

基于遥感数据光流场的郑州“7·20”特大暴雨动力条件和水凝物输送特征分析

孙跃¹ 肖辉^{1,2} 杨慧玲¹ 丁建芳³ 付丹红^{1,2} 郭学良¹ 冯亮¹

1 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴重点实验室, 北京 100029

2. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

3 河南省人工影响天气中心, 河南 450003

摘要 本文针对2021年7月20日河南省郑州市发生的“7·20”特大暴雨天气过程, 主要基于FY-4A静止气象卫星成像仪和地基天气雷达遥感数据, 利用光流法分别计算遥感数据图像的光流场(Optical Flow Field)。经与FNL数据水平风和地面风速观测对比表明, 气象卫星和雷达光流场可以近似反映大气和云系的高空和低空的运动特征。在此基础上, 分析了与暴雨天气过程有关的动力条件和水凝物输送特征。结果显示, 在20日午后, 存在从华南经河南延伸至华北的“西南-东北”走向的水汽和云水输送带, 其中对流活动非常明显, 并一直延伸至河南中北部的既有云系中, 为河南郑州地区特大暴雨的形成提供了有利的水汽和云水输送条件。20日午后至16时最强降水发生前, 郑州地区低空由辐散转为强烈的气旋状辐合, 并且高空的反气旋涡度增强, 表明郑州地区整个降水系统上升运动增强。在最强降水发生前, 从郑州地区南侧输入的水凝物急剧增加。这些结果表明, 郑州地区不仅存在大量水汽输入, 同时还有大量水凝物随强对流云输送进入到大范围降水系统的上升运动区, 可能极大地加速了水汽转化为云水进而形成降水的微物理过程转化速率, 这可能是此次郑州特大暴雨快速增强的主要成因。本文提出的基于遥感数据光流场的分析方法在暴雨短临预报和预警中有显著的应用潜力。

关键词 FY-4A 卫星云图 天气雷达 光流场 郑州特大暴雨 水凝物输送

文章编号 2021155A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2109.21155

收稿日期 2021-8-17 **网络预出版日期**

作者简介 孙跃, 男, 1988年出生, 博士后, 主要从事云降水物理、强风暴遥感探测研究。E-mail: sunyuel@mail.iap.ac.cn

通讯作者 肖辉, E-mail: hxiao@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家重点研发计划课题 2019YFC1510304, 2016YFE0201900, 中国科学院特别研究助理资助项目, 国家自然科学基金项目 41575037

Funded by National Key Research and Development Plan of China (Grant Nos. 2019YFC1510304, 2016YFE0201900), Special Research Assistant Project of Chinese Academy of Sciences, and National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41575037)

Feature Analysis of Dynamic Condition and Hydrometeor Transportation among Zhengzhou “7·20” Superheavy Rainfall Event Based on Optical Flow Field of Remote Sensing Data

SUN Yue¹, XIAO Hui^{1,2}, YANG Huiling¹, DING Jianfang³, FU Danhong^{1,2}, GUO Xueliang¹, FENG Liang¹

1 Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 10029

2 School of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 The Weather Modification Center of Henan Province, Zhengzhou 450003

Abstract In this paper, aiming at the “7·20” superheavy rainfall event in Zhengzhou City, Henan Province on July 20, 2021, the FY-4A stationary satellite imager data and ground-based weather radar data are respectively used to produce optical flow field. Compared with the horizontal wind speed of FNL data and ground observation data, the weather satellite and radar optical flow field can approximately reflect the motion characteristics of the upper-level and lower-level atmosphere and cloud system. On this basis, the feature analysis of dynamic condition and hydrometeor transportation related to the superheavy rainfall event is presented. The results show that, there was a "southwest to northeast" transporting zone of water vapour and cloud on the afternoon of July 20, extending from southern China to northern China through Henan Province. There was actively convective in this transporting zone, extending to the existing cloud system on northern-central parts of Henan, providing favourable transporting condition for superheavy rainfall event. In Zhengzhou region, the anticyclonic vorticity on upper atmosphere increased and the divergence on lower atmosphere converted to strong cyclonic convergent on the afternoon of July 20 and before the severest precipitation, indicating that the updraft in the precipitation system in Zhengzhou region was increasing. The hydrometeor input at south boundary of Zhengzhou region greatly increased ahead of the stage of severest precipitation. These results indicate that there was not only a large amount of water vapour, but also hydrometeors in severe convective cloud transported to the updraft area in large-scale precipitation system. It may greatly accelerate

the microphysical process of water vapor transforming into cloud water and finally forming the precipitation, which may be an important cause of the rapid enhancement of the superheavy rainfall. The analysis method based on optical flow field of remote sensing data proposed in this study has significant application potential in short-term and impending rainstorm forecast and early warning.

Key word FY-4A weather satellite cloud image, weather radar, optical flow field, “7·20” Zhengzhou superheavy rainfall, hydrometeor transportation

1 引言

2021 年 7 月 20 日, 河南省郑州市出现特大暴雨天气(简称郑州“7.20”特大暴雨), 郑州市雨量站数据显示最大小时累积降水达到 201.9mm, 24 小时累积降水高达 627.4mm, 最大小时降水量超过陆地上小时累积降水量的历史极值, 24 小时累积降水量也远超特大暴雨(24 小时累积 250mm)的定义阈值。由此引发的郑州市等地市特大洪水和城市严重内涝, 造成了巨大的人民生命和财产损失。在此类极端降水天气灾害尚且无法被数值天气预报完全精准预测出来的背景下, 利用现有观、探测手段对极端降水案例开展特征分析和暴雨形成机理研究尤为重要。特别是, 需要进一步结合极端降水期间的观、探测数据特征, 探究基于极端降水形成机理的极端暴雨短临预报和预警的新方法。

气象卫星和天气雷达是监测大范围降水天气过程的最重要遥感探测手段。我国 FY-4A 静止卫星于 2016 年 12 月发射(Yang et al., 2017), 目前已在气溶胶(祝善友等, 2020)、闪电(黄守友和徐国强, 2020)、洪水(Shao et al., 2020)、森林火灾(熊得祥等, 2020)等多种要素的监测方面取得了初步应用。近 20 多年来, 我国地基天气雷达组网的建设也有了极大发展, 并已逐步形成高时空分辨率的降水天气监测能力(勾亚彬等, 2014; 李国翠等, 2014; 孙婵和徐国强, 2019)。但是, 直接基于这些遥感数据开展降水天气动力诊断分析与预报的研究尚不多见。其中原因可能是因为, 一方面, 静止卫星并不直接测量大气运动的动力变量; 另一方面, 静止卫星成像数据与天气雷达体扫数据在空间精度和连续性上存在局限性。静止卫星探测到的不同水平位置的云顶、水汽等高空目标可能是位于不同高度的, 并且对这些测得目标的反演高度存在误差。Liu et al. (2021) 的研究显

示, FY-4A 云顶高度产品存在 $10^{-1} \pm 2$ km 量级的误差; 谭仲辉等 (2019) 的统计结果显示, FY-4A 云顶高度产品对于冰相云和覆盖型的云具有更大的误差。而天气雷达受探测灵敏度和变仰角体扫的扫描方式限制, 无法充分探测到高空的非降水云。这些因素导致不易依靠单一类型天气遥感数据得到传统天气分析所需的大范围水平空间连续且垂直精细分层的流场特征。如何进一步利用这些遥感探测数据, 更好地服务于极端强降水的短临预报和预警, 便成为亟待解决的问题。

近年来在大气遥感相关领域逐步广泛应用的光流法 (Optical Flow), 为拓展气象遥感潜力提供了新的可能。光流法最早由美国学者 Gibson 在 1950 年代提出 (Horn and Schunk, 1981), 其基本假定是图像中运动目标自身亮度对应的像素值 I 在相邻帧中的变化极小, 即个别变化可忽略不计, 这样, 便可以根据式 (1) 获得像素值 I 的局地时间变化、空间梯度和目标运动矢量 u 、 v 之间的守恒关系:

$$\frac{\partial I}{\partial t} + u \frac{\partial I}{\partial x} + v \frac{\partial I}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

早期的光流法主要通过选取运动目标边界拖影附近的多个像素点对应的方程式 (1) 联立求解目标运动矢量, 但在存在一些问题。譬如, 对于含有非均一运动特征的图像, 如何通过每个像素点上的一个方程求解两个未知数 u 、 v 的速度场, 以及如何减小个别变化对求解的影响。之后, Horn and Schunk (1981) 将运动矢量平滑条件和变分方法引入光流法 (H-S 光流法), Lucas and Kanade (1981) 引入局部权重求解 (L-K 光流法), 使得从相邻帧运动图像中可以求解出具有分析价值的视速度矢量场 (称为光流场)。Meinhardt-Llopis et al. (2013) 将现代数字图像处理中的“金字塔”模型引入到 H-S 光流法, 并构建了可靠性更高的计算方案, 增强了对图像中目标亮度随时空变化的适应能力。近年来, 国内外学者和气象业务部门已经有一些基于天气雷达数据和所得到的光流场进行回波外推短临预警的研究和工作 (如 Bechini and Chandrasekar, 2017; Woo and Wong, 2017; 曹春燕等, 2015; 田刚等, 2021)。

然而, 受多种因素限制, 基于遥感数据光流场直接进行降水系统诊断分析的研究尚不多见。除了受上文所述的静止气象卫星成像数据定高精度和天气雷达空间连续性上局限性的影响, 光流法在气象应用中还存在一些原理性的障碍。譬如, 光流场作为图像中运动目标的视速度场, 与大气水平运动在物理概念上并不一

致；大气和云降水活动也并不总能满足可忽略个别变化的求解假定条件。但值得注意的是，既然已经有了一些基于光流法对天气遥感数据进行外推分析的成功实践，那么，利用光流法求解得到的云系视速度场即光流场也应具有近似分析云系水平运动特征的潜力。尽管通过静止气象卫星和天气雷达无法直接获得精准三维空间高分辨率的大气运动特征，但是，如果使用水平空间和时间高分辨率的卫星和雷达数据得到的光流场分别近似地表征对流层中高层和低层的大气水平运动状况，是否可以分析出天气学原理中对降水天气发展有重要影响的大气水平运动高空和低空配置的特征？或者是否可以分析出对极端降水短临预报和预警具有一定应用价值的中小尺度物理参量特征？这是很值得研究的科学问题，也是本文所开展工作的出发点之一。

