

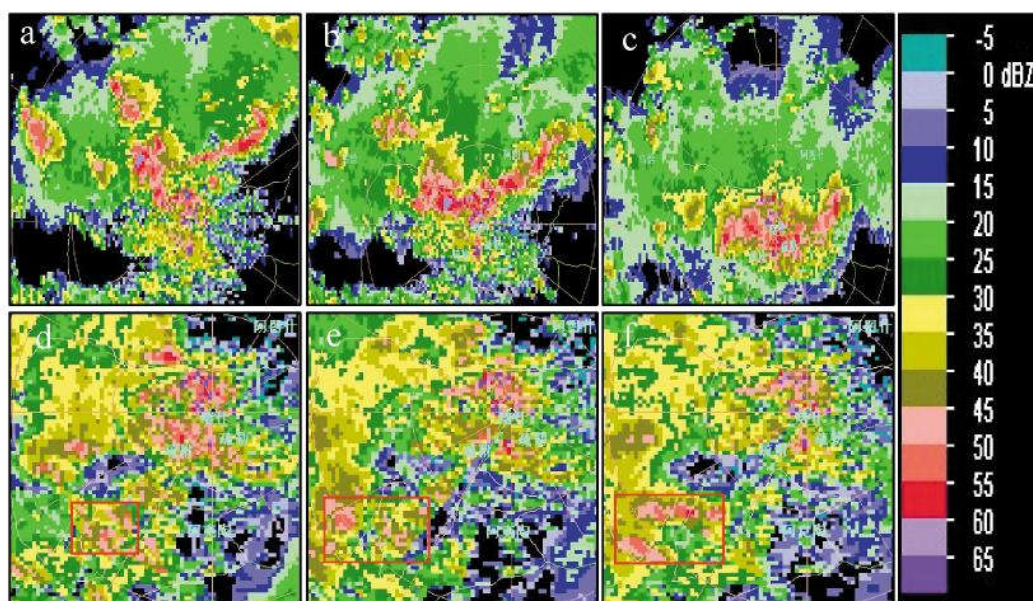


图5 2020年4月22日20:54(a)、21:23(b)、22:23(c)和2021年6月15日16:21(d)、17:28(e)、18:19(f)喀什雷达组合反射率因子(单位: dBZ)

强单体合并,乌帕尔乡位于强度为58 dBZ的回波中心,强回波随后分离为南、北两个单体,南部强单体仍位于乌帕尔乡,58 dBZ的强回波持续9个体扫,造成乌帕尔7村11.8 mm/h短时强降水。18:19(图5f)强回波范围逐渐减小,强度维持在50~53 dBZ,暴雨中心小时降水为4.3 mm。

两次暴雨过程对流单体回波强度均>50 dBZ,强回波稳定少动且中心强度长时间保持大值是造成两次短时暴雨的主要原因。但造成强降水的风暴强度不同,“过程1”由持续增强并持续时间长的超级单体风暴造成,“过程2”由不断新生激发的分散型普通单体风暴造成。

4.3.2 径向速度

“过程1”中,4月22日21:06,喀什雷达1.5°仰角径向速度图上(图6a),喀什西北方向30~90 km为明显的速度辐合区,21:23(图6b)超级单体风暴形成时1.5°~4.3°仰角的径向速度图上均出现明显的中小尺度辐合、旋转特性,径向速度垂直剖面图上表现为中低层辐合、高层辐散特性,有利于风暴单体的维持和加强,维持到21:53,在21:47的1.5°仰角上最明显(图6c)。过程中喀什西北、偏北、东北方向有风向辐合,辐合区位置与暴雨落区有很好的对应关系。

“过程2”中,6月15日16:01—17:06,喀什雷达1.5°~3.4°仰角径向速度图上(图6d、6e),喀什雷达站偏西、西南方向90 km范围内有明显的速度辐合区,其中2.4°仰角上不仅有辐合特征,还具有旋转

特征。17:17—17:56在1.5°~3.4°仰角径向速度图上(图6f),暴雨区有大片的正速度区中包含着小片负速度区,即类似于“逆风区”,附近存在明显的风的径向辐合,2.4°~3.4°仰角上这种辐合特征维持8个体扫,说明上升运动强,但更高的仰角辐散特征不明显。“逆风区”的长时间维持有利于上升气流的维持和增强。

两次过程的径向速度风场都具有辐合、旋转特征,此特征出现的时间、位置与暴雨出现时间、位置较吻合。不同点是“过程1”径向速度风场表现为明显的超级单体特征,中低层辐合、高层辐散,而“过程2”只有中低层风场辐合,高层辐散不明显。“过程2”出现逆风区,维持时间长、上升运动更强,这也是持续2 h出现短时强降水的重要原因。

4.3.3 垂直累积液态含水量

“过程1”中,2020年4月22日20:30雷达站西北方强回波单体所在范围出现大片 $VIL > 13 \text{ kg/m}^2$ 的区域,其中最强单体 VIL 为 38 kg/m^2 ,随后单体风暴发展为超级单体风暴,21:29,飑线最西端位于疏附县境内的单体 VIL 达 43 kg/m^2 (图7a),21:59,又增大至 48 kg/m^2 ,随后回波减弱, VIL 随之减小(图7b)。疏附县短时暴雨出现期间的9个体扫 VIL 维持在 40 kg/m^2 以上。疏勒县小冰雹出现前的22:17—22:23, VIL 由 3 kg/m^2 跃增至 18 kg/m^2 ,22:34,跃增至 28 kg/m^2 , VIL 跃增有利于雹粒的形成,对冰雹预报有指示意义(图7c)。

“过程2”中,2021年6月15日16:01喀什雷达

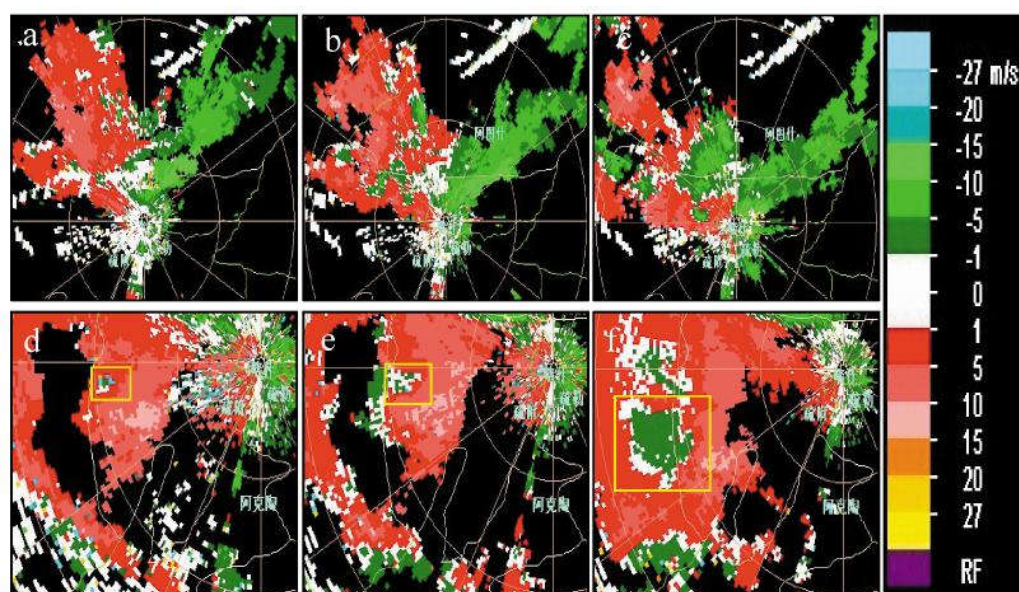


图6 2020年4月22日21:06(a)、21:23(b)、22:47(c)和2021年6月15日16:49(d)、16:49(e)、17:45(f)喀什雷达径向速度
(a、b、c、d为1.5°仰角,e、f为2.4°仰角,单位:m/s)

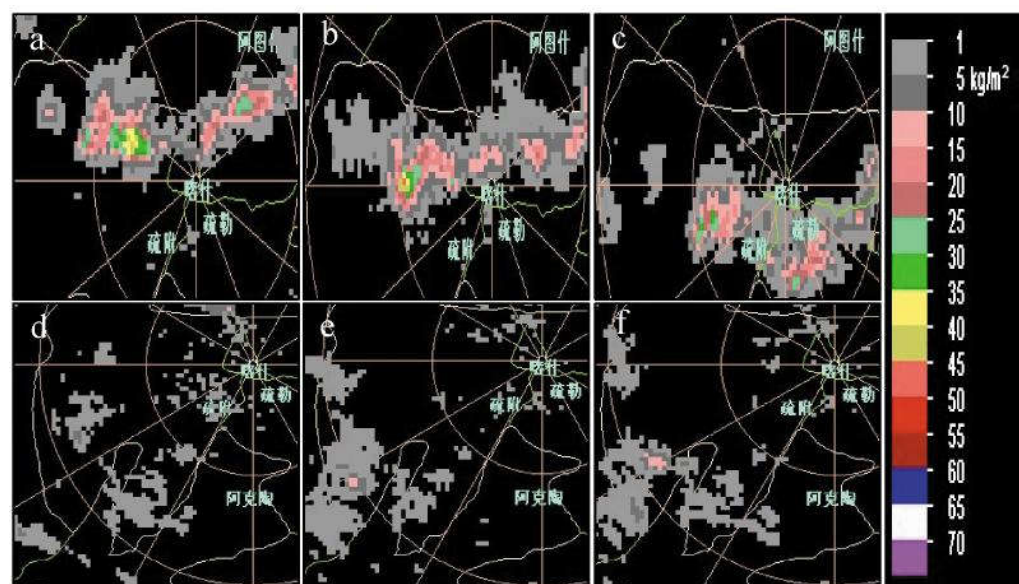


图7 4月22日21:29(a)、21:59(b)、22:34(c)和6月15日16:21(d)、17:28(e)、17:51(f)
喀什雷达垂直累积液态含水量VIL(单位:kg/m²)

站西南方向60 km的疏附县境内分析“过程2”的VIL演变(图7d、7e、7f),出现 $VIL > 0$ 的区域,16:21,暴雨落区北部强单体所在区域VIL达 13 kg/m^2 ,随后减小至 8 kg/m^2 ,在17:28—17:56的6个体扫时间暴雨中心VIL维持 13 kg/m^2 ,这与长时间维持的对流单体反射率有较好的对应关系。

两次过程在暴雨出现期间VIL长时间保持较大值,与强降水出现时间有较好的对应关系。“过程1”VIL值明显大于“过程2”,冰雹出现前有VIL的跃增。

5 结论与讨论

通过对比分析南疆西部两次极端暴雨过程的环流背景、环境参数以及中尺度对流系统演变特征,得出以下结论:

