暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

FY-4B GHI资料在北京一次对流下山增强过程中的应用分析

刘翠 章丽娜 毛冬艳 刘瑞婷 肖现

Application and analysis of FY-4B GHI data in analyzing a convective downslope intensification process in Beijing

LIU Cui，ZHANG Lina，MAO Dongyan，LIU Ruiting，XIAO Xian

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-175

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

青藏高原夏季FY-4A卫星对流初生产品的分类识别

Classification and identification of FY-4A convective initiation products in summer on the Qinghai-Tibet Plateau

暴雨灾害. 2024, 43(2): 214-223 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-193

阿克苏地区一次强对流天气过程的地闪活动特征分析

Activity characteristics of the cloud-to-ground lightning in a severe convective weather event in Arksu of Xinjiang

暴雨灾害. 2022, 41(6): 640-650 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-013

基于葵花8号卫星资料的沈阳两次暴雨过程中对流云特征对比分析

Comparison of convective cloud characteristics during two torrential rain events in Shenyang based on Himawari-8 satellite data

暴雨灾害. 2020, 39(2): 125-135 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.02.003

基于随机森林算法优选FY-4B AGRI通道订正雨量产品研究

The study on precipitation products corrected by optimal selection FY-4B AGRI channel based on random forest algorithm

暴雨灾害. 2024, 43(5): 598-606 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-194

山东半岛"平行"双支海风锋的中尺度特征分析及对流触发机制初探

Mesoscale characteristics analysis of "parallel" dual sea breeze fronts and associated convection initiation mechanism in the Shandong Peninsula

暴雨灾害. 2025, 44(1): 9-18 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-137

一次华南准静止线状对流系统触发维持机制研究

A study on triggering and maintenance mechanism of a linear quasi-stationary convection system in South China

暴雨灾害. 2022, 41(1): 33-41 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.01.004

关注微信公众号，获得更多资讯信息

刘翠,章丽娜,毛冬艳,等.2026. FY-4B GHI 资料在北京一次对流下山增强过程中的应用分析[J].暴雨灾害,45(1):47−57. LIU Cui, ZHANG Lina, MAO Dongyan, et al. 2026. Application and analysis of FY-4B GHI data in analyzing a convective downslope intensification process in Beijing [J]. Torrential Rain and Disasters,45(1):47−57 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−175

FY-4B GHI 资料在北京一次对流下山增强过程中的应用分析

刘翠[1, 2], 章丽娜[2, 3], 毛冬艳[4], 刘瑞婷[5], 肖现[5]

(1. 国家卫星气象中心 (国家空间天气监测预警中心), 北京 100081; 2. 许健民气象卫星创新中心, 北京 100081; 3. 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081; 4. 辽宁省气象局, 沈阳 110166; 5. 北京城市气象研究院, 北京 100089)

摘　要: FY-4B 快速成像仪 (Geostationary High-speed Imager, GHI) 区域扫描能力已提升至空间分辨率 250 m、时间分辨率 1 min, 其探测资料可用于实时监测对流演变。2022 年 6 月 12 日东北冷涡背景下北京平原地区出现了一次对流下山增强引发风雹灾害的过程, 采用时空匹配后的 GHI 可见光云图、云顶亮温等卫星数据与多普勒天气雷达数据, 通过对比对流触发与合并的卫星与雷达特征, 分析 FY-4B GHI 捕捉此次过程对流发展前兆信号的能力以及积云线形成的原因。结果表明: FY-4B GHI 高分辨率资料可显著提升对强对流天气前兆信号的识别时效, 为改进对流下山过程的预报预警提供新的观测依据。其中, 在对流触发监测中, GHI 可见光云图提前约 30 min 识别出山区对流触发的前兆信号—积云线, 并完整监测积云线上浅对流演变为深对流的全过程。在对流下山合并过程中, GHI 基于云顶亮温识别的回波合并时间较雷达识别的回波合并时间提前 18 min, 展现出对系统整合的早期捕捉能力。为进一步揭示积云线的成因, 结合新一代快速更新多尺度资料分析和预报系统的临近数值预报子系统 (RMAPS-NOW) 分析发现, 北京陡峭地形处低层弱的辐合上升是积云线形成的重要动力因子。

关键词: 快速成像仪 (GHI); 云顶亮温; 下山对流; 对流触发; 对流合并; RMAPS-NOW

中图法分类号: P405　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−175

Application and analysis of FY-4B GHI data in analyzing a convective downslope intensification process in Beijing

LIU Cui[1, 2], ZHANG Lina[2, 3], MAO Dongyan[4], LIU Ruiting[5], XIAO Xian[5]

(1. *National Satellite Meteorological Center* (*National Centre for Space Weather*), *Beijing* 100081; 2. *Innovation Center for FengYun Meteorological Satellite* (*FYSIC*), *Beijing* 100081; 3. *China Meteorological Administration Training Centre*, *Beijing* 100081; 4. *Liaoning Provincial Meteorological Service*, *Shenyang* 110166; 5. *Institute of Urban Meteorology*, *China Meteorological Administration*, *Beijing* 100089)

Abstract: The FY-4B Geostationary High-speed Imager (GHI), featuring a maximum temporal resolution of 1 minute and a spatial resolution of 250 m, enables real-time monitoring of convective evolution. A convection downslope intensification event that caused severe wind and hail disasters in the Beijing plain on June 12, 2022, under the influence of a Northeast China cold vortex, was investigated. Utilizing spatiotemporally matched GHI visible imagery, Black Body Temperature (TBB) data, and Doppler weather radar data, this study compared the capabilities of satellite and radar in monitoring CI and convective merger features and the reason of the formation of the cloud line with a particular focus on the ability of GHI to detect precursor signals. The results show that for CI monitoring, GHI visible imagery detected precursor signals over mountainous regions-cumulus cloud lines-approximately 30 minutes earlier than radar, and fully captured the transition from shallow to deep convection along these lines. During the downslope merging stage, the cloud merger time identified by GHI based on TBB was 18 minutes earlier than the echo merger time detected by radar,showcasing its early detection capability for system integration. A comprehensive analysis of GHI observations and data from the Rapid-refresh Multi-scale Analysis and Prediction System-nowcasting revealed that weak low-level convergent uplift over Beijing's steep

收稿日期: 2024−09−23; **定稿日期**: 2025−12−19

资助项目: 国家自然科学基金面上项目 (42375019)

第一作者: 刘翠, 主要从事卫星资料应用分析研究。E-mail: 1076955154@qq.com

通信作者: 章丽娜, 主要从事灾害性天气机理和中尺度气象学研究。E-mail: zhangln@cma.gov.cn

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

terrain was identified as a key dynamical factor for cumulus cloud line formation. To further reveal the formation mechanism of the cumulus cloud line, a comprehensive analysis of GHI observations combined with data from the Rapid-refresh Multi-scale Analysis and Prediction System–Nowcasting (RMAPS-NOW) revealed that weak low-level convergent uplift over Beijing's steep terrain is a key dynamical factor in the formation of the cloud line.

Key words: Geostationary High-speed Imager (GHI); Black Body Temperature (TBB); downslope convection; convective initiation; convective merger; RMAPS-NOW

引　言

冰雹、雷暴大风和短时强降水等强对流天气具有突发性强、致灾性高等特点。华北地区夏季强对流天气频发，该地区此类天气的精准预警预报面临重大挑战 (Yang et al., 2017)。北京地区西部为太行山脉，北部为燕山山脉，山区海拔最高超过 2 000 m，平原海拔高度仅数 10 m，地形高度落差大。这种复杂地形显著增强了山区对流触发 (Convection Initiation, CI)、对流系统下山及强度变化的预报难度。目前，针对解决这些关键问题的预报技术尚未取得根本性突破 (Chen et al., 2012; Wang et al., 2014; 肖现等, 2015; 程文静等, 2023)。

Chen 等 (2012) 的研究表明，200 m 地形分界线附近是 CI 最密集的地方，华北地区夏季 CI 事件多发生于冷涡背景下，于午后在西北部山区生成，随后向东南方向的山脚和平原地区传播。黄荣 (2012) 的研究结果表明，夏季在北京西北山区生成的对流系统中，约 30% 在下山过程中增强，其余对流系统则留在山区或在进入平原时减弱。就环境条件而言，有利的环境风和垂直风切变、地形强迫及充足的水汽供应是对流下山增强的关键 (肖现等, 2015)。在对流发展过程中，对流合并在增强过程中起着关键作用，对流系统面积和强度的增加往往会导致更为严重的气象灾害 (French and Parker, 2012; Zhou et al., 2020)。从雷达回波演变特征看，对流合并通常始于外围较弱回波合并，然后是强回波中心的合并，合并后强回波面积增加，回波顶抬高 (翟菁等, 2012; 翟丽萍等, 2024)。