为了将天气遥感数据能够更充分地被应用到郑州“7·20”特大暴雨的成因分析和先兆研究中，本文利用 FY-4A 静止气象卫星成像仪数据和天气雷达低仰角组合反射率数据这两种数据求解得到光流场，分别表征降水过程动力条件分析中极为关注的对流层中高层和低层的大气运动特征，并在此基础上开展与此次特大暴雨形成过程有关的动力条件和水凝物输送特征综合分析，进而对强降水形成的机理进行分析，并为极端降水的短临预报和预警提供基础。

2 数据和方法

2.1 数据

(1) 卫星数据

卫星数据采用国家卫星气象中心发布的 FY-4A 静止卫星多通道辐射扫描成像扫描仪（Advanced Geosynchronous Radiation Imager，简称 AGRI）4 km 分辨率 1 级数据。该数据自 2018 年 3 月 12 日起可供用户下载。FY-4A 卫星位于赤道 104.7°E 上空 35786 km，数据所含 14 个通道（瞿建华等，2019）的概况如表 1 所示。数据的扫描范围存在全圆盘和中国区域两种模式，一天内存在若干指定时段进行 15 分钟一次的全圆盘扫描，起始时间具体包括：24 个整点、世界时 00:15、02:45、03:15、05:45、06:15、08:45、09:15、11:45、12:15、14:45、15:15、17:45、18:15、20:45、21:15 和 23:45 共 40 次，其他时间进行 4 分 18 秒一次的中国区域扫描。本文取一个数据文件内标示的观测开始时间和结束时间的均值作为该数据

文件对应的中国区域有效时间。

表 1 FY-4A AGRI 4 km 分辨率 1 级数据的通道类型、波长范围、变量及用途概况

Table 1 Channel types, wavelength ranges, variables and applications of FY-4A AGRI Level 1 data in a resolution of 4 km

通道号	通道类型	波长范围 (μm)	变量	主要用途
1	可见光与近红外	0.45-0.49	灰度值	气溶胶
2		0.55-0.75	灰度值	雾、云
3		0.75-0.90	灰度值	植被
4		1.36-1.39	灰度值	卷云
5	短波红外	1.58-1.64	灰度值	云、雪
6	中波红外	2.10-2.35	灰度值	卷云、气溶胶
7		3.5-4.0 (high)	亮温	火点
8		3.5-4.0 (low)	亮温	地表
9	水汽	5.8-6.7	亮温	水汽和云导风
10		6.9-7.3	亮温	水汽和云导风
11		8.0-9.0	亮温	云导风
12	长波红外	10.3-11.3	亮温	海表温度
13		11.5-12.5	亮温	海表温度
14		13.2-13.8	亮温	云顶高度

(2) 雷达数据

雷达数据采用国家气象科学数据中心发布的郑州雷达（站号 Z9371，经纬度为 113°41'E、34°42'N）的低仰角组合反射率图像数据。该组合反射率为 0.5°、1.5°、2.4°共 3 层 PPI 的水平空间最大值组合而成，每 6 分钟一组图像。该图像数据在 2021 年 7 月 20 日 17:13 至 19:53（北京时）缺失，经确认是由于特大暴雨导致郑州全市大范围停电而造成观测系统停机。使用该图像数据时，通过图像中给定的色标对图片中的反射率数值进行提取，并根据图像中的省、县界进行地理位置校准，最终得到水平空间分辨率 1 km×1 km、数值分辨率 5 dB 的组合反射率数值。

(3) 天气形势与降水观测概况数据

针对本次特大暴雨发生前的天气形势的概况分析，采用 NCEP FNL（Final Operational Global Analysis）全球分析场数据（邓伟等，2009）。该数据水平分辨率 1°×1°，时间间隔 6 小时，相比于再分析数据具有更高的时效性，是用于天气分析和驱动中尺度天气数据模式常用的数据之一。

地面雨量数据采用国家气象科学数据中心发布的郑州站（站号 57083，经纬度为 113°39'E、34°43'N）逐小时累积降水。在通过对比分析讨论光流场可靠性时还使用了该站的最大风速、风向数据。河南地区降水的空间分布采用中央气象台发布的河南地区 2021 年 7 月 19 日 08 时-20 日 17 时累积降水图像数据，再根据图像的色标范围和行政边界提取数据后进行重新绘制。

2.3 光流法

本文所采用的光流法主要参考 Meinhardt-Llopis et al. (2013) 介绍的单层 H-S 光流法。该方法的最小化目标函数 J 在平面域 Ω 上的表达式如下：

$$J = \int_{\Omega} \left((I_x u + I_y v + I_t)^2 + \alpha^2 (|\nabla u|^2 + |\nabla v|^2) / \Delta s^2 \right) d\Omega \quad (2)$$

其中， u 和 v 为光流场矢量， I_x 、 I_y 、 I_t 分别为图像灰度值或变量 I 的 x 、 y 方向的空间偏导数和时间偏导数， α 为控制光流场平滑程度的参数，与原图像变量场量纲一致， Δs^2 为格距的平方。积分式中前半部分为光流法基本的假设求解条件，即变量的 I 个别变化很小；积分式中后半部分为 H-S 光流法的光滑条件，同时也是变分求解的必要条件。此处需要说明的是，当用于求解等时间间隔图像的外推问题时，公式中可以不含 Δs^2 项，且所有变量均可以没有物理单位，因为最终解出的光流场 u 和 v 的单位可以是“单位格距/图像时间间隔”，在外推预测时并不影响结果。由于本文所使用的卫星数据存在不等时间间隔的情况，且主要针对光流场的特征进行分析而不是进行图像外推，因此需确保所有变量具备物理单位并加入 Δs^2 项配平单位。光流场矢量单位为 m/s ，移动距离单位为 m 。光流场矢量的迭代求解方案如下：

$$u^{n+1} = \bar{u}^n - I_x \frac{I_x \bar{u}^n + I_y \bar{v}^n + I_t}{\alpha^2 / \Delta s^2 + I_x^2 + I_y^2} \quad (3)$$

$$v^{n+1} = \bar{v}^n - I_y \frac{I_x \bar{u}^n + I_y \bar{v}^n + I_t}{\alpha^2 / \Delta s^2 + I_x^2 + I_y^2} \quad (4)$$

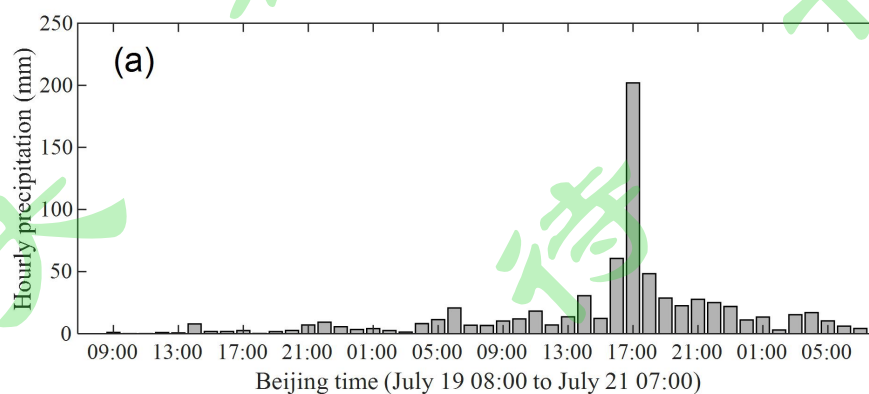
其中， n 为迭代次序号。在一般求解此问题时通常设置误差阈值，当相邻两次迭代的最小化函数之差的绝对值小于该阈值时退出迭代，但为了避免求解陷入局部最小，本文经试验强制完成 600 次迭代。 $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 、 I_x 、 I_y 和 I_t 的计算方案选择 Meinhardt-Llopis et al. (2013) 方案。平滑参数 α 的取值存在一定的经验性和主观性，其与所用格距、数据时空分布特征和数据中的噪声特性都有关联。当取值过

小时平滑计算项的权重过低，可能导致所求得的光流场矢量空间变化明显不连续，不利于据此开展大气运动特征分析；当取值过大时，虽然所得光流场可以保证平滑，但同时会导致所求得的光流场矢量的量级过小，使其与大气运动特征在物理意义上的差距增大。经试验，本文针对 4 km 分辨率的卫星数据取 a^2 为 $100 K^2$ ，针对 1 km 分辨率的雷达低仰角组合反射率数据取 a^2 为 $10 dBZ^2$ 。迭代求解结束后，对光流场矢量进行 25×25 格点范围的中值滤波以便滤除可能出现的异常值。在对计算光流场的卫星通道选择上，由于探测水汽的通道能同时对云顶和无云区的水汽响应，进而可以更全面地反演大气和云系的运动特征，本文优先考虑通道 9 和 10。在此基础上，由于通道 9 及其它部分远红外通道中存在相比于通道 10 更明显的横向的随时间变化的条纹噪声，故本文选取通道 10 计算光流场表征高空的运动特征。

3 结果与分析

3.1 天气形势与降水观测概况

郑州雨量站小时累积降水数据（图 1a）显示，郑州自 2021 年 7 月 19 日上午起便出现持续性降水。其中 19 日 24 小时累积降水量（19 日 08 时-20 日 08 时）为 101.3mm，20 日 24 小时累积降水量激增到 627.4mm（20 日 08 时-21 日 08 时），最大小时累积降水量发生于 20 日 16-17 时，高达 201.9mm，远超以往学者统计的郑州降水量历史极大值（1 小时 87.1mm，24 小时 173.5mm；左璇等，2021）。河南地区 19 日 08 时至 20 日 17 时累积降水量的空间分布（图 1b）显示，此次降水过程为覆盖河南省的大范围降水过程。该时段内累积降水量超过 100mm 的地区从河南中部偏西地区延伸至河南北部，郑州位于累积降水量超过 400mm 的强降水中心的东部。



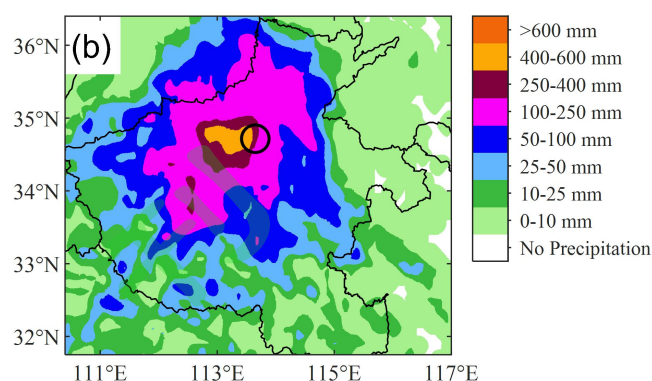


图 1 (a) 郑州雨量站 2021 年 7 月 19 日 08 时-21 日 08 时逐小时累积降水观测；(b) 河南地区 2021 年 7 月 19 日 08 时-20 日 17 时累积降水。粗黑线圆圈代表郑州站位置。

Fig. 1 (a) Hourly accumulated precipitation in Zhengzhou station from 08:00 July 19 to 08:00 July 21, 2021; (b) Accumulated precipitation from 08:00 July 19 to 17:00 July 20 (Beijing time, BJT) in Henan Province. The bold black circle presents the location of Zhengzhou station.