(1)两次极端暴雨发生期间南疆西部均处在200 hPa强辐散区内;500 hPa为有利于南疆西部暴雨的“东西夹攻”形势,低层辐合切变和偏东急流为对流触发系统。不同点是:两次过程100 hPa南亚高压的位置不同,“过程1”中南亚高压呈东部型,“过程2”中呈双体型;中亚低涡的强度和维持时间不

同,“过程2”明显强于“过程1”,且维持时间更长。

(2)两次过程短时强降水前大气均处于“上干冷、下暖湿”的不稳定层结,并不稳定能量的累积。但“过程1”CAPE明显大于“过程2”,各对流参数更有利于强对流的发生。

(3)两次强降水均由 β 中尺度对流云团产生,强降水出现在对流云团前沿TBB梯度最大处或者TBB低值区。“过程1”的中尺度对流云团较“过程2”范围大、发展成熟、TBB强度大、生命史长、降水局地性强;“过程2”中对流云团演变迅速,TBB变化明显、生命史短,预报难度更大。

(4)雷达回波上“过程1”中短时强降水是由超级单体风暴造成,而“过程2”是由普通单体风暴造成。径向速度风场都具有辐合、旋转特征,“过程2”长时间维持的“逆风区”为强降水的持续提供了有利的环境条件。“过程1”的VIL值明显大于“过程2”,且有VIL的跃增,对冰雹预报有指示意义。

参考文献:

- [1] 张家宝,邓子凤.新疆降水概论[M].北京:气象出版社,1987.
- [2] 林建,杨贵名.近30年中国暴雨时空特征分析[J].气象,2014,40(7):816-826.
- [3] 胡钰玲,王遂缠,王式功,等.2012年初夏西北干旱区罕见区域性大暴雨天气过程分析[J].干旱气象,2015,33(1):128-137.
- [4] 牛淑贞,张一平,梁俊平,等.郑州市两次短时强降水过程的环境条件和中尺度特征对比[J].暴雨灾害,2016,35(2):138-147.
- [5] 杨康权,张琳,肖递祥,等.四川盆地西部一次大暴雨过程的中尺度特征分析[J].高原气象,2013,32(2):357-367.
- [6] 孔祥伟,杨建才,李红,等.河西走廊西部干旱区一次极端暴雨天气的水汽特征分析[J].气象,2021,47(4):412-423.
- [7] 常煜,李秀娟,陈超,等.内蒙古一次暴雨过程中尺度特征及成因分析[J].高原气象,2016,35(2):432-443.
- [8] 符娇兰,马学款,陈涛,等.“16·7”华北极端强降水特征及天气学成因分析[J].气象,2017,43(5):528-539.
- [9] 张桂莲,仲夏,韩经纬,等.内蒙古中西部地区一次极端暴雨特征分析[J].干旱气象,2018,36(1):17-26.
- [10] 胡皓,李丽平,王建鹏,等.2016年陕甘宁地区一次强降水的大气环流特征及水汽输送途径[J].干旱气象,2018,36(5):776-781.
- [11] 田付友,杨舒楠,郑永光,等.北京地区两次极端特大暴雨过程中短时强降水环境条件对比分析[J].暴雨灾害,2021,40(1):27-36.
- [12] 张家宝,苏起元,孙沈清,等.新疆短期天气预报指导手册[M].乌鲁木齐:新疆人民出版社,1986.
- [13] 张云惠,胡顺起,王勇,等.新疆暴雨(1961-2018)[M].北京:气象出版社,2020.
- [14] 杨莲梅,张云惠,黄艳,等.新疆短时强降水诊断分析暨预报手册[M].北京:气象出版社,2020.
- [15] 李如琦,李建刚,唐冶,等.中亚低涡引发的两次南疆西部暴雨中尺度特征对比分析[J].干旱气象,2016,34(2):297-304.
- [16] 江远安,包斌,王旭.南疆西部大降水天气过程的统计分析[J].新疆气象,2001,24(5):19-20.
- [17] 张云惠,陈春艳,杨莲梅,等.南疆西部一次罕见暴雨过程的成因分析[J].高原气象,2013,32(1):191-200.
- [18] 曾勇,杨莲梅.新疆西部一次极端暴雨事件的成因分析[J].高原气象,2018,37(5):1220-1232.
- [19] 张云惠,李海燕,蔺喜禄,等.南疆西部持续性暴雨环流背景及天气尺度的动力过程分析[J].气象,2015,41(7):816-824.
- [20] 黄艳,刘涛,张云惠,等.2010年盛夏南疆西部一次区域性暴雨天气特征[J].干旱气象,2012,30(4):615-622.
- [21] 杨霞,张云惠,张超,等.南疆西部“5·21”极端大暴雨成因分析[J].沙漠与绿洲气象,2020,14(1):21-30.

Comparative Analysis on Mesoscale Characteristics of Two Extreme Rainstorms in the West of Southern Xinjiang

Xerinay Tiliwaldi¹, Mayire Ahat¹, MENG Fanxue¹, HU Suqin¹, SUN Yu¹, LI Jiangang²

(1.Kashgar Meteorological Bureau, Kashgar 844000, China;

2.Institute of Desert Meteorology of China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China)

Abstract Based on conventional meteorological observations, hourly observation data from meteorological stations in the ground region, FY-2G cloud top brightness temperature, CR/CC radar products in Kashgar and NCEP reanalysis data, The circulation background, and mesoscale characteristics of two extreme rainstorm processes from April 17 to 24, 2020 and June 15 to 17, 2021 (Process 1 and Process 2, respectively) in western Southern Xinjiang were compared and analyzed. The results show that both processes took place under the favorable circulation background of “east–west attack” at 500 hPa, and the 100 hPa SAH was east type and double type, respectively. Low–level jet, shear line, and surface mesoscale convergence line were the critical triggering systems of the two heavy rainstorms. The two heavy rainfall events occurred when the convective cloud cluster was the most powerful and its range was the largest or the *TBB* gradient was the largest. However, the radar echo characteristics are obviously different. The influence system of “Process 1” is a linear multi–cell strong storm with a maximum reflectivity factor of 65 dBZ, which has the characteristics of convergence and rotation at small and medium scales. During the heavy rainfall, *VIL* maintains over 40 kg/m² and has a jump phenomenon, which is more conducive to the generation of severe convection. The system affected by “Process 2” was a dispersed typical mono storm, with no apparent divergence in the upper level of radial velocity. The Value of *VIL* was significantly smaller than that of “Process 1”.

Key words west of southern Xinjiang; extreme rainstorm; environment condition; mesoscale characteristics

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):56-61.
doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2022.05.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



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

王小龙¹,王彤^{1*},李映春¹,李娟¹,邓卓雅¹,王秀花¹,谢蕊¹,安斌²

(1.天水市气象局,甘肃 天水 741000;2.麦积区气象局,甘肃 天水 741020)

摘要:利用常规观测资料、区域自动站资料和“葵花8号”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,确立了强对流云团识别指标、追踪方法及预报指标,并对2018年部分个例进行效果检验。结果表明:(1)利用卫星B13通道(10.4 μm)亮温值 $TBB \leq 238 \text{ K}$ 或B08通道(6.2 μm)与B13通道亮温差 $\Delta TBB < 0 \text{ K}$ 双阈值作为强对流云团识别指标,可以准确识别出陇东南地区的强对流天气云团;(2)利用“逆向搜索法”、“面积重叠法”及对云团重心的计算,可以对强对流云团进行准确定位、追踪及移动路径外推预报;(3)建立的强对流天气落区判别指标对该地区短时强降水及冰雹落区具有一定的预报能力。

关键词:葵花8号;强对流云团识别;强对流云团追踪;短时强降水

中图分类号:P457.6

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2022)05-0056-06

强对流天气是导致气象灾害的重要天气类型^[1]。近年来,全球变暖,天气气候异常,强对流天气频发,经常造成重大财产损失和人员伤亡^[2]。例如,2010年8月8日,由强降水引发的舟曲特大山洪泥石流地质灾害,导致1478人遇难,287人失踪;2007年,甘肃省86个县(区)中,有38个县(区)的230个乡镇出现了冰雹灾害,发生冰雹灾害共计85次,农作物受灾面积累积超过14万 hm^2 。随着我国经济的快速发展,强对流天气造成的危害和损失在不断增加,研究强对流天气的监测、预报预警技术,对于防灾减灾工作意义重大。

国内外学者对强对流天气进行了大量的研究,在强对流天气特征、形成机制以及可预报性等方面取得了许多成果^[3-4]。我国学者对中国强对流的生成

环境、组织形态、多普勒天气雷达回波特征以及临近预报、预警技术进行了研究,强对流天气业务预报能力得到显著提升,但仍需在分类强对流天气预报、预警技术方面更加深入细致的研究^[1]。利用卫星遥感技术对强对流天气进行监测预警是目前国内外常用的技术手段之一^[5-9]。费增坪等^[10-14]在利用卫星云图资料对强对流天气进行识别追踪方面进行了一系列研究,取得了一定成果,但上述研究大多都是基于上一代气象卫星资料,时空分辨率较低,实用性有限。“葵花8号”是日本气象厅2014年底发射的新一代气象卫星,具有观测频次高、空间分辨率高、观测通道多、卫星辐射计性能先进等特点。周鉴本等^[15-16]率先在国内对其展开了大气向量研究及冰雪侦测试验,也有学者将其应用于暴雨、气溶胶及雾霾等方面的研究^[17-19],然而利用该卫星对强对流天气进行识别及追踪的相关研究较少。

因此,本文利用2016年陇东南地区出现的43次强对流天气过程和“葵花8号”气象卫星资料,对强对流天气的识别、动态跟踪及预报方法展开研究,以期对甘肃省强对流天气监测预报预警提供技术参考。

收稿日期:2021-03-12;修回日期:2021-08-30

基金项目:甘肃省气象局面上项目(GSMAMS2018-08)

作者简介:王小龙(1986—),男,工程师,主要从事中短期天气预报及相关研究工作。E-mail:qxtwxl@126.com

通信作者:王彤(1968—),男,工程师,主要从事中短期天气预报及相关研究工作。E-mail:gstswt@163.com

1 资料和处理

选取甘肃省兰州、临夏、定西、庆阳及天水 2016 年 4—9 月强对流天气实况资料,建立个例样本 43 个,统计出强对流云团 64 个,强对流点 200 个,其中包含短时强降水点(1 h 降水量 ≥ 20 mm)142 个,一般性冰雹点(冰雹直径 < 2 cm)50 个,强降水点(冰雹直径 ≥ 2 cm)8 个。利用“葵花 8 号”气象卫星资料,选择对应时次 B08 通道(中心波长 6.2 μm)、B13 通道(中心波长 10.4 μm)、B16 通道(中心波长 13.3 μm)观测数据(选取资料范围为 32.5°~37.5°N,102.0°~109.0°E)进行样本分析。

