

一次豫北暴雨的卫星云图特征分析

张鑫磊¹, 裴坤宁²

¹山西省气候中心, 山西 太原

²山西省气象科学研究所, 山西 太原

收稿日期: 2022年2月1日; 录用日期: 2022年2月24日; 发布日期: 2022年3月2日

摘要

本文利用葵花8号卫星资料结合数值模拟结果对2016年7月8日至9日在豫北发生的暴雨过程做了分析, 结果表明: 8日20:00山西省中部生成中尺度对流云团, 500 hPa高度上对应有冷涡及风切变, 切变线北侧冷平流加强, 南侧暖平流加强, 为云团东移提供动力条件; 后云团分裂成多个对流单体向东移动, 9日02:00移动至豫北西部, 对流云团逐渐膨胀增大, 暖平流变强, 地面至450 hPa有上升运动, 湿度较大, 中尺度系统开始发展; 9日05:00深对流云团完全覆盖豫北, 暖平流再次加强, 暴雨区上空850 hPa高度上出现强对流, 雨强达到最大; 9日08:00云团东移至豫北中东部, 变形场形成, 维持暖平流和对流运动, 而后分裂出新的对流单体东移至豫北, 维持至09:00; 10:00~14:00云团逐渐东移减弱, 变形场消失, 直至9日20:00中尺度系统消亡, 暴雨过程结束。

关键词

暴雨, 对流云团, 豫北, 中尺度

Analysis of Satellite Cloud Image Characteristics of a Rainstorm in Northern Henan

Xinlei Zhang¹, Kunning Pei²

¹Shanxi Climate Center, Taiyuan Shanxi

²Shanxi Institute of Meteorological Sciences, Taiyuan Shanxi

Received: Feb. 1st, 2022; accepted: Feb. 24th, 2022; published: Mar. 2nd, 2022

Abstract

Based on the data of Himawari-8 satellite and the numerical simulation results, the rainstorm

process in Northern Henan from July 8 to 9, 2016 was analyzed. A mesoscale convective cloud cluster was formed in the middle of Shanxi Province at 20:00 on the 8th. The convective cloud was a cloud system with cold vortex and wind shear at the height of 500 hPa. The cold advection on the north side of the shear line was strengthened, and the warm advection on the south side was strengthened, which provided dynamic conditions for the cloud cluster to move eastward. The cloud cluster split into several convective cells and moved eastward. At 02:00 on the 9th, it moved to the west of North Henan Province. The convective cloud group gradually expanded and increased, and the warm advection flow was strong. There was upward movement from the ground to 450 hPa, and the humidity was high, and the mesoscale system began to develop. At 05:00 on the 9th, the deep convective cloud cluster completely covered Northern Henan, and the warm advection strengthened again, even stronger convective cloud cluster appeared at 850 hPa height in the rainstorm area. At 08:00 on the 9th, the cloud cluster moved eastward to the central and eastern part of Northern Henan, and the deformation field formed to maintain the warm advection and convective movement, and then the new convective cell separated moved eastward to the north of Henan and maintained until 09:00; 10:00~14:00, the cloud group gradually moved eastward and weakened, and the deformation field disappeared until the mesoscale system disappeared at 20:00 on the 9th, and the rainstorm process ended.

Keywords

Rainstorm, Convective Clouds, North of Henan, Mesoscale

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

2016年7月8日夜至9日夜, 豫北发生暴雨过程, 由于日降水量和雨强大, 持续时间长, 强降水范围较小, 具有突发性, 难以预报, 因此豫北遭受较为严重的灾害。

针对暴雨系统的分析研究有很多, 贝耐芳和赵思雄[1]、毕宝贵等[2]、矫梅燕等[3]、廖移山等[4]利用多种观测资料分别就长江流域一次强暴雨、陕南暴雨系统、川东一次暴雨以及济南一次大暴雨过程进行了研究, 得出暴雨发生发展的特征及其成因。为了更细致地分析暴雨发生过程, 多位学者利用模拟结果对暴雨进行分析研究。王建捷和李泽椿[5]利用观测资料和高分辨率数值模拟结果, 对1998年6月16~17日的梅雨锋暴雨中尺度对流系统特征进行了分析研究, 发现本次梅雨锋暴雨发生在对流层中低层中尺度低压南侧的中尺度辐合线上。丁一汇[6]从中尺度气象学的角度对暴雨研究做了总结, 概括了中国暴雨发生的温湿和动力条件。寿绍文等[7]用模式输出资料, 根据湿位涡理论分析了暴雨过程中对流层低层的中尺度低涡及地面气旋发生发展的原因。Kumar等[8]利用WRF模拟结果诊断了发生在印度孟买一次强降水的发生原因。Pennelly等[9]比较了模式的不同微物理方案的模拟效果。

利用卫星云图可以识别不同的天气系统, 监测系统的发生发展, 对暴雨的发生过程有一定的揭示作用[10][11][12][13]。张夕迪和孙军[14]通过华北一次极端暴雨对比了葵花8号卫星和FY-2卫星数据, 发现葵花8号卫星从时间分辨率以及监测对流方面更有优势。王元兵和陈耀登[15]基于WRFDA资料同化系统实现了葵花8号三个水汽通道逐小时辐射率资料的快速更新对流尺度(3 km)同化, 使降水的模拟得到提高。燕亚菲等[16]采用葵花8号亮温资料估算降水强度, 发现H8卫星估算的降水可在台风降水的预警预报中提供指示作用。刘刘等[17]利用葵花8号卫星资料和地面降水观测资料进行定量降水估计, 发现可

以有效地改进站点密度小的区域的降水格点场的精度。魏建苏等[18]采用卫星云图分析和数值产品释用相结合的技术路线,建立了汛期强降水云团预警系统。石定朴等[19]发现 TBB 等值线分析方法能较细致地揭示 MCS 的形成过程,对 MCS 的发展有很好的指示意义。因此本文利用葵花 8 号卫星资料进行云图分析。

已有多位学者从不同的角度研究过豫北“7.09”暴雨[20][21],但利用卫星云图与数值模拟结果结合来分析降水动力机制的研究较少,因此为了解本次豫北暴雨的降水过程,我们从该角度来进行研究。

