

吴进,李琛,于波,等,2018. 两类短时强降水天气边界层气象要素变化特征[J]. 气象,44(7):902-910.

两类短时强降水天气边界层气象要素变化特征^{*}

吴进^{1,2,3} 李琛⁴ 于波³ 卢冰¹ 王庆元⁵

1 中国气象局北京城市气象研究所,北京 100089

2 京津冀环境气象预报预警中心,北京 100089

3 北京市气象台,北京 100089

4 北京市气象服务中心,北京 100089

5 天津市气象台,天津 300074

提 要: 本文基于2013—2015年北京铁塔的气象观测数据,结合VDRAS、地面自动站、NCEP再分析资料等,将短时强降水个例分为地面辐合线型和无地面辐合线型两类,并着重对两类短时强降水天气的边界层气象要素演变特征进行分析,寻找短时强降水发生的预报信号。结果表明:根据铁塔气象要素变化基本无法预判无地面辐合线型强降水的发生;而铁塔气象要素变化对地面辐合线型短时强降水发生具有一定预报指示意义,地面辐合线型在强降水发生前1 h,温度和位温减小,温度变率显著增大,最大达每分钟下降0.35℃;在强降水开始前3 h,地面至325 m比湿增大,降水开始前20 min,比湿减小3.5 g·kg⁻¹;低空风切变在强降水开始前20 min增大到“强烈”到“严重”程度,比湿跟低空风切变的提前量约为10~20 min。因此,预报业务中关注铁塔气象要素及衍生物理量演变,对地面辐合线型短时强降水预报预警有一定指示意义。

关键词: 边界层,短时强降水,地面辐合线,气象铁塔,VDRAS

中图分类号: P421

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.07.005

Study on the Variation Characteristics of Meteorological Elements in the Boundary Layer of Two Types of Short-Time Heavy Rainfall

WU Jin^{1,2,3} LI Chen⁴ YU Bo³ LU Bing¹ WANG Qingyuan⁵

1 Institute of Beijing Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089

2 Beijing-Tianjin-Hebei Prediction and Early Warning Center for Environmental Meteorology, Beijing 100089

3 Beijing Municipal Weather Forecast Center, Beijing 100089

4 Beijing Municipal Meteorological Service Center, Beijing 100089

5 Tianjin Meteorological Observatory, Tianjin 300074

Abstract: This article focuses on the application of the 2013—2015 Beijing meteorological tower data and derivative data, combined with conventional and unconventional observation data, such as VDRAS, automatic weather stations and NCEP reanalysis data. According to the evolution of the boundary layer elements, short-time heavy precipitation is divided into two types, one has the surface convergence line and the other has not. And we also focus on the evolution of the boundary layer elements of the two types short-time rainfalls to find the forecasting signal before heavy rainfalls occur in summer, which could provide reference for the short-time heavy rainfall forecasting. The results show that variation of the elements of the meteorological power can not predict for the occurrence of the non-surface convergence line type, but it has certain guiding significance to the short-time severe rainfall of the surface convergence line type. Before such type of heavy rain occurs, the temperature and potential temperature begin to decrease

^{*} 中国气象局预报员专项(CMAYBY2016-001)资助

2017年2月22日收稿; 2018年2月8日收修定稿

第一作者:吴进,主要从事北京地区天气预报. Email: wujin_0472@163.com

obviously and decline rate gradually increases. The temperature change rate gradually increases to -0.35°C per minute. The specific humidity increases significantly 3 h before the start of the heavy rainfall below 325 m. When it begins to rain, the specific humidity decreases about $3.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ during 20 min before the rainfall begins. The low-level wind shear is up to the strong degree. But the specific humidity and low-level wind shear can show the signals at 10–20 min lead time. So the evolution of tower meteorological elements and the physical quantities have indicative meaning for the forecasting and warning of short-time rainfall of surface convergence line type.