2 强对流云团的识别

2.1 云顶亮温

由于发展旺盛的强对流云团具有更高的上升高度和更低的云顶亮温(TBB)。统计样本中强对流天气发生区域的 TBB 值特征,建立强对流识别指标,再对其进行回代检验,可以初步建立识别阈值并过滤掉非强对流云团。通过计算发现,在 10.4 μm 通道,陇东南出现短时强降水的强对流云团云顶 TBB 平均值为 222 K,当 TBB 阈值 ≤ 238 K 时,可有效识别出样本中 80.3%的强对流云团(表 1)。冰雹发生区域云顶 TBB 平均值为 228 K,当 TBB 阈值 ≤ 238 K 时,可有效识别出 44.8%的冰雹云云团(表 2)。

表 1 2016 年 4—9 月陇东南短时强降水云团 TBB 阈值识别

云顶亮温识别标准/K	$TBB \leq 222$	$TBB \leq 228$	$TBB \leq 238$
参与计算的强对流点/个	142	142	142
识别出的个例(点)数/个	83	98	114
识别率/%	58.5	69.0	80.3
漏报率/%	41.5	31.0	19.7
空报率/%	0	0	0

表 2 2016 年 4—9 月陇东南冰雹云团 TBB 阈值识别

云顶亮温识别标准/K	$TBB \leq 222$	$TBB \leq 228$	$TBB \leq 238$
参与计算的强对流点/个	58	58	58
识别出的个例(点)数/个	11	19	26
识别率/%	18.9	32.8	44.8
漏报率/%	81.1	67.2	55.2
空报率/%	0	0	0

2.2 多通道差

卫星 6.2~10.4 μm 通道亮温差可以指示已经穿透对流层顶的对流云顶,其亮温差负值区对应云顶超过对流层顶的云团区域,统计分析个例云团中多通道差分布,可以有效识别对流云^[20]。

选取不同通道的亮温差对样本云团进行回代识别检验,当识别指标分别为 $\Delta TBB < 0$ K、 $\Delta TBB \leq -5$ K、 $\Delta TBB \leq -10$ K、 $\Delta TBB \leq -15$ K 时,对短时强降水云团的识别率依次为 65.5%、29.6%、21.1%、16.2%(表 3),对冰雹抗云团的识别率依次为 86.2%、60.3%、48.3%、44.8%(表 4)。

表 3 2016 年 4—9 月陇东南短时强降水云团 6.2~10.4 μm 亮温差阈值识别

6.2~10.4 μm 亮温差/K	$\Delta TBB < 0$	$\Delta TBB \leq -5$	$\Delta TBB \leq -10$	$\Delta TBB \leq -15$
参与计算的强对流点/个	142	142	142	142
识别出的个例(点)数/个	93	42	30	23
识别率/%	65.5	29.6	21.1	16.2
漏报率/%	34.5	70.4	78.9	83.8
空报率/%	0	0	0	0

表 4 2016 年 4—9 月陇东南冰雹云团 6.2~10.4 μm 亮温差阈值识别

6.2~10.4 μm 亮温差/K	$\Delta TBB < 0$	$\Delta TBB \leq -5$	$\Delta TBB \leq -10$	$\Delta TBB \leq -15$
参与计算的强对流点/个	58	58	58	58
识别出的个例(点)数/个	50	35	28	26
识别率/%	86.2	60.3	48.3	44.8
漏报率/%	13.8	39.7	51.7	55.2
空报率/%	0	0	0	0

2.3 双阈值检测

双阈值识别法具有很好的互补性,可以有效识别单一阈值不能识别出的强对流云团,提高识别率。

采用 B13 通道(10.4 μm) $TBB \leq 238$ K 或 6.2~10.4 μm 亮温差 $\Delta TBB < 0$ K 双阈值作为“葵花 8 号”卫星资料的强对流云团识别指标,可以识别出样本中全部的强对流天气云团(表 5)。

表 5 2016 年 4—9 月陇东南短时强降水云团 双阈值识别

双阈值识别标准/K	$TBB \leq 238$ 或 $\Delta TBB < 0$	$TBB \leq 238$ 或 $\Delta TBB \leq -5$	$TBB \leq 238$ 或 $\Delta TBB \leq -10$	$TBB \leq 238$ 或 $\Delta TBB \leq -15$
参与计算的强对流点/个	142	142	142	142
识别出的个例数/个	142	142	141	137
双阈值识别率/%	100	100	99.3	96.5
双阈值漏报率/%	0	0	0.7	3.5
双阈值空报率/%	0	0	0	0

3 强对流云团边界的提取

使用双阈值法可有效识别出强对流云团,但要确定强对流云团的大小、范围及其位置,还需要对强对流云团边界使用技术手段进行提取。本文借鉴较为成熟的“逆向搜索法”^[21-23]对强对流云团边界进行识别。根据识别阈值,从左下角第一个边界点开始,定义初始的搜索方向为沿右上方,如果右上方的点是强对流云团点,则为边界点,否则搜索方向顺时针旋转 45°,直到找到第一个强对流云团点为止。然后以这个点为新的边界点,在当前搜索方向的基础上逆时针旋转 90°,继续用同样的方法搜索下一个云团点,直到返回最初的边界点。

在云图数据处理过程中,由于实际的红外云图的云顶并非理想的等值面,在云图边界点搜索过程中不可避免的出现断点。因此,本文对云图进行两次平滑滤波处理(九点平滑)。

对提取到的边界点进行处理,连接符合阈值的点,完成云团边界提取。通过边缘提取,使强对流云团边缘光滑,同时可以过滤掉微小云块的影响,便于跟踪计算(图1)。

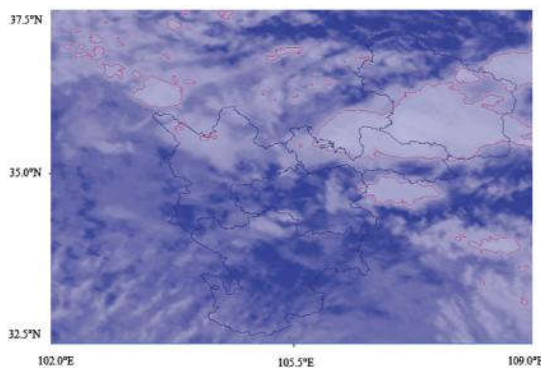


图1 使用“逆向搜索法”提取的陇东南地区强对流云团边界(2018年6月9日16:30)

4 强对流云团的自动追踪

云团的发展过程经常会发生合并、分裂现象,在不同时次的云图上云团的匹配不具有唯一性。云团位置的跟踪首先要判断不同时次的两块云团是否为同一云团。本项目沿用目前国内云图追踪常用的“面积重叠法”^[24-25]对不同时次的同一云团进行匹配跟踪,即相邻时次的两块云团的重叠度越大,则它们为同一云团的可能性越大。云团重叠度又和卫星扫描时间间隔密切相关,葵花8号扫描时间间隔缩短到10 min,重叠度较以往风云卫星有明显提高。

设 $N(t)$ 、 $M(t+1)$ 分别表示 t 、 $t+1$ 时刻的云团范围,则2个时刻同一云团重叠率 R 可以表达为:

$$R = \frac{N(t) \cap M(t+1)}{M(t+1)} \quad (1)$$

识别强对流云团是为了对其未来发展作出预测,根据对某一云团多个时次移动规律的跟踪,推演下一时刻该云团所处位置,从而确定强对流天气发生的区域。

使用面积重叠法匹配出强对流云团位置变化后,用强对流云团内所含像素点的总数表征其面积,运用以下公式对云团重心^[21]进行计算:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n x(i) \cdot G(i)}{\sum_{i=1}^n G(i)} \quad (2)$$

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n y(i) \cdot G(i)}{\sum_{i=1}^n G(i)} \quad (3)$$

其中 $x(i)$ 、 $y(i)$ 为像素点的云图网格坐标, $G(i)$ 为该像素点的灰度值。采用灰度值的优点为:发展更高的云顶具有更大的灰度值,越大的灰度值在云团重心计算中占据更大的比重^[22]。

根据同一个强对流云团重心的变化,可以计算其移动的方位和单位时间移动量,从而实现下一时刻强对流云团位置的外推预报(图2)。

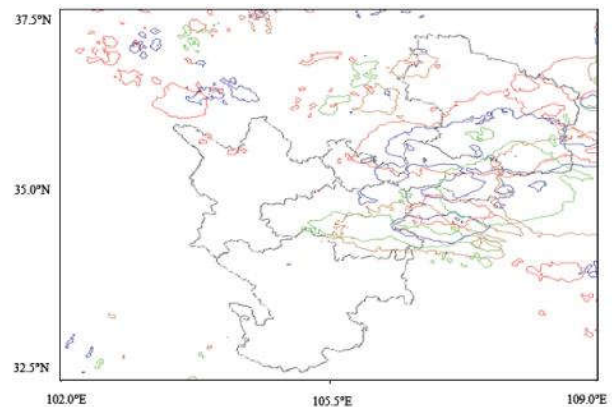


图2 2016年6月9日16:30—19:30逐小时强对流云团移动路径

(红线为16:30强对流云团位置,蓝线为17:30强对流云团位置,绿线为18:30强对流云团位置,橙线为19:30强对流云团位置)

5 强对流天气落区的判定

5.1 短时强降水落区的判定

借鉴 Mecikalski J R 等^[26]有关利用卫星数据对强对流云团进行计算的思路,建立陇东南地区短时强降水落区判定指标。统计分析样本中出现短时强

降水位置的云顶特征因子、云状因子及趋势因子等,建立阈值(表6),采用等权重投票法进行短时强降水落区判定,即:当投票数(P_i) ≥ 6 时(共7项),判断该点为短时强降水发生位置。

表6 陇东南地区短时强降水预报模型中的各因子及指标

因子	指标名称	权重	修订后的阈值/K
I1	6.2~10.4 μm 亮温差	1	≤ 2.1
I2	13.3~10.4 μm 亮温差	1	≤ 2.1
I3	10.4 μm 亮温值	1	≤ 294
I4	10.4 μm 亮温趋势(10 min)	1	≤ -3
I5	10.4 μm 亮温趋势(20 min)	1	≤ -4
I6	6.2 μm 与 10.4 μm 亮温差时间趋势(10 min)	1	> 0
I7	13.3 μm 与 10.4 μm 亮温差时间趋势(10 min)	1	> 0