2. 暴雨及环流背景

2.1. 暴雨实况

2016 年 7 月 8 日晚至次日夜,豫北出现如图 1 所示的累积 24 小时降水量超过 100 mm 的暴雨,强降水主要发生在 9 日 03:00~10:00,9 日 04:00~05:00 是暴雨最集中发生的时间段。

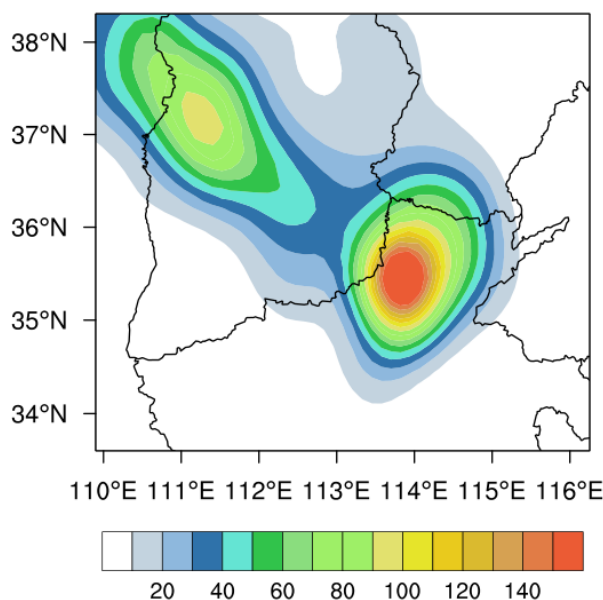


Figure 1. Total Precipitation of 24 h from 20:00 on 8th to 20:00 on 9th July 2016 (shaded, units: mm)

图 1. 2016 年 7 月 8 日 20:00~9 日 20:00 24 小时降水量(填充色,单位: mm)

2.2. 大尺度环流背景

本次暴雨发生在变形场的背景下。图 2 给出了 2016 年 7 月 9 日 08:00 700 hPa 的风场。可见,在豫北的东北方有位于海上的副热带高压,东南方是台风“尼伯特”,西北方是位于河套地区的低压,西南方是位于广东西部的高压[22]。图中红线为膨胀轴,蓝线为压缩轴,沿膨胀轴有强烈的气流辐合,且膨胀轴沿豫北分布。豫北地区临近太行山,太行山能够阻挡来自西南方向的水汽,使水汽聚集在豫北,为豫北降水提供充足的水汽,在有利的天气条件下生成暴雨。

3. 资料

本文实况降水、高度场、8 日 20:00 风场采用中国自动站站点观测资料,环流背景风场采用 NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 的 6 h 一次的再分析资料,卫星云图采用葵花 8 号(以下简称 H8) L1 级的中心波长为 10.4 μm 的第 13

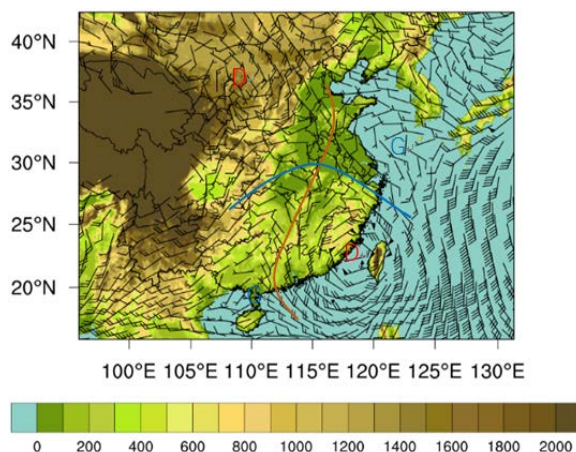


Figure 2. Wind field (vectors, units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and topographic height (shaded, units: m) at 700 hPa at 08:00 on July 9 2016. (The red line is the expansion axis and the blue line is the compression axis of deformation field, G is the high pressure center, D is the low pressure center)

图 2. 2016 年 7 月 9 日 08:00 700 hPa 的风场(矢量, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)与地形高度(填色, 单位: m) (红线为变形场膨胀轴, 蓝线为变形场压缩轴, G 为高压中心, D 为低压中心)

通道数据, 空间分辨率是 5 km, 时间分辨率是 10 分钟。模式采用 NCEP 的 2016 年 7 月 8 日 20:00 至 9 日 20:00 $1^\circ \times 1^\circ$ 逐 6 h 气象再分析资料, 利用 WRFV3.8 进行数值模拟, 模拟采用 3 层嵌套网格, 微物理过程方案是 WSM6, 积云参数化方案是 Kain-Fritsch, 长波辐射方案是 RRTM, 短波辐射方案是 Dudhia, 近地面方案是 QNSE, 边界层方案是 QNSE-EDMF。

4. 降水模拟结果

图 3 是 2016 年 7 月 8 日 20:00~9 日 20:00 24 小时模拟降水量分布, 在豫北地区有大于 150 mm 的暴

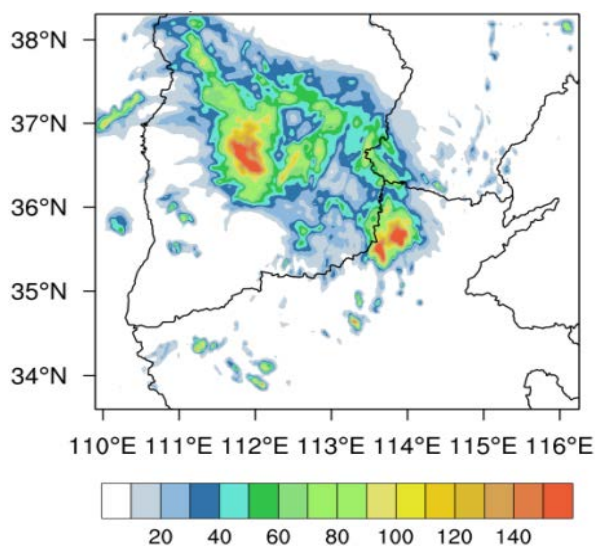


Figure 3. Total simulated precipitation of 24 h from 20:00 on 8th to 20:00 on 9th July 2016 (shaded, units: mm)

图 3. 2016 年 7 月 8 日 20:00~9 日 20:00 24 小时模拟降水量(填色, 单位: mm)