当前，对流下山监测主要依赖多普勒天气雷达，但其受限于地形遮挡和扫描频率等原因，难以捕捉对流触发前的发展演变及合并过程中云顶物理特征变化。卫星遥感技术因其高时空分辨率与广域覆盖能力，在对流识别与追踪方面展现出独特优势，能够在地面雷达尚未有效捕捉前，及时发现并持续监测快速发展的对流系统，从而提前识别出可能伴随强天气的对流过程 (覃丹宇和方宗义, 2014)。国际上，自 Mecikalski 和 Bedka (2006) 提出利用静止卫星光谱特征并设定相应阈值以判断对流发生的可能性后，已发展出对流分析追踪 (Mecikalski et al., 2016) 与对流触发临近预报 (Sieglaff et al., 2011) 等主流算法。国内研究也广泛利用静止卫星多光谱特征提取 CI 指标，追踪对流合并过程及分析系统演变 (郭巍等, 2018; Min et al., 2019; 徐小红等, 2022; Li et al., 2023)。在识别对流云合并后，低亮温区的面积增大，云团强度显著增强 (万夫敬和刁秀广, 2018; 杨舒楠等, 2023)，针对华北地区的研究进一步发现，−52 ℃ 左右的云顶亮温 (Black Body Temperature, TBB) 阈值对识别下山对流具有较高准确率 (杨艺亚等, 2024)。然而，绝大多数静止卫星的时间分辨率尚不足以精细解析下山对流的快速演变过程 (乔丹杨等, 2025; 谢娜等, 2025)。

在卫星监测中，代表边界层辐合的积云线是识别 CI 的关键前兆信号，该类云线的出现与相互作用，被证实可提前 30~60 min 预示雷暴的发生 (Purdom, 1976)，这为基于卫星的 CI 预警提供了物理基础 (俞小鼎和郑永光, 2020; Li et al., 2023)。由于从积云线出现到发展为雷暴的时间较短，为捕捉快速演变的精细过程，需要高时空分辨率的卫星观测。我国新一代静止轨道气象卫星 FY-4B 搭载的快速成像仪 (Geostationary High-speed Imager, GHI)，区域扫描能力已提升至空间分辨率为 250 m、时间分辨率为 1 min，这使得完整捕捉雷暴的时空尺度特征成为可能，从而有助于更加深入理解 CI 前期信号和对流演变特征 (Wang and Xiao, 2023; Li et al., 2023)。

本文选取 2022 年 6 月 12 日北京一次冷涡背景下对流下山增强并在平原致灾的过程，针对该过程下山对流突发性强、演变快的难点，聚焦其中的 CI 与对流合并阶段，通过分析时空匹配的 GHI 分钟级序列数据及多普勒天气雷达数据，在对比卫星与雷达监测对流触发及合并特征的基础上，重点评估 FY-4B GHI 资料在识别 CI 及下山对流强度增强前兆信号方面的能力，从而为改进下山对流预警预报提供新的科学思路与观测依据。

1　资料与方法

1.1　资料说明

本文使用的资料包括：(1) 2022 年 6 月 12 日 FY-4B 气象卫星资料，来源于国家卫星气象中心 (https://

data.nsmc.org.cn)。其中, 可见光云图来自 FY-4B GHI 通道 1 (全色波段) 的 L1 级产品, 空间分辨率为 250 m, 时间分辨率为 1 min, 用于识别对流初生过程中的积云线等精细云系特征; TBB 数据来自 GHI 通道 7 (11.4 μm) 的 L1 级产品, 空间分辨率为 2 000 m, 时间分辨率为 1 min, 用于分析对流发展过程中的云顶冷却特征; 云顶高度数据来自 FY-4B 多通道扫描成像辐射计 (Advanced Geosynchronous Radiation Imager, AGRI) 的 L2 级产品, 空间分辨率为 4 000 m, 时间分辨率为 15 min, 用于识别深对流的发展和云顶高度变化。FY-4B 云顶高度产品基于 AGRI 仪器两个红外窗区通道 (10.8 μm、12.0 μm) 和一个 CO_2 吸收通道 (13.3 μm), 采用一维变分方法反演得到。张淼等 (2024) 研究表明该产品可靠性较高, 适用于对流监测分析。需特别说明的是, 卫星观测任务中还包含了扫描黑体背景、观测恒星以及其他任务, GHI L1 级数据具备 1 min 时间分辨率, 但实际数据存在定时缺测 (图 1)。(2) 常规气象观测资料, 包括国家气象信息中心提供的国家和区域气象观测站及 L 波段探空数据, 用于分析天气实况和环境场; 其中冰雹实况资料来自北京市气象局地面观测报告。(3) 中国气象局气象探测中心提供的 S 波段多普勒天气雷达组网数据, 用于确定下山对流触发 (CI) 及合并的关键时间节点, 并作为评估卫星监测能力的对比基准。(4) 欧洲中心提供的 1 h 一次、0.25°× 0.25°第五代全球再分析资料 (ERA5), 用于分析对流发生前的大尺度环境条件。(5) 新一代快速更新多尺度资料分析和预报系统-临近预报子系统 RMAPS-NOW 数据。该数据通过同化多普勒雷达反射率因子、径向速度及高频自动站资料, 生成水平分辨率 3 km、垂直分辨率 150 m (70 层) 的分析场, 用于揭示卫星所见对流前兆信号

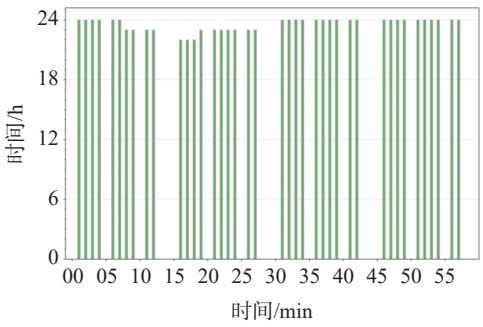


图 1 2022 年 6 月 12 日 GHI 分钟级数据时间分布特征 (横坐标表示分钟数 0—59, 时间分辨率 1 min, 纵坐标表示一天 24 h)

Fig. 1 Temporal distribution of GHI minute-level data on June 12, 2022 (The horizontal axis denotes minutes of the hour (0–59) with a 1-minute temporal resolution, and the vertical axis represents the 24 hours of the day)

(如积云线) 的成因。研究表明, RMAPS-NOW 反演数据可靠性较高, 已广泛应用于对流尺度天气分析 (肖现等, 2015; Xiao et al., 2022; 徐姝等, 2024)。

1.2 对流触发和合并的识别标准

目前普遍采用多普勒天气雷达首次监测到反射率因子达到或超过 35 dBz 作为 CI 的识别标准 (Bai et al., 2019)。对流合并通常是根据超过一定阈值的雷达回波反射率因子等值线的合并来识别, 但标准各有不同。如 Gauthier 等 (2010) 将组合反射率因子 (CR) 强度达到 30 dBz 作为确定对流合并的阈值, French 和 Parker (2012)、Liu 等 (2023) 采用 40 dBz 作为判断弓形回波合并的阈值。本文利用多普勒天气雷达资料识别 CI 和对流合并的具体做法是: 利用 python 提供的 opencv 计算机视觉库 (https://github.com/opencv), 基于八邻域-连通区域标记法识别出对流发生发展关键区域内 CR 强度达到 35 dBz 的回波。其中, 八邻域是指对应某个格点的上、下、左、右、左上、右上、左下、右下位置, 即紧邻和斜向相邻的格点, 连通区域是指图像中具有相同像素值并且位置相邻的格点组成的区域。根据连通域中的格点数变化、结合反射率因子图像特征来进行 CI 和对流合并的识别。本文定义的 CI 标准是: 当格点数突破零时 (即研究区域内出现至少一个 CR≥35 dBz 的连通域) 标记为 CI; 对流合并标准是: 在雷达组合反射率图上两个连通域 (CR≥35 dBz) 合并的时刻标记为对流合并。