Key words: boundary layer, short-time heavy precipitation, surface convergence line, meteorological tower, VDRAS (Variational Doppler Radar Analysis System)

引言

暴雨往往不断挑战着大型城市应对自然灾害能力的底限。短时强降水具有突发性、强度大、局地性强等特点,极易导致泥石流、山体崩塌滑坡、城市内涝等次生地质灾害。我国的气象工作者在暴雨研究方面取得了较大进展,一般认为,在稳定的大尺度背景下,天气尺度系统的活动造成一次次短期暴雨过程;在有利的天气尺度背景中,中、小尺度系统的发生、发展触发了一次次的短时暴雨(孙继松等, 2006)。而大城市及其周边的中、小尺度系统对强对流天气的触发大都与城市边界层密切相关,翟国庆和孙淑清(1986)很早就提出:单站风速廓线中出现急流状的结构时往往伴随有强烈天气,这类边界层内的急流风速较大,平均高度却比较低,通常在 900 m 以下,因此在 850 hPa 的常规图上不易被发现,而 1000 m 的流场图上则较清楚;蒙伟光等(2007)研究了城市化对珠江三角洲强雷暴天气的影响,利用数值试验模拟出与城市影响有关的低层辐合主要位于 500 m 以下的近地面层;张光智等(2005)和 Li et al(2012)通过边界层探测资料和模式模拟指出低空风切变可以激发湍流;许多业务工作者也通过分析一次或多次中尺度暴雨个例发现边界层触发机制对短时强降水发生及发展的贡献,孔凡超等(2016)通过分析河北一次大暴雨天气发现切变线对流云团和暖区对流云团合并而成的持续拉长状中尺度对流系统,配合地面辐合线引发强降水;喻谦花等(2016)发现地面热力不均匀导致局地升温是一次地面中尺度辐合系统生成的主要原因,而地面中尺度辐合系统的发生发展触发了中小尺度对流系统的发生发展,从而导致大暴雨;王坚红等(2017)研究发现华南沿海暖区暴雨主要影响系统为两类辐合线低值系统,有别于锋面气团抬升,造成暖区降水雨强远高于华南锋面降水。在华北地区也可以经常看

到一些 β 中尺度系统造成的局地暴雨现象(孙继松, 2005),它们的出现与地形或有关或几乎无关,目前的业务数值模式对这类暴雨的预报能力较弱。由于受到目前观测水平和资料时空分辨率的限制,我们对暴雨边界层气象要素演变认识仍非常有限。

目前暴雨天气的研究资料大都在地面及 925 hPa 以上,对于边界层内的气象要素的观测手段在时空分辨率上都较为有限。而在 2015 年 9 月 3 日阅兵气象服务保障中,中国科学院大气物理研究所北京铁塔(以下简称北京铁塔)和香河铁塔、天津市气象局大气边界层铁塔联合为首都气象预报和服务提供了重要的边界层观测资料,同时,这一气象服务保障案例的圆满成功也给灾害性天气监测与预报的边界层气象要素探索带来极大启示。气象铁塔数据在以往的研究中,多用于研究大气边界层辐射特征(Dutton, 1990;王正兴等, 2009;江玉华等, 2010)、大气成分研究(李昕等, 2003)、边界层强风天气(刘小红和洪钟祥, 1996;李倩等, 2004;程雪玲等, 2014)、雾和霾天气分析(吴彬贵等, 2008;刘熙明等, 2010;花丛等, 2015),也有少数应用于降水分析,譬如用于分析渤海湾回流降雪(孙密娜等, 2013)、冰雹天气分析(姚日升等, 2015)。本文特色之一在于使用气象铁塔数据及其衍生物理量,结合变分多普勒雷达分析系统(Variational Doppler Radar Analysis System, VDRAS)反演要素场等其他多种常规、非常规探测资料研究分析边界层在北京地区短时强降水天气的作用,并探讨其对短时强降水天气预报预警的指示意义。