5.2 冰雹落区的判定

冰雹云团较强降水云团具有更高的高度和更深的纹理,对样本中冰雹落区云图特征进行统计分析,发现可以将亮温梯度作为区分强降水云团和冰雹云团的物理量。采用 3×3 像素宽度计算云顶亮温梯度 G ,其表达式为:

$$G = \{[T_{i+1,j} - T_{i-1,j}]^2 + [T_{i,j+1} - T_{i,j-1}]^2\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

其中, T 为云顶亮温, i, j 为像素坐标。

陇东南地区 10.4 μm 通道亮温梯度 $G > 5$ 且 6.2~10.4 μm 亮温差 < 0 K 的区域为冰雹易发点。

6 个例检验

6.1 个例检验 1

以 2018 年 6 月 10 日 19—21 时天水强对流天气为例,对强对流云团进行识别、边界提取、路径跟踪、移动路径外推以及强对流天气落区预报检验,见图 3~5。

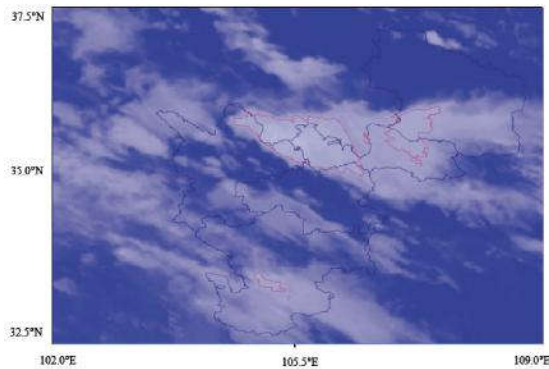


图3 2018年6月10日19:00强对流云团识别及边界提取

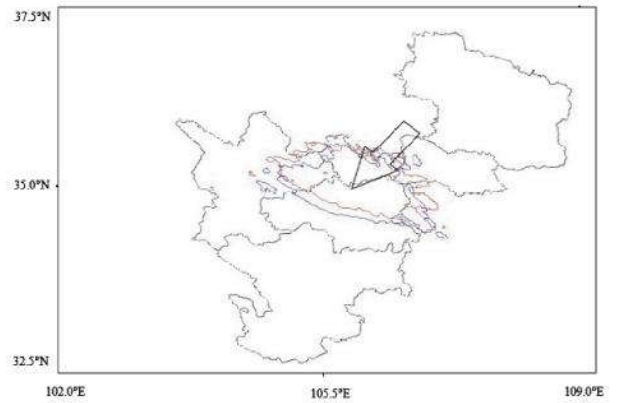


图4 2018年6月10日19:00和19:40强对流云团位置跟踪

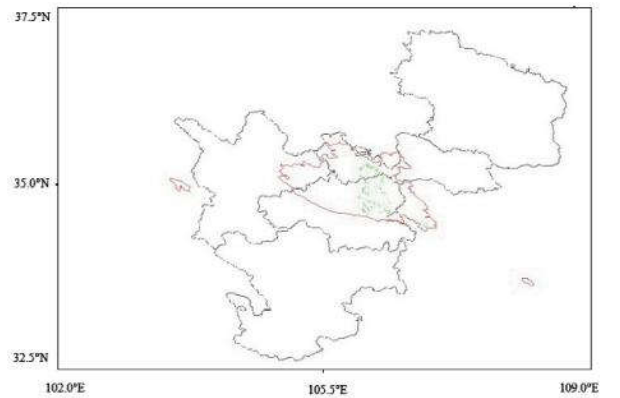


图5 2018年6月10日19:40外推未来20 min (20:00)强对流云团位置及强对流天气落区

2018年6月10日19—21时,天水市自北向南出现强对流天气,秦安县、甘谷县、武山县、麦积区、张家川县等乡镇相继出现冰雹天气。19时秦安县王铺、郭嘉、魏店最大冰雹直径约8 mm,持续时间约20 min;20时甘谷县八里湾、礼辛、金山最大冰雹直径7~8 mm,持续时间约4 min;20时40分武山县洛门镇、温泉镇、咀头镇最大冰雹直径约15 mm,持续时间约10 min。甘谷县、麦积区、秦州区部分乡镇出现短时强降水,最大小时雨量为麦积区肖王的30.4 mm。

利用双阈值法成功识别出强对流云团,利用“逆向搜索法”提取的强对流云团边界清晰可靠,路径跟踪准确,利用“面积重叠法”和云团重心计算的强对流云团移动方位准确;冰雹天气落区判别模型成功识别出秦安县、甘谷县、张家川县一带冰雹,但对武山县、麦积区一带冰雹空报,同时,冰雹实际出现时间也与识别到的时间存在偏差;短时强降水落区判别模型成功识别出秦州、甘谷、麦积一带短时强降水,但对秦安、张家川、清水一带空报,短时强降水实际发生时间也与识别出的时间存在一定偏差。

6.2 个例检验 2

对 2018 年 7 月 10 日 14—20 时陇东南地区发生的一次区域性短时强降水过程进行强对流云团识别及位置追踪检验,发现建立的双阈值指标和追踪方法并不能有效对其进行识别和位置追踪。经过对云图资料研判分析后发现,此次强对流过程为暖云性降水,云顶温度较高,同时强对流云团发展高度相对较低,导致建立的统计指标不能对其有效识别。由此可见,本文建立的双阈值指标并不能有效识别和追踪云顶温度较高且垂直发展高度不高的强对流云团。

“双阈值法”能够成功识别出陇东南地区绝大多数的强对流云团,但对少数一些云顶温度较高且垂直发展高度不高的对流云团存在无法识别的情况;利用“逆向搜索法”可以对强对流云团边界轮廓进行准确定位,利用“面积重叠法”和对云团重心的计算可以对强对流云团进行动态追踪及移动路径外推预报,但也存在对少数一些尺寸较小的强对流云团无法匹配和跟踪的情况。另外,建立的强天气落区判别模型对该地区强对流云团中短时强降水、冰雹天气易发点具有一定的判断能力,但是空报率偏高,强天气实际出现时间与预报时间也存在一定偏差。

7 结论和讨论

(1)利用卫星 B13 通道(中心波长 $10.4\ \mu\text{m}$)云顶亮温 $TBB \leq 238\ \text{K}$ 或 B08 通道(中心波长 $6.2\ \mu\text{m}$)与 B13 通道云顶亮温差 $\Delta TBB < 0\ \text{K}$ 双阈值指标,可以准确识别出陇东南地区的强对流云团。

(2)利用“逆向搜索法”可以准确获取强对流云团的边界轮廓;利用“面积重叠法”和对云团重心的计算可实现强对流云团位置的动态追踪及移动路径外推预报。

(3)强对流云团识别指标及追踪方法,对一些云顶温度较高且垂直发展高度不高的暖性强对流云团存在无法识别和追踪的情况,同时,对一些尺寸较小的强对流云团也无法匹配跟踪。

(4)强天气落区判别指标充分考虑了对流云顶发展高度、云顶发展趋势、对流云主体位置、云顶纹理等方面的特性,对陇东南地区强对流天气落区具有一定的预报能力,但空报率偏高,同时存在一定的时间偏差。

本文没有考虑高空风对强对流天气落区的影响,在之后的研究中需要对这部分内容展开详细分析;同时,由于发展旺盛的强对流云团尺度较大且云顶特征均匀,卫星投影角度造成的落区偏差相对较

小,忽略了这部分的影响。

参考文献:

- [1] 俞小鼎,郑永光.中国当代强对流天气研究与业务进展[J].气象学报,2020,78(3):391–418.
- [2] 闵锦忠,吴乃庚.近二十年来暴雨和强对流可预报性研究进展[J].大气科学,2020,44(5):1039–1056.
- [3] 郑永光,陶祖钰,俞小鼎.强对流天气预报的一些基本问题[J].气象,2017,43(6):641–652.
- [4] 周庆亮.美国强对流预报主观产品现状分析[J].气象,2010,36(11):95–99.
- [5] JOHN R H, DOSWELL C A. Severe local storms forecasting[J]. Wea Forecasting, 1992, 7: 588–612.
- [6] LI Z J. Estimation of cloud motion using cross-correlation[J]. Atmospheric Science, 1998, 15(2): 277–282.
- [7] 刘科峰,张韧,李文才,等.奇异值分解与神经网络网络结合的卫星云图云团移动预测[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2008,9(3):298–301.
- [8] 张春桂,周乐照,林柄青,等.基于卫星和雷达资料的强对流云团识别跟踪[J].气象科技,2017,45(3):485–491.
- [9] 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.
- [10] 费增坪,王洪庆,张炎,等.基于静止卫星红外云图的 MCS 自动识别与追踪[J].应用气象学报,2011,22(1):115–122.
- [11] 廖伟,原湘华,于广俊,等.基于卫星云图亮温分析的中尺度对流云团的识别技术研究[J].空军装备研究,2008,2(1):17–32.
- [12] 李汇军,孔玉寿.应用连续小波变换提取对流云团[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2005,6(2):181–184.
- [13] 刘科峰,张韧,孙照渤.基于交叉相关法的卫星云图中云团移动的短时预测[J].中国图像图形学报,2006,11(4):586–591.
- [14] 方兆宝,林晖,吴立新,等.流形群速度目标自动识别与跟踪技术研究[J].遥感学报,2004,8(1):14–22.
- [15] 周鉴本.地球同步卫星葵花 8 号多频道大气运动向量[J].地球科学前沿,2017,7(4):586–597.
- [16] 周鉴本.以葵花 8 号卫星观测探测冰雪的初步试验[J].地球科学前沿,2016,7(5):432–442.
- [17] 杨磊,才奎志,孙丽,等.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[J].暴雨灾害,2020,39(2):125–135.
- [18] 牛晓君,唐家奎,张自力,等.基于葵花 8 号卫星数据的气溶胶反演算法及其在雾霾过程监测中的应用[J].中国科学院大学学报,2019,36(5):671–681.
- [19] 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.
- [20] 刘京华,王彬,韩雷,等.津京地区一次强对流天气的初

- 生预警技术研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2012, 48(1):42-46.
- [21] 胡渝宁,李森.基于FY2D静止气象卫星云图中的雷暴云团的识别[J].灾害天气研究与预报,2012(2):1286-1305.
- [22] 白洁,王洪庆,陶祖钰,等.GMS卫星红外云图强对流云团识别与追踪[J].热带气象学报,1997,13(2):158-167.
- [23] 李森,刘建文,刘玉玲,等.基于FY2D静止卫星云图的强对流云团识别[J].气象水文海洋仪器,2010(2):72-78.
- [24] 刘年庆,郑媛媛,蒋建莹,等.基于动态特征的强对流云团追踪[J].高原气象,2013,3(2):556-563.
- [25] 周鑫.基于FY-2F卫星数据研究对流初生的云顶物理量特征[D].南京信息工程大学,2018.
- [26] MECIKALSKI J R, BEDKA K M. Forecasting convective initiation by monitoring the evolution of moving cumulus in daytime GOES imagery [J].Mon Wea Rev,2006,134:49-78.

