynamic monitoring of the heavy precipitation area 24 hours a day, 10 minutes by 10 minutes. The accuracy of the inversion of the precipitation area by the satellite data at the whole point, 10 minutes before the whole point and 30 minutes before the whole point can reach 70%–80%.

Key words: Himawari-8 satellite; short-term strong precipitation; satellite inversion

0 引言

重庆地处四川盆地东部,属亚热带季风性湿润气候,降水充沛。由于重庆山地地形较多且夏季气温高,受地形抬升或局地热力环流影响,降水过程往往伴有短时强降水、雷暴大风等强对流天气,这是本地天气预报关注的重点。强对流天气具有空间尺度小、生命周期短、局地性和突发性强、破坏性大等特点,气象相关领域专家一直致力于对其进行研究^[1-6]。

气象卫星能够提供大范围、全天候的观测信息,近年来成为对流性天气的重要监测工具^[7-8]。静止气象卫星对云顶亮温、纹理及水汽含量等特性具有识别能力,能够提供云层表面和云内平均的辐射信息,从而反演出相应云的宏微观物理特性^[9-10]。2011年, Sieglaff J M 等人^[11]基于卫星资料开发了一种可用于对流初生和发展监测的算法。刘健等人^[12]利用 FY-2C 卫星分析了强对流云团的变化特征,发现快速区域扫描的高时间分辨率观测模式具有更好的效果。杜倩等人^[13]利用 FY-2 卫星云图资料和美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)再分析资料、常规观测资料及地面降水资料,分析了 2008 年华南地区一次西南涡降水过程中的环境场和暴雨云团影响系统。周晓丽等人^[14]针对新疆地区强对流天气个例及 FY-2D 数据,构建了多通道多阈值判识方法。王华荣等人^[15]基于 FY-2C 红外和水汽通道资料,分析

了发生在四川盆地的西南低涡暴雨云团生消过程。刘珂珂^[16]基于 FY-4A 卫星的多通道资料,利用阈值法对强对流雷暴云团进行了识别,并研究了云团的发展演变过程。

Himawari-8 是日本 2014 年发射的新一代静止气象卫星,可获取 16 个光谱通道的辐射信息,为我国范围内强对流天气的监测识别提供了有利条件。张成伟^[17]基于 Himawari-8 数据,利用单位特征空间聚类方法和机器学习算法实现了对流云和非对流云的分类研究。桂海林等人^[18]基于 Himawari-8 卫星云产品,对我国中东部地区 2017 年夏季白天的降水资料进行了分析,研究了云光学厚度、云顶粒子平均尺度、云顶温度参数与降水的关系,提出了用于估计小时降雨率的参数方法。唐飞等人^[19]基于静止气象卫星、极轨气象卫星和全球降水测量卫星的多通道观测产品,对 2021 年第 6 号台风“烟花”进行了分析。张夕迪等人^[20]选取 2016 年的 27 次暴雨过程,利用 Himawari-8 资料和地面降水资料分析了对流云团的初生情况,并将其与 FY-2 卫星及雷达探测数据进行对比。刘子菁^[21]针对 Himawari-8 观测资料在强对流识别和短时临近天气预报中的应用进行研究,结合数值模式资料与随机森林机器学习方法,建立了局地对流初生的预警模型。王小龙等人^[22]利用常规气象观测资料和 Himawari-8 气象卫星资料,对 2016 年 4~9 月甘肃省陇东南地区出现的 43 次强对流天气过程进行分析,建立了强对流云团识别指标、追

踪方法以及预报指标, 并对 2018 年的部分个例进行了检验。

本文针对 2021 年重庆地区 8 次区域性暴雨天气过程, 以短时强降水这一强对流天气类型作为研究对象, 选取雨强大于等于 20 mm/h 的地面降水实况数据, 与相应时间空间范围的 Himawari-8 卫星多通道资料进行匹配, 建立用于反演的降水强度与辐射特征数据集。利用 0.64 μm 可见光、1.6 μm 短波红外、3.9 μm 中波红外、6.2 μm 水汽、7.3 μm 水汽、10.4 μm 长波红外通道的辐射特征值进行组合。基于单位特征空间归类分析方法, 分别构建了适用于白天和夜间时段的二维光谱特征空间, 并分析了强降水像素点在光谱空间中的分布范围和集群特征, 从而提出了一种基于卫星多通道资料的强降水落区阈值判识方案。利用该方案分析了 2021~2022 年 16 次强对流天气过程中实际发生短时强降水的站数与不同时次卫星资料的反演击中情况, 并选取重庆地区“2022.6.26”暴雨区域个例进行了检验。