本文参考杨艺亚等 (2024) 的研究, 在新生对流发展的关键区域, 将 TBB 达到-52 ℃ 作为卫星资料识别对流合并的阈值。具体的识别对流合并方法与雷达数据的处理方法类似, 即划分八象限连通域, 两个连通域 (TBB≤-52 ℃) 的合并标记为对流云顶合并。

2 天气过程实况及其对流发生前的环境条件

2.1 强对流天气实况

2022 年 6 月 12 日 16:00 (北京时, 下同), 受河北西北部线状对流系统东移影响, 北京西北部山区出现 6 级以上瞬时大风, 此时北京地区未观测到冰雹和短时强降水 (图 2a)。17:00, 随着线状对流系统移入北京境内, 北京西北部山区出现呈东北—西南向线状排列的 6 级以上瞬时大风带, 延庆地区出现直径达 5 mm 的冰雹 (图 2b)。18:00, 北京山区和平原的地形交界处开始观测到短时强降水, 多个站点出现 6 级以上瞬时大风 (图 2c)。19:00, 北京东部平原地区多个站点出现短时强降水、大风和冰雹天气, 部分站点冰雹直径超过 2 cm (图 2d)。此后对流持续发

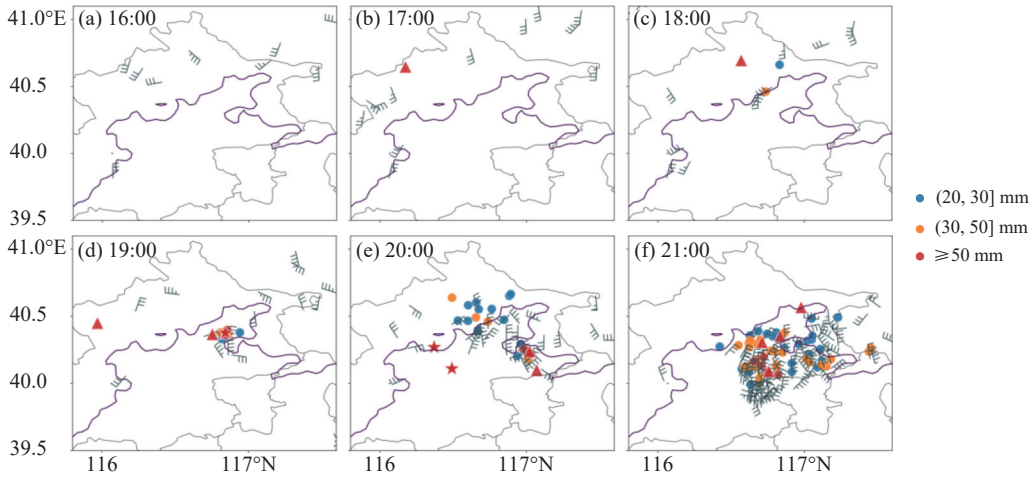


图 2 2022 年 6 月 12 日 16:00 (a)—21:00 (f) 逐时短时强降水 (彩色圆点)、6 级以上大风 (风向杆, 单位: m·s^{-1}) 和冰雹 (红三角和红五星) 分布 (三角形为直径>5 mm 的冰雹, 五角星为直径>2 cm 的冰雹, 紫色实线表示 200 m 地形等高线)

Fig. 2 Spatial distribution of short-duration heavy rainfall (dots), wind greater than beaufort 6 (wind barbs, unit: m·s^{-1}), and hail (red symbols) from (a) 16:00 BT to (f) 21:00 BT on June 12, 2022 (Triangles represent hail with a diameter greater than5 mm, and stars represent hail with a diameter greater than 2 cm. The purple solid lines indicate the 200 m topography contour)

展, 北部山区及平原地区出现冰雹、大风和短时强降水的站点数显著增加 (图 2e)。21:00, 冰雹、大风和短时强降水的范围和强度增强, 且主要集中于北京东北部的平原地区, 个别站点的小时雨强超过 50 mm·h^{-1} (图 2f)。

依据对流系统的演变特征, 将本次过程分为三个阶段: 首先是触发阶段 (16:00—17:15), 对流初生于西北部 200 m 地形线附近; 然后是合并增强阶段 (17:15—19:00), 线状对流与新生对流合并增强; 最后是下山影响阶段 (19:00—21:00), 合并后的系统向东南移动影响城区。本文聚焦前两个阶段, 原因在于触发与合并阶段是决定此次下山对流能否增强的关键期, 此外 FY-4B GHI 分钟级分辨率可见光云图可完整捕捉此阶段的演变。

2.2 对流发生前的环境条件

6 月 12 日 14:00, 500 hPa 东北冷涡中心位于 115°E、45°N 附近, 配合−16 ℃ 冷中心 (图 3a)。北京位于冷涡底部、西风槽槽前和 850 hPa 切变线东侧, 中层以偏西风为主, 低层受西南气流影响, 850 hPa 北京大部分地区的比湿超过 10 g·kg^{-1} (图 3b)。由此表明, 东北冷涡中心明显且结构对称, 500 hPa 的槽明显超前于 850 hPa 的切变。另外, 6 月 12 日 14:00 北京探空站 T-ln$p$ 图 (图 3c) 显示, 对流有效位能 (CAPE) 为 2 455 J·kg^{-1}, 这表明午后的大气层结十分不稳定, 且午后对流抑制能量仅为 0.3 J·kg^{-1}, 午后对流容易触发; 同时, 午后对流层中层的干层也变得更加深厚, 650—400 hPa 之间平均的 $T-T_d$ 超过 20 ℃, 低层 $T-T_d$ 小于 5 ℃, 地面以上 1.5 km 内大气的平均比湿约 12 g·kg^{-1}, 上干下湿的特征明显; 850 hPa 与

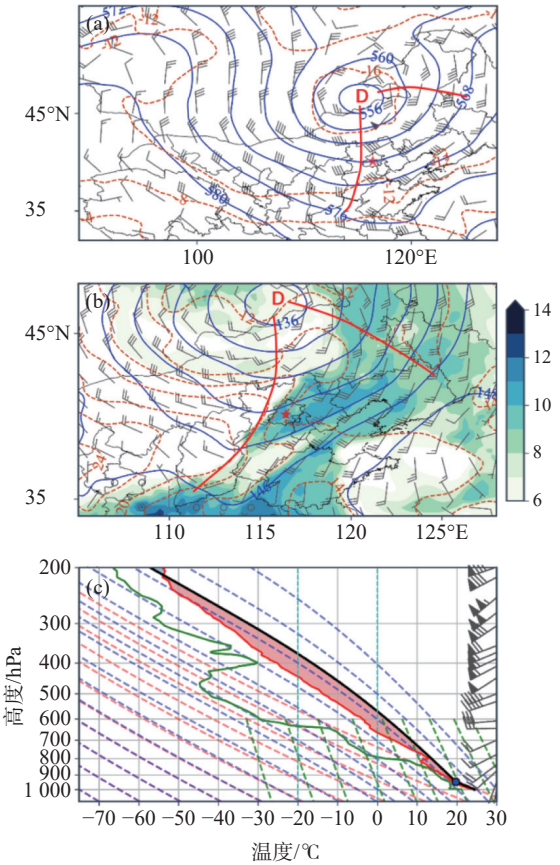


图 3 2022 年 6 月 12 日 14:00 的 500 hPa (a) 和 850 hPa (b) 位势高度 (蓝色实线, 单位: dagpm)、温度 (橙色虚线, 单位: ℃)、水平风 (风向杆, 单位: m·s^{-1})、比湿 (填色, 单位: g·kg^{-1}) 的空间分布以及北京探空站 T-ln$p$ 图 (c)

Fig. 3 Spatial distributions of (a) 500 hPa and (b) 850 hPa geopotential height (blue solid lines, unit: dagpm), temperature (orange dashed lines, unit: ℃), horizontal wind (wind barbs, unit: m·s^{-1}), and specific humidity (shaded, unit: g·kg^{-1}) at 14:00 on June 12, 2022, and (c) the T-ln$p$ diagram of Beijing sounding station