1 资料与方法

1.1 个例筛选

北京铁塔高 325 m,为保证铁塔气象要素能准确表征短时强降水发生前后的环境场,筛选了

2013—2015 年在铁塔本站发生超过 $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的短时强降水个例,并结合铁塔数据完整性,选取 7 个个例(表 1)。通过对逐个个例的初步分析发现,当地面存在辐合线时,铁塔气象要素在强降水发生前及发生时有显著的变化,并对强降水发生具有一定

预报指示意义;当地面不存在辐合线时,铁塔气象要素变化基本无法预判强降水的发生,即气象铁塔要素演变仅在地面存在辐合线时对强降水的预报预警存在参考价值。结合上述结果,本文将短时强降水个例分为地面辐合线型、无地面辐合线型两类。

表 1 2013—2015 年北京铁塔出现短时强降水个例

Table 1 Beijing Meteorological Tower short-term heavy precipitation cases in 2013—2015

短时强降水出现时间/BT	降水量 $>20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的观测站	是否有地面辐合线
2013 年 7 月 8 日 00—01 时	北京铁塔、顺义、平谷	是
2013 年 8 月 11 日 07—08 时	北京铁塔	否
2014 年 7 月 30 日 00—01 时	北京铁塔、大兴	否
2015 年 7 月 17 日 00—01 时	北京铁塔、海淀	否
2015 年 7 月 27 日 20—21 时	北京铁塔、海淀、朝阳、丰台、密云、平谷、顺义	是
2015 年 8 月 7 日 19—20 时	北京铁塔、海淀、朝阳	是
2015 年 9 月 4 日 16—17 时	北京铁塔、石景山、门头沟、海淀	否

1.2 资料

本文主要使用北京铁塔($39^{\circ}58'\text{N}$ 、 $116^{\circ}22'\text{E}$)逐 5 min 观测数据,垂直方向 15 层,观测高度分别为 8、15、32、47、65、80、102、120、140、160、180、200、240、280、320 m,观测要素为水平风向、风速、温度和相对湿度;垂直速度观测数据,垂直方向 7 层,观测高度分别为 8、16、47、80、140、200、280 m,同时结合 NCEP 再分析资料、VDRAS 反演要素场、地面自动站资料、观象台 S 波段雷达等常规和非常规观测资料进行详细分析。其中,VDRAS 系统是利用四维变分同化技术和一个包含简化暖雨参数化方案的三维云尺度数值模式,对北京和天津两部新一代 S 波段天气雷达资料进行 12 分钟间隔的快速循环同化分析,并融合地面自动站观测、雷达 VAD 分析和精细数值预报结果,反演得到与对流风暴生消发展密切相关的低层热力、动力三维结构,包括水平风场、垂直速度、辐合辐散、扰动温度和扰动温度梯度等,以及它们的时间增量,用以指导北京及其周边地区对流风暴新生和发展演变的临近预报和预警(Chen et al,2007)。

2 两种类型的典型代表个例分析

2.1 2015 年 9 月 4 日无地面辐合线型典型个例分析

受高空槽及低涡的共同影响,2015 年 9 月 4 日

北京出现全市性暴雨,城区最强降水时间段出现在 16—17 时(图 1a),北京铁塔与海淀分别出现 20 与 $39\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的短时强降水,城区大部雨强为 $10\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上。由于天气尺度动力及水汽作用,14 时北京已产生大范围层状云降水,925 hPa 以上均盛行低涡前部偏南急流,而 925 hPa 在北京城区至河北东部存在东西向偏东风与偏南风的气旋性暖式切变(图 1b),20 时 925 hPa 以上仍以偏南急流为主,高层及中层系统并未过境,925 hPa 风切变维持。