Research on Identification and Tracking Technology of Severe Convection in Southeast Gansu Based on Himawari-8 Meteorological Satellite

WANG Xiaolong¹, WANG Tong¹, LI Yingchun¹, LI Juan¹, DENG Zhuoya¹, WANG Xiuhua¹,
XIE Rui¹, AN Bin²

(1.Tianshui Meteorological Bureau, Tianshui 741000, China;

2.Maiji Meteorological Bureau, Tianshui 741020, China)

Abstract Based on the data of routine observations, regional automatic stations and Himawari-8 meteorological satellite, the 43 severe convection weather processes that occurred in southeast Gansu between April and September 2016 were analyzed. The indicator of severe convective cloud recognition, tracking method and forecast indicator were established, and some individual cases of 2018 were tested to validate the effectiveness. The results showed that: (1) Using double threshold values of $TBB \leq 238$ K of the B13 channel ($10.4 \mu\text{m}$) or the TBB difference $\Delta TBB < 0$ K of the B08 channel ($6.2 \mu\text{m}$) and the B13 channel as the indicator of severe convective cloud recognition can accurately identify severe convection weather clouds in southeast Gansu. (2) Approaches like “reverse searching” and “area overlap” could be used to calculate the center of gravity of clouds, thereby accurately locating and tracking severe convective clouds and extrapolatively forecasting their paths of movement. (3) The indicator to discriminate the fallout zone of convective weather has a certain forecast capacity for the fallout zones of short-time strong rainfall and hail within the region.

Key words Himawari-8 meteorological satellite; identification of severe convective clouds; tracing of severe convective clouds; short-time strong rainfall

周涛,李娜,许敏,等.基于多源资料的一次暖区暴雨水汽特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2022,16(5):62-69.

doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2022.05.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



基于多源资料的一次暖区暴雨水汽特征分析

周涛^{1,2},李娜²,许敏²,王清川^{1,2*},张湘涵²

(1.河北省气象与生态环境重点实验室,河北 石家庄 050021;2.廊坊市气象局,河北 廊坊 065000)

摘要: 利用常规气象观测资料、NCEP逐6 h再分析资料(1°×1°)、微波辐射计资料以及HYSPLIT模式等,对2021年7月5日冀中平原一次暖区暴雨过程的水汽输送特征进行对比分析。结果表明:应用HYSPLIT模式模拟分析后发现,本次过程中925和850 hPa降水开始前比湿在12 g/kg以上,是暴雨区的主要水汽贡献者,其主要水汽通道为西南路径,水汽贡献率分别占57.57%和63.64%。源自黄海或途径黄海、渤海等地的气块在东南转西南气流的引导下为暴雨区低层带来丰富的水汽,同时源自亚欧大陆中高层的气块,随着西风带长波槽脊的运动,为暴雨区上空500 hPa带来干空气,构成上干下湿的不稳定层结。降水开始前,925和850 hPa在相应引导气流的作用下,水汽不断向冀中平原输送,使得优良的水汽条件主要集中于低层大气,与HYSPLIT模式模拟结果一致。通过微波辐射计对降雨过程的水汽特征进行分析,结果表明在降雨开始前,700 hPa以下高度的水汽含量有明显增加,水汽密度最大达到14 g/m³。分析3种不同资料得到相似结论,但HYSPLIT模式和微波辐射计两种高时空分辨率资料的应用,可以及时且多方位分析水汽特征,为暖区暴雨落区、强度等精细化准确预报预警提供一定参考。

关键词: 暖区暴雨;HYSPLIT模式;微波辐射计;水汽特征

中图分类号: P426.62

文献标识码: A

文章编号: 1002-0799(2022)05-0062-08

暖区暴雨的定义最早由黄土松等^[1]针对华南前汛期暴雨提出,具体定义为:暴雨发生在锋面的南侧暖区,或是在北部没有锋面存在,且不受冷空气或变性冷高脊控制,有时发生在西南气流和东南气流的汇合处,有锋面时暴雨区位于地面锋区以南200~300 km^[1-2]。虽然此概念是针对华南地区提出,陈玥等^[3]研究发现,在华南地区以外的其他地区也可产生暖区暴雨,多发生于距离地面冷锋或850 hPa暖切变以南100~300 km的暖区范围内,或是副热带高压边缘等。由于产生暖区暴雨的斜压性强迫不明

显,边界层的抬升机制复杂,数值模式对暴雨强度和落区的预报难度较大^[4-6],短时预报及临近预警仍是目前的主要手段。

暖区暴雨的形成,同样需要有充沛且持续稳定的水汽输送^[7-10],因此分析暴雨过程中的水汽输送特征对研究暖区暴雨的成因及预报都具有重要的意义。徐玥等^[11-13]利用常规资料对暖区暴雨过程的水汽特征进行了分析研究。孙密娜等^[17-8,14-15]在对暖区暴雨过程进行水汽特征分析时多结合了云图和雷达等资料。此外,气象工作者开始引入HYSPLIT模式对暴雨过程的水汽特征进行分析,孙建华等^[16]、马梁臣等^[17]、许彬等^[18]研究发现,利用HYSPLIT模式可得到暴雨区的水汽源地、输送路径,以及不同通道的水汽贡献率。陶健红等^[19-27]研究发现,HYSPLIT模式在与水汽收支计算结果一样的基础上,具有更明显的优势。

目前针对冀中平原暖区暴雨水汽输送特征的研究

收稿日期:2021-12-11;修回日期:2022-02-17

基金项目:中国气象局预报员专项(CMAYBY2020-012);河北省气象局面上项目(21ky21);廊坊市气象局预报员专项(2021-02)

作者简介:周涛(1988—),女,工程师,主要从事短期及短临预报服务工作。E-mail:zhoutao_job@126.com

通信作者:王清川(1978—),男,正高级工程师,主要从事短期天气预报及短临预警。E-mail:hblfwqc@163.com

究较少,特别是基于多源资料的水汽来源与输送的对比分析成果更少,需要对更多典型天气过程开展多方位的相关研究。2021年7月5日暖区暴雨过程中,多个模式预报的暴雨落区、量级、降水大值中心等与实况都有明显偏差,导致暴雨和大暴雨漏报,因此,对此次暖区暴雨过程中水汽来源及输送的研究非常必要。本文在利用常规观测资料、加密自动站资料、NCEP $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 再分析资料的基础上,运用 HYSPLIT 模式结合廊坊大厂微波辐射计等新方法和新资料,对此次过程的水汽输送特征进行分析,以期冀中平原地区的暖区暴雨预报提供更多参考。

1 资料和方法

本文主要使用的资料包括:常规气象观测资料、区域自动站资料、NCEP 逐 6 h 再分析资料($1^{\circ}\times 1^{\circ}$)以及廊坊大厂微波辐射计资料(数据经过质量控制)等,同时应用 HYSPLIT 模式,模式数据来源于全球资料同化系统(GDAS)6 h 一次的分析资料,水平分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$,向后的时间步长为 1 h,逐小时输出一组轨迹点的位置及相应位置上气块的物理属性(气压、相对湿度、比湿等)。

HYSPLIT 模式^[28-29],即拉格朗日混合单粒子轨道模式,通常用于跟踪气流所携带粒子的运动轨迹。最终的位置 $P(t+\Delta t)$ 由初始位置 $P(t)$ 和第一猜测位置 $P'(t+\Delta t)$ 插值的平均速率计算得出,公式如下:

$$P'(t+\Delta t)=P(t)+v(P,t)\Delta t, \quad (1)$$

$$P(t+\Delta t)=P(t)+0.5[v(P,t)+v(P',t+\Delta t)]\Delta t. \quad (2)$$

式中, Δt 为时间步长。利用轨迹上气块的比湿来表征水汽输送情况,因为在不发生相变的情况下,气块内的比湿不随环境温度和气压的变化而变化^[30]。模拟的起始高度固定,但每一条轨迹都是在拉格朗日空间进行模拟,其高度随环流演变,即随地点和时间变化。为更直观地分析轨迹分布特征,文中引入簇分析方法,即先定义每个簇的空间方差为簇内每条轨迹与簇平均轨迹对应点的距离平方和,并将每条轨迹视为一簇,算出所有可能组合的两个簇的空间方差,任选两个簇合并为一个新簇,以使得合并后所有簇的空间方差之和(Total Spatial Variance, TSV)比合并前增加最小,一直进行到所有轨迹合并为一个簇。统计发现,刚开始时 TSV 迅速增加,之后增加缓慢,但分成一定数量的簇后,在进一步合并的过程中 TSV 又迅速增加,说明此时要合并的两个簇相似性较差,因此把 TSV 即将再次迅速增大的点作为聚类运算的结束点,此时分出的各个簇即为聚类得到的

最终簇^[16,21]。文中给出的聚类结果,反映的是聚类后每一类轨迹的平均结果。

2 降雨实况和环流背景分析

2.1 降雨实况

2021年7月5日下午—夜间,冀中平原(选取廊坊、保定中东部和沧州西北部共 25 个县(市、区)作为研究对象)中北部出现区域性暴雨天气(图 1),最大降雨量(152.7 mm)出现在廊坊市安次区仇庄乡,最大雨强(48.7 mm/h)出现在保定市易县。降水主要集中在 5 日 18 时—6 日 00 时,期间共有 5 个国家站出现短时强降水,雨强在 30 mm/h 以上的区域气象站达到 47 个。过程中 6 站出现 8 级以上大风,其中在易县狼牙山镇南管头村国家气象观测站出现极大风速 25.4 m/s(十级)。综上,本次天气过程具有明显的强对流特征。

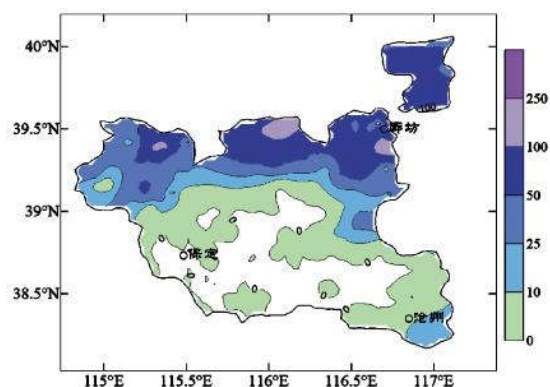


图 1 2021 年 7 月 5 日 14 时—6 日 08 时冀中平原降雨量分布(单位:mm)