FNL 数据分析显示,20 日午后 14 时即特大降雨发生前,郑州上空处在 200hPa 高压脊控制并伴有强烈辐散(图 2a),为强降水系统的发展和维持提供了非常有利的高空动力条件。从中层 500hPa(图 2b)和低层 850hPa(图 2c)环流形势图上,可见 2021 年第 6 号台风“烟花”(In-Fa)位于台湾以东洋面(约 130°E、25°N 附近)和第 7 号台风“查帕卡”(Cempaka)位于海南东北部(约 110°E、20°N 附近)。在 500hPa 存在一“西南-东北”走向的倒槽(585 dagpm 等值线),郑州恰好位于该倒槽的顶部偏东侧(图 2b),为在该区域形成上升运动和偏南水汽、云水输送,从而形成大范围降水系统提供了极为有利的动力条件。由 850hPa 形势图(图 2c)可见,郑州处于日本海高压延伸带的西侧,受台风“烟花”外围的东南气流明显影响。由整层水汽通量图(图 2d)显示,郑州处于与 500hPa 上的 585 dagpm 倒槽位置基本一致的水汽辐合带中,受到南面和东南面水汽输送的强烈影响,从而为降水系统的发展和维持提供了极为有利的水汽条件。

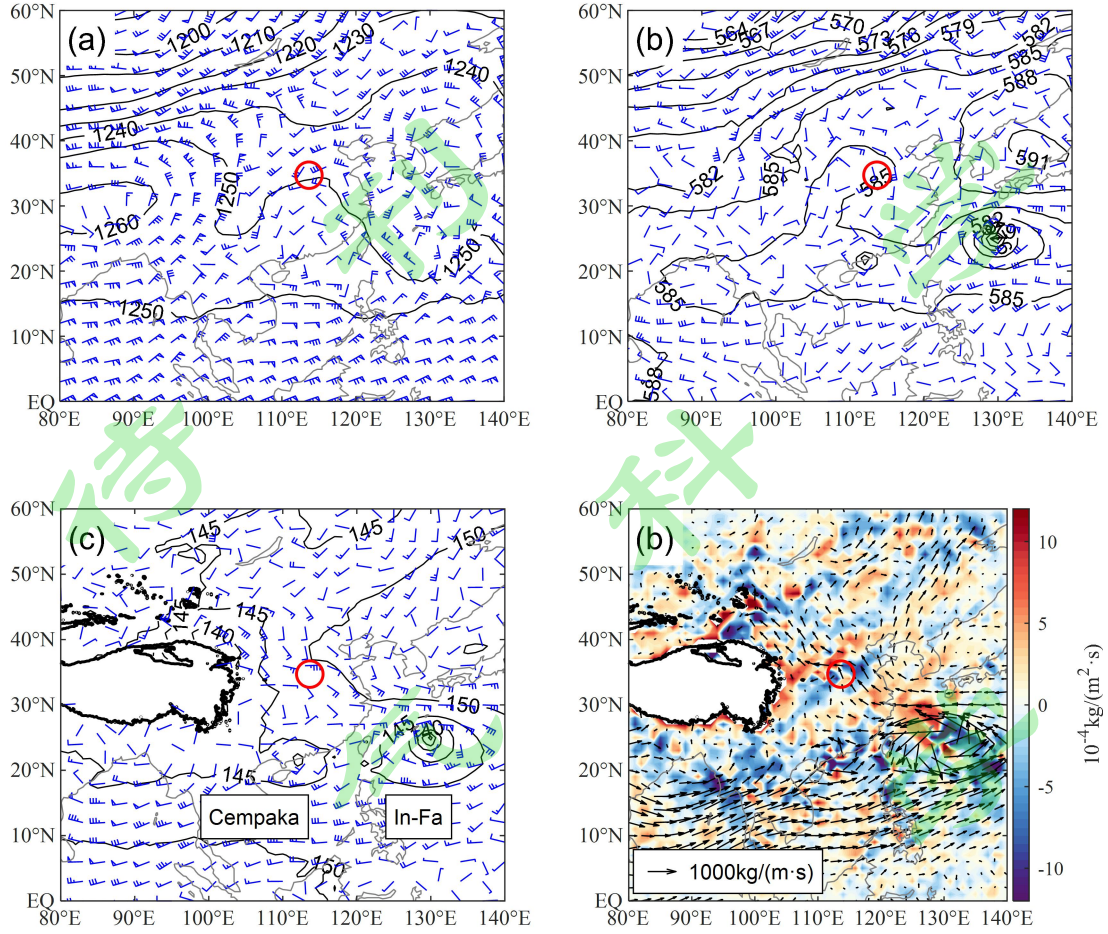


图 2 2021 年 7 月 20 日 14 时 FNL 数据天气形势概况

(位势高度场和风场: (a) 200hPa, (b) 500hPa, (c) 850hPa, 位势高度场单位为 dagpm。 (d) 500hPa 以下整层水汽通量与水汽通量散度。图中红圈为郑州雨量站位置, 图 c,d 中黑色粗实线圈为海拔超过 3000m 的高原范围)

Fig. 2 Synoptic situation plots of July 20, 2021 in FNL dataset

(Geopotential height (in dagpm) and wind field: (a) 200hPa, (b) 500hPa, (c) 850hPa; (d) the integrated water vapour flux and its divergence below 500hPa level. The red circle presents the location of Zhengzhou station. The bold black line in Fig. 2c and d are used to draw the plateau areas with an altitude more than 3km above sea level)

3.2 遥感数据光流场与其他资料的对比

如本文引言所述, 光流场作为遥感数据图像的视速度场, 虽然其本身与大气水平运动在物理概念上并不一致, 但同时也具备反映大气运动特征的潜力。为了检验本文计算得到的遥感数据光流场能否合理地表征出对流层中高层和低层的

大气水平运动特征，应通过与其他常规资料进行对比分析和验证。对于卫星光流场，首先需确认其代表的大气运动高度。取 7 月 20 日午后 14:00 时，参考 FY-4a 的云顶高度产品和云顶气压产品（图 3a,b），可见郑州上空大范围云系及周边云系的云顶核心高度在 12 km 以上，气压小于 200 hPa。大范围云系的云顶高度向外围递减降至不足 8 km 高度，但高于 400 hPa 的高度。结合引言中已介绍的卫星云顶高度反演 $10^{\pm 2}$ km 量级的误差范围，考虑卫星光流场应对应 400~200 hPa 高度范围的中高层大气运动状况。从卫星光流场与 FNL 数据 400~200 hPa 高度平均水平风的对比（图 3c）来看，二者在郑州上空均为有一定辐散特征的西南风，在我国东部外海台风“烟花”上空则呈现反气旋式辐散，大范围流场矢量大小和方向基本相似，表明本文计算得到的卫星光流场可以近似表征对流层中高层的大气运动状况。

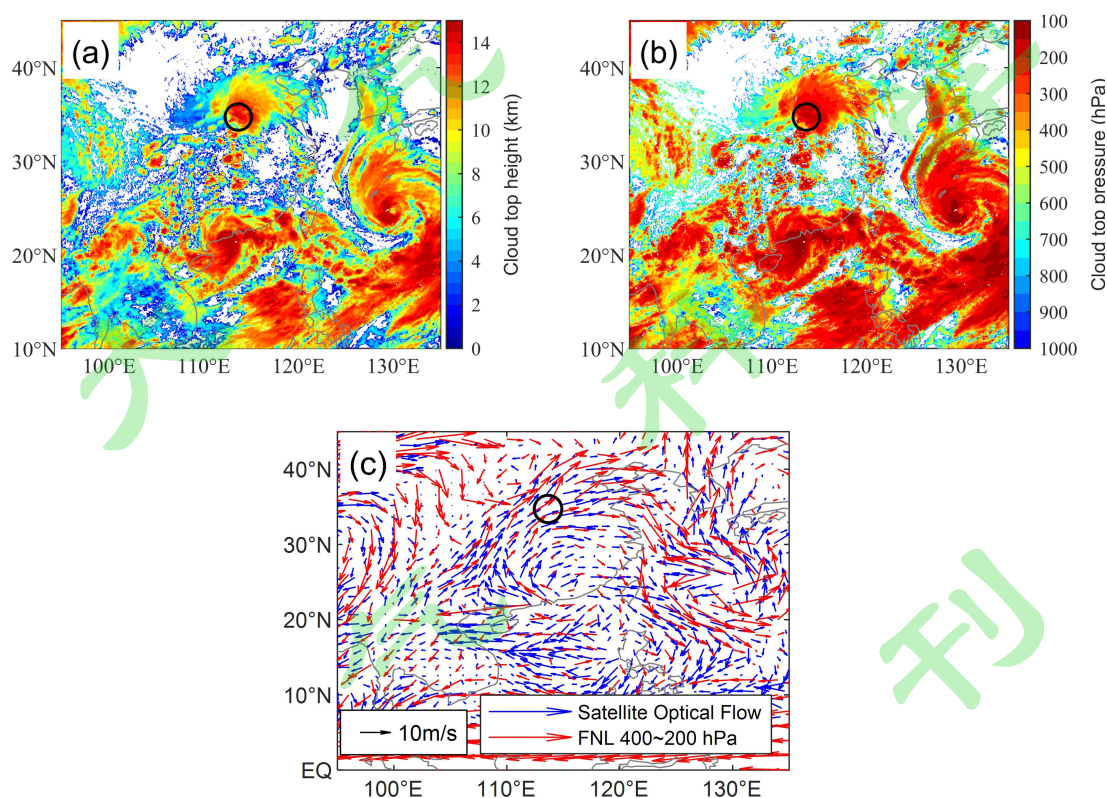


图 3 2021 年 7 月 20 日 14:00 左右 FY-4A 云高产品和卫星光流场（蓝色箭头）与相应高度范围内 FNL 水平风（红色箭头）对比
（a: 云顶高度产品，b: 云顶气压产品，c: FY-4A 通道 10 计算的光流场和 FNL 400 至 200hPa 平均水平风。图中黑色圈为郑州雨量站位置）

Fig. 3 Cloud top height products of FY-4A and the comparison between the satellite optical flow

field and the horizontal wind field of FNL data in the layer ranged from 400 to 200 hPa near

14:00 BJT July 20, 2021

(a: cloud top height product, b: cloud top pressure product, c: the mean horizontal wind field (red arrow) of FNL data within the layer from 400 to 200 hPa and the optical flow field (blue arrow) derived from FY-4A Channel No.10. The black circle presents the location of Zhengzhou station.)