进一步通过短时强降水发生的天气形势的垂直结构,分析导致强降水发生的触发机理。NCEP 再分析资料的垂直剖面显示(图 1c),9 月 4 日 00 时起 925 hPa 以下盛行东南风,925~700 hPa 为南风,700 hPa 以上盛行西风,风随高度顺转说明 700 hPa 以下受较强暖平流影响;12 时左右 950 hPa 由 $-0.2\text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ 弱上升变为 $0.2\text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ 弱下沉,16℃等温线下降。与此同时,VDRAS 0.2 km 反演风场表征了京津冀相对湿度呈东南高西北低,扰动温度呈东南低西北高的分布模态(图 2a),反映出边界层东南气流湿冷特征,边界层冷垫逐步形成。而 925 hPa 左右为 $-0.2\text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ 弱上升气流,在 15 时之后上升气流逐渐加强,上升运动伸展至 700 hPa 以上,最大上升速度达 $1\text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,地面未形成辐合线,而 925 hPa 切变线造成的弱上升运动与整层垂直运动的建立与发展密切相关。

北京地区 9 月 4 日 15:30 已出现了大范围的层状云降水(图 2c),此时平原地区一致盛行东风

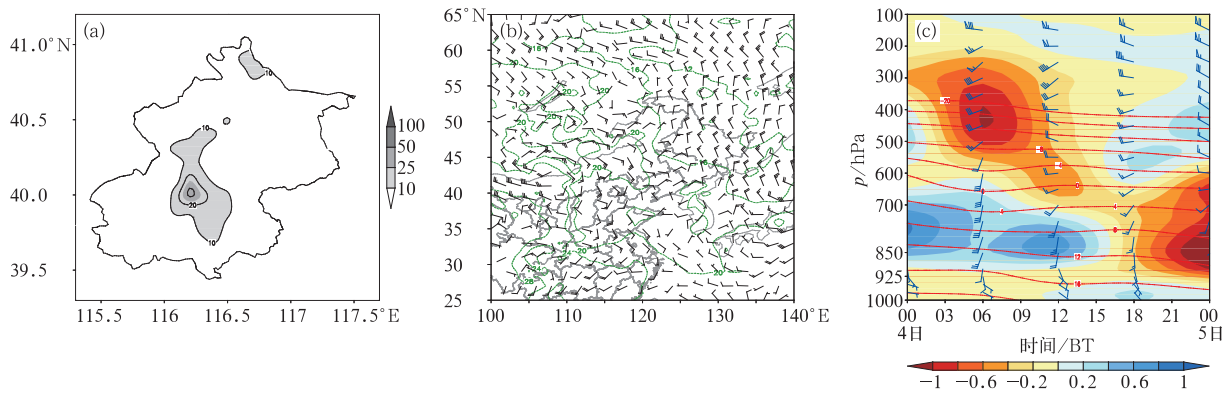


图 1 2015 年 9 月 (a)4 日 16—17 时北京降水强度(单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$), (b)4 日 14 时 925 hPa 风场和温度场(单位: $^{\circ}\text{C}$), (c)4—5 日 NCEP 再分析资料剖面图(阴影为垂直速度, 单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$; 红色虚线为温度, 单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 1 (a) Rainfall intensity (unit: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) in Beijing 16:00 BT to 17:00 BT 4 September, (b) 925 hPa wind and temperature fields (unit: $^{\circ}\text{C}$) at 14:00 BT 4 September, and (c) NCEP reanalysis data profile of 4—5 September 2015 (shaded area: vertical velocity, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$; red dashed lines: temperature, unit: $^{\circ}\text{C}$)