雨出现, 尽管豫北地区降水大值范围较实况略小, 但其雨带走向、落区位置、雨量大小与图 1 的实况降水大致相似, 说明模拟效果较好, 故可用模拟结果进行暴雨的诊断。

5. 云图分析

5.1. 云团的动力机制

根据国家气象中心业务检测深对流云团的 TBB 值标准是小于 -32°C [23], 本文以云顶 TBB 值小于等于 -32°C 作为出现对流云团的标准。图 4 是 2016 年 7 月 8 日 20:00 H8 卫星红外云图、风场以及高度场, 图 4(a)、图 4(b)分别是 500 hPa 和 700 hPa。由图 4 可知该时刻在山西省中部有呈西北-东南走向的 TBB 为 -52°C 的深对流云团, 说明山西省中部上空约 4~5 km 高度上有中高层积云存在。图 4(a)显示 8 日 20:00 在 500 hPa 高度上有冷涡出现, 与深对流云团出现的位置相对应, 且存在明显的风切变, 切变线北侧是东南风, 南侧是西南风。图 4(b)显示 700 hPa 高度上冷涡和切变线消失, 切变线两侧风向均转变为东南风。从 700 hPa 到 500 hPa 切变线北侧风向发生逆时针变化, 使北侧冷平流加强; 切变线南侧风向发生顺时针变化, 使南侧暖平流加强, 有利于降水的产生, 同时也说明山西省中部上空的深对流云团是切变线云系, 冷暖平流的加强为切变线云系东移产生降水提供了动力机制。

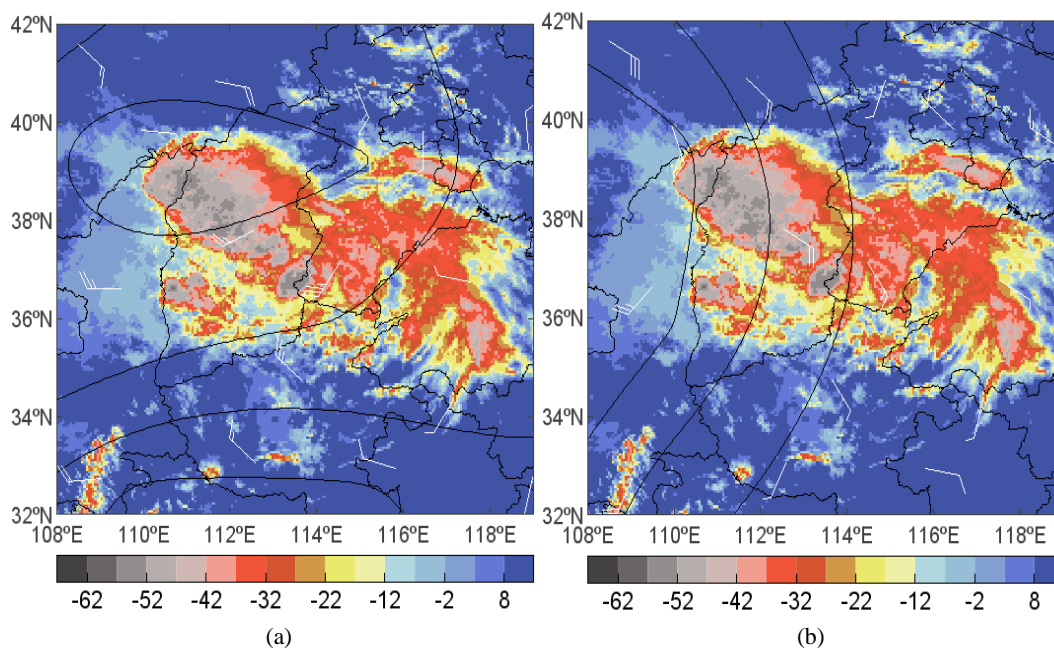


Figure 4. Infrared cloud picture of H8 satellite (shaded, unit: $^{\circ}\text{C}$), wind field (vector, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and potential height (contour, unit: dagpm) at 08:00 on July 9 2016; a is 500 hPa, b is 700 hPa

图 4. 2016 年 7 月 8 日 20:00 H8 卫星红外云图(填色, 单位: $^{\circ}\text{C}$)、风场(矢量, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)以及位势高度线(等值线, 单位: dagpm); a 为 500 hPa, b 为 700 hPa

为了更细致地研究降水集中发生时段温度平流和水汽情况, 故对 9 日 02:00~08:00 的模式模拟结果进行分析研究。

图 5(a)是 7 月 9 日 02:00 H8 卫星红外云图, 从图上可以看出深对流云团移动至豫北西部地区。图 6(a)、图 6(b)是模式模拟的 9 日 02:00 在 500 hPa 和 700 hPa 高度上的地转风, 由图可知 9 日 02:00 豫北区域在 500 hPa 和 700 hPa 上均有风切变, 且切变线两侧地转风随着高度均发生了顺时针旋转, 即有暖平流出现, 对应向东移动的切变线云系。图 7(a)是沿暴雨中心 35.5°N 的模拟风场的剖面图, 由图知 9 日 02:00 豫北

暴雨区 $113^{\circ}\text{E}\sim 114^{\circ}\text{E}$ 地面至 450 hPa 高空均有强烈的上升运动, 为暴雨的发生提供动力条件。同时, 根据图 6(a)、图 6(b) 中湿度混合比的分布, 可知 9 日 02:00 豫北地区在 500 hPa 高度上湿度混合比是 $0.6\text{ k}\cdot\text{kg}^{-1}$, 700 hPa 高度上豫北大部分地区湿度混合比大于 $0.8\text{ k}\cdot\text{kg}^{-1}$, 豫北西部对流云团所对应的位置是 $1\text{ k}\cdot\text{kg}^{-1}$, 湿度均较大。充足的水汽和上升运动为降水提供了条件。