对于雷达低仰角组合反射率计算的光流场,由于天气雷达的不同扫描仰角和探测距离对应着不同的高度,且组合反射率的计算规则是取不同高度上的最大反射率数值,因此不易确认该数据精确对应的高度。但是,考虑到雷达原始数据 3 个低仰角中间层(仰角 1.5°) 在 150 km 距离(约 $1.35^{\circ}\sim 1.67^{\circ}$ 经纬度)上的对应探测高度不足 4 km,考虑本文计算的雷达光流场应对应约 3 km 以下的低层大气运动特征。从 20 日午后 14:00 时的雷达光流场和 FNL 数据 1000~700 hPa 高度层平均水平风对比(图 4a)来看,二者在郑州北侧的大范围偏东风和南侧部分东南风具有相似之处,但结合雷达回波结构特征(图 4b)可以看出雷达光流场空间分辨率高并且更加精细,而 FNL 数据给出的流场则显示较大尺度的平滑特点,尤其地,在一些回波核心周边雷达光流场显示出了更小尺度的辐合或辐散特征。图 4a 中的两种数据还有一个明显的不同之处是,FNL 数据给出的低层风速比雷达光流场的大很多。为了确认两种数据在风速大小上的准确程度,我们取郑州站地面 10m 高度逐小时观测的最大风速,与雷达光流场在郑州站附近 2 km 范围以内的平均值(雷达距离郑州站水平距离不足 2 km,可近似地与地面站观测数据对比),以及 FNL 数据中的 10 m 风插值出郑州站位置的地面风进行近地面风时间序列对比。由风速对比(图 4c)可见,在 20 日下午 14:00 时,FNL 数据给出近 8 m/s 的风速,远高于站点观测和雷达光流场的近 4 m/s 风速,说明此时 FNL 数据确实存在风速偏大的情况。雷达光流场除了最强小时降雨阶段(16-17 时前后)与地面观测差异较大外,其他时段与地面观测风速较一致。再从风向对比(图 4d)可见,雷达光流场总体上与地面观测的风向和变化趋势一致性更好,而 FNL 数据表现出的风向变动很小,不能精细地反映云尺度系统风场的局地变化特征。上述对比表明,本文计算的雷达光流场可以近似地表征对流层低层的大气运动状况。

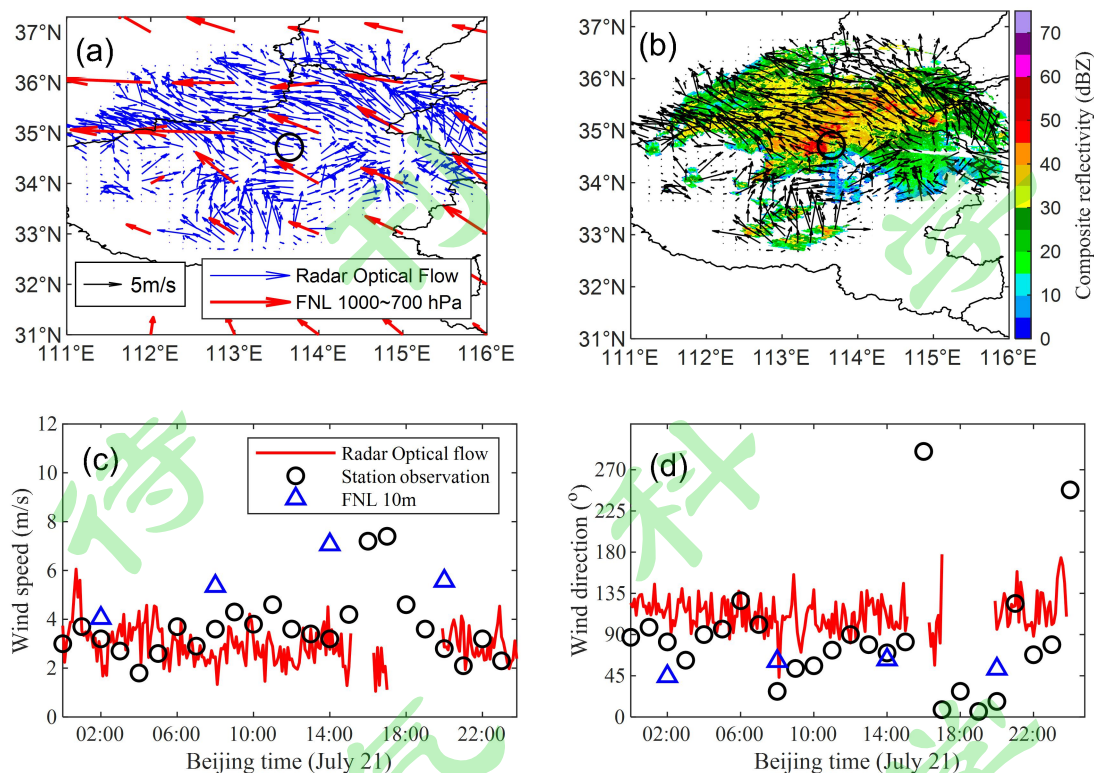


图 4 2021 年 7 月 20 日 14:00 雷达光流场与 FNL 水平风及地面观测对比

(a: 雷达低仰角组合反射率光流场与 FNL 1000 至 700hPa 平均水平风, b: 雷达低仰角组合反射率及光流场, c: 郑州站位置的雷达光流场、郑州站最大风速观测和 FNL 10m 风场的风速变化, d: 同 c 但为风向。图 a,b 中黑色圈为郑州雨量站位置)

Fig. 4 Comparison between radar optical flow field, horizontal wind field of FNL data and station observation at 14:00 July 20, 2021

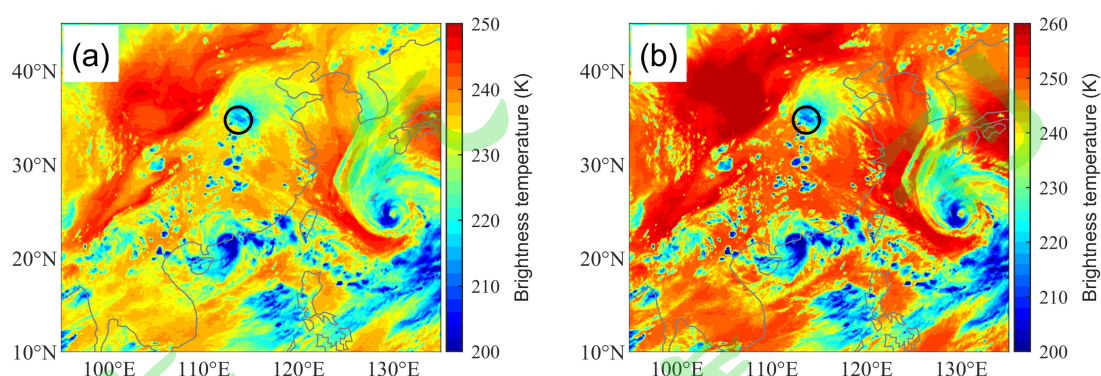
(a: 10 m-height horizontal wind field of FNL data and the optical flow field derived from radar low level composite reflectivity, b: radar low level composite reflectivity and optical flow field, c: time series of radar optical flow field near Zhengzhou station, maximum ground 10 m-height wind speed observation of Zhengzhou station and 10 m-height wind of FNL data, d: the same as (c) but for wind direction. The black circles in (a) and (b) present the location of Zhengzhou station.)

3.3 西南水汽通道和对流带

选取与图 2 相近的 7 月 20 日午后 14 时前后时次, 由 FY-4a AGRI 卫星数据中对云水和水汽均有响应的通道 9 (图 5a) 和通道 10 (图 5b) 数据可见, 当日

午后，郑州上空已覆盖有一个范围较大的云系（图中浅蓝色），其西南侧衔接含有一系列尺度较小的对流云块、呈现“西南-东北”走向的水汽带，其位置与中低层天气形势图中的倒槽（图 2b）和水汽辐合带（图 2d）位置基本重合。再由卫星通道 4 测量的短波红外图（图 5c）进一步观察该水汽带中的这些小尺度对流云块，发现这些对流云具有相对较高的卫星短波红外探测值，其明显高于郑州上空云系且与“查帕卡”台风核心区域的数值量级相当。这说明，上述水汽带中的这些块状云体是发展深厚的强对流云，由于它们的云顶和云核心较密实，使得直接反射太阳短波辐射较多。再结合通道 10 计算得到的光流场（图 5d）可见，上述水汽带南起台风“查帕卡”的西侧和北侧区域，并向东北方向输送进入河南省大部分地区，轴心正穿过郑州地区，表明郑州在特大暴雨发生前处在该“西南-东北”走向的水汽和深对流云输送带轴心上。

同时注意到，卫星与 FNL 分析场数据（图 2d）显示台风“烟花”（位于台湾以东约 1000km 的洋面上）的水汽向郑州输送特征不同的是，由卫星两个探测水汽亮温的通道（通道 9 和 10，图 5a,b）数据可以看到，在我国华北、华东海边直至台风“烟花”西侧的广大区域，亮温相当高，说明这些区域几乎无云，水汽也很少。由卫星水汽亮温通道 10 反演的高空光流场也没有显示水汽从台风“烟花”向西北输送至郑州地区的特征，表明至少在 20 日午后，郑州西南方向的水汽和对流云的输送作用相比，位于我国广东东南海面上的“查帕卡”台风输送作用更为明显。



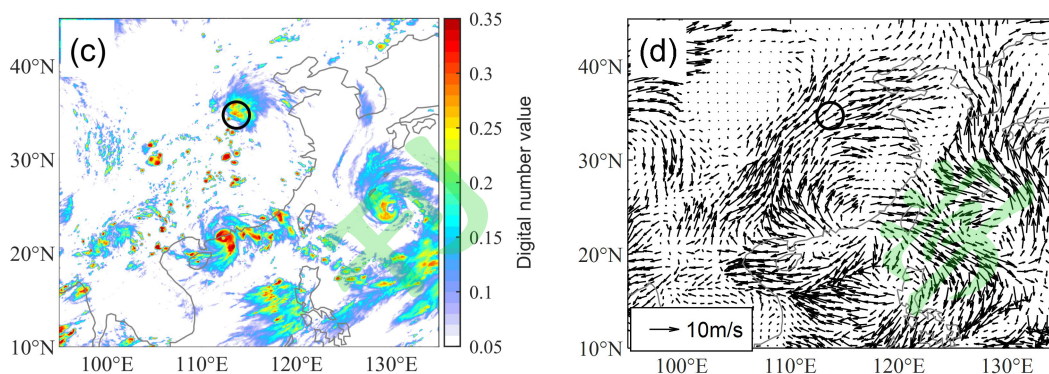


图 5 2021 年 7 月 20 日 14:06 FY-4A AGRI 的观测与计算的光流场

(a: 通道 9 亮温, b: 通道 10 亮温, c: 通道 4 灰度值, d: 由通道 10 计算的光流场。图中黑色圈为郑州雨量站位置)

Fig. 5 Observation of FY-4A AGRI and optical flow field derived at 14:06 July 20, 2021

(a: brightness temperature of Channel No.9, b: brightness temperature of Channel No.10, c: digital number value of Channel No.4, d: optical flow field derived from Channel No.10. The black circle presents the location of Zhengzhou station.)