500 hPa 温差为 27 ℃, 下坡对流有效位能 (DCAPE) 为 1 014 J·kg^{-1}, 0—6 km 垂直风切变属于中等强度 (18 m·s^{-1}), 湿球零度高度为 2.8 km (表 1)。可见, 本次强对流天气发生在典型的东北冷涡背景下, 温湿廓线呈现出垂直减温率大、高层相对湿度低、低层相对湿度高等特征, 结合对流参数, 当日发生风雹类强对流天气的可能性非常大。

表 1 2022 年 6 月 12 日 14:00 北京探空站参数

Table 1 Sounding parameters from the Beijing station at 14:00 BT June 12, 2022

物理量/单位	参数值
850 hPa比湿/(g·kg^{-1})	10
500 hPa和850 hPa温度差/(℃)	27
CAPE/(J·kg^{-1})	2 455
DCAPE/(J·kg^{-1})	1 014
CIN/(J·kg^{-1})	0.3
0—6 km垂直风切变/(m·s^{-1})	18
湿球温度0 ℃层高度/(km)	2.8

3 基于 FY-4B GHI 数据识别的对流触发和合并

3.1 对流触发的前兆信号

6 月 12 日, 张家口地区受东北冷涡底部云系影响, 午后有对流在原地缓慢发展, 但一开始并未呈现组织化的带状结构, 到 16:00 左右组织成带状对流云系, 并向东南方向移动, 带状对流云系前方为大范围云顶较低 (约 2 km) 的浅对流 (图略)。

16:36 的 GHI 可见光云图 (图 4a) 表明, 带状对流云系的前沿移至河北西北部与北京交界处, 云带呈准连续的带性结构, 前沿梯度陡峭 (将图中 4a 带状云系整体标注为 A)。FY-4B AGRI 的云顶高度图表明, 带状对流云系 A 的云顶高度最高处超过 10 km (图 5a)。在带状对流云系 A 的东南侧, 是云顶较低的浅对流, 这些对流的云顶高度只有 2~3 km (图 5a)。在图 4a 中的绿色方框内, 北京北部山区 200 m 地形线附近的浅对流区有一条积云线发展, 积云线与 200 m 地形的走向趋于平行。此时的雷达图显示, 在该区域只能识别到一些弱 (小于 10 dBz) 零碎回波 (图 7a), 这表明 FY-4B GHI 在识别对流触发的前兆信号 (积云线) 方面, 相比雷达具备了显著的提前量。

16:54 的 GHI 可见光云图显示, 带状对流云系 A 的前沿已经进入北京西北部山区, 浅对流区 200 m 地形线附近的积云线位置基本没有变化, 但线状排列的浅对流轮廓更为清晰 (图 4b)。对应该时刻的雷达, 200 m 地形等高线附近的回波增强至 20 dBz 左右 (图 5b)。17:01, 带状对流云系 A 主体完全进入北京西北部山区, 积云线的位置保持稳定, 积云线上线状排列的多个浅对流有不同程度的发展加强 (图 4c),

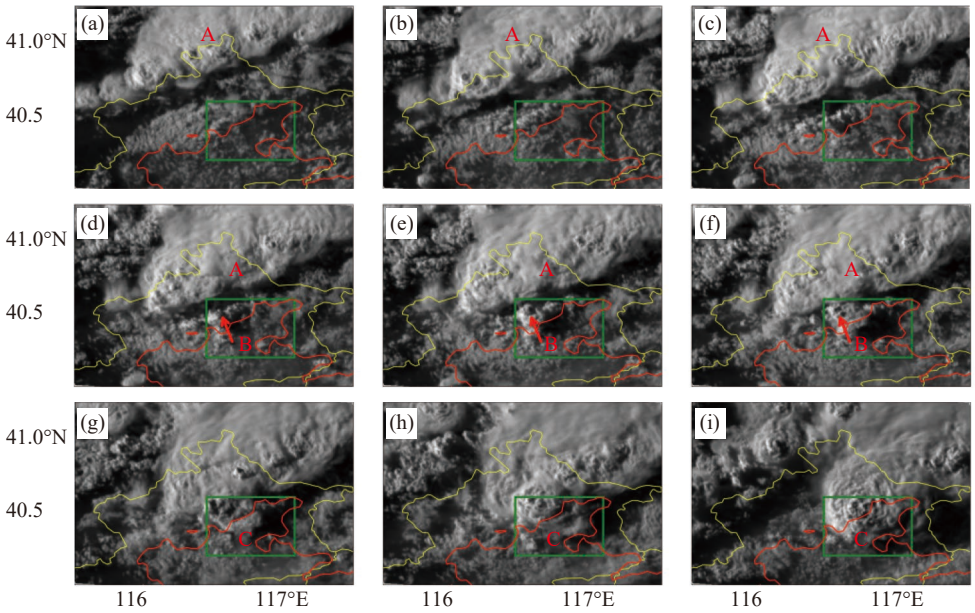


图 4 2022 年 6 月 12 日 16:36 (a)、16:54 (b)、17:01 (c)、17:06 (d)、17:12 (e)、17:18 (f)、17:24 (g)、17:36 (h) 和 18:01 (i) GHI 250 m 分辨率可见光云图 (A、B 分别表示带状对流、新生对流, C 为 A 与 B 合并后的新对流; 红色箭头指示对流 B 位置; 绿色方框表示对流触发和合并关键区域)

Fig. 4 FY-4B GHI visible imagery at 250 m resolution at (a) 16:36 BT, (b) 16:54 BT, (c) 17:01 BT, (d) 17:06 BT, (e) 17:12 BT, (f) 17:18 BT, (g) 17:24 BT, (h) 17:36 BT and (i) 18:01 BT on June 12, 2022 (A and B denote the banded convection and newly developed convection, respectively, C indicates the merged convection system, the red arrow indicates the location of convective B, and the green box indicates the key area of convection initiation and merging)

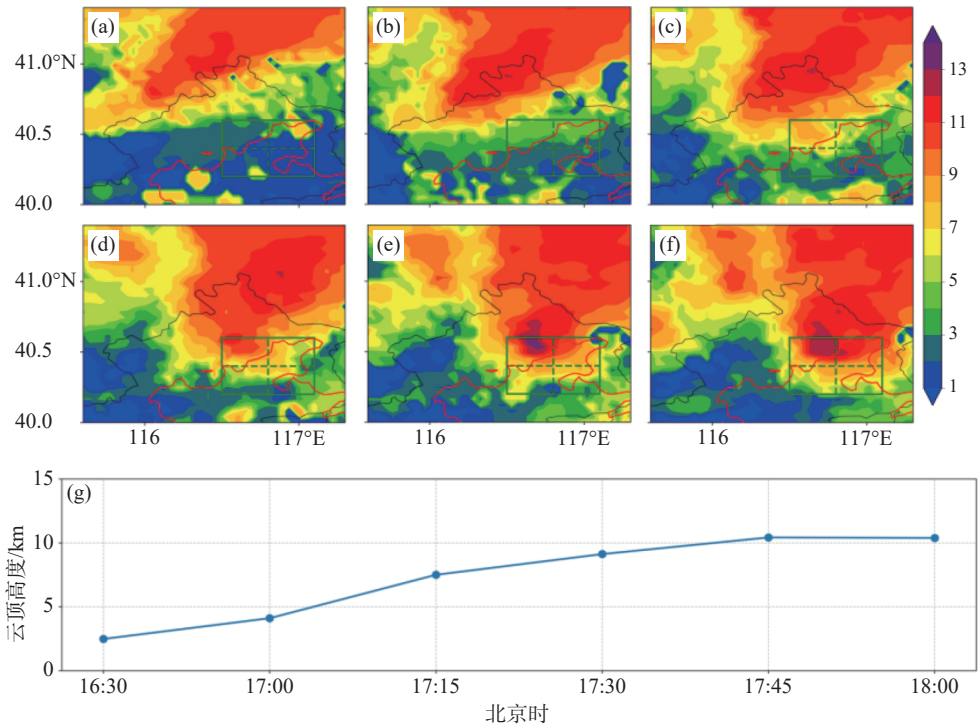


图 5 2022 年 6 月 12 日 16:30 (a)、17:00 (b)、17:15 (c)、17:30 (d)、17:45 (e)、18:00 (f) FY4B AGRI 云顶高度 (单位: km) 的空间分布以及绿色方框左上角区域的平均云顶高度时序演变 (g)