图 5(b) 是 7 月 9 日 05:00 H8 卫星红外云图, 可以看出 9 日 05:00 深对流云团继续向东移动, 整个豫北地区被深对流云团覆盖, 且出现 TBB 值更低即对流更强的云团。从图 6(c)、图 6(d) 的 9 日 05:00 地转风在 500 hPa 和 700 hPa 高度上的分布可以看出, 豫北地区在 500 hPa 和 700 hPa 风向与 9 日 02:00 相比变化很小, 切变线两侧地转风风向随着高度有顺时针变化, 即暖平流加强, 对应切变线云系向东移动并覆盖整个豫北。结合图 7(b) 显示 9 日 05:00 暴雨区地面至 850 hPa 为上升运动, 高空至 850 hPa 为强烈的下沉运动, 说明存在强对流, 而降水最强的时段发生在 9 日 02:00~05:00。另外, 结合图 6(c)、图 6(d) 的 9 日 05:00 湿度混合比的分布, 发现豫北在 500 hPa 高度上湿度混合比维持 $0.6\text{ k}\cdot\text{kg}^{-1}$, 700 hPa 高度上豫北部分地区湿度混合比增大, 是 $1.2\text{ k}\cdot\text{kg}^{-1}$, 且 500 hPa 和 700 hPa 湿度混合比大值范围扩大。

图 5(c) 是 7 月 9 日 08:00 H8 卫星红外云图, 从图上可以看出 9 日 08:00 大多 TBB 为 -52°C 的深对流云团已东移至豫北中东部, 小部分对流云团在豫北暴雨区。由图 6(e)、图 6(f) 的 9 日 08:00 分别在 500 hPa 和 700 hPa 高度上的地转风可以看出, 9 日 08:00 豫北暴雨区地转风风向变化不大, 且风切变仍存在, 维持暖平流, 暴雨区维持 9 日 05:00 的强对流运动(图 7(c))。根据图 6(e)、图 6(f) 中湿度混合比的分布, 可知 9 日 08:00 豫北在 500 hPa 高度上湿度混合比为 $0.6\text{ k}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的地区范围减小, 700 hPa 高度上豫北大部分地区维持 $1.2\text{ k}\cdot\text{kg}^{-1}$, 豫北东部湿度混合比增大, 由 9 日 02:00、05:00 的 $0.8\text{ k}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增大至 $1\text{ k}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。从云图上看豫北暴雨区 9 日 08:00 相对 05:00 对流减弱, 深对流云团已大多东移至豫北中东部, 但由于 9 日 08:00 变形场形成[24][25], 膨胀轴位于豫北, 为豫北带来充足的水汽条件, 因此 9 日 08:00 豫北地区湿度混合比没有减小。

从 9 日 02:00、05:00 到 08:00, 可以看出随着切变线云团的东移, 在降水集中发生的时段, 豫北地区 700 hPa 和 500 hPa 上空有风切变, 均保持上升运动, 且湿度均较大, 有利于强降水的产生和维持。9 日 02 时对流云团未完全覆盖豫北区域, 地面至 450 hPa 为一致的上升气流; 05 时强对流云团完全覆盖豫北地区, 且覆盖暴雨区的云团对流更强, 暴雨区在垂直剖面上显示 850 hPa 上有强对流发生, 此刻降水量累计达到最大; 08 时随着强对流云团的东移, 豫北地区对流减弱, 但由于变形场作用下水汽的聚集致使降水过程继续发生。