3.4 区域流场变化特征

选取 7 月 20 日郑州站小时累积降水最大时段 (16:00-17:00) 中的 16:30 左右郑州附近区域光流场数据, 以及在此之前每间隔 2 小时的光流场数据, 分析卫星和雷达光流场的时间变化特征 (图 6、图 7)。在 20 日上午, 郑州上空大范围云系在南偏西气流影响下已具有辐散特征 (图 6a), 午后郑州南侧有大量积云单体向北输送进入郑州上空云系 (图 6c), 在郑州小时降水最强阶段 (图 6d), 高空辐散区向下游即东北方向移动, 并且反气旋式曲率更为明显, 说明高空反气旋式辐散增强。而雷达光流场显示, 20 日上午低层气流呈大范围东偏南风 (图 7a), 从中午开始, 郑州南部不断有强回波单体发展并向北移动 (图 7b-d), 在郑州南侧形成辐合。综上分析表明, 利用卫星和雷达低层数据计算的光流场可以表征大气和云系高空和低空的移动特征, 并分析出郑州地区强降水发生时及发生前处于明显的“高空强烈辐散、低空强烈辐合”的动力场影响中。

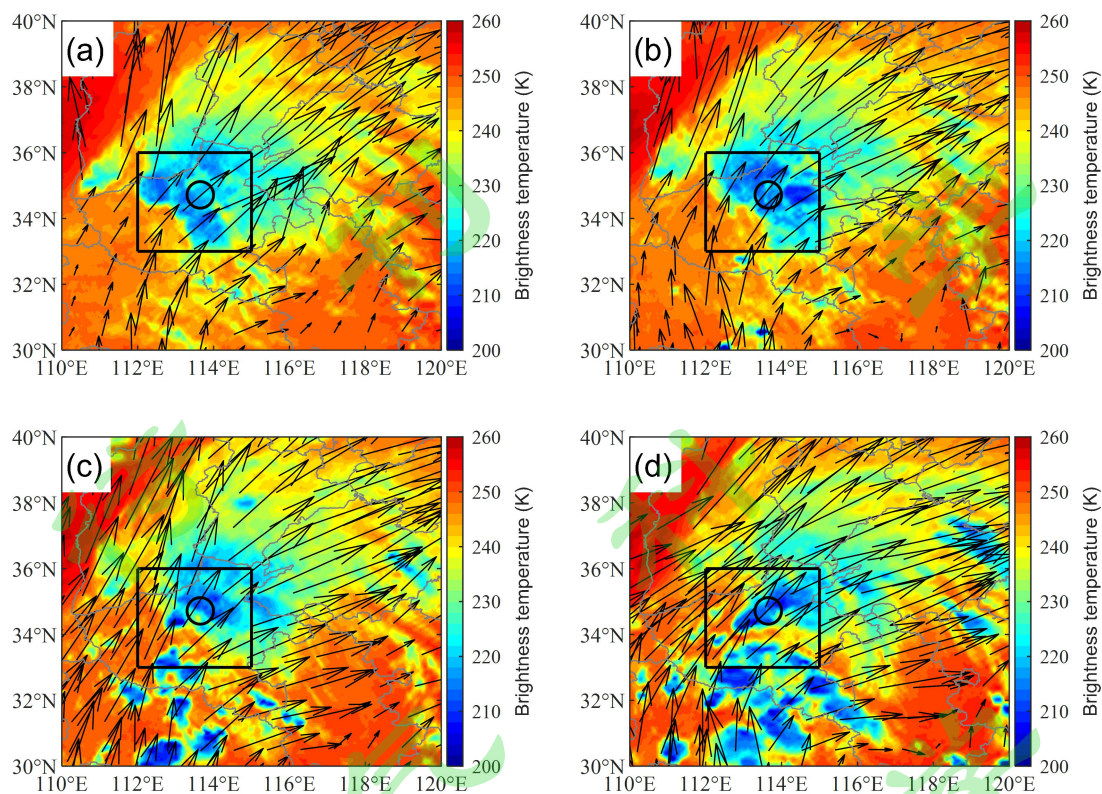


图 6 在最大小时降水时段及之前时段卫星光流场的变化

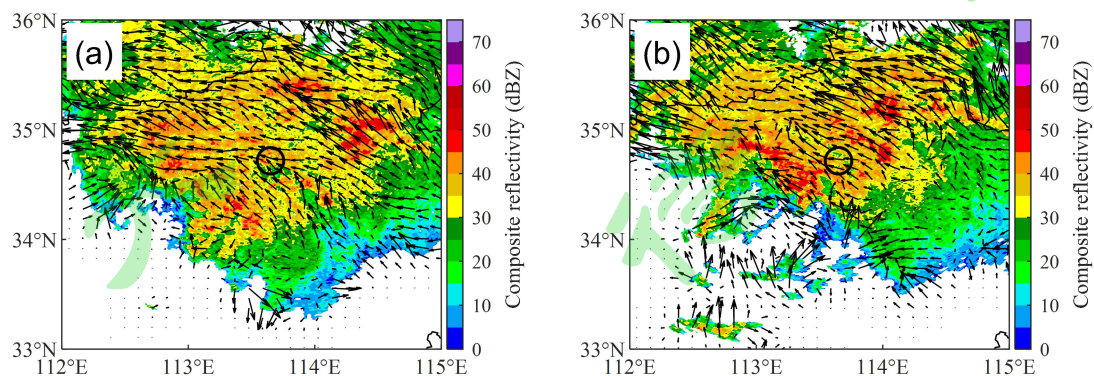
(a: 10:32, b: 12:32, c: 14:32, d: 16:32, 北京时。填色为 FY-4A AGRI 通道 10 亮温。

图中黑色圈为郑州雨量站位置。图中黑色线框范围为郑州附近区域)

Fig. 6 Change of satellite optical flow field on the stage of the severest hourly precipitation and its earlier stages

(a: 10:32, b: 12:32, c: 14:32, d: 16:32, Beijing time. The color shading represents brightness temperature of FY-4A Channel No.10. The black circle presents the location of Zhengzhou station.

The bold black box represents surrounding area of Zhengzhou.)



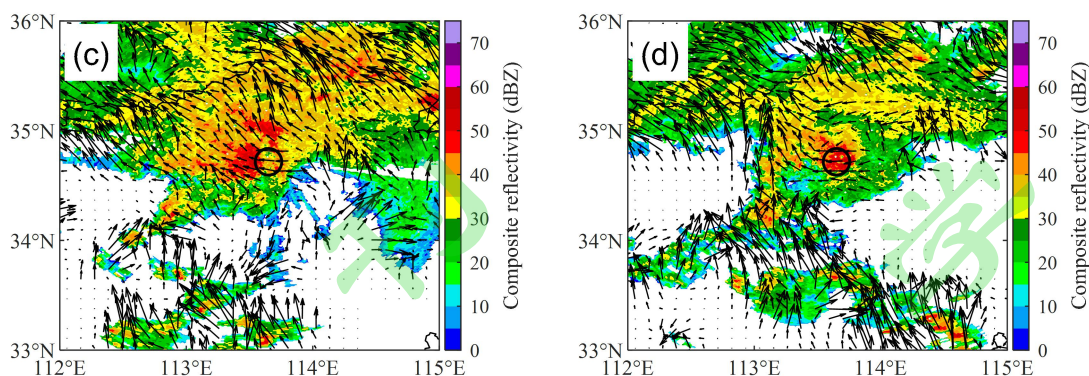


图 7 在最大小时降水时段及之前时段雷达光流场的变化

(a: 10:30, b: 12:30, c: 14:30, d: 16:30。时间为北京时。填色为雷达低仰角组合反射率。

图中黑色圈为郑州雨量站位置。绘图范围同图 6 中黑线框。)

Fig. 7 Change of radar optical flow field on the stage of the severest hourly precipitation and its earlier stages

(a: 10:30, b: 12:30, c: 14:30, d: 16:30, Beijing time. The color shading represents radar composite reflectivity of low level. The black circle presents the location of Zhengzhou station. The depicted area is the same as the black box in Fig. 6.)