1 资料与方法

1.1 卫星及降水资料

2014 年 10 月 7 日发射的 Himawari-8 卫星是日本新一代静止气象卫星, 于 2015 年 7 月 7 日正式业务运行。Himawari-8 定位于 140.7°E 赤道上空, 采用三轴稳定方式, 搭载的先进葵花成像仪(Advanced Himawari Imager, AHI)共有 16 个光谱通道(见表 1): 3 个可见光通道、3 个近红外通道和 10 个红外通道(空间分辨率分别为 0.5 km、1 km 和 2 km)。AHI 每 10 min 对东半球进行一次圆盘扫描, 每 2.5 min 对日本周边地区进行一次区域扫描。Himawari-8 卫星成像速度快、图像质量高、产品种类丰富, 对我国范围内的云和大气探测具有重要意义。

重庆位于我国西南地区的四川盆地东部, 受西太平洋副热带高压、东亚季风等天气系统及山地地形共同影响, 夏季降水呈现范围广、雨量大、对流性强等特点。强降水和强对流天

表 1 Himawari-8 通道信息

通道号	中心波长/ μm	空间分辨率/km
01	0.46	0.5
02	0.51	0.5
03	0.64	0.5
04	0.86	1
05	1.6	1
06	2.3	1
07	3.9	2
08	6.2	2
09	7.0	2
10	7.3	2
11	8.6	2
12	9.6	2
13	10.4	2
14	11.2	2
15	12.3	2
16	13.3	2

气多由对流云产生。积雨云(Cumulonimbus, Cb)是最常见的对流云, 云体浓厚而庞大, 内部垂直上升运动剧烈, 因此在卫星云图上体现出独特的形态纹理和辐射特性, 并与地面强降水落区具有显著的时间空间对应关系。

本文的研究时间为 2021 年 5 月至 9 月, 研究区域为 104°E~112°E、26°N~34°N, 研究对象为 2021 年重庆地区的 8 次区域性暴雨天气过程。卫星资料来源于 Himawari-8 各个通道的辐射数据, 时间分辨率为 10 min, 空间分辨率为 0.05°。降水资料来源于全国综合气象信息共享平台(China Integrated Meteorological Information Service System, CIMISS)的地面站点实况数据, 时间分辨率为 1 h, 重庆范围内共有 2092 个站。卫星资料与降水资料按整点时间对应, 如 08:00 的卫星资料匹配 07~08 时的累计降水量。

1.2 卫星多通道组合

Himawari-8 卫星各个通道的辐射值(红外亮温或可见光反射率)体现了不同波长范围内的辐射特征, 因此能够根据云在不同通道中的辐射特征差异反演云的微观物理特征(粒子相态、粒子尺度), 从而达到区分降水云和非降

水云的目的。本文选择 Himawari-8 卫星的 3 号可见光通道($0.64\ \mu\text{m}$)、5 号短波红外通道($1.6\ \mu\text{m}$)、7 号中波红外通道($3.9\ \mu\text{m}$)、8 号水汽通道($6.2\ \mu\text{m}$)、10 号水汽通道($7.3\ \mu\text{m}$)和 13 号长波红外通道($10.4\ \mu\text{m}$)，并将各个通道的亮温或反射率值加以组合，以便更直观地分析不同通道的辐射特征差异。本文对于白天时段(北京时间 08:00~17:59 或世界时间 00:00~09:59, 下同)采用“红外通道+三通道差”组合，即通道 13、通道 07-13 (“-”表示亮温值相减, 下同)、通道 08-10、通道 05-03；对于夜间时段(北京时间 18:00~07:59 或世界时间 10:00~23:59, 下同)，由于可见光通道无效，采用“红外通道+两通道差”组合(删除通道 05-03)。

2 短时强降水特征分析

2.1 多光谱特征分布

针对 2021 年重庆地区的 8 次区域性暴雨天气过程，筛选地面降水强度大于等于 20 mm/h 的所有站点作为强降水点，然后分析强

降水点在不同卫星通道组合中的频数分布特征(见图 1)。

将图 1 中的通道组合分别作为 X 轴或 Y 轴，可构建二维光谱特征空间。单位特征空间归类分析是对光谱特征空间离散化的方法。其原理是将连续空间分割成 $N \times N$ 的矩阵，每个矩阵单元称为一个单位特征空间。统计强降水点落在每个单位特征空间单元的频次，即可根据高、低频次分布范围来定量判断 Cb 的光谱特性(见图 2)。