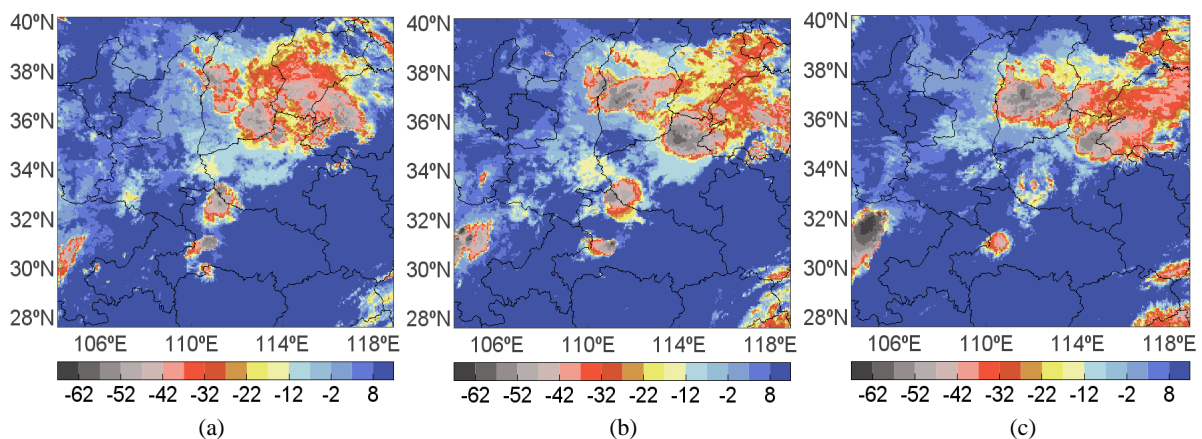


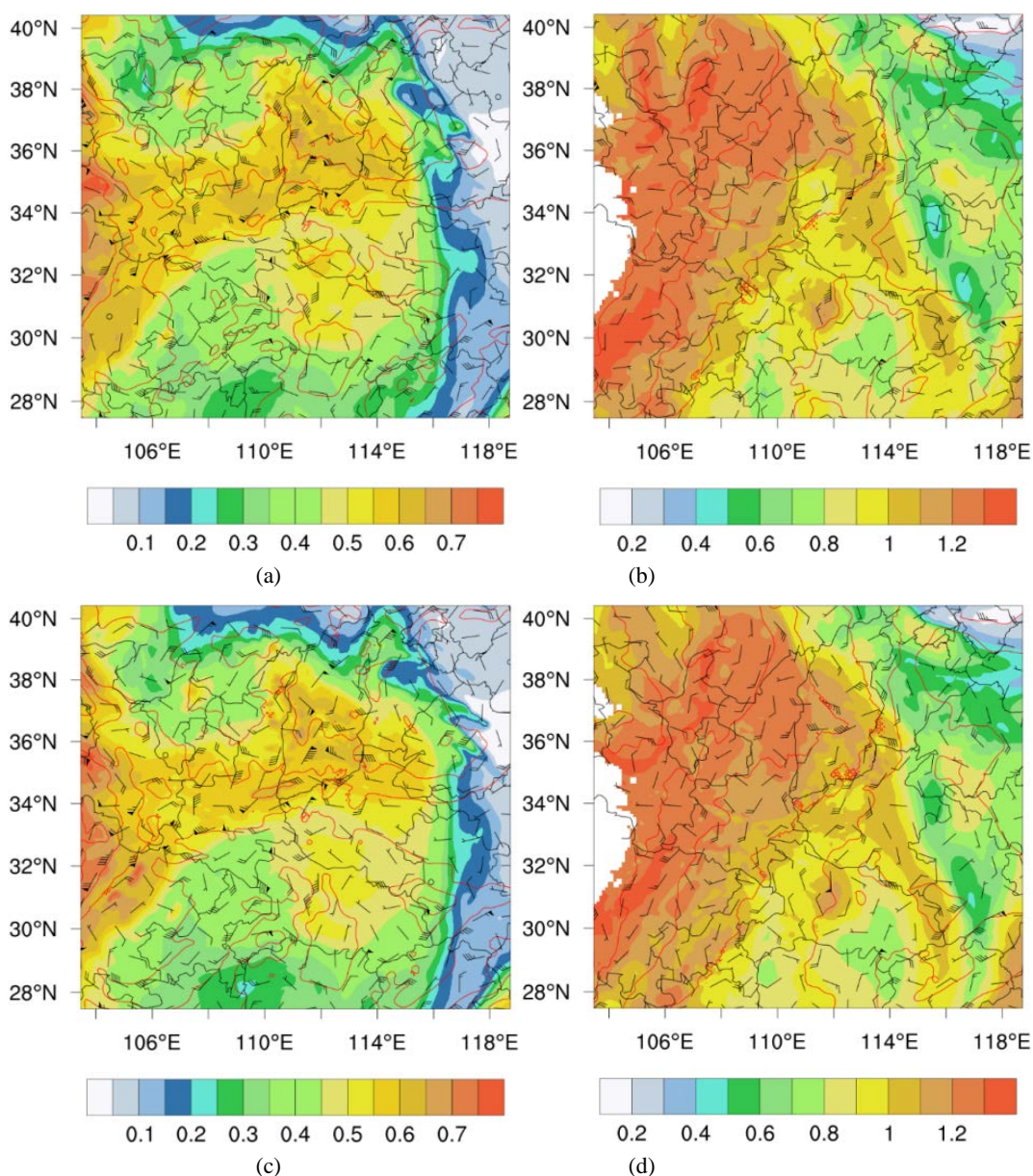
Figure 5. Infrared cloud picture of H8 satellite (shaded, unit: $^{\circ}\text{C}$) on July 9 2016; a is 02:00, b is 05:00, c is 08:00

图 5. 2016 年 7 月 9 日 H8 卫星红外云图(填色, 单位: $^{\circ}\text{C}$); a 为 02:00、b 为 05:00、c 为 08:00

5.2. 暴雨区云图变化分析

为了更详细地了解切变线云系在东移至豫北过程中的变化, 分析了9日02:00~20:00的H8卫星红外云图。

图8是7月9日02:00~20:00的H8卫星红外云图, 由图可以看出如5.1所述9日02:00豫北和太行山区域TBB值为 -42°C , 豫北部分区域甚至为 -52°C 。9日02:00到03:50对流云团向东移动, 太行山区域的对流云团逐渐向东并入豫北, 豫北地区TBB值为 -42°C 的对流云团范围逐渐增大, 由分布在豫北的西部逐渐发展到整个豫北。9日04:00豫北大部分区域维持 -52°C 的TBB值, 小部分地区为 -62°C , 9日04:10 TBB值为 -62°C 的深对流云团东移, 对应豫北暴雨中心的位置。9日04:20豫北TBB值为 -62°C 的深对流云团减弱消失, 从04:20到04:50豫北维持 -52°C 的TBB值。9日05:00豫北部分区域再次出现TBB值为 -62°C 的对流云团, 但维持时间较短, 9日05:10该深对流云团减弱, 继续维持 -52°C 的TBB值。



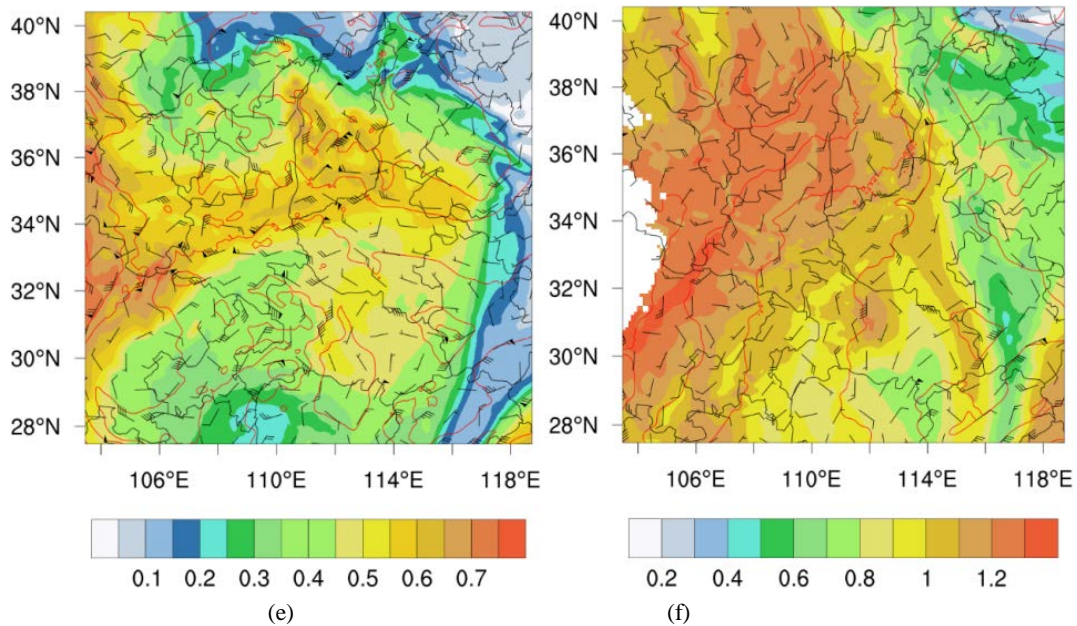


Figure 6. Humidity mixing ratio (shaded, unit: $\text{k}\cdot\text{kg}^{-1}$), geostrophic wind vectors (vector, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and geopotential heights (contour, unit: gpm) at 500 hPa and 700 hPa at 02:00, 05:00, 08:00 on July 9 2016; (a) (b) is 02:00, (c) (d) is 05:00, (e) (f) is 08:00, (a) (c) (e) is 500 hPa, (b) (d) (f) is 700 hPa