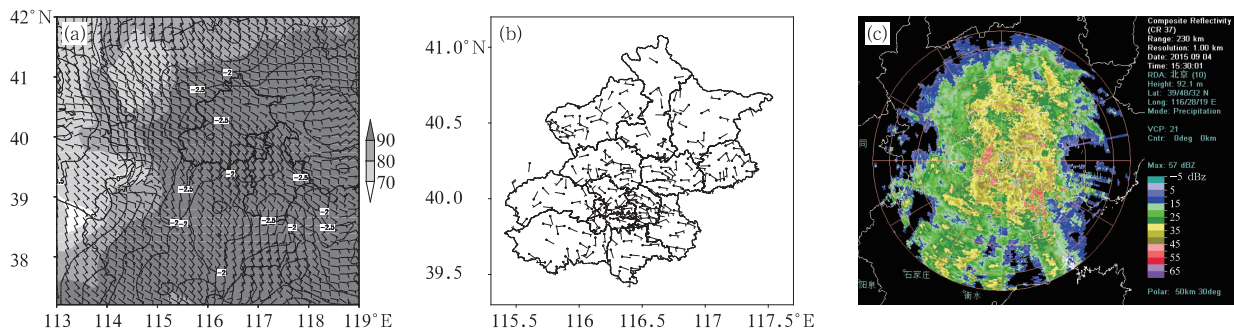


图 2 2015 年 9 月 4 日 15:30 北京地区 (a)VDRAS 反演 2.0 km 风场、相对湿度(阴影, 单位:%) 和扰动温度场(单位: $^{\circ}\text{C}$), (b)地面自动站风场, (c)观象台雷达组合反射率

Fig. 2 (a) VDRAS 2.0 km wind field, relative humidity (shaded area, unit: %) and the perturbation temperature (unit: $^{\circ}\text{C}$), (b) ground automatic station wind field, (c) radar reflectivity in Beijing Region at 15:30 BT 4 September 2015

(图 2b), 大于 50 dBz 的强对流带位于北京西部山区与平原交界处, 近地面偏东气流沿山区爬升进一步加强垂直上升运动, 表明地形强迫抬升对偏东风降水的增幅作用。综上所述, 925 hPa 切变线及地形的强迫抬升作用可能是本次层状云降水中强对流天气的触发机制。

与此同时, 位于 325 m 以下近地面层的铁塔气象要素在无地面辐合线型短时强降水类型中有何种演变特征? 为全面反映地面气象要素变化, 通过铁塔数据的基础观测要素, 即温度、相对湿度、风场及自动站气压等计算出温度变率、位温、比湿、低层风切变(王学永等, 1986)、温度平流等衍生物理量, 其中低空风切变使用国际民航组织第五次航空会议采

用的等级标准(表 2), 分为微弱、轻度、中度、强烈、严重五个等级。

表 2 国际民航组织第五次航空会议采用的低空风切变等级标准(赵树海, 1994)

Table 2 Low-level wind shear standards adopted by the International Civil Aviation Organization (ICAO) in the Fifth International Aviation Conference (赵树海, 1994)

类别	影响程度	数值标准	
		$(\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \cdot (30 \text{ m})^{-1}$	s^{-1}
0	微弱	<1.0	<0.033
1	轻度	$1.1 \sim 2.0$	$0.033 \sim 0.067$
2	中度	$2.1 \sim 4.0$	$0.068 \sim 0.133$
3	强烈	$4.1 \sim 6.0$	$0.134 \sim 0.20$
4	严重	>6.0	>0.20

从9月4日11—18时325 m北京铁塔气象要素变化分析,温度与位温12时达到当日最高温度 $24\sim 25^{\circ}\text{C}$,此后开始下降(图3a),但温度变率与气温日变化基本一致,约每小时下降 $0.5\sim 1^{\circ}\text{C}$,与此同时,比湿在11时之后显著增大,尤其在32 m以下、100和280 m左右,最大达 $17\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,温度与湿度变化与前面所分析的边界层为东南冷湿平流结论一致,说明边界层冷垫逐渐建立。短时强降水16时左右开始,约20 min后比湿开始减小,仅1 h下降 $1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右(图3b);强降水发生前除240 m左右和80 m以下存在弱冷平流之外,直至强降水开始后冷、暖平流才逐渐加强,在降水结束后迅速减弱;低空风切变基本与冷、暖平流同位相变化,“强烈”和“严重”低空风切变集中在32 m以下,而32 m