图 2 给出了强降水点在光谱特征空间中的分布范围和集群频率。在本文的研究中，集群的频率密度等同于概率密度，因此可根据图 2 确定不同光谱通道组合中强降水出现概率较大的阈值范围：通道 13 为 $[190, 230]$ (单位：K)，通道 07-13 为 $[-48, 64]$ (单位：K)，通道 08-10 为 $[-18, 2]$ (单位：K)，通道 05-03 为 $[-0.64, -0.16]$ (单位：%)。利用多通道组合的阈值判断方法，能够实现任意时次

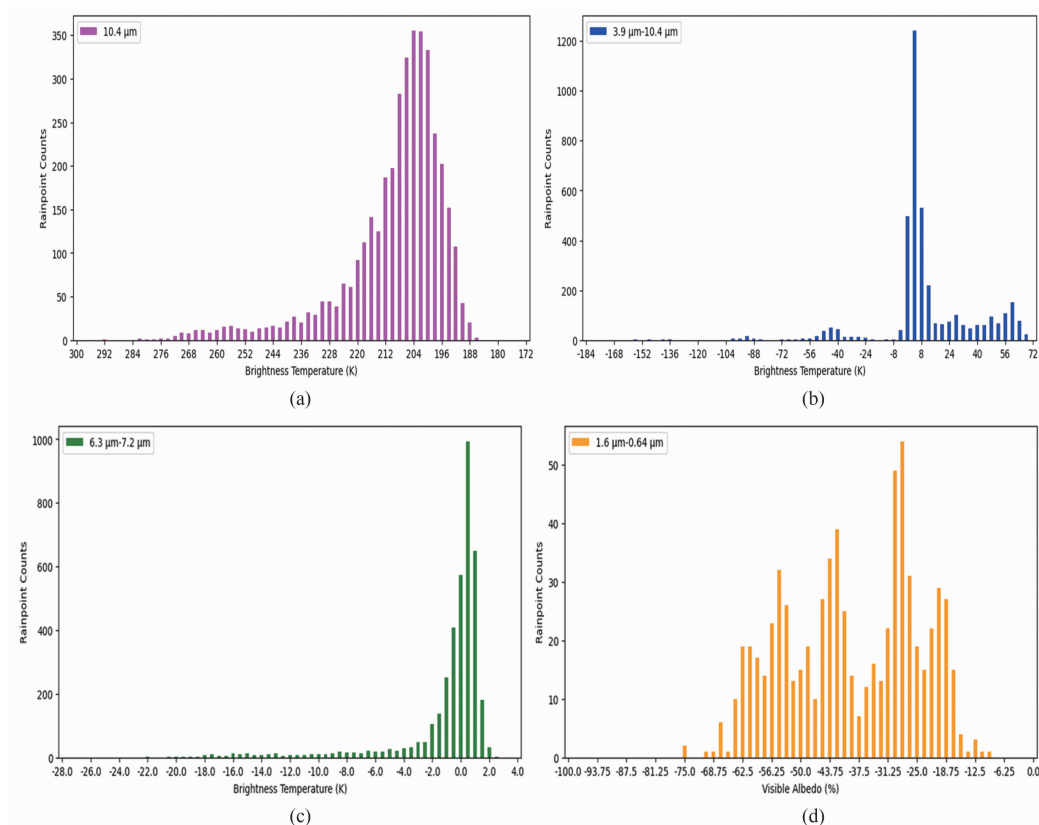


图 1 强降水点光谱通道频数分布特征：(a)通道 13；(b)通道 07-13；(c)通道 08-10；(d)通道 05-03

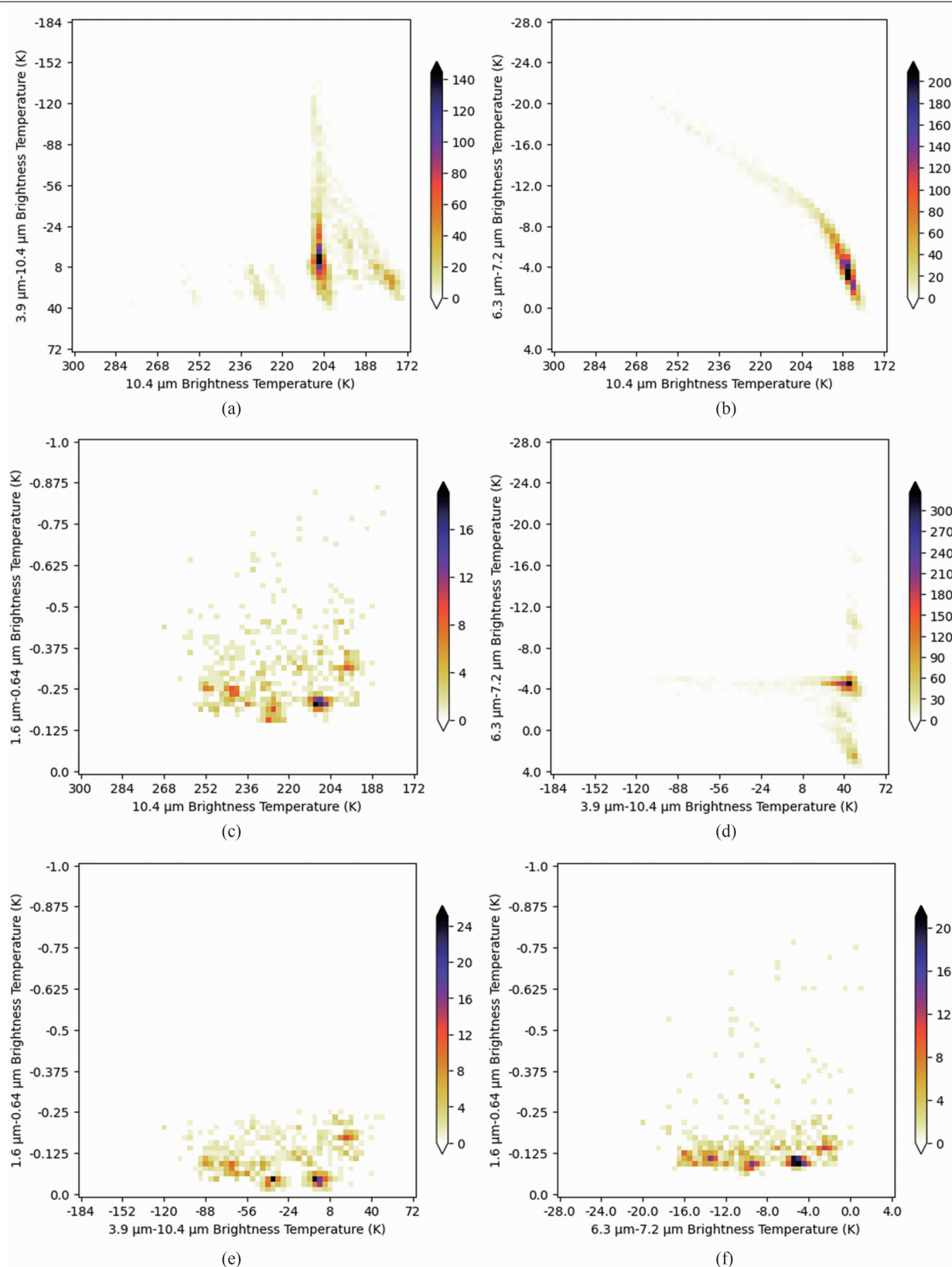


图 2 强降水光谱空间集群分布特征: (a)通道 13 与通道 07-13; (b)通道 13 与通道 08-10; (c)通道 13 与通道 05-03; (d)通道 07-13 与通道 08-10; (e)通道 07-13 与通道 05-03; (f)通道 08-10 与通道 05-03

卫星资料的强降水落区识别。

2.2 差异性分析