图 6. 2016 年 7 月 9 日 02:00、05:00、08:00 在 500 hPa 和 700 hPa 高度上的湿度混合比(填色, 单位: $\text{k}\cdot\text{kg}^{-1}$)、地转风(矢量, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)以及位势高度(等值线, 单位: gpm); (a) (b)为 02:00, (c) (d)为 05:00, (e) (f)为 08:00, (a) (c) (e) 为 500 hPa, (b) (d) (f)为 700 hPa

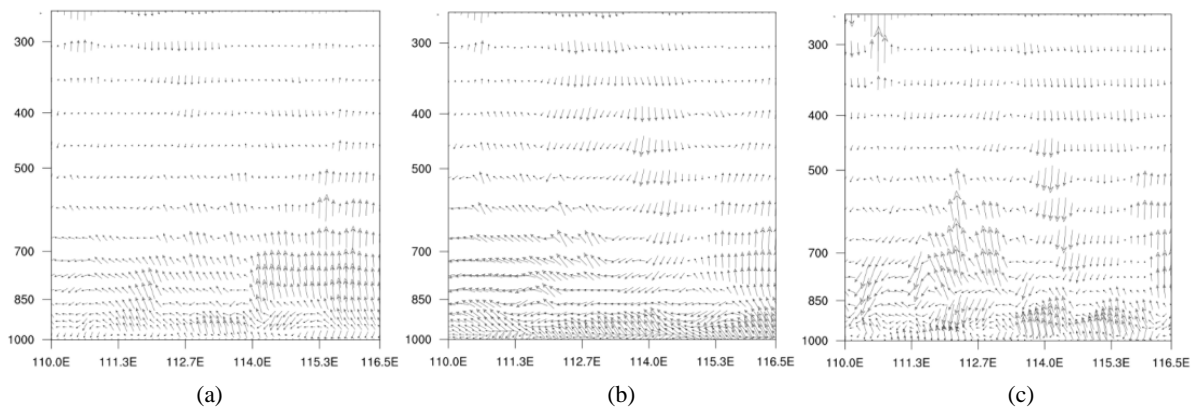
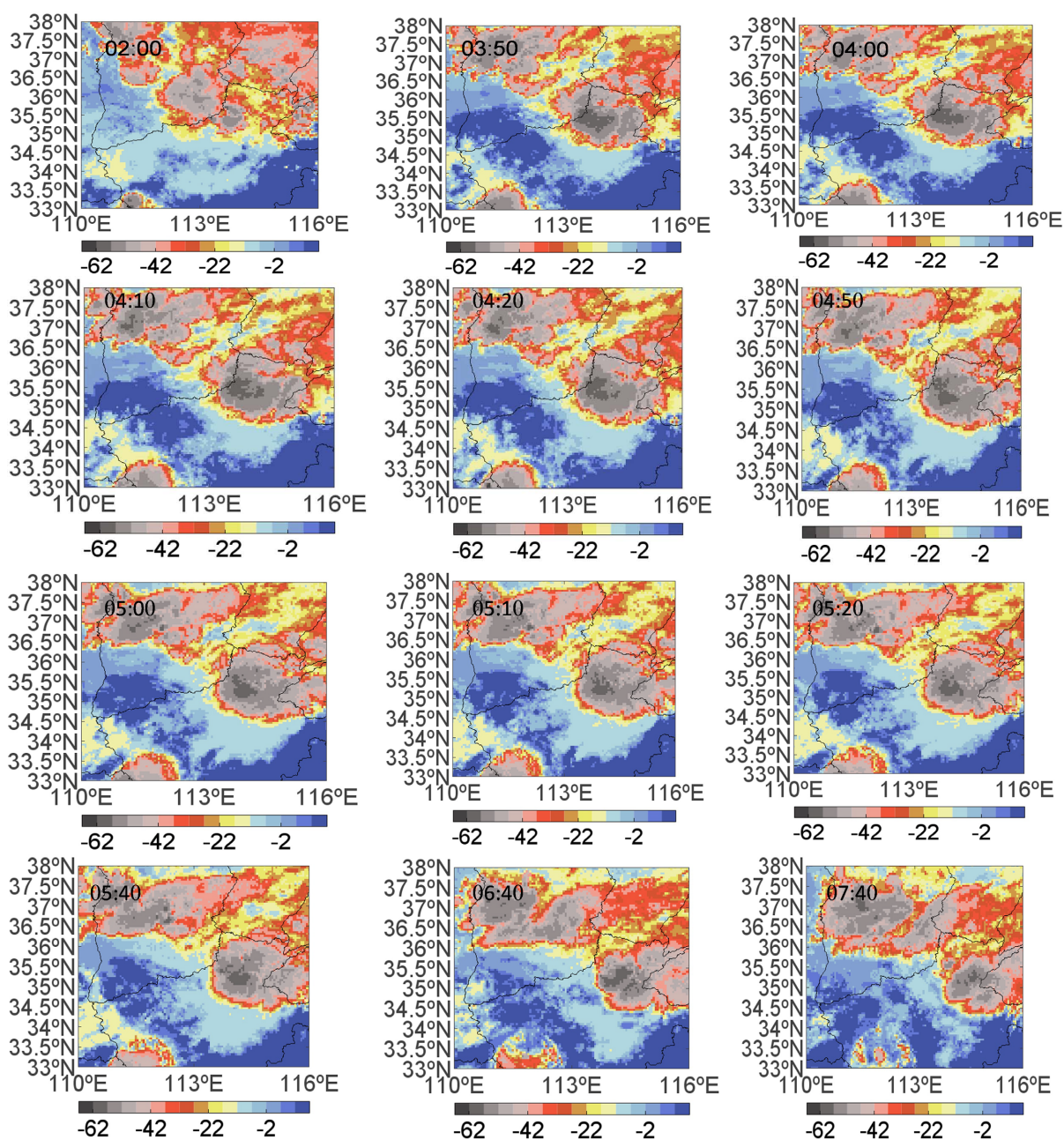