利用郑州及其周边地区（112-115°E，33-36°N，跨度约 300 km×300 km）的光流场可以进一步定量分析涡度和散度这两个动力特征诊断量随时间的变化特征。为了获得影响郑州地区的降水系统总体动力特征和变化，对涡度和散度场进行区域平均，以减小流场局地扰动或数据起伏的影响，从而获得降水系统总体动力特征变化（图 8、图 9）。所得到的该 3°×3°区域平均涡度和散度量级为 $10^{-5}s^{-1}$ ，与以往学者使用 1°×1°空间分辨率数据分析暴雨流场的涡度和散度的量级基本一致（杨帅和高守亭，2007；黄治勇等，2021），表明本文对光流场的涡度和散度场进行区域平均所得到的统计量数值范围基本合理。

图 8 给出了卫星光流场计算的高空辐散和涡度随时间的变化，可见，郑州地区高空的流场从 20 日 0 时起就一直处于强烈的辐散状态，并且反气旋涡度（图 8 红线）不断增强，直到 22 时强降水开始减弱后高空的涡度和散度才趋于消失。这些结果表明，当日郑州地区在高空强辐散和强反气旋涡度作用下一直维持有强烈的上升运动。进一步观察最强小时降水发生时段（20 日 16-17 时）前的高空动力参量的变化，发现从 20 日中午 12 时起，虽然高空呈现的辐散有减弱趋势，但

从下午约 14 时起高空反气旋涡度出现增强，这说明降水系统中的上升运动并非趋于减弱，而是在增强。此处高空辐散的减弱统计结果可能受最强辐散层的高度变化以及云顶主要辐散区向统计区域下游移动等多种因素影响。

以与卫星光流场类似的方式计算雷达光流场的区域平均涡度和散度。此处需指出，光流场在没有雷达回波的区域为 0，或在回波边沿外侧呈现很小的值，即光流法并不会在图像中没有有效目标和变化特征的区域求解出有效的视速度矢量，而这部分结果也不应在区域平均统计时被记入。本文此处取组合反射率大于 0dBZ 的格点上的涡度和散度进行区域平均。图 9 显示了雷达低仰角光流场表征的散度和涡度随时间的变化，可见，7 月 20 日从 0 时起到强降水结束时，低空呈现强气旋式涡度发展，与高空反气旋相对应，表明当日郑州地区确有大范围上升运动发展。低空散度自 20 日 0 时起先以明显辐散为主，这是因为郑州当时存在持续性降水（图 1），降水粒子下落引起下沉气流到达地面后会自然引起辐散。但是，低空散度在 13-14 时间由正值急剧转为负值，即低空由辐散急剧转为辐合，并在 16-17 时最强降水发生前一直保持辐合，与午后高空出现的反气旋增强现象（图 8）相对应，表明郑州地区在 20 日午后上升运动明显增强，这为特大暴雨的产生和维持提供了直接的动力条件。

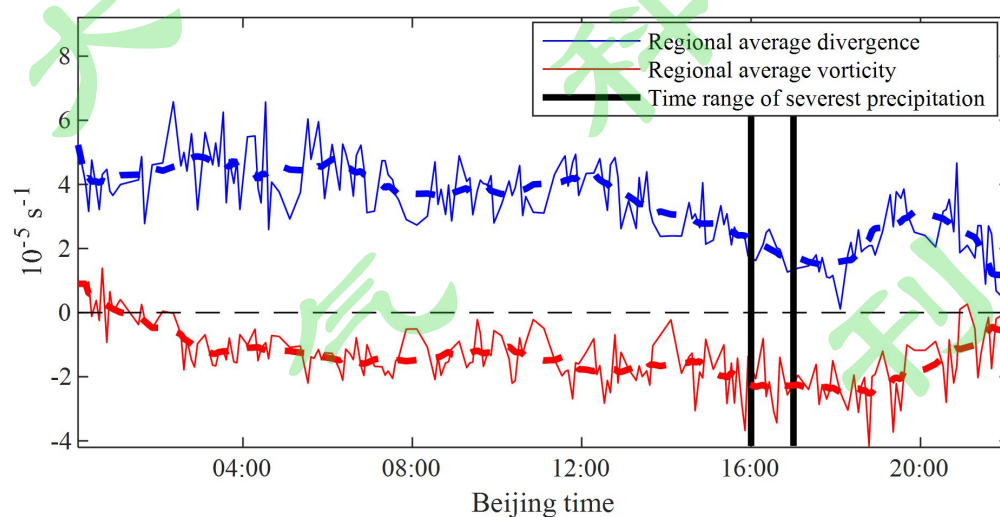


图 8 由 2021 年 7 月 20 日 FY-4A AGRI 通道 10 计算的光流场计算的区域平均散度和涡度变化

（区域平均范围为郑州周边地区：112-115°E，33-36°E，同图 7 范围。图中粗虚线为 15 点滑动平均线）

Fig. 8 Regional average divergence and vorticity of optical flow field derived from Channel No.10 of FY-4A AGRI data on July 20, 2021

(The regional average area is the surrounding areas of Zhengzhou: 112-115°E, 33-36°E, the same as Fig. 7. The bold dash line is from the 15-point moving average)

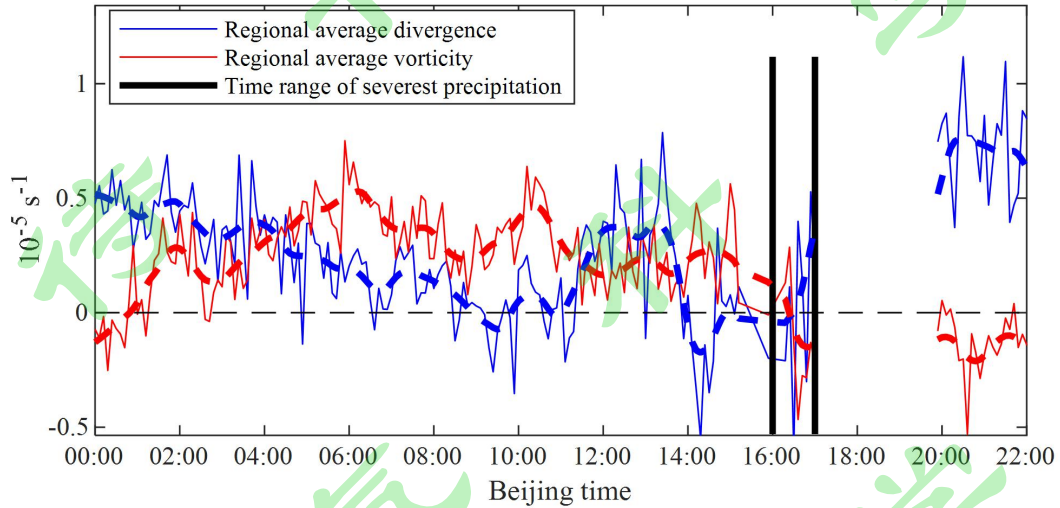


图 9 由 2021 年 7 月 20 日雷达低仰角组合反射率光流场计算得到的区域平均散度和涡度变化

(区域平均范围为郑州周边地区: 112-115°E, 33-36°E, 同图 7 范围。平均时取组合反射率大于 0dBZ 的格点。图中粗虚线为 15 点滑动平均线)

Fig. 9 Regional average divergence and vorticity of optical flow field derived from radar composite reflectivity of low elevation on July 20, 2021

(The regional average area is the surrounding areas of Zhengzhou: 112-115°E, 33-36°E, the same as Fig. 7. Regional average is with the radar composite reflectivity over 0 dBZ. The bold dash line is from the 15-point moving average)

3.5 区域水凝物输送特征

从 3.4 节看到, 郑州发生特大暴雨期间南侧有大量强对流云向北输送。为了进一步讨论南侧大量强对流云向北输送对郑州此次特大暴雨的影响, 需要对区域的水凝物输送特征进行定量分析。这里取与图 7 所示的郑州及周边范围作为重点研究区域。首先取南侧边界 (33°N 附近, 112-115°E 范围), 估算水凝物通量随时间的变化进行讨论。由雷达反射率估算水凝物含量的方案采用于华英等(2007)构建的简单估算公式:

$$W = 3.44 \times 10^{-3} \times Z^{4/7} \quad (5)$$

其中, W 为液态含水量, 单位为 g/m^3 , Z 为雷达反射率因子, 单位为 mm^6/m^3 。由于本文所使用的雷达反射率为低仰角的组合反射率, 因此, 由 (5) 式仅能得到表征低层中单层积分的水凝物含量最大值。将 W 与雷达光流场南北方向分量 v 相乘, 即得到某个空间点上的水凝物通量估计值 (单位 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。考虑到回波单体在空间上的不均匀性, 为了更好地表征越过 33°N 线的对流云向北输送量的变化情况, 取雷达数据每个经度上 32.5°N - 33.5°N 之间单点水凝物通量绝对值最大的点作为代表, 然后沿 112 - 115°E 积分, 最终得到从郑州区域南侧边界的低层单层水凝物向北输送的净通量估计值。

在对比分析方面, 取 FNL 分析数据中各高度层的云、雨、冰晶、霰和雪团等水凝物的混合比之和作为根据 FNL 的水凝物含量数据计算各层水凝物通量, 以便与雷达反演数据作对比。由图 1a 看到, 20 日中午以前, 降水持续且相对平稳。从图 10 看到, 由雷达低仰角组合反射率和光流场估算的水凝物向北输送净通量在 00 时至 08 时基本位于 FNL 数据 500 hPa 和 700 hPa 的数值之间, 其中, 02 时和 08 时与 FNL 分析数据 700 hPa 的数值更接近。这些对比表明, 本文由雷达低仰角数据估算的水凝物通量数值范围合理, 能够基本反映对流层中低层的水凝物输送情况。进一步分析发现, 在 20 日午后至 16 时郑州最强降水发生前, 由雷达计算的水凝物向北净通量自 13 时起急剧增大 (图 10), 而由 FNL 数据计算的中低各层水凝物通量在 14 时后也有一些增长趋势, 但其数值和增长程度均远远小于雷达计算的水凝物通量, 并没有表现出与 20 日中午以前明显不同的数值变化特征。这表明雷达数据及其光流场所估算的水凝物输送情况相比于传统粗时空分辨率的分析场在极端降水过程的输送条件估算上具有明显的优势。

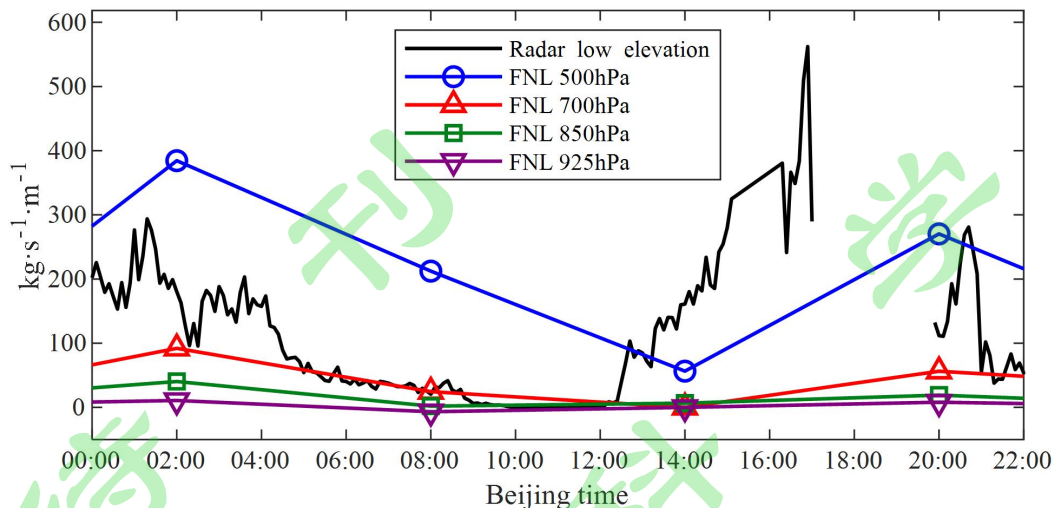


图 10 2021 年 7 月 20 日分别由雷达和 FNL 数据计算的郑州区域低层南侧边界水凝物向北净
通量（郑州区域范围同图 7）

Fig. 10 Net northward hydrometeor fluxes on low level at the south boundary of Zhengzhou
region, derived from radar and FNL data respectively, on July 20, 2021
(The Zhengzhou region is defined the same as Fig. 7)