气象站的降水数据为观测时间前 1 h 降水量的累加值, Himawari-8 卫星资料则是每 10 min 间隔的红外亮温或可见光反射率瞬时值, 因此需要对时间分辨率不同的两种数据进行匹配。在前面提到, 本文采用的是整点匹配原则, 但也有研究者使用整点前 10~30 min 的卫星资料进行匹配。为了分析不同时次资料对反演结果的影响, 本文将降水强度大于等于 20 mm/h 的气象站作为真值, 利用多通道组合阈值判断方法分别对整点及整点前 30 min、20 min、10 min 的卫星资料进行反演, 并将反演得到的强降水落区作为测试值。若真值站点位置落在测试值落区范围内, 则判断为“击中”。表 2 列出了 2021~2022 年重庆地区 16 次强对流天气过程中真值与反演测试值的击中情况对比数据。

由表 2 可见, 16 次过程的平均击中率在 45.5% 左右; 最高击中率为 80.8%, 出现在

2022 年 4 月 23 日~4 月 24 日的过程中。对比上述过程的天气环流形势及降水特征后发现, 本文的卫星多通道组合阈值反演方法对夏季 5~8 月的短时强降水特征明显(即“风弱雨强”)的强对流天气过程具有较好的反演效果, 击中率可达 70%~80%。对比不同时次卫星资料的反演结果后发现, 整点及整点前 10 min 资料的击中率最高, 16 次过程中各有 6 次的击中数高于其他时次; 整点前 30 min 资料的击中率次之; 整点前 20 min 资料的击中率最低, 16 次过程中仅有 1 次的击中数高于其他时次。