2.2 环流背景分析

7月5日08时,500和700 hPa槽均位于蒙古到内蒙古中西部地区,850 hPa在 $105^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$ 、 40°N 附近有“人”字形切变线,冀中平原处于暖切变线东部的西南暖湿气流控制中,925 hPa同样受西南气流控制。14时(图2),500和700 hPa槽移到蒙古中东部到内蒙古中西部地区,500 hPa有干舌从渤海北部向西延伸至西北地区,冀中平原处于干侵入区,925和850 hPa处于显著湿区范围内,构成“上干下湿”的不稳定层结,同时850 hPa“人”字形切变线移到晋冀交界,冀中平原位于暖切变区,925 hPa局地风速超过 14 m/s,地面冷锋位于内蒙古中部到河套东部地区,冀中平原处于地面风速辐合区,20时冷锋移到张家口与北京交界附近。冀中平原在低层暖湿气流控制、中高层干冷空气入侵的垂直不稳定层结下,出现了一次显著的暖区降水。

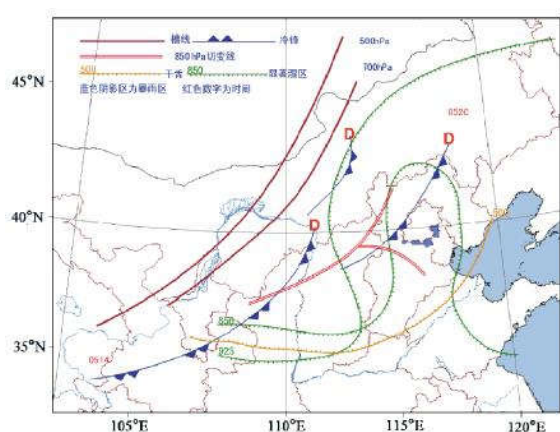


图2 2021年7月5日14时高低空系统

3 基于 HYSPLIT 模式的水汽输送特征

3.1 水汽来源及输送

大气中的水汽主要有2个来源,一是本地大气的绝对含水量,二是外地水汽输送及在本地辐合^[7-8]。本次过程中,降水开始(14时)前冀中平原地面露点温度为23℃,大气可降水量最大为40.1 mm,依据Tian等^[31]研究指出,大气可降水量达到60 mm是我国东部地区短时强降水发生的充分条件,显然冀中平原地区的短时强降水需要依靠外地水汽输送。综合考虑冀中平原各站的地理位置、降水量大值区和降水时间,选取2021年7月5日14时廊坊北部的大厂(116.98°E, 39.88°N)作为模拟起始时间和起点。由于大气中大部分水汽集中在对流层中低层^[32],因此垂直方向上选取800、1 500、3 000和5 500 m(分别代表925、850、700和500 hPa)4个高度作为模拟的起始高度,进行96 h后向轨迹模拟,并对其水汽路径及贡献进行分析。

根据图3的分布情况,925 hPa的气块96 h前来自山西南部800 hPa附近,比湿为9.4 g/kg,之后气块在北上过程中高度略有上升,在到达山西中部后转向偏东方向移动,伴随高度迅速下降,比湿迅速增大,在经过山东西北部时又折向东北方向,最后途经渤海由东南方向到达暴雨区,此时比湿为12.3 g/kg。850 hPa的气块来自黄海西部,初始携带大量水汽,比湿为16.5 g/kg,较其他源地明显偏高,气块前期在1 000 hPa高度近似做水平运动,进入河北东南部后略有抬升,到达暴雨区时比湿虽较源地有所下降,但仍可达到12 g/kg。700 hPa的气块来自蒙古中北部,初始比湿为8.4 g/kg,气块高度一路波动上升,比湿在2日达到峰值后开始波动下降,到达暴雨区时为7.1 g/kg。500 hPa的气块来自亚欧大陆

500 hPa高空附近,初始比湿低于4 g/kg,气块运动过程中比湿一直维持在4 g/kg以下。由此可见,此次过程中850和925 hPa为主要的水汽来源。

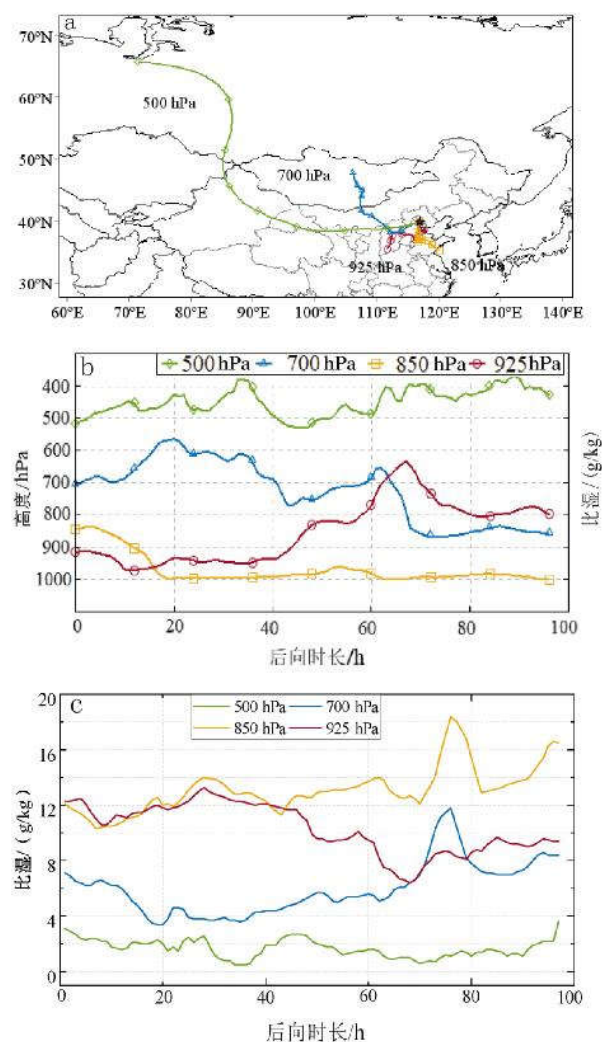


图3 2021年7月5日14时大厂(图中★位置)4个高度层96 h后向轨迹水平分布(a)、垂直分布(b)和比湿分布(c)

3.2 聚类分析

3.2.1 各通道水汽贡献

分别计算925、850、700和500 hPa 4个高度层的通道水汽贡献率,925 hPa高度上(图4a)共有4条水汽输送通道,其中西南路径(通道1和3)水汽贡献率最大,为57.57%,来源于韩国与日本之间海域的东南路径(通道4)也占有18.19%,而通道1和4的水汽来源于黄海或途经黄海、渤海等海面,在东南气流的引导下向西北方向移动,通道1的气块在到达河北中部时受西南气流影响,最终由西南路径到达暴雨区上空。850 hPa高度上(图4c)共有3条

水汽输送通道,同样是西南路径(通道1和2)水汽贡献率最大,为63.64%,其中通道2水汽来源于黄海附近海面,与925 hPa的通道1类似,引导气流由东南转向西南,最终由西南路径到达暴雨区上空。700 hPa高度上(图4e)以西北(通道3)和偏西路径(通道1和2)占主导。500 hPa高度上(图4g)只有西北(通道1、3和4)和偏西(通道2)两条路径。结合轨迹高度分布情况,925 hPa(图4b)和850 hPa(图4d)的主要水汽通道源地气块高度均位于850 hPa以

下,气块在到达暴雨区前近似做水平运动,700 hPa(图4f)的主要水汽通道源地气块高度位于700 hPa附近,之后一直维持在600~700 hPa。500 hPa(图4h)的主要水汽通道源地气块高度位于500 hPa附近,随后在向东移动过程中均呈上升趋势,最高达到350 hPa以上,直至降水开始前24 h左右开始下降。

整体来看,源自低层的气块首先在东南气流的引导下向西北方向移动,随后转为西南气流的引导,通过西南路径为暴雨区上空850和925 hPa带来丰

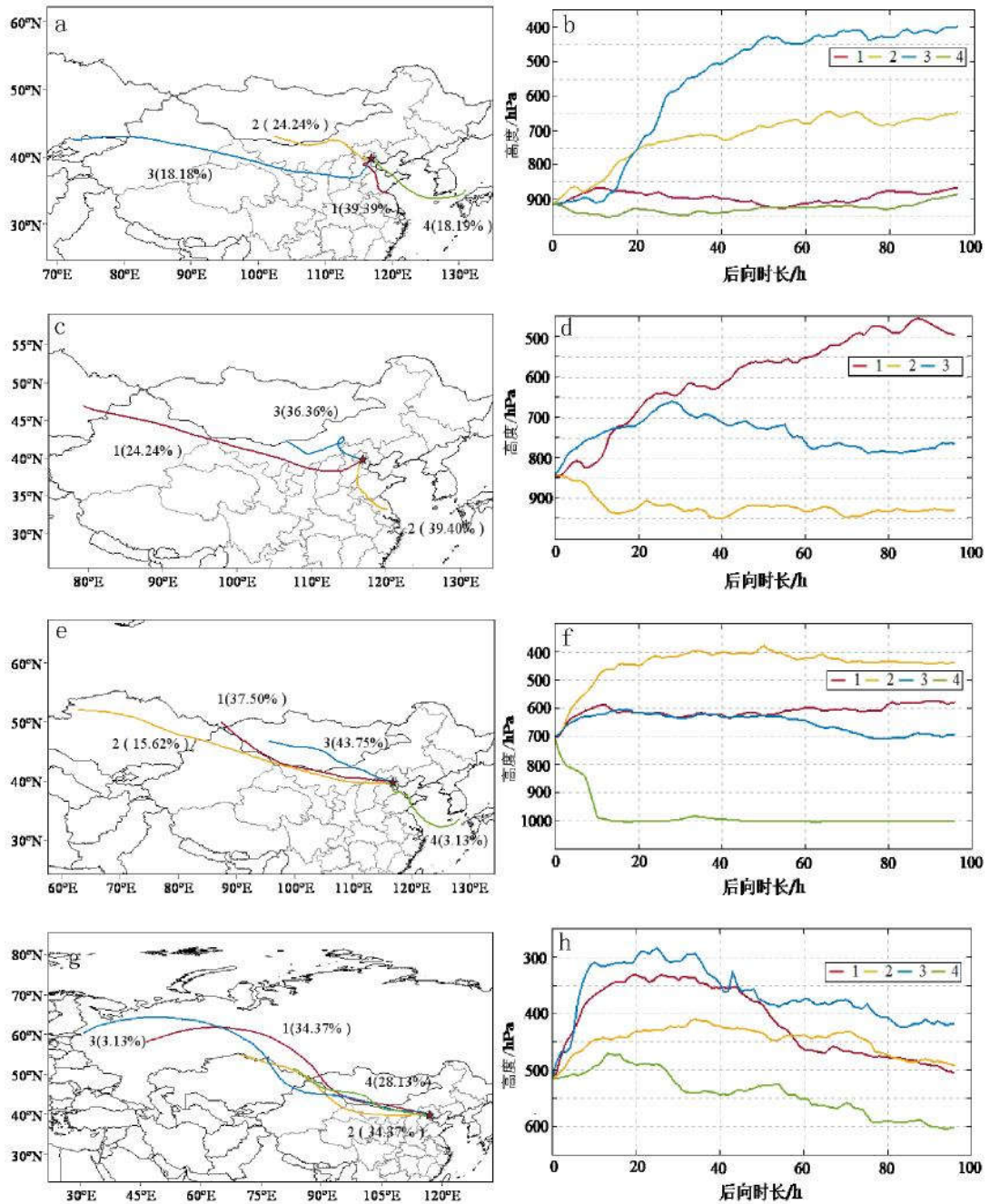


图4 后向模拟96 h通过不同高度水汽传输通道在7月5日14时到达暴雨区水汽轨迹的水平分布和垂直分布以及通道水汽贡献率

(a,b为925 hPa,c,d为850 hPa,e,f为700 hPa,g,h为500 hPa)