以上低空风切变最大仅为“中度”(图3c);从风场来看(图3d),在11—16时,地面至325 m一致盛行偏东风,15:30开始100 m以上风速加大到 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,在强降水发生期间16—17时240 m以上风速增大至 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,形成边界层东南风急流,但从垂直速度分布上来看以弱下沉为主(图略),这与NCEP资料所分析的三维结构一致。总体来看,本次短时强降水发生前及发生过程中,北京铁塔各气象要素变化并不剧烈,且仅从前期风速、比湿增大基本无法预判强降水的发生。

2.2 2015年8月7日地面辐合线型代表个例分析

受东北冷涡及偏南气流影响,2015年8月7日北京出现大到暴雨,城区最强降水时段为19—20

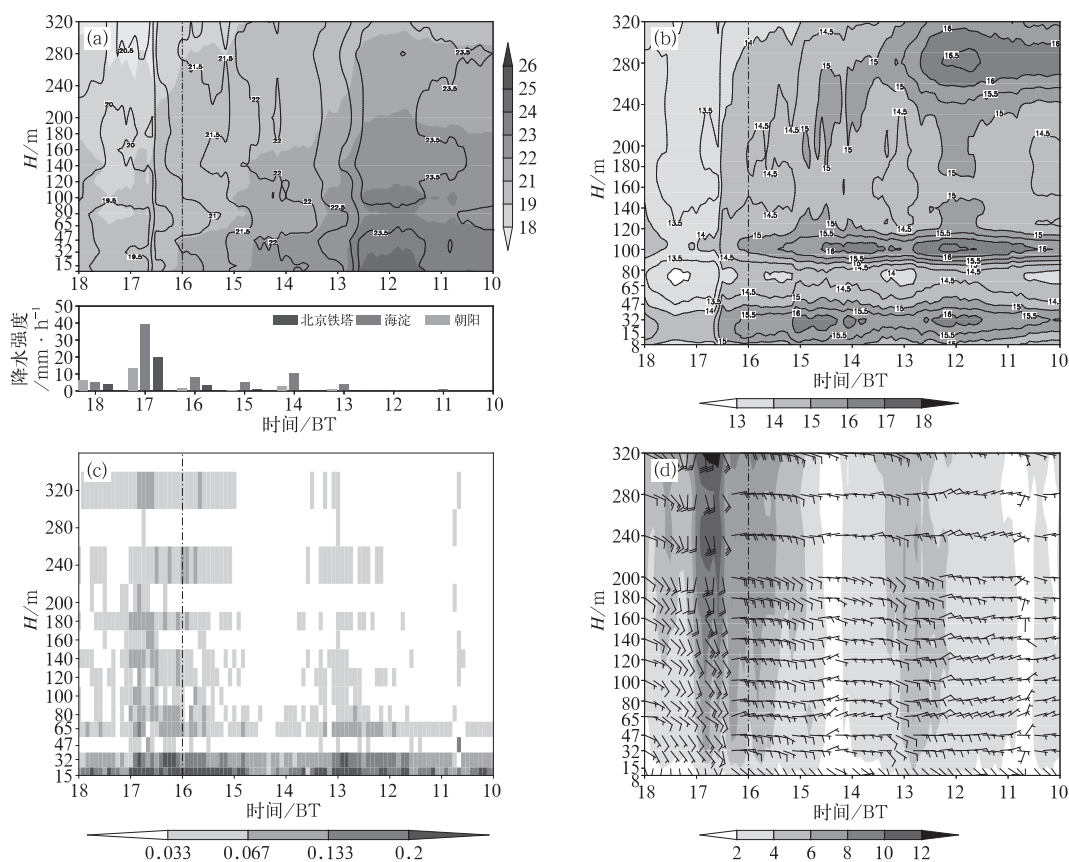


图3 2015年9月4日11—18时北京铁塔各物理量随时间的变化
(a)温度(阴影,单位: $^{\circ}\text{C}$)、位温(等值线,单位: $^{\circ}\text{C}$)和降水强度,(b)比湿(单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$),
(c)低空风切变(单位: s^{-1}),(d)风场(阴影为全风速,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
(虚线为短时强降水开始时间)