如前所述, 白天时段采用“红外通道+三通道差”组合, 夜间时段采用“红外通道+两通道差”组合, 二者的反演效果有一定差异。分别统计 16 次过程白天时段和夜间时段的反演击中率(见表 3)。结果表明, 白天时段整点前 10 min 资料的击中率最高, 夜间时段整点资料的击中率最高, 但与整点前 10 min 的差异不大。

表 2 短时强降水实况站数与反演击中数对比

起止时间 (世界时)	实况站数	整点 击中数	前 10 min 击中数	前 20 min 击中数	前 30 min 击中数
2021050213~2021050308	781	608	612	590	589
2021062600~2021062723	385	111	89	103	100
2021071509~2021071623	627	127	150	110	123
2021080804~2021080923	696	402	369	376	395
2021082212~2021082313	705	431	415	321	442
2021090403~2021090523	794	397	447	410	431
2021091101~2021091202	378	85	81	74	83
2021091515~2021091623	501	307	303	295	296
2022031602~2022031614	78	30	15	14	15
2022041115~2022041214	157	19	17	18	22
2022042319~2022042413	197	153	162	161	161
2022042717~2022042813	257	194	200	182	178
2022050810~2022050908	317	146	145	128	166
2022060106~2022060223	203	24	25	25	23
2022062203~2022062323	990	388	382	380	378
2022062609~2022062708	759	537	528	530	565

表 3 短时强降水白天与夜间反演击中数对比

时段	实况站数	整点 击中数	前 10 min 击中数	前 20 min 击中数	前 30 min 击中数
白天 00:00~09:59 UTC	932	592	601	588	575
夜间 10:00~23:59 UTC	3867	3545	3535	3519	3520