采用与图 10 计算南侧边界类似的方案，进一步分析郑州区域低层各方向边界的水凝物输入情况（图 11a），可见在 20 日上午以东边界水凝物输入为主，而南边界的水凝物输入在午后开始增大，在 14 时超过东边输入成为主要贡献。从低层水凝物的净输入情况（图 11b）来看，郑州区域低层从南侧和东侧边界输入水凝物，并从西侧和北侧输出，13 时起主要受南侧净输入影响，低层水凝物总净通量由负转正并波动上升，直至 16-17 时最强降水时达到最大。

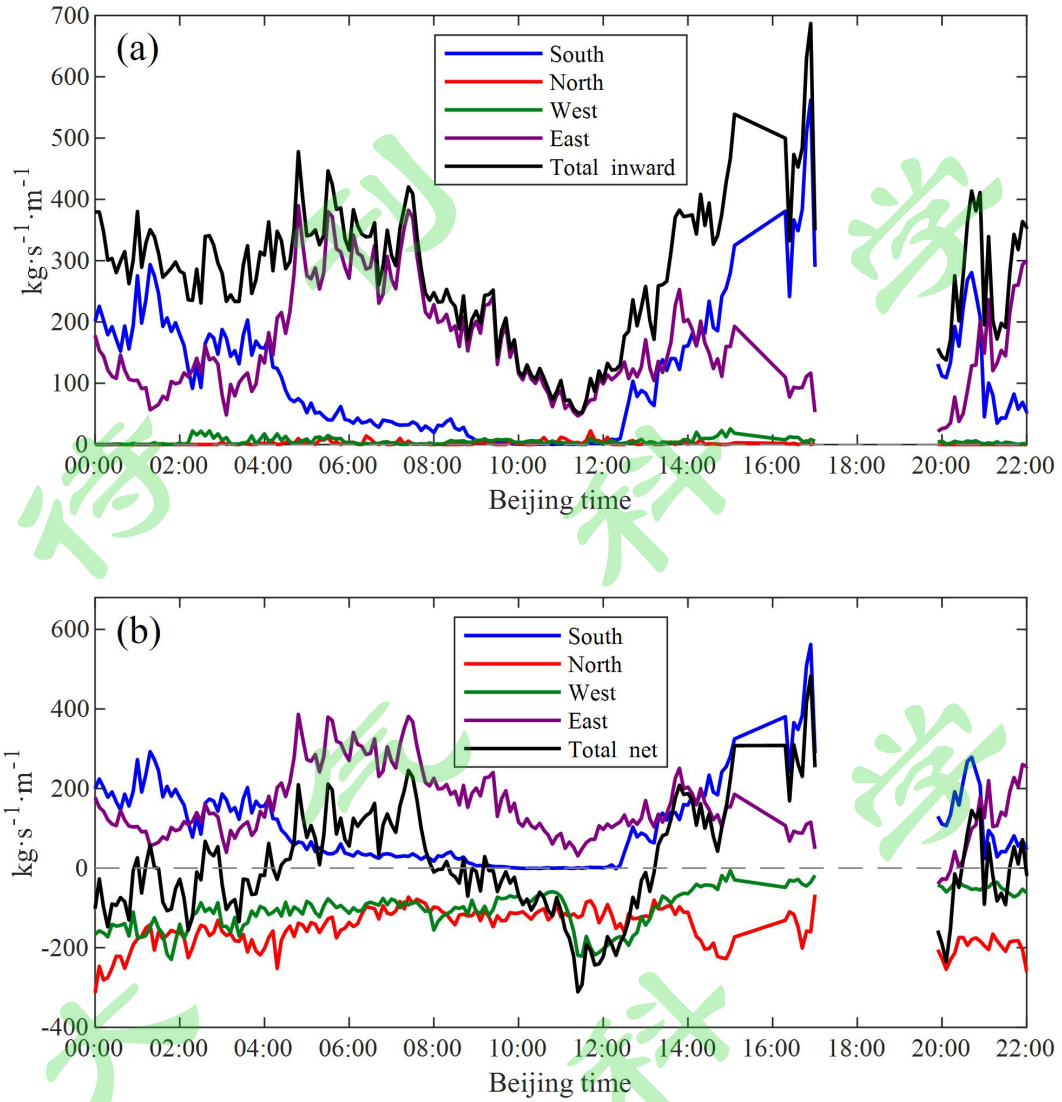


图 11 2021 年 7 月 20 日由雷达估算的郑州区域低层不同方向边界上水凝物的 (a) 向内正通量与 (b) 向内净通量 (郑州区域范围同图 7)

Fig. 11 (a) Inward positive flux and (b) inward net flux of hydrometeor on low level at boundaries of different directions transporting to Zhengzhou region, July 20, 2021

(The Zhengzhou region is defined the same as Fig. 7)

为了将水凝物收支和小时降水变化情况进行比较,将水凝物总净通量按雷达数据时间分辨率 (6 分钟) 进行 6 分钟时间间隔的线性补插后,计算出每个小时平均的水凝物总净通量。然后,考虑到雷达原始数据 3 个低仰角中间层 (仰角 1.5°) 在区域半宽度 (1.5° 经纬度, 约 150 km) 距离上的高度不足 4 km, 取 3 km 作为低层水凝物输送的层厚度,对图 11b 中的总净通量进行逐小时的时间和高度

积分，得到郑州地区低层水凝物逐小时输送收支情况（图 12）。自 13 时起，郑州区域低层水凝物收支由负转正，在 15-16 时突然增大，数值 2 倍于当日此前的正收支数值，并维持大值到最强降水发生的时段（16-17 时）。此过程伴随的地面小时累积降水从 15 时不足 10mm 到 16 时近 50mm，再到 17 时超过 200mm，相比于水凝物输送的急剧增加存在约 1 个小时的滞后。

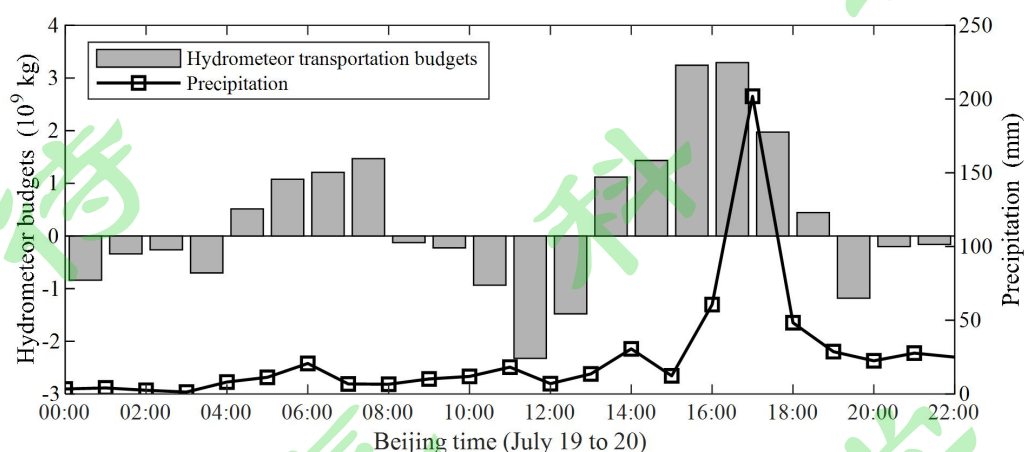


图 12 2021 年 7 月 20 日由雷达估算的郑州区域低层水凝物输送收支与郑州站小时降水量

Fig. 12 The hydrometeor transportation budgets on low level of Zhengzhou region estimated using radar data, and the hourly precipitation of Zhengzhou station on July 20, 2021

进一步结合 3.2 节中 7 月 20 日午后有大量对流云向郑州地区上空大范围云系输送的现象，和 3.3 节中 20 日午后云区上升运动增强的特征，可以推断 20 日下午有大量水凝物随对流云输送进郑州地区大范围降水系统的上升运动区里。注意到，上述一系列物理过程与我国学者提出的积层混合云降水理论（黄美元等，1986；洪延超，1996）存在相似之处。例如，镶嵌在层状云饱和环境中的对流云的降水效率明显高于纯对流云（黄美元等，1986），层状云的饱和环境和辐合场可以使镶嵌其中的对流云具有较长的生命期、持续性高强度降水和间歇性特高强度降水（洪延超，1996），这些机制可能是导致此次郑州特大暴雨的关键原因。

4 结论与讨论

本文针对 2021 年 7 月 20 日郑州“7·20”特大暴雨，利用 FY-4A AGRI 遥感数据和地基天气雷达低仰角组合反射率数据分别计算光流场。经与 FNL 数据水平风和地面风速观测对比，表明本文计算的光流场具备近似表征大气和云系的高

空和低空运动特征的能力。在此基础上,从动力场和水凝物输送方面,对郑州强降水发生的前兆和成因进行了分析。

在 7 月 20 日午后,郑州受“西南-东北”走向的水汽和强对流输送带控制,与 FNL 分析场数据中 500hPa 倒槽和整层水汽辐合带位置基本吻合。该输送带南起位于南海的台风“查帕卡”西侧和北侧,一直延伸至郑州上空的大范围云系中,这可能是这次郑州“7.20”特大暴雨产生的重要水汽来源。

7 月 20 日午后至 16 时最强降水发生前,表征高空流场特征的卫星光流场呈现反气旋涡度增强,而表征低空流场特征的雷达光流场则由辐散转为强烈的气旋性辐合,表明郑州地区上空整个降水系统的上升运动增强,为特大暴雨的形成提供了极为有利的动力条件。