Fig. 3 Changes of physical quantities with time of tower from 11:00 to 18:00 BT 4 September 2015
(a) temperature (shadow, unit: $^{\circ}\text{C}$), potential temperature (contour, unit: $^{\circ}\text{C}$) and rainfall intensity,
(b) specific humidity (unit: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), (c) low-level wind shear (unit: s^{-1}),
(d) wind field (shadow: full wind speed, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
(Dotted line is for the onset of heavy precipitation)

时,北京铁塔、海淀、朝阳降水强度分别达 42 、 48 和 $37 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (图 4a)。本次大到暴雨过程是典型华北夏季东北冷涡控制下的强对流天气,08 时 CAPE 已达 $2097.4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,探空曲线呈上干下湿分布,水汽、动力和不安定条件较好;20 时,500 和 700 hPa 仍受槽前偏南风控制,而 850 hPa 已经转为 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西北风,且较周围气温低 2°C 左右(图 4b),说明 20 时观象台站正在发生强对流,雷暴云团的强下沉气流使得 850 hPa 阵风增大到 6 级左右,并伴随冷中心,由此判断地面发生雷暴大风天气的可能性较大。

为反映短时强降水发生的天气形势的垂直结构,分析导致强降水发生的触发机制,采用时空分辨率较常规资料高的 VDRAS 反演要素场进行分析(图 4c)。在短时强降水发生前 3 h,地面至 2 km 均以东南风为主,2~3 km 转为南风,3 km 以上为西风,风随高度顺转反映了 3 km 以下为暖平流;8 月

7 日 18:18 在 1.5 km 以下出现上升运动,上升速度最大达 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,位于距地面 1 km 左右,同时 1~2.5 km 出现辐合,最强辐合中心位于 1 km 高度处,散度场平面图显示北京城区东南部有较强辐合,达 -0.8 s^{-1} (图 5a),与此同时,北京城区存在东西向地面辐合线,其位置与 1 km 以下的辐合区基本一致,说明该区域辐合上升运动由地面辐合线引起。18:40 左右 3 km 高度处有风切变快速移过,形成了 1.5~3.4 km 高度的强辐合上升运动,上升运动大值中心大于 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,辐合中心最大达 -1 s^{-1} 以上,位于北京城区东南部(图 5b)。此时地面辐合线仍然维持(图 5c),且对应 -0.2 s^{-1} 的弱辐合运动,3.4 km 的强辐合上升运动一直维持至 19 时,强降水开始之后由于强雷暴云团下沉气流和降水拖曳作用,形成了大于 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的下沉运动,地面辐合线消失,雷暴大风天气自北向南推进。综上所述,地