Fig. 5 Spatial distribution of FY-4B AGRI cloud top height (unit: km) at (a) 16:30 BT, (b) 17:00 BT, (c) 17:15 BT, (d) 17:30 BT, (e) 17:45 BT, and (f) 18:00 BT on June 12, 2022, and (g) the corresponding time series of the average cloud top height over the region in the top-left corner of the green box

云顶高度抬升至 4~5 km (图 5b)。

图 5g 为 2022 年 6 月 12 日 16:30—18:00 绿色方框左上区域内平均云顶高度的时序演变。从中可见, 16:30—17:00, 云顶高度在逐渐增加, 表明该区域的浅对流不断发展加强, 但是区域平均的云顶高度没有超过 5 km, 还未发展为深对流; 17:00 之后, 云顶高度快速增长, 17:15 区域平均云顶高度超过 7 km。在 17:06 的 GHI 可见光云图上, 积云线西段的对流显著发展 (图 4d, 记为对流单体 B), 云顶高度很快发展至 8 km 以上 (图 5c)。对比同期的雷达观测 (图 7d) 可见, 对流单体 B 于 17:06 刚刚达到可识别的回波强度, 而 GHI 可见光云图于 16:36 识别到对流初生前兆信号 (积云线), 较雷达识别提前了 30 min, 进一步验证了卫星在对流初生监测方面的优势。

3.2 对流合并增强的前兆信号

17:12—17:18, 随着带状对流云系 A 向东南方向移动以及对流单体 B 的发展加强, A 的西段和 B 的边界逐渐相连 (图 4e、f)。之后两个对流系统合并增强 (图 4g, 记为对流系统 C), 云顶高度增加到 11 km 以上 (图 5d)。对流系统 C 进一步加强 (图 4h), 云顶出现蜂窝状纹理, 缓慢向东南方向的平原地区移动。18:01 对流系统 C 中出现了明显的上冲云顶 (图 4i)。从积云线所在区域平均的云顶高度变化可见, 17:30—18:00 接近或超过 10 km, 表明积云线所在区域内的对流加强为深对流后持续发展加强。

为了更加定量地分析下山对流合并加强过程, 本文利用分钟级的 GHI TBB 资料, 分析在对流发生发展关键区域内, 云顶面积和平均亮温随时间的变化 (图 6)。按 1.2 节中所介绍的方法, 当两个连通域 (TBB ≤−52 ℃) 合并, 即表明本次过程的对流云顶合并。

由图 6 可见, 伴随着积云线上对流 B 的强烈发展, 其 TBB 最低值于 17:24 降至−52 ℃, 其初始阶段 (17:24—17:36), −52 ℃ 云面积维持< 500 km^2, 平均亮温在−53 ℃ 左右, 表明对流单体 B 仍处于独立发展阶段。17:36, −52 ℃ 冷云区面积骤升至 5 000 km^2,

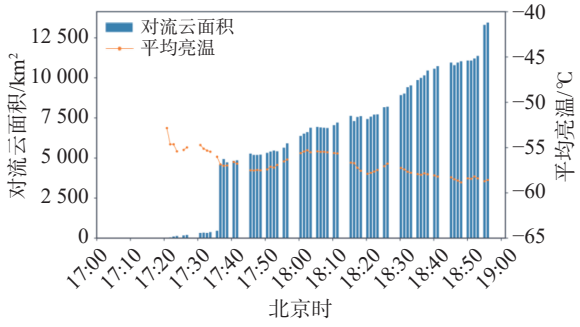


图 6 2022 年 6 月 12 日 17:00—19:00 图 4 绿色方框区强对流云面积和平均亮温随时间变化

Fig. 6 Temporal variation in the area of severe convective clouds and mean TBB within the region marked by the green box in Fig. 4 from 17:00 BT to 19:00 BT on June 12, 2022

同时平均亮温进一步下降至−56 ℃ 以下, 标志着对流单体 B 与带状对流云系 A 完成了云顶合并, 此时刻正好对应对流系统 C 的云顶出现蜂窝状纹理。

对流单体 B 与线状对流 A 的合并显著加强了对流系统。17:36—18:00, 对流系统 C 的 TBB≤−52 ℃ 的面积持续增加, 云顶垂直发展突破 12 km (图 5e、f)。对流系统 C 从 18:00 开始加强为超级单体风暴。超级单体风暴形成后, TBB≤−52 ℃ 的面积呈现明显上升趋势, 其中 18:40 之后面积超过10 000 km^2, 同时平均亮温在−58 ℃ 至−59 ℃ 之间波动, 说明超级单体风暴一直在发展加强。随着强对流系统 C 从山区向平原移动, 导致了北京平原地区出现冰雹、大风、短时强降水等强对流天气 (图 2d)。

4 基于多普勒天气雷达数据识别的对流触发和合并

为客观评估 FY-4B GHI 资料在对流触发与合并监测中的性能, 将其观测结果与多普勒天气雷达组网资料 (时间分辨率 6 min) 进行系统对比。对比其在对流演变关键阶段的时间差异与特征识别能力。

4.1 对流触发的识别

图 7 是 2022 年 6 月 12 日不同时刻的雷达 CR 图。16:00, 河北张家口地区多个单体雷暴经过组织化过程发展为线状对流 (图略)。16:36, 线状对流的主体已经进入北京西北部 (图 7a), 此后线状对流持续向东南方向传播 (图 7b、c)。同时, 16:36—17:00, 在线状对流前方靠近 200 m 地形高度线的山区, 一直有反射率因子较弱 (小于 20 dBz) 的零星回波 (图 7a—c 绿色方框内) 存在。17:06, 首次在 200 m 地形处的弱回波区里出现 CR≥35 dBz 的格点 (图 7e、图 8)。因此, 根据雷达观测识别到 CI 的时间为 17:06。

对比 FY-4B GHI 可见光云图和雷达 CR 发现, GHI 分钟级可见光云图能够在对流触发前约 30 min 监测到线状对流前方、200 m 地形处的积云线。结合 FY-4B AGRI 的云顶高度产品和 FY-4B GHI 的 TBB 资料, 初始时积云线具有低云顶 (< 3km)、弱强度 (TBB>−10℃, 图略) 等特征。16:30—17:15, 积云线上的浅对流快速加强为深对流的形态演变、云顶高度变化等特征非常清晰, 而雷达反射率因子图在该时段仅能识别 20 dBz 以下的零碎回波, 无法监测到积云线及其变化。

4.2 对流合并的识别

位于 200 m 地形附近的对流新生后, 强度和面积不断增加但移动速度较为缓慢, 而北侧线状对流的移速则相对更快, 这使得两个对流系统之间的距离越来越近 (图 7e—f)。至 17:24, 两个对流系统外围的弱回波出现了较为充分的合并, 但强回波 (≥35 dBz) 之间的距离还有 10 km 左右, 根据 1.2 节中对流合并的定义, 此时尚未达到对流合并的标准。相比 CI 时刻, 此时 200 m 地形线附近绿色方框内 35 dBz 以上

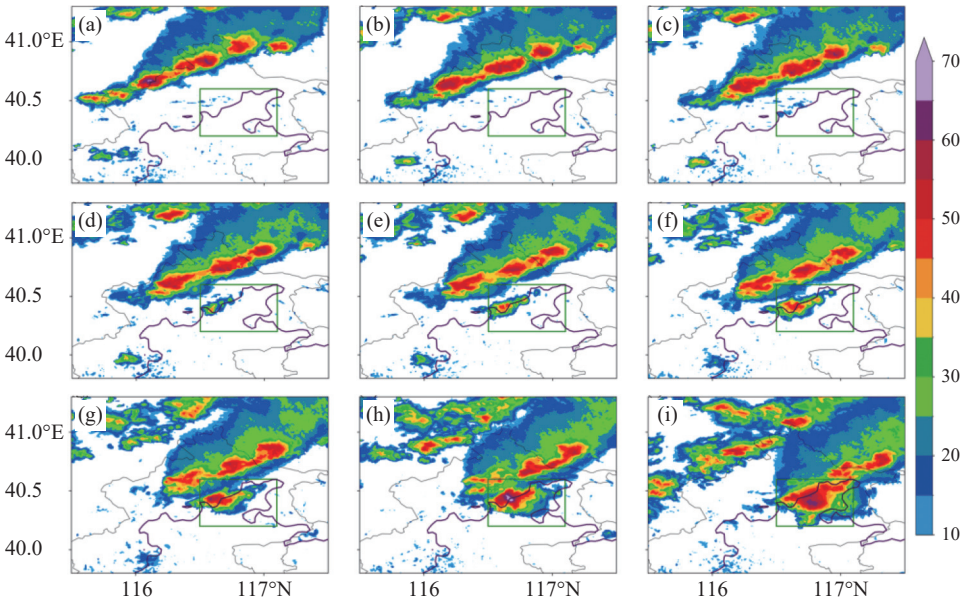


图 7 2022 年 6 月 12 日 16:36 (a)、16:54 (b)、17:00 (c)、17:06 (d)、17:12 (e)、17:18 (f)、17:24 (g)、17:36 (h) 和 18:00 (i) 雷达组网的组合反射率因子 (单位: dBz) 空间分布 (紫线为 200 m 地形等高线, 绿色方框表示对流触发和合并关键区域)