Figure 7. Wind profile along 35.5°N at 02:00, 05:00 and 08:00 on July 9, 2016 (vector, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); (a) is 02:00, (b) is 05:00, (c) is 08:00

图 7. 2016 年 7 月 9 日 02:00、05:00、08:00 沿 35.5°N 的模拟风场剖面图(矢量, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); (a)为 02:00, (b)为 05:00, (c)为 08:00

9 日 05:20 强对流再次减弱, TBB 值为 -52°C 的区域范围明显减小, 至 9 日 05:40 豫北 TBB 值已减小为 -42°C 。而后, 对流继续减弱, 至 9 日 06:40 豫北 TBB 值为 -32°C , 后对流云团逐渐东移消散, 9 日 07:20 豫北暴雨中心仍存在 TBB 值为 -32°C 的对流云团, 维持至 9 日 08:00, 此时山西省中部又一对流云团逐渐移动至豫北。此后, 该对流云团继续东移, 9 日 09:00 豫北对流加强, 部分区域出现 TBB 值为 -52°C 的对流云团, 9 日 10:00 豫北强对流范围减小, 但仍存在 TBB 值为 -52°C 的对流云团。14:00 豫北对流减弱, 大部分区域 TBB 值为 -32°C 。17:00 豫北部分地区仍存在 TBB 值为 -32°C 的对流云团, 20:00 豫北区域对流云团完全消失, 过程结束。

在分析的过程中, 发现 8 日 20:00 中尺度云团在山西中部生成, 后分裂成多个对流单体向东移动, 9 日 02:00 移动到豫北西部, 9 日 02:00~03:50 位于豫北西部和太行山区域的对流云团不断东移, 致使豫北 TBB 值不断减小, 对流云团逐渐膨胀增大, 这是中尺度系统的发展阶段。9 日 04:00~05:10 深对流云团维持在豫北, 有利于暴雨区长时间发生强降水。在维持强对流的过程中, 小部分区域出现更强的对流云团, 致使暴雨中心出现, 雨强达到最大。9 日 05:20 深对流云团开始东移, 强对流减弱, 但豫北仍存在对流云团, 维持至 9 日 08:00。9 日 08:00 时分裂的另一对流云团出现在豫北, 09:00 云团东移的过程中, 山西中部和东部的深对流云团合并, 云团再次膨胀增大, 并出现在豫北上空, 使对流加强, 这可能与变形场的作用有关, 这是中尺度系统的成熟阶段。10:00~14:00 豫北对流减弱。后云团逐渐东移减弱, 变形场逐渐消失, 直至 9 日 20:00 过程结束, 这是中尺度系统的消亡阶段。



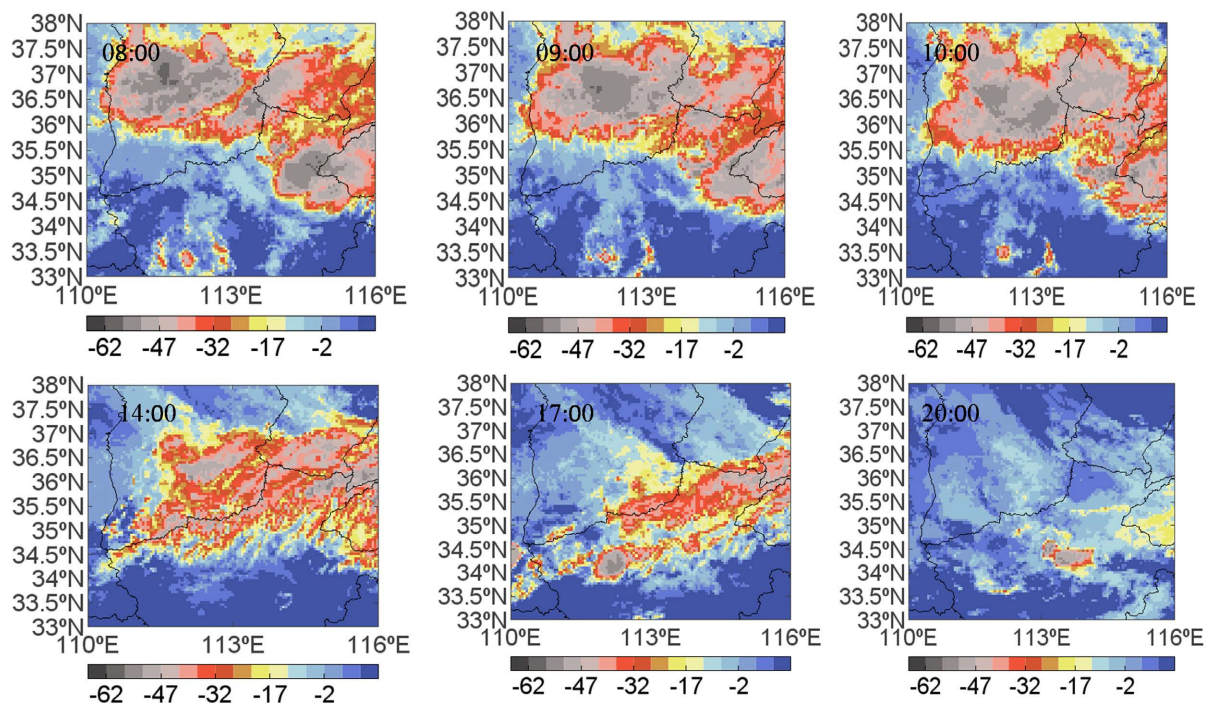


Figure 8. Infrared cloud picture of H8 satellite (shaded, unit: °C) from 02:00 to 20:00 on 9 July 2016

图 8. 2016 年 7 月 9 日 02:00~20:00 H8 卫星红外云图(填色, 单位: °C)

6. 结论与思考

1) 8 日 20:00 山西中部有深对流云团出现, 对应 500 hPa 高度上有冷涡出现, 且存在风切变, 700 hPa 高度上冷涡和切变线消失, 从低空到中空切变线北侧风向发生逆时针变化, 北侧冷平流加强; 切变线南侧风向发生顺时针变化, 南侧暖平流加强, 有利于降水的产生, 为云团东移提供动力条件。