在 7 月 20 日午后,郑州地区受南侧强对流云输入的影响,在最强降水发生前 1 小时水凝物净输入急剧增加,并维持到最强降水发生阶段,表明存在大量水凝物随对流云输送进入大范围降水系统上升运动区,从而极大地加速了水汽转化为云水进而形成降水的微物理过程转化速率,这可能是此次郑州特大暴雨快速增强的关键成因。

上述这些动力条件和水凝物输送特征在最强降水发生前 1-2 个小时就已明显出现,表明本文所使用的基于遥感数据高空和低空光流场分析的方法具备一定的短临预报和预警价值,同时也表明此类我国高时空分辨率的天气遥感探测数据具备在降水天气探测与预警方面进一步被拓展应用的潜力。

未来还有一些相关研究工作值得深入开展。首先,本文计算水凝物输送时,在雷达反演含水量、低层高度积分时使用的是粗略的估计方法,如果能利用近年来我国部分地区新部署的双偏振雷达,不仅可以利用双偏振参量更准确地计算不同水凝物含量,还可以借助更高时空分辨率的探测,最终得到更为准确的不同高度层上的水凝物输送特征,以便更好地对强降水进行诊断和预警。其次,此次特大暴雨过程和以往积层混合云暴雨过程在动力和微物理过程方面的异同,需要结合更多样的观、探测数据和研究手段进行深入讨论。第三,卫星数据没有呈现明显的 7 月 20 日午后台风“烟花”向郑州地区输送水汽的特征,与 FNL 分析数据所呈现出的特征不一致。如何更好地解释这些数据中存在的差异并加以利用,值得在未来进一步研究。

参考文献

- Bechini R, Chandrasekar V. 2017. An enhanced optical flow technique for radar nowcasting of precipitation and winds [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 34:2637-2658. doi: 10.1175/JTECH-D-17-0110.1
- 曹春燕, 陈元昭, 刘东华, 等. 2015. 光流法及其在临近预报中的应用 [J]. *气象学报*, 73(3):471-480. Cao Cunyan, Chen Yuanzhao, Liu Donghua, et al. 2015. The optical flow method and its application to nowcasting. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 73(3):471-480. doi:10.11676/qxxb2015.034
- 邓伟, 陈海波, 马振升, 等. 2009. NCEP FNL 全球分析资料的解码及其图形显示 [J]. *气象与环境科学*, 32(3):78-82. Deng Wei, Chen Haibo, Ma Zhensheng, et al. 2009. Decoding and graphic display of the NCEP FNL global analysis data [J]. *Meteorological and Environmental Science (in Chinese)*, 32(3):78-82. doi:10.16765/j.cnki.1673-7148.2009.03.009
- 勾亚彬, 刘黎平, 杨杰, 等. 2014. 基于雷达组网拼图的定量降水估测算法业务应用效果评估 [J]. *气象学报*, 72(4):731-748. Gou Yabin, Liu Liping, Yang Jie, et al. 2014. Operational application and evaluation of the quantitative precipitation estimates algorithm based on the multi-radar mosaic [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 72(4):731-748. doi:10.11767/qxxb2014.050
- 洪延超. 1996. 积层混合云数值模拟研究 (II) ——云相互作用及暴雨产生机制 [J]. *气象学报*, 54(6):661-674. Hong Yanchao. 1996. The numerical simulation study of convective-stratiform mixed cloud, part(II)--interaction of cloud and formative mechanism of the heavy rain [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 54(6):661-674.
- Horn B K P, Schunk B G. 1981. Determining optical flow [J]. *Artif. Intell.*, 17:185-203. doi:10.1016/0004-3702(81)90024-2
- 黄美元, 徐华英, 洪延超. 1986. 混合云系中的层状云对对流云发展影响的数值模拟研究 [J]. *成都气象学院学报*, 1:48-54. Huang Meiyuan, Xu Huaying, Hong Yanchao. 1986. A numerical simulation study for effects of stratiform cloud in mixed cloud system on growth of convective cloud [J]. *Journal of Chengdu Institute of Meteorology (in Chinese)*. 1:48-54.
- 黄守友, 徐国强. 2020. FY-4A 的 LMIE 闪电数据对云信息初始化的影响及数值试验 [J]. *高原气象*, 39(2): 378-392. Huang Shouyou, Xu Guoqiang. 2020. Influence of LMIE lightning data of FY-4A on cloud information initialization and numerical experiment [J]. *Plateau*

- Meteorology (in Chinese), 39 (2) : 378-392. doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00110
- 黄治勇, 王婧羽, 周文. 2021. 2020 年 7 月 4—8 日长江中游极端暴雨特征分析[J]. 暴雨灾害, 40(4):333-341. Huang Zhiyong, Wang Jingyu, Zhou Wen. 2021. Characteristics analysis of an extreme heavy rain event in the middle reaches of the Yangtse River from July 4 to 8 in 2020 [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 40(4):333-341. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2021.04.001
- 李国翠, 刘黎平, 连志鸾, 等. 2014. 利用雷达回波三维拼图资料识别雷暴大风统计研究 [J]. 气象学报, 72(1):168-181. Li Guocui, Liu Liping, Lian Zhiluan, et al. 2014. Statistical study of the identification of thunderstorm gale based on the radar 3D mosaic data. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 72(1):168-181. doi:10.11767/qxxb2014.003
- Liu Bo, Huo Juan, Lyu Daren, et al. 2021. Assessment of FY-4A and Himawari-8 cloud top height retrieval through comparison with ground-based millimeter radar at sites in Tibet and Beijing [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 38(8):1334-1350. doi: 10.1007/s00376-021-0337-2
- Lucas, B D, Kanade, T. 1981. An iterative image registration technique with an application to stereo vision [C]. In Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence, 2:674-679.
- Meinhardt-Llopis E, Sanchez J, Kondermann D. 2013. Horn-Schunck optical flow with a multi-scale strategy [J]. Image Processing On Line, 3(2013):151-172. doi:10.5201/ipol.2013.20
- 瞿建华, 张琅, 陆其峰, 等. 2019. 基于 ERA5 的快速辐射传输模式与 FY-4A 成像仪观测结果的偏差分析 [J]. 气象学报, 77(5):911-922. Qu Jianhua, Zhang Lang, Lu Qifeng, et al. 2019. Characterization of bias in FY-4A advanced geostationary radiation imager observations from ERA5 background simulations using RTTOV. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 77(5):911-922. doi:10.11676/qxxb2019.049
- Shao J L, Gao H, Wang X, et al. 2020. Application of Fengyun-4 satellite to flood disaster monitoring through a rapid multi-temporal synthesis approach [J]. J. Meteor. Res., 34(4), 720-731, doi: 10.1007/s13351-020-9184-9
- 孙婵, 徐国强. 2019. 闪电定位和雷达观测资料在云分析中的应用及数值试验 [J]. 大气科学, 43(1):131-141. Sun Chan, Xu Guoqiang. 2019. Application of lightning location and radar data in cloud analysis system and numerical experiments [J]. Chinese Journal of

Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(1):131-141.
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1804.17233

谭仲辉, 马烁, 韩丁, 等. 2019. 基于随机森林算法的 FY-4A 云底高度估算方法 [J]. 红外与毫米波学报, 38(3):381-388. Tan Zhonghui, Ma Shuo, Han Ding, et al. 2019. Estimation of cloud base height for FY-4A satellite based on random forest algorithm [J]. J. Infrared. Millim. Waves (in Chinese), 38(3):381-388. doi: 10.11972/j.issn.1001-9014.2019.03.020

田刚, 陈良华, 魏凡, 等. 2021. 基于光流法雷达外推的 2020 年长江致洪降水临近预报检验评估 [J]. 暴雨灾害, 40(3):316-325. Tian Gang, Chen Lianghua, Wei Fan, et al. 2021. Evaluation of flood-producing rainfall nowcasting based on radar extrapolation with the variational optical flow method in the Yangtze River Basin in 2020 [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 40(3):316-325. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2021.03.010

Woo Wang-chun, Wong Wai-kin. 2017. Operational application of optical flow techniques to radar-based rainfall nowcasting [J]. Atmosphere. 2017, 8(48):1-20.
doi:10.3390/atmos8030048

熊得祥, 谭三清, 张贵, 等. 2020. 基于 FY4 遥感数据的森林火灾判别研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 40(10): 42-50. Xiong Dexiang, Tan Sanqing, Zhang Gui, et al. 2020. Forest fire discrimination research based on FY-4A remote sensing data [J]. J. Central South University of Forestry & Technology (in Chinese), 40(10): 42-50.
doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2020.10.005

Yang J, Zhang Z Q, Wei C Y, et al. 2017. Introducing the new generation of chinese geostationary weather satellites, fengyun-4 [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 98(8): 1637-1658.
doi:10.1175/BAMS-D-16-0065.1

杨帅, 高守亭. 2007. 三维散度方程及其对暴雨系统的诊断分析 [J]. 大气科学, 31(1):168-179. Yang Shuai, Gao Shouting. 2007. Three-dimensional divergence equation and its diagnosis analysis to storm rainfall system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 31(1):168-179. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.01.17

于华英, 牛生杰, 梁明珠, 等. 2007. 一次强对流风暴含水量的雷达反演和数值模拟结果的对比分析 [J]. 高原气象, 26(5):1112-1118. Yu Huaying, Niu Shengjie, Liang Mingzhu, et al. 2007: Comparison analyses on the radar retrieved and simulated water content in a severe convective storm [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 26(5): 1112-1118.

- 祝善友, 李佳敏, 向嘉敏, 等. 2020. 基于 FY-4A AGRI 数据的气溶胶光学厚度反演研究 [J]. 地理与地理信息科学. 36(4): 26-32. Zhu Youshan, Li Jiamin, Xiang Jiamin, et al. 2020. Research on aerosol optical depth inversion based on FY-4A AGRI data [J]. Geography and Geo-Information Science (in Chinese). 36(4):26-32. doi:10.3969/j.issn.1672-0504.2020.04.005
- 左璇, 朱业玉, 郭鹏, 等. 2021. 郑州市短历时强降水变化特征及重现期研究 [J]. 气象与环境科学, 44(2):25—32. Zuo Xuan, Zhu Yeyu, Guo Peng, et al. 2021. Research on variation characteristics and return periods of short-time heavy precipitation in Zhengzhou [J]. Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese). 44(2):25 — 32. doi:10.16765/j.cnki.1673—7148.2021.02.004