Fig. 7 Spatial distribution of composite reflectivity (unit: dBz) from radar mosaic at (a) 16:36 BT, (b) 16:54 BT, (c) 17:00 BT, (d) 17:06 BT, (e) 17:12 BT, (f) 17:18 BT, (g) 17:24 BT, (h) 17:36 BT, and (i) 18:00 BT on June 12, 2022(The purple lines indicate the 200 m topography contour, and the green box indicates the key area of convection initiation and merging)

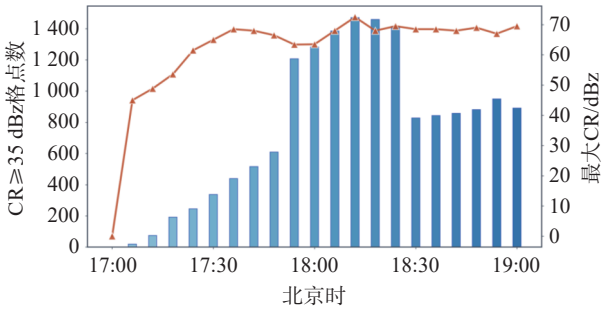


图 8 2022 年 6 月 12 日 17:00—19:00 图 4 绿色方框中最大 CR (红色折线) 以及该区域内 CR≥35 dBz 的格点数 (蓝柱)

Fig. 8 Temporal evolution of the maximum CR (red line, unit: dBz) and the number of grids with CR greater than or equal to 35 dBz (blue bars) within the area marked by the green box in Fig. 4 from 17:00 BT to 19:00 BT on June 12, 2022

的回波面积较快增加, 中心强度迅速加强至 60 dBz 以上 (图 7g、图 8), 表明新生的对流明显加强。此时新生对流的最大回波强度已经超过了其后方线状对流西段的最大回波强度, 且向东部的低海拔地区移动, 即处于下山过程 (图 4g)。

17:24—17:48, 新生对流区的对流活动持续增强 (图 7h、图 8), 表现为≥35 dBz 的强回波面积不断扩大, 最大 CR 超过 60 dBz, 该阶段强回波面积的扩大和最大 CR 的增强主要源于新生对流的快速发展。虽然此阶段加强的新生对流与线状对流的较强回波 (≥25 dBz) 出现了合并, 但≥35 dBz 的强回波尚未合并。至 17:54, 35 dBz 以上强回波的面积陡增, 结合反射率因子平面图特征 (图略), 此时可以确定基于雷达识别的对流合并时间 (图 8)。18:00, 结合多普勒雷达回波特征, 识别到超级单体 (图略)。

从雷达图上识别出 200 m 地形线附近对流新生, 到该新生对流发展加强并与南移的线状对流合并、加强为超级单体, 用时约 1 h。17:54—18:24, 线状对流西段与加强的新生对流充分合并, 在 18:12 强回波面积达到峰值且最大 CR 突破 70 dBz (图 8)。从 18:30 开始到 19:00, 由于超级单体与线状对流分裂, 回波面积较之前有所减小, 超级单体维持较大强度 (接近 70 dBz, 图 8) 向东南方向的平原移动。

本次过程揭示了 FY-4B GHI 与雷达观测在对流下山阶段具有互补性, 雷达能更精准地追踪对流的强回波中心, 而 GHI TBB 资料于 17:36 明确识别对流云顶合并信号 (图 6), 较雷达基于 35 dBz 回波判识的合并时间 (17:54) 提前了 18 min。

5 积云线生成的中尺度环境条件

环流形势和 *T*-ln*p* 图分析表明, 北京地区午后非常有利于强对流天气发生 (图 3)。高时空分辨率的卫星资料在此次过程的 CI 监测中展现出优势, 在对流触发前 30 min, 从 FY-4B GHI 可见光云图上监测到了对流触发的前兆信号—积云线, 积云线上的浅对流发展加强为深对流 (图 4、图 5)。6 月 12 日午后, 北京西北部存在大片的浅积云, 但为什么只是在 200 m 地形线附近有积云线发展呢? 下面基于 RMAPS-NOW 高分辨率资料, 对照高分辨率卫星等观测资料等分析得到的实况特征, 进一步剖析有利于积云线产生的中尺度热动力条件。

RMAPS-NOW 资料表明, 积云线出现前 1 h (15:36), 北京西北山区的大气已具备较高的不稳定能量, CAPE 值普遍达 1 300 J·kg^{-1}, 200 m 地形线附近的 CAPE 为 1 500 J·kg^{-1} (图 9a)。此时北京低层盛行偏南气流, 其与北京西北部地形的交角接近 90°, 但由于此时风速较弱且没有明显变化, 在 200 m 地形线附近没有辐合出现 (图 9c)。至 16:36, 即可见光云图上监测到积云线初生时刻 (图 6a), 北京西北山区的热力不稳定进一步增强, 200 m 地形线附近 CAPE 值升至 2 000 J·kg^{-1} 左右 (图 9b)。此时低层的偏南风风速显著增大, 风向略向西偏, 环境风与地形强迫的耦合作用增强, 200 m 地形线附近出现了一个弱的辐合中心 (图 9d 黑色方框内)。

FY-4B GHI 监测到的积云线位置与图 9d 中带状辐合区的空间位置高度吻合。通过穿过该辐合中心、垂直于地形的垂直剖面能更清楚地反映积云线附近的热动力场特征。图 10c 表明, 在积云线出现之前, 垂直于地形的东南风分量持续增强, 1 h 内 500 m 高度处的风速增幅接近 2 m·s^{-1}, 但山前的东南风非常浅薄, 只出现在 1 km 以下。同时, 东南风还不断向迎风坡输送水汽, 水汽受地形阻挡在山前堆积, 500 m 高度处出现强度达−0.1×10^{-3}·g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1} 水汽通量辐合中心 (图 10a)。山前 1 km 以下比湿普遍高于 12 g·kg^{-1}, 其中近地层 (500 m 及以下) 达 13 g·kg^{-1} (图 10b)。相对湿度大于 80% 的层次主要集中在 1 km 附近 (图 10a), 对应山前浅对流云所在高度。

积云线的出现反映出边界层辐合线的存在。从上述分析可知, 午后在北京西北部山区线状对流以南的大范围地区, 均存在较强的不稳定能量, 但由于低层缺乏一定强度的辐合上升运动, 大部分地区仅有浅对流。至 16:36, 在 200 m 地形等高线附近, 加强的偏南气流受陡峭地形阻挡后, 在山前 500 m 高度局地产生了强度为−0.1×10^{-3} g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1} 的水汽辐合, 为积云线的形成提供了有利条件。FY-4B GHI 可见光可精准捕捉积云线信号, 高分辨率 RMAPS-NOW 分析资料可以揭示其形成的中尺度热动力条