2) 9 日 02:00 东南走向的深对流云团移动至豫西北部, 在 500 hPa 和 700 hPa 上均有风切变, 切变线两侧地转风发生了顺时针旋转, 暖平流变强, 暴雨区地面至 450 hPa 有一致的上升运动, 且湿度均较大; 9 日 05:00 深对流云团继续东移, 对流加强, 暖平流加强, 深对流云团完全覆盖豫北, 暴雨区 850 hPa 出现强对流, 此时降水强度达到最大; 9 日 08:00 深对流云团东移至豫北中东部, 暴雨区对流减弱, 地转风风向变化不大, 且风切变仍存在, 维持暖平流, 此时变形场的形成为豫北带来充足的水汽条件, 暴雨区维持对流活动。充足的水汽和上升运动为降水提供了条件。

3) 8 日 20:00 是中尺度系统的生成阶段; 9 日 02:00~03:50 是发展阶段; 9 日 04:00~05:10 深对流云团维持在豫北, 小部分区域出现更强的对流云团, 致使暴雨中心出现, 雨强达到最大, 后云团开始东移, 至 09:00, 是中尺度系统的成熟阶段。10:00~20:00 过程结束, 是中尺度系统的消亡阶段。

通过云图和天气分析结合研究本次中尺度暴雨, 能够了解到此次暴雨的发生发展。若从云的微物理特征方面分析此次暴雨, 或许能够有更细致深入的理解, 有待进一步学习研究。

基金项目

山西省气象局青年基金项目(SXKQNDW20217151, SXKQNTQ20217142)。

参考文献

- [1] 贝耐芳, 赵思雄. 1998 年“二度梅”期间突发强暴雨系统的中尺度分析[J]. 大气科学, 2002, 26(4): 526-540.

- [2] 毕宝贵, 刘月巍, 李泽椿. 2002年6月8-9日陕南大暴雨数值模拟研究[J]. 大气科学, 2004, 28(5): 747-761.
- [3] 矫梅燕, 李川, 李延香. 一次川东大暴雨过程的中尺度分析[J]. 应用气象学报, 2005, 16(5): 699-704.
- [4] 廖移山, 李俊, 王晓芳, 崔春光, 李武阶. 2007年7月18日济南大暴雨的 β 中尺度分析[J]. 气象学报, 2010, 68(6): 944-956.
- [5] 王建捷, 李泽椿. 1998年一次梅雨锋暴雨中尺度对流系统的模拟与诊断分析[J]. 气象学报, 2002(2): 146-155.
- [6] 丁一汇. 暴雨和中尺度气象学问题[J]. 气象学报, 1994, 52(3): 274-284.
- [7] 寿绍文, 李耀辉, 范可. 暴雨中尺度气旋发展的等熵面位涡分析[J]. 气象学报, 2001, 59(5): 560-567.
- [8] Kumar, A., Dudhia, J., Rotunno, R., Niyogi, D. and Mohanty, U.C. (2010) Analysis of the 26 July 2005 Heavy Rain Event over Mumbai, India Using the Weather Research and Forecasting (WRF) Model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **134**, 1897-1910. <https://doi.org/10.1002/qj.325>
- [9] Pennelly, C., Reuter, G. and Flesch, T. (2014) Verification of the WRF Model for Simulating Heavy Precipitation in Alberta. *Atmospheric Research*, **135-136**, 172-192. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.09.004>
- [10] 徐双柱, 王平, 车钦. “6.18”湖北省大暴雨卫星云图分析[J]. 灾害学, 2013(2): 81-85.
- [11] 李海红, 戴升, 史津梅, 裴少阳. 青藏高原东部大到暴雨卫星云图演变特征[J]. 气象, 2000, 26(10): 53-55.
- [12] 陈永旭, 梁希豪, 曾祥耀. 卫星云图在暴雨预报中的应用[J]. 现代农业科技, 2011(17): 44+51.
- [13] 寿亦萱, 张颖超, 赵忠明, 励申申, 寿绍文. 暴雨过程的卫星云图纹理特征研究[J]. 大气科学学报, 2005, 28(3): 337-343.
- [14] 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): 1245-1254.
- [15] 王元兵, 陈耀登. 葵花8号辐射率资料在对流尺度数值预报中的同化研究[C]//第35届中国气象学会年会 S9 卫星资料同化. 北京: 中国气象学会, 2018: 64.
- [16] 燕亚菲, 谈建国, 崔林丽, 岳彩军, 郭巍, 刘冬韡. 利用葵花8号(Himawari-8)高时空分辨率的红外亮温资料估计台风莫兰蒂的短时强降水及其演变[J]. 气象, 2019, 45(3): 318-329.
- [17] 刘刘, 何险峰, 刘德. 卫星云图资料在降水量客观分析中的应用试验[J]. 高原山地气象研究, 2017, 37(1): 80-83.
- [18] 魏建苏, 严明良, 樊永富, 尹东屏, 沈树勤. 卫星云图和数值产品结合的汛期强降水预警系统[J]. 气象科学, 2001, 21(3): 355-362.
- [19] 石定朴, 朱文琴, 王洪庆, 陶祖钰, 顾雷. 中尺度对流系统红外云图云顶黑体温度的分析[J]. 气象学报, 1996, 54(5): 600-611.
- [20] 顾佳佳, 武威. 2016年“7.9”豫北特大暴雨过程的中尺度特征分析[J]. 暴雨灾害, 2017, 36(5): 440-452.
- [21] 曹巧莲, 马旭林, 宋方超, 俞宙, 明亮, 王文平. “7.09”山西暴雨数值模拟与诊断分析[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2016, 38(4): 575-585.
- [22] 裴坤宁, 王磊, 李谢辉, 陈得圆. 一次变形场背景下的暴雨位涡诊断研究[J]. 高原气象, 2019(6): 1221-1228.
- [23] 郑永光, 林隐静, 朱文剑, 蓝渝, 唐文苑, 张小玲, 等. 强对流天气综合监测业务系统建设[J]. 气象, 2013(2): 234-240.
- [24] 姜勇强, 王元, 吕梅, 周祖刚, 罗坚. 2010年6月中下旬南方暴雨过程变形场作用分析[J]. 气象科学, 2013, 33(2): 168-177.
- [25] 姜勇强. 风场扰动激发中尺度天气系统的动力机制研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京大学, 2011.