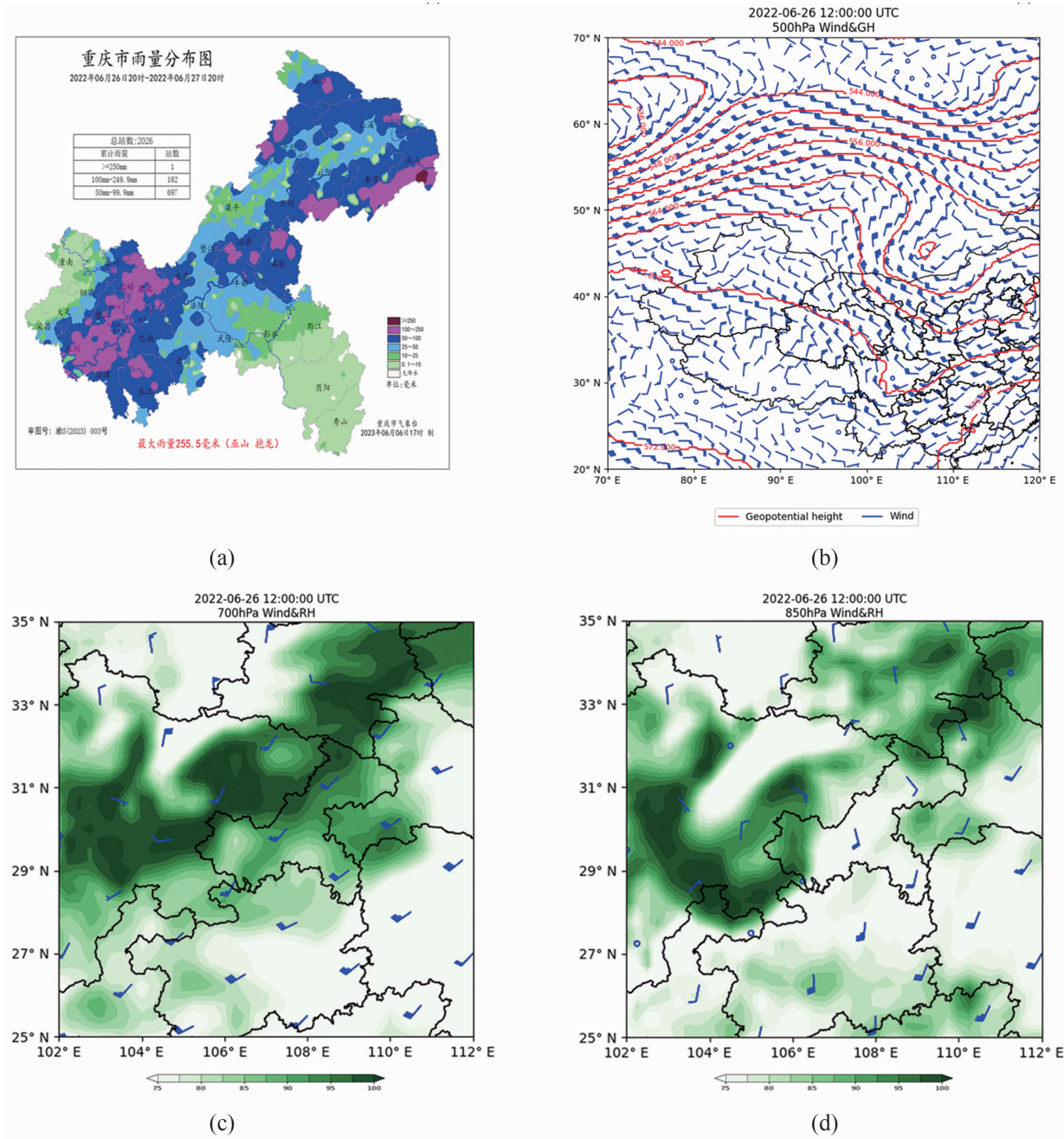


图 3 “2022. 6. 26”暴雨天气过程的地面降水实况及环流形势：(a)2022 年 6 月 26 日 20 时~6 月 27 日 20 时重庆市雨量分布；(b)2022 年 6 月 26 日 20 时 500 hPa 位势高度场和风场；(c)2022 年 6 月 26 日 20 时 700 hPa 风场和相对湿度场；(d)2022 年 6 月 26 日 20 时 850 hPa 风场和相对湿度场

2.3 个例检验

2022 年 6 月 26 日~6 月 27 日，重庆地区

出现一次暴雨天气过程，强降水主要集中在东北部至西南部一线的大部分地区。全市共有 1

站出现特大暴雨, 182 站出现大暴雨, 697 站出现暴雨, 过程最大雨量达到 255.5 mm, 最大小时雨量为 125.1 mm (见图 3(a))。利用欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 的再分析资料分析此次过程的天气环流形势可以发现, 26 日 20 时 500 hPa 上空有一高空槽位于四川盆地东部, 重庆受副热带高压外围及高空槽前西南气流共同影响 (见图 3(b)); 700 hPa 上空在陕西至四川东北部有一条呈东北-西南走向的冷式切变线, 贵州至湖南一带有低空急流形成, 重庆位于切变线和低空急流之间 (见图 3(c)); 850 hPa 上空在重庆西部和四川交界处有一低涡, 重庆南侧的低空急流不断向重庆地区输送暖湿空气, 导致本地相对湿度达到 80% 以上, 冷暖空气交汇明显 (见图 3(d))。从高-中-低空综合配置来看, 整个天气系统保持后倾结构。在高空槽、低空切变线、西南涡和低空急流的共同作用下, 强降水集中发生在 26 日夜间至 27 日凌晨。

以“2022. 6. 26”过程为例, 基于强降水时间范围内的 Himawari-8 卫星资料, 利用多通道组合阈值反演方法判断地面强降水落区, 匹配方式为整点匹配。对于白天时段和夜间时段的卫星资料, 分别使用白天和夜间通道组合, 最终得到图 4 所示的强降水落区判别结果。

分别检验“2022. 6. 26”过程中白天时段和夜间时段的反演结果。夜间 (26 日 21 时~27 日 07 时) 气象站观测到实际降水强度大于等于 20 mm/h 的站点数为 587, 反演击中数为 367, 击中率为 62.5%; 白天 (27 日 08 时~16 时) 气象站观测到实际降水强度大于等于 20 mm/h 的站点数为 170, 反演击中数为 161, 击中率为 94.7%。可以看出, 白天结果明显优于夜间。个例检验结果表明, 卫星多通道组合阈值反演方法对强对流天气中的短时强降水落区具有较好的监测识别能力, 且白天的识别效果优

于夜间。

3 结束语

本文以强对流天气中的短时强降水为研究对象, 利用 Himawari-8 卫星多通道组合的阈值反演方法开展强降水落区识别研究。选取 2021 年重庆地区的 8 次区域性暴雨天气过程, 统计雨强大于等于 20 mm/h 的地面降水实况数据, 并将其与相同时空范围的 Himawari-8 卫星资料进行匹配。将 0.64 μm 、1.6 μm 、3.9 μm 、6.2 μm 、7.3 μm 、10.4 μm 光谱通道组成二维光谱空间, 利用单位特征空间归类分析法分析了强降水点在光谱空间中的分布范围与集群频率。本文提出了一种基于卫星多通道资料的强降水落区阈值判别方案。利用该方案对 2021~2022 年重庆地区的 16 个强对流天气个例进行反演, 分别分析了整点、整点前 10 min、20 min 和 30 min 的 Himawari-8 卫星资料对强降水落区的反演效果, 并将实际观测到强降水的气象站作为真值进行检验。结果表明, 整点及整点前 10 min 的卫星资料的强降水落区反演结果与真值最接近。其中, 整点前 10 min 资料在白天时段的识别效果略优于整点。最后利用该反演方法对重庆地区“2022. 6. 26”暴雨天气过程进行个例分析, 实现了全天 24 h、逐 10 min 的强降水落区连续动态监测。