富的水汽,同时源自中高层的气块,随着西风带长波槽脊的运动,在西北或偏西气流的引导下为暴雨区上空 500 hPa 带来干空气,使层结不稳定性加大,进而有利于强对流天气的发生。

3.2.2 整层水汽贡献

为了更直观地看到整层的水汽贡献,对 925~500 hPa 整层高度的后向 96 h(1 日 14 时—5 日 14 时)气块再分别进行后向 24、48、72 和 96 h 聚类(图 5a~5d),聚类结果以 3 或 4 条为主,其中后向 24 h 的聚类结果以西南路径占主导,随着后向时间的延长,聚类结果均以西北路径占主导。

通过对 4 个高度层气块水汽含量定量分析,发现源自低层的气块,在东南或西南气流的引导下,到达暴雨区上空 925 和 850 hPa 时,比湿均在 12 g/kg,为暴雨区上空带来丰富的水汽,作为其主要水汽通道的西南路径水汽贡献分别占 57.57%和 63.64%。源自亚欧大陆中高层的气块,整个过程中比湿都相对较小,随着西风带长波槽脊的运动,在西北或偏西气流的引导下为暴雨区上空 500 hPa 带来干空气,使层结不稳定性加大,进而有利于强对流天气的发生。通过上述分析表明,925 和 850 hPa 西南路径上的水汽是暴雨区最为主要的水汽通道和来源,500 hPa 干空气的入侵加大了层结不稳定性,有利于强对流天气的发生。

4 水汽通量及比湿特征

5 日 14 时,925 hPa(图 6a)和 850 hPa(图 6b)

在 40°N 以南有两个水汽通量大值中心,最大值达到 11 g/(cm·hPa·s),在西南或偏南气流的引导下,高水汽通量不断向暴雨区输送,使得暴雨区比湿分别达到 15 和 10 g/kg;700 hPa(图 6c)和 500 hPa(图 6d)在 105°E 以西虽有水汽通量大值区和西南或偏西气流的输送,但因其绝对数值较小,为冀中平原带来的水汽有限,暴雨区的比湿仅为 1~5 g/kg。由此可见,925 和 850 hPa 在相应引导气流的作用下,水汽不断向冀中平原输送,为暴雨的形成提供了充足的水汽条件。

5 微波辐射计反演水汽特征

从图 7a 中可以看到,5 日 06 时,水汽总含量开始迅速上升,09—10 时达到最大,为 38 mm,随后略有下降,14 时为 33 mm,此后由于降水的开始,水汽总含量迅速下降。图 7b 显示,06 时开始,925 和 700 hPa 高度附近的相对湿度明显增加,09 时达到 70%~80%,同时 500 hPa 以下廓线从低到高逐渐呈现出干—湿交替分布的层结,与此同时,低层水汽密度(图 7c)也迅速增大,14 时 925、850 和 700 hPa 的水汽密度分别达到 14、12 和 8 g/m³,上述过程都反映出云中水汽在不断积累。14 时随着降雨的开始,干、湿交替分层现象趋于结束,整个过程中 500 hPa 的水汽密度一直维持在 4 g/m³ 以下。可见,在降雨开始前,低层湿度在 2~3 h 内迅速增加,暴雨区上空 925 和 850 hPa 水汽总量大,结合大的水汽密度,

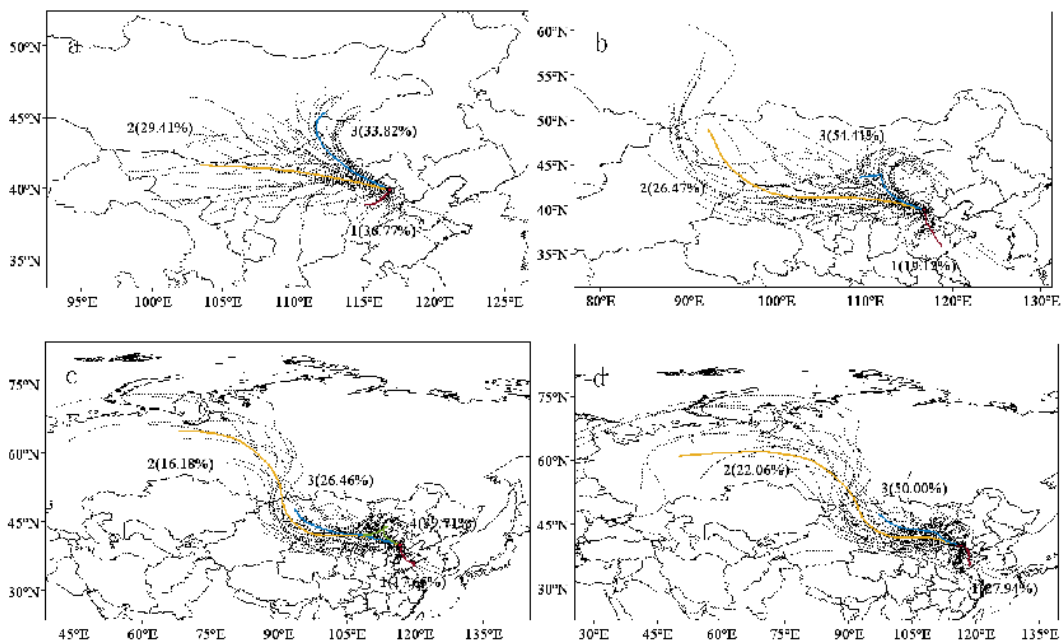


图 5 925~500 hPa 分别后向 24 h(a)、48 h(b)、72 h(c)、96 h(d)聚类
(a、b、c、d 分别为 925、850、700 和 500 hPa)

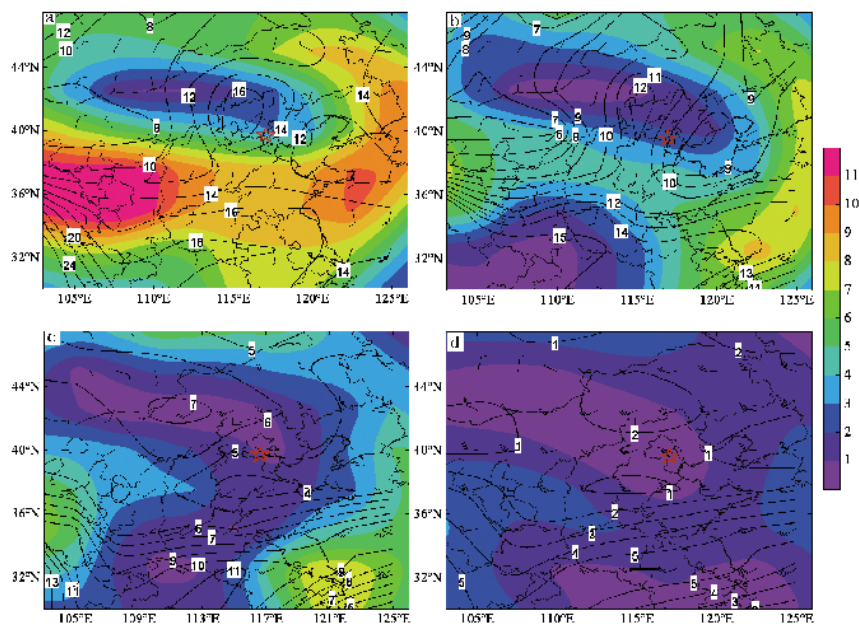


图 6 2021 年 7 月 5 日 14 时 925 hPa(a)、850 hPa(b)、700 hPa(c)和 500 hPa(d)水汽通量(填色,单位: $\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$)、比湿(等值线,单位: g/kg)与风场叠加

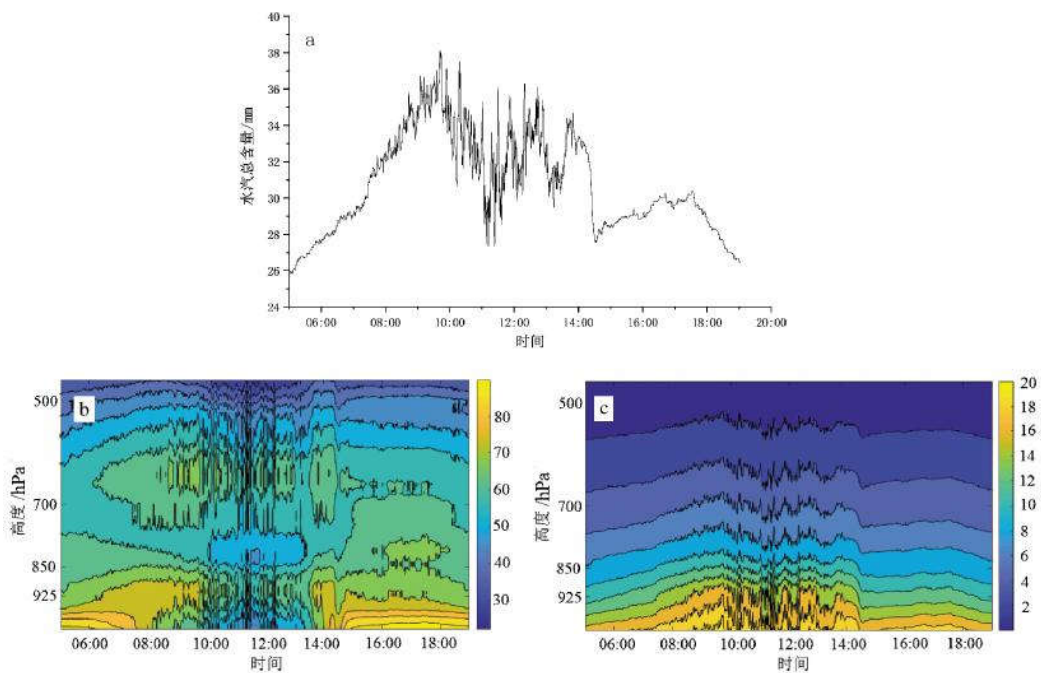


图 7 2021 年 7 月 5 日大厂站微波辐射计反演的水汽总含量曲线(a,单位: mm)、相对湿度廓线(b,单位: $\%$)和水汽密度廓线(c,单位: g/m^3)