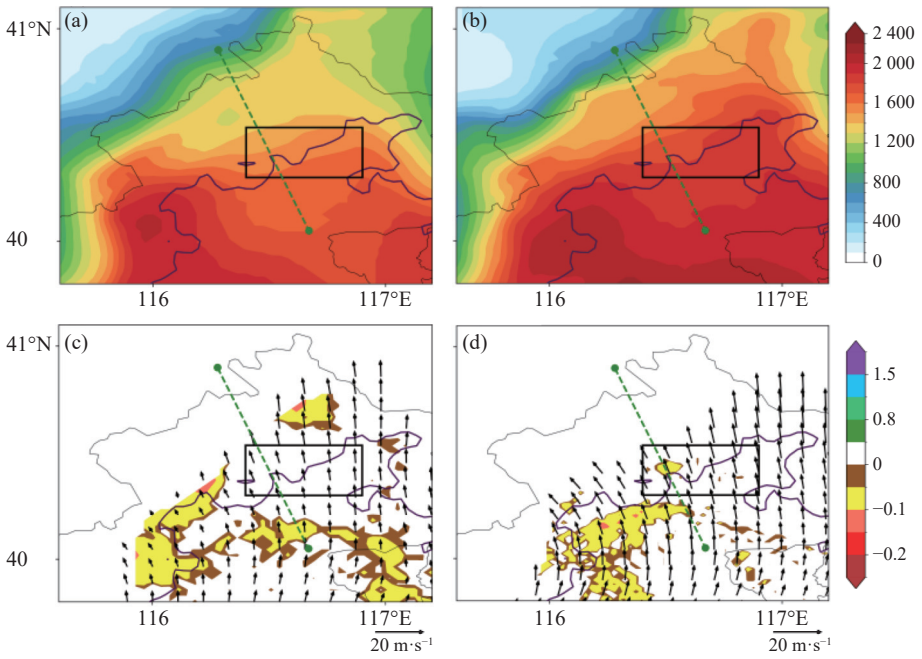


图 9 2022 年 6 月 12 日 15:36 (a、c) 和 16:36 (b、d) 525 m 高度整层对流有效位能 (a, b, 填色, 单位: J·kg^{-1}); 水汽通量散度 (填色, 单位: 10^{-3}·g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1}, 负值为辐合) 和风场 (箭头, 单位: m·s^{-1}) (c, d) (紫线为 200 m 地形等高线, 方框指示积云线所在区域; 绿线为图 10 剖面图的基线)

Fig. 9 Distribution of meteorological elements for (a, b) layer-integrated convective available potential energy (shaded, unit: J·kg^{-1}), (c, d) Moisture flux divergence (shaded, unit:10−3·g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1}, negative values indicate convergence) and wind vectors (arrows, unit: m·s^{-1}) at 525 m height at (a, c) 15:36 BT and (b, d) 16:36 BT on June 12, 2022 (The purple line indicates the 200 m topography contour, the rectangle marks the location of cumulus cloud lines, and the green line represents the baseline for the cross-section in Fig. 10)

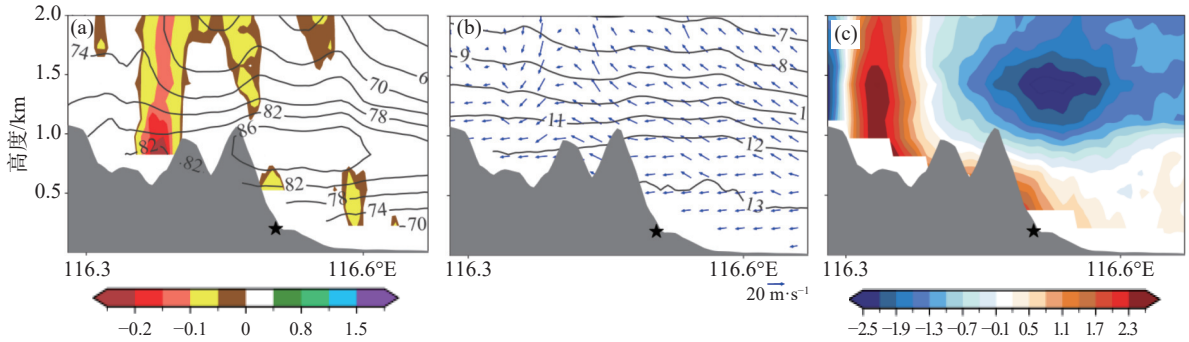


图 10 沿图 9d 绿色虚线的水汽通量散度 (填色, 单位: 10^{-3}g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1})、相对湿度 (黑线, 单位: %)(a), 比湿 (黑线, 单位: g·kg^{-1})、经向-垂直风矢量 (箭头, 单位: m·s^{-1}) (b), 16:24 与 15:48 水平风速之差 (c, 填色, 单位: m·s^{-1}) 的垂直剖面 (其中图 b 的垂直风速被放大了 100 倍, 灰色阴影为地形剖面, 五角星指示积云线所在位置)

Fig. 10 Vertical cross-sections along the green dashed line in Fig. 9d of (a) moisture flux divergence (shaded, unit: 10^{-3} g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1}) and relative humidity (black line, unit: %), (b) specific humidity (black lines, unit: g·kg^{-1}) and meridional-vertical wind vectors (arrows, unit: m·s^{-1}), and (c) the difference in horizontal wind speed (shaded, unit: m·s−1) between 16:24 BT and 15:48 BT. (In panel (b), the vertical wind component is amplified by afactor of 100, the gray shading represents the topographic profile, and the star indicates the location of the cumulus line)

件, 这两种资料结合使用, 可为对流触发的预警提供更为可靠的支持。

6 结论与讨论

受东北冷涡影响, 2022 年 6 月 12 日北京地区傍晚发生一次对流下山过程, 西北山区的初生对流与其后方的线状对流合并出现下山增强效应, 给北京平原地区带来了严重的大风、降水和冰雹灾害。本文基于具备最高 1 min 的时间分辨率和 250 m 的空间分辨率的 FY-4B GHI 卫星观测, 结合多普勒天气雷达组网数据与 RMAPS-NOW 分析资料, 系统揭示下山对流的演变特征及 GHI 资料在对流监测方面的优势, 主要结论如下:

(1) GHI 可见光数据在对流触发识别中具有显著

时效优势。多普勒天气雷达于 17:06 监测到北京西北山区 200 m 地形等高线附近的对流触发。而 GHI 可见光云图于 16:36 识别到对流初生前兆信号 (积云线), 较雷达识别提前了 30 min。该积云线云顶高度为 2~3 km, 初生对流由该积云线上的对流单体发展加强而来, 最终发展为深对流, 完整呈现了对流初生的演变过程。

(2) GHI 亮温数据能够更早捕捉对流系统的合并信号。雷达组合反射率因子 (≥35 dBz 连通域合并) 显示对流系统于 17:54 合并。而基于 GHI 逐分钟云顶亮温资料 (≤−52 ℃ 云区连通域合并), 识别到的云顶合并时间为 17:36, 比雷达资料识别提前了 18 min, 表明 GHI 可从云顶结构变化中识别系统整合的早期信号。

(3) 积云线的形成是边界层动力抬升触发对流在卫星图像上的直观体现。12 日午后, 北京西北部地区具备产生对流的热力条件, 即水汽条件充沛、不稳定能量强, 因此积云线能否出现及位置主要取决于动力条件, 即辐合上升运动的位置和强度。RMAPS-NOW 分析数据表明, 16:36 时, 边界层加强的偏南气流遇到北京西部山地地形阻挡后, 在迎风坡陡峭地形约 500 m 高度附近产生了弱辐合带, 最终在卫星图像上表现为沿地形分布的积云线。

上述研究表明, FY-4B GHI 数据可为下山对流过程的监测与预警提供关键的前兆信号。然而, 可见光观测受限于日照条件, 且容易受到云顶几何形状的影响 (覃丹宇和方宗义, 2014), 具有一定的局限性。同时, 本文只是针对一次下山过程的研究, 未来有待进一步探索 GHI 资料对下山对流加强或减弱演变监测的适用性。此外, 本文重点聚焦于观测特征的分析, 挖掘 FY-4B GHI 数据在对流监测中的优势, 而对流触发和合并过程涉及复杂的动力学与微物理过程, 其发生发展机理将另文研究。

致谢：在本文撰写中，中国气象局气象干部培训学院俞小鼎教授对本文强对流天气的过程分析进行了指导；国家卫星气象中心吴晓京正研级高工对 FY-4B GHI 数据应用进行了技术指导，谨致谢忱！

参考文献 (References):

程文静,俞小鼎,王秀明,等.2023.太行山东麓对流风暴下山演变气候特征[J].气象,49(6):641−656. Cheng W J, Yu X D, Wang X M, et al. 2023. Climatic characteristics of convective storms moving from Taihang Mountains to north China plain [J]. Meteorological Monthly, 49(6):641−656 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2022.121201

郭巍,崔林丽,顾问,等,2018.基于葵花 8 卫星的上海市夏季对流初生预报研究[J].气象,44(9):1229-1236. Guo W, Cui L L, Gu W, et al. 2018. Summer convective initiation forecasting in Shanghai based on Himawari-8 satellite [J]. Meteorological Monthly,44(9):1229-1236 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2018.09.011