然而本文仍存在一些未解决的问题: (1) 夜间时段的光谱通道误差。夜间“红外通道+两通道差”组合的识别效果比白天时段稍差。这是因为某些非降水云在红外通道的光谱特征与 Cb 类似, 从而被阈值判断方法错误地判断为 Cb。(2) 卫星与气象资料匹配误差。虽然利用整点卫星资料反演的强降水落区能够较好地代表地面实际降水情况, 但始终存在滞后性差异。在今后的研究中, 考虑对逐 1 h 的卫星多光谱通道辐射值进行平均处理, 或者基于经验公式设置逐 10 min 的强降水标准, 从而提高强降水落区反演的准确性。

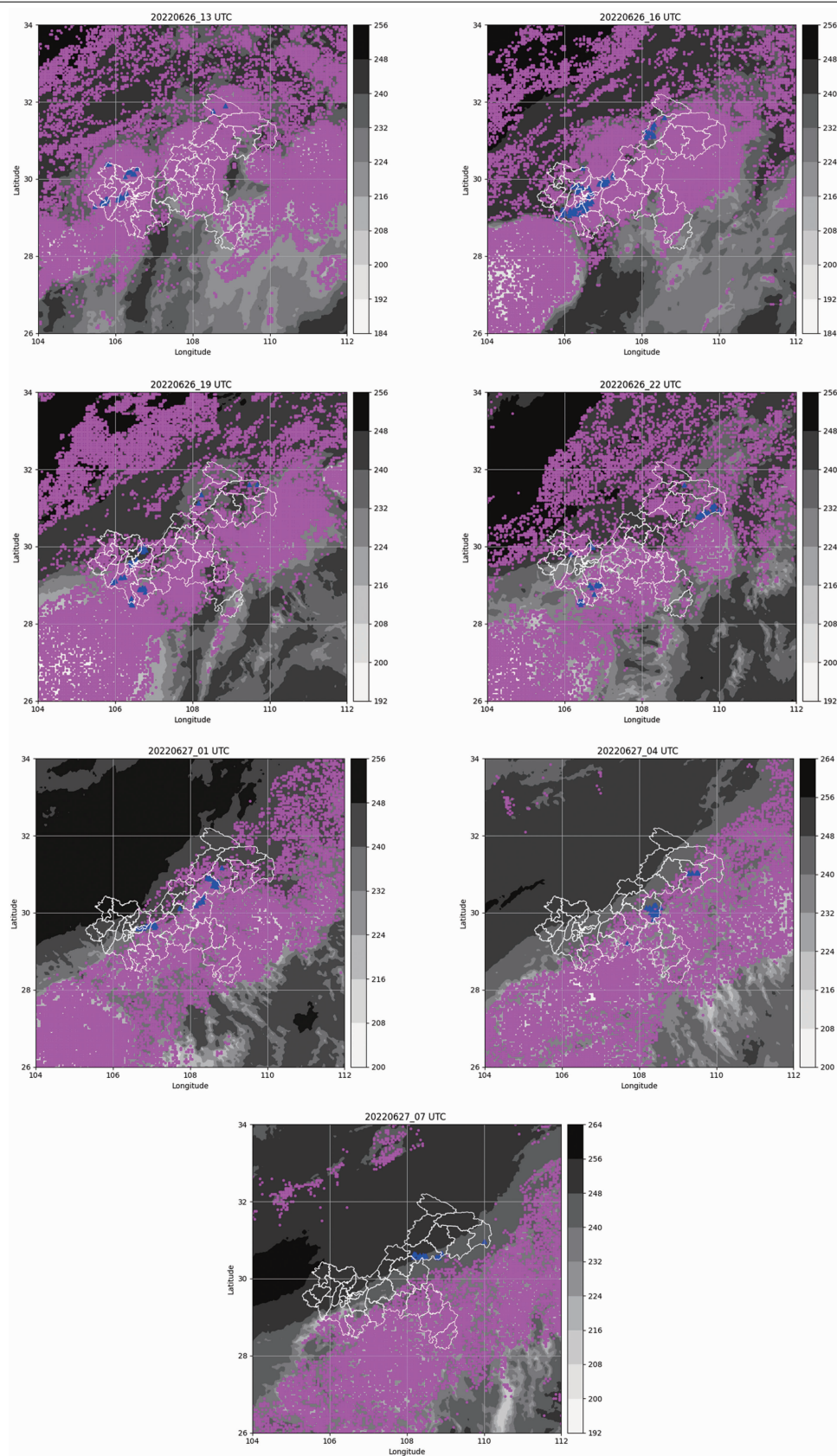


图 4 2022 年 6 月 26 日 13 时~6 月 27 日 07 时逐 3 h 短时强降水实况站点及反演落区
(图中时间为世界时, 蓝色“▲”为实况降水站点, 紫红色“●”为降水反演落区)

参考文献

- [1] 田付友, 张小玲, 曹艳察, 等. 中国中低海拔地区三类强对流天气环境条件的基本气候特征[J]. *高原气象*, 2022, **41**(6): 14.
- [2] 陈鲍发, 马中元, 王立志, 等. 江西昌江流域特大暴雨短时强降水回波特征分析[J]. *气象*, 2022, **48**(11): 1418–1427.
- [3] 梁巧倩, 李晓娟, 文秋实, 等. 强弱天气尺度强迫下广东短时强降水时空特征分析[J]. *热带气象学报*, 2022, **38**(5): 641–650.
- [4] 潘佳文, 彭婕, 魏鸣, 等. 副热带高压背景下极端短时强降水的双偏振相控阵雷达观测分析[J]. *气象学报*, 2022, **80**(5): 748–764.
- [5] 兰明才, 周莉, 蒋帅, 等. 西太平洋副热带高压控制下湖南一次短时强降水成因分析[J]. *干旱气象*, 2022, **40**(4): 656–666.
- [6] 王宏, 王秀明, 姜云雁, 等. 承德山区夏季短时强降水的时空分布及环境参数特征[J]. *气象*, 2021, **47**(12): 1469–1483.
- [7] 杨洁, 王兵, 刘峰, 等. 葵花 8 号卫星在白云机场一次强对流冰雹中的监测应用[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2021, **15**(1): 8.
- [8] 邵建, 张肃诏, 陈敏, 等. FY-4A 卫星在宁夏短时强降水中的适用性研究[J]. *干旱区研究*, 2023, **40**(2): 163–172.
- [9] 王晨曦, 郁凡, 张成伟. 基于 MTSAT 多光谱卫星图像监测全天时我国华东地区的梅雨期降水[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 2010, **46**(3): 12.
- [10] 王远谋, 郁凡. 主要降水与非降水云类的全天时反演试验研究[J]. *气象学报*, 2017, **75**(4): 14.