有利于强降水的形成。

6 结论与讨论

通过引入 HYSPLIT 模式和微波辐射计等新方法和新资料,对 2021 年 7 月 5 日冀中平原一次暖区暴雨过程的水汽输送特征进行对比分析,得到如下结论:

(1)利用 HYSPLIT 模式对大厂进行 4 个高度

层的 96 h 后向轨迹模拟,结果表明:降水开始前,500 hPa 水汽含量较少,925 和 850 hPa 的比湿在 12 g/kg 以上,是本次过程的主要水汽贡献者。对 925~500 hPa 整层高度的后向 96 h 气块再分别进行后向聚类分析,后向 24 h 的聚类结果以偏南路径占主导,随着后向时间的延长,聚类结果均以西北路径占主导。

(2)分别计算不同高度层的通道水汽贡献率,得

到925和850 hPa高度的主要水汽通道,是源自黄海或途经黄海、渤海等地的西南路径,水汽贡献率分别占57.57%和63.64%,为暴雨区低层带来丰富的水汽,而500 hPa高度的水汽源地气块高度相对较高,在西北或偏西气流的引导下为暴雨区上空带来干空气,使层结不稳定性加强。

(3)降雨开始前,925和850 hPa在相应引导气流的作用下,水汽不断向冀中平原输送,使得丰富的水汽条件主要集中于低层大气,而500 hPa上没有明显有利的水汽输送条件,与HYSPLIT模式模拟的结果一致。

(4)应用微波辐射计对降雨过程的水汽特征进行分析,在降雨开始前,700 hPa以下湿度增加显著,水汽总量和水汽密度大,有利于强降水的形成。

3种资料分析结果表明,降雨开始前,暴雨区上空925和850 hPa的湿度条件都较好,而500 hPa为干空气,HYSPLIT模式和微波辐射计两种高时空分辨率资料的应用,可以及时且多方位分析水汽特征,为暖区暴雨落区、强度等精细化准确预报预警提供一定参考。此外,上述结论仅为一次暖区暴雨分析所得,仍需对更多相似个例进行研究和验证。

参考文献:

- [1] 黄土松,李真光,包澄澜,等.华南前汛期暴雨[M].广州:广东科技出版社,1986:244.
- [2] 陶诗言.中国之暴雨[M].北京:科学出版社,1980:33.
- [3] 陈玥,谌芸,陈涛,等.长江中下游地区暖区暴雨特征分析[J].气象,2016,42(6):724-731.
- [4] 吴亚丽,蒙伟光,陈德辉,等.一次华南暖区暴雨过程可预报性的初值影响研究[J].气象学报,2018,76(3):323-342.
- [5] 任华荣,高志球,李煜斌,等.不同边界层方案对一次华北暴雨数值模拟的敏感性研究[J].气象科学,2017,37(1):10-20.
- [6] 伍志方,蔡景就,林良勋,等.2017年广州“5·7”暖区特大暴雨的中尺度系统和可预报性[J].气象,2018,44(4):485-499.
- [7] 杨晓亮,杨敏,段宇辉,等.京津冀一次暖区大暴雨的成因分析[J].暴雨灾害,2021,40(5):455-465.
- [8] 王华,李宏宇,仲跻芹,等.京津冀一次罕见的双雨带暴雨过程成因分析[J].高原气象,2019,38(4):856-871.
- [9] 张芹,王洪明,张秀珍,等.2017年山东雨季首场暖区暴雨的特征分析[J].高原气象,2018,37(6):1696-1704.
- [10] 李欣,张璐,江敦双.青岛地区暖区暴雨特征研究分析[J].气象科学,2021,41(2):270-277.
- [11] 徐玥,张桂华,孟莹莹,等.黑龙江省一次伴有龙卷的暖区暴雨成因分析[J].沙漠与绿洲气象,2020,14(1):40-

- 48.
- [12] 阿不力米提江·阿布力克木,汤浩,张俊兰.新疆一次罕见的暖区暴雨过程特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2019,13(6):1-12.
- [13] 孙明生,李国旺,尹青,等.“7·21”北京特大暴雨成因分析(I):天气特征、层结与水汽条件[J].暴雨灾害,2013,32(3):210-217.
- [14] 孙密娜,王秀明,胡玲,等.华北一次暖区暴雨而雷暴触发及传播机制研究[J].气象,2018,44(10):1255-1266.
- [15] 王思懋,赵桂香,赵瑜,等.2016年7月山西一次大暴雨天气过程的多尺度系统相互作用分析[J].干旱气象,2017,35(5):857-867.
- [16] 孙建华,汪汇洁,卫捷,等.江淮区域持续性暴雨过程的水汽源地和输送特征[J].气象学报,2016,74(4):542-555.
- [17] 马梁臣,孙力,王宁.东北地区典型暴雨个例的水汽输送特征分析[J].高原气象,2017,36(4):960-970.
- [18] 许彬,熊秋芬,张玉婷,一次热带风暴背景下南昌暴雨的水汽来源及输送特征[J].气象,2019,45(10):1392-1401.
- [19] 陶健红,孔祥伟,刘新伟.河西走廊西部两次极端暴雨事件水汽特征分析[J].高原气象,2016,35(1):107-117.
- [20] 陈红专,叶成志,陈静静,等.2017年盛夏湖南持续性暴雨过程的水汽输送和收支特征分析[J].气象,2019,45(9):1213-1226.
- [21] 刘国强,佟欣怡,邓京,等.2012年6月巴州一次暴雨水汽输送特征[J].沙漠与绿洲气象,2019,13(2):22-31.
- [22] 江志红,梁卓然,刘征宇,等.2007淮河流域强降水过程的水汽输送特征分析[J].大气科学,2011,35(2):361-372.
- [23] 阙志萍,凌婷,吴凡,等.江西一次连续大暴雨的水汽特征分析[J].干旱气象,2021,39(1):76-86.
- [24] 戴竹君,王黎娟,管兆勇,等.热带风暴“Bilis”(0604)暴雨增幅前后的水汽输送轨迹路径模拟[J].大气科学,2015,39(2):422-432.
- [25] 司福意,张一平,赵海青,等.豫北“7·9”特大暴雨的形成与极端性探析[J].气象与环境科学,2021,44(1):65-73.
- [26] 孔祥伟,杨建才,李红,等.河西走廊西部干旱区一次极端暴雨天气的水汽特征分析[J].气象,2021,47(4):412-423.
- [27] 王婧羽,崔春光,王晓芳,等.2012年7月21日北京特大暴雨过程的水汽输送特征[J].气象,2014,40(2):133-145.
- [28] DRUMOND A, NIETO R, GIMENO L. On the contribution of the tropical western hemisphere warm pool source of moisture to the Northern Hemisphere precipitation through a Lagrangian approach[J]. J Geophys Res, 2011, 116(21):1-4.

- [29] DRAXLER R R, HESS G D. An overview of the HYSPLIT_4 modeling system of trajectories, dispersion, and deposition[J]. Aust Meteor Mag, 1998, 47(4): 295–308.
- [30] MALIN G, DAVID R, CHEN D L. Extreme rainfall events in southern Sweden: where does the moisture come from [J]. Tellus, 2010, 62A: 605–616.
- [31] TIAN F Y, ZHENG Y G, ZHANG T. Statistical characteristics of environmental parameters for warm season short-duration heavy rainfall over central and Eastern China [J]. Journal of Meteorological Research, 2015, 29(3): 370–384.
- [32] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法[M]. 第4版. 北京: 气象出版社, 2007: 329–331.

Water Vapor Characteristics of a Rainstorm in Warm Region Based on Multisource Data

ZHOU Tao^{1,2}, LI Na², XU Min², WANG Qingchuan^{1,2}, ZHANG Xianghan²

(1. Key Laboratory of Meteorology and Ecological Environment of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China;
2. Langfang Meteorological Bureau, Langfang 065000, China)

Abstract Based on the conventional meteorological observation data, NCEP reanalysis data ($1^{\circ} \times 1^{\circ}$), microwave radiometer data and the HYSPLIT model, the characteristics of water vapor transport during a heavy rain in the warm zone of Jizhong Plain on July 5, 2021 was comparatively analyzed. The results showed that before the onset of precipitation in this process, the specific humidity of 925 hPa and 850 hPa were above 12 g/kg by applying the analysis of the HYSPLIT model simulation, which were the main water vapor contributors in the rainstorm area, and the main water vapor channels were the southwest route, the contribution rate of water vapor accounted for 57.57% and 63.64% respectively. Under the guidance of the southeast turning southwest airflow, the air masses which were originated from the Yellow Sea or passed through the Yellow Sea, Bohai Sea, etc., brought abundant water vapor to the lower layers of the rainstorm area. At the same time, the air masses originating from the middle and high levels of the Eurasian continent, brought dry air to 500 hPa over the rainstorm area, which constituted an unstable stratification of upper dry and lower wet along with the movement of the longwave troughs and ridges in the westerly zone. Before the start of precipitation, under the action of the corresponding guiding airflow at 925 hPa and 850 hPa, water vapor were continuously transported to the central Jizhong Plain, so that the excellent water vapor conditions were mainly concentrated in the lower atmosphere, which was consistent with the simulation results of the HYSPLIT model. The water vapor characteristics which were analyzed by microwave radiometer, showed that the water vapor content at altitudes below 700 hPa increased significantly before the rainfall started, and the maximum water vapor density reached 14 g/m³. Three different data were analyzed to get similar conclusions, but the application of the two high-temporal-spatial-resolution data of the HYSPLIT mode and microwave radiometer can analyze the water vapor characteristics in a more timely and detailed manner, and provide accurate forecast and early warning of the rainstorm falling area and intensity in warm regions.

Key words warm-sector rainstorm; HYSPLIT; microwave radiometer; water vapor characteristics