黄荣.2012.北京地区雷暴下山增强的特征分析及个例研究[D]. 北京:中国气象科学研究院. Huang R. 2012. Features of intensifying thunderstorms moving down from the mountains and case study in Beijing [D]. BeiJing:Chinese Academy of Meteorological Sciences (in Chinese)

翟丽萍,梁依玲,周云霞,等.2024.桂林“5.22”极端强降雨过程的观测分析[J].暴雨灾害,43(3):313−321.ZhaiLP,LiangYL,ZhouYX,et al.2024. Observation analysis of "5.22" extreme rainfall event in Guilin [J]. Torrential Rain and Disasters,43(3):313−321 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−141

乔丹杨,王瑾婷,彭力,等.2025.一次强冰雹天气环境场及卫星云参数特征分析[J].沙漠与绿洲气象,19(2):84−91. Qiao D Y, Wang J T, Peng L, et al. 2025. Analysis of the environmental field and satellite cloud parameter characteristics of a severe hailstorm [J]. Desert and Oasis Meteorology,19(2):84−91 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2310.20001

覃丹宇,方宗义.2014.利用静止气象卫星监测初生对流的研究进展[J].气象,40(1):7−17. Qin D Y, Fang Z Y. 2014. Research progress of geostationary satellite-based convective initiation [J]. Meteorological Monthly,40(1):7−17 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2014.01.002

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]. Meteorological Monthly,44(6):759−770 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2018.06.004

肖现,陈明轩,高峰,等.2015.弱天气系统强迫下北京地区对流下山演变的热动力机制[J].大气科学,39(1):100−124. Xiao X, Chen M X, Gao F, et al. 2015. A thermodynamic mechanism analysis on enhancement or dissipation of convective systems from the mountains under weak synoptic forcing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 39(1):100−124 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1403.13318

谢娜,屠妮妮,肖递祥,等.2025. “24.6”川藏铁路甘孜段连续强降水过程诊断分析[J].高原山地气象研究,45(2):57−69. Xie N, Tu N N, Xiao D X, et al. 2025. Diagnostic analysis of the "24.6" extreme continuous heavy precipitation event in the Ganzi section of the Sichuan-Tibet railway [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,45(2):57−69 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2025.02.006

徐小红,余兴,刘贵华,等.2022.冰雹云卫星早期识别与自动预警[J].大气科学,46(1):98−110. Xu X H, Yu X, Liu G H, et al. 2022. Early identification and automatic warning of hail clouds by satellite [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,46(1):98−110 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2104.21010

徐姝,易笑园,熊明明,等.2024.华北局地大暴雨过程中多个 β 中尺度对流系统发生发展对比分析[J].气象,50(2):181−194. Xu S, Yi X Y, Xiong M M, et al. 2024. Comparative analysis of occurrence and development of multiple β-meso scale convective systems during a localized severe torrential rain event in North China [J]. Meteorological Monthly,50(2):181−194 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−

0526.2023.092801

杨舒楠,张芳华,胡艺,等.2023. “23·7”华北特大暴雨过程的基本特征与成因初探[J].暴雨灾害,42(5):508−520. Yang S N, Zhang F H, Hu Y, et al. 2023. Analysis on the characteristics and causes of the "23·7" torrential rainfall event in North China [J]. Torrential Rain and Disasters,42(5):508−520 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−187

杨艺亚,雷蕾,仲跻芹,等.2024.北京地区 3 次对流下山增强过程的云参数特征[J].应用气象学报,35(4):429−443. Yang Y Y, Lei L, Zhong J Q, et al. 2024. Cloud parameter characteristics of three strengthening convective systems during downhill processes in Beijing [J]. Journal of Applied Meteorological Science,35(4):429−443 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20240404

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 Meteorologica Sinica,78(3):391−418 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2020.035

翟菁,胡雯,冯妍,等.2012.不同发展阶段对流云合并过程的数值模拟[J].大气科学,36(4):697−712. Zhai J, Hu W, Feng Y, et al. 2012. Numerical simulations of convective cloud merging processes at different development stages [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 36(4):697−712 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2012.11096

张淼,徐娜,陈林,等.2024. FY-4B 与 FY-4A 云顶性质产品精度的一致性评估[J].热带气象学报,40(3):389−396. Zhang M, Xu N, Chen L, et al. 2024. Consistency of the accuracy of FY-4B and FY-4A cloud top products [J]. Journal of Tropical Meteorology,40(3):389−396 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004−4965.2024.035

Bai L Q, Meng Z Y, Huang Y P, et al. 2019. Convection initiation resulting from the interaction between a quasi-stationary dryline and intersecting gust fronts: a case study [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,124(5):2379−2396. doi:10.1029/2018JD029832

Chen M X, Wang Y C, Gao F, et al. 2012. Diurnal variations in convective storm activity over contiguous North China during the warm season based on radar mosaic climatology [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,117(D20):114. doi:10.1029/2012JD018158

French A J, Parker M D. 2012. Observations of mergers between squall lines and isolated supercell thunderstorms [J]. Weather and Forecasting,27(2):255−278. doi:10.1175/WAF−D−11−00058.1

Li J, Zheng J, Li B, et al. 2023. Quantitative applications of weather satellite data for nowcasting: progress and challenges [J]. Journal of MeteorologicalResearch,38(3):399−413.doi:10.1007/s13351−024−3138−6

Li X, Meng J, Sun L, et al. 2023. A study of internal solitary waves in the Northern South China Sea using the Geo High-Speed Imager of the FY-4B satellite [J]. International Journal of Remote Sensing,44(7): 2216−2235. doi:10.1080/01431161.2023.2197132

Liu Q, Xu X, Zhao K, et al. 2023. A merger-formation bow echo caused by low-level mesovortex in South China [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,128:e2022JD037954. doi:10.1029/2022JD037954

Mecikalski J R, Bedka K M. 2006. Forecasting convective initiation by monitoring the evolution of moving cumulus in daytime GOES imagery [J]. Monthly Weather Review,134:49−78. doi:10.1175/MWR3062.1

Mecikalski J R, Rosenfeld D, Manzato A. 2016. A conceptual model for 1-2 hour nowcasts of storm intensity using geostationary satellite observations [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,121:6374−6392. doi:10.1002/2016JD024768

Min M, Bai C, Guo J, et al. 2019. Estimating summertime precipitation from Himawari-8 and global forecast system based on machine learning[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 57(5): 2557-2570. doi:10.1109/TGRS.2018.2874950

Purdom J F W. 1976. Some uses of high-resolution GOES Imagery in the mesoscale forecasting of convection and its behavior [J]. Monthly Weather Review,104:1474−1483. doi:10.1175/1520−0493(1976)104<1474:SUOHRG>2.0.CO;2

Sieglaff J M, Cronce L M, Feltz W F, et al. 2011. Nowcasting convective storm initiation using satellitebased box-averaged cloud-top cooling and cloudtype trends [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,50(1):608−265. doi:10.1175/2010JAMC2496.1

Wang Y, Han L, Wang H. 2014. Statistical characteristics of convective initiation in the Beijing-Tianjin region revealed by six-year radar data [J]. Journal of Meteorological Research,28(6):1127−1136. doi:10.1007/s13351−014−3061−3

Wang Y, Xiao B H. 2023. Convolution-UNet: a deep convolutional neural network for convection detection based on the Geo High-speed Imager of Fengyun-4B [C]// 2023 International Conference on Pattern Recognition, Machine Vision and Intelligent Algorithms, 163-168. doi:10.1109/PRMVIA58252.2023.00033

Yang X L, Sun J H, Zheng Y G. 2017. A 5-yr climatology of severe convective wind events over China [J]. Weather and Forecasting,32(4): 1289−1299. doi:10.1175/WAF−D−16−0101.1

Xiao X, Sun J Z, Ji L, et al. 2022. A study on local-scale thermal and dynamical mechanisms in the initiation of a squall line under weak forcing [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,127: e2021JD035561. doi:10.1029/2021JD035561

Zhou A, Zhao K, Lee W C, et al. 2020. VDRAS and polarimetric radar investigation of a bow echo formation after a squall line merged with a preline convective cell [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,125:e2019JD031719. doi:10.1029/2019JD031719

(责任编辑　闵爱荣)