- [11] Sieglaff J M, Cronce L M, Feltz W F, et al. Nowcasting convective storm initiation using satellite-based box-averaged cloud-top cooling and cloud-type trends [J]. *Apply Meteorology Climatology*, 2011, **50**(1): 110–126.
- [12] 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[J]. *大气科学*, 2013, **37**(4): 873–880.
- [13] 杜倩, 覃丹宇, 张鹏. 一次西南低涡造成华南暴雨过程的 FY-2 卫星观测分析[J]. *气象*, 2013, **39**(7): 821–831.
- [14] 周晓丽, 杨昌军. 基于 FY-2D 的新疆强对流云的识别[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2017, **11**(2): 82–87.
- [15] 王华荣, 何光碧, 谌贵珣. 西南低涡对流云团及其降水的一些特征[J]. *高原山地气象研究*, 2012, **32**(2): 6.
- [16] 刘珂珂. 基于卫星云图强对流雷暴识别方法的研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- [17] 张成伟. 新一代静止卫星葵花-8 的云分类研究及其应用[D]. 南京: 南京大学, 2019.
- [18] 桂海林, 诸葛小勇, 韦晓澄, 等. 基于 Himawari-8 卫星的云参数和降水关系研究[J]. *气象*, 2019, **45**(11): 1579–1588.
- [19] 唐飞, 陈凤娇, 诸葛小勇, 等. 利用卫星遥感资料分析台风“烟花”(202106)的影响过程[J]. *大气科学学报*, 2021, **44**(5): 14.
- [20] 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[J]. *气象*, 2018, **44**(10): 10.
- [21] 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[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2019.
- [22] 王小龙, 王彤, 李映春, 等. 基于“葵花 8 号”气象卫星的陇东南地区强对流识别跟踪技术研究[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2022, **16**(5): 6.