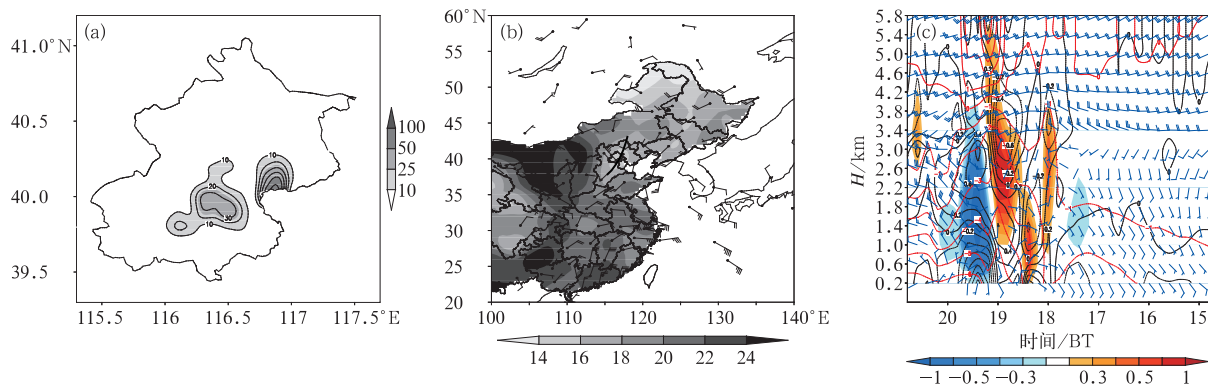


图 4 2015 年 8 月 7 日 (a) 19—20 时北京地区降水强度(单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$),
(b) 20 时 850 hPa 温度场(阴影,单位: $^\circ\text{C}$)和风场, (c) VDRAS 反演要素场(阴影:垂直速度,
单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$;黑线:散度,单位: s^{-1} ;红线:扰动温度,单位: $^\circ\text{C}$)

Fig. 4 (a) Spatial distribution of rainfall intensity (unit: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) from 19:00 BT to 20:00 BT,
(b) 850 hPa wind field and temperature field (shaded, unit: $^\circ\text{C}$) at 20:00 BT, and
(c) VDRAS inversion field of the elements on 7 August 2015 (shaded area: the vertical velocity,
unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$; black lines: divergence, unit: s^{-1} ; red lines: perturbation temperature, unit: $^\circ\text{C}$)

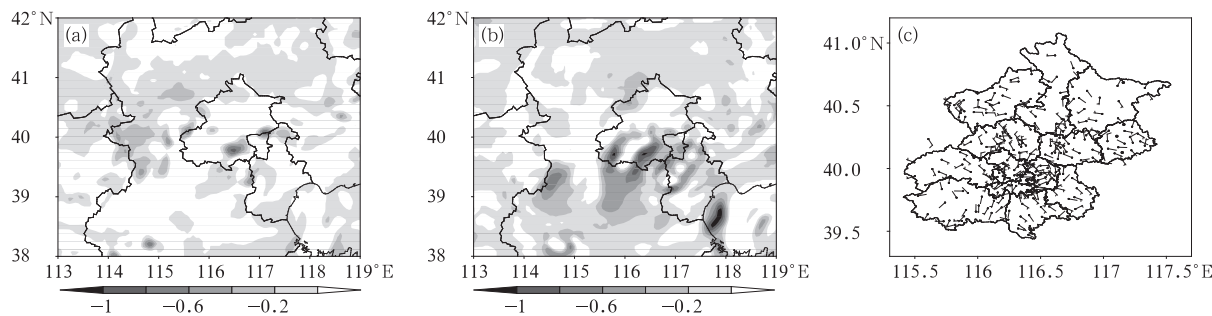


图 5 2015 年 8 月 7 日 18:18 的 1 km(a)和 18:40 的 3.4 km(b) VDRAS 散度场(单位: s^{-1})
及 18:40 北京地区地面自动站风场(c)

Fig. 5 VDRAS 1.0 km at 18:18 BT (a) and 3.4 km at 18:40 BT (b) divergence fields (unit: s^{-1}),
Beijing ground automatic station wind field at 18:40 BT (c) 7 August 2015

面辐合线配合 3 km 高度处风切变形成的辐合上升运动可能是本次短时强降水天气的触发机制。

在此类在地面辐合线生成并维持之后发生的短时强降水类型,铁塔数据及其衍生物理量会有何种演变特征? 从 7 日 14—21 时北京铁塔要素变化场

上发现,17 时温度和位温开始显著减小,递减率逐渐增大(图 6a),从每分钟下降 0.1°C 增大到 18 时每分钟下降 0.3°C ,最大值出现在 18:50 左右,每分钟下降 -0.45°C (图 6b),说明温度变率清晰反映近地面层弱冷空气,至强降水发生后,温度和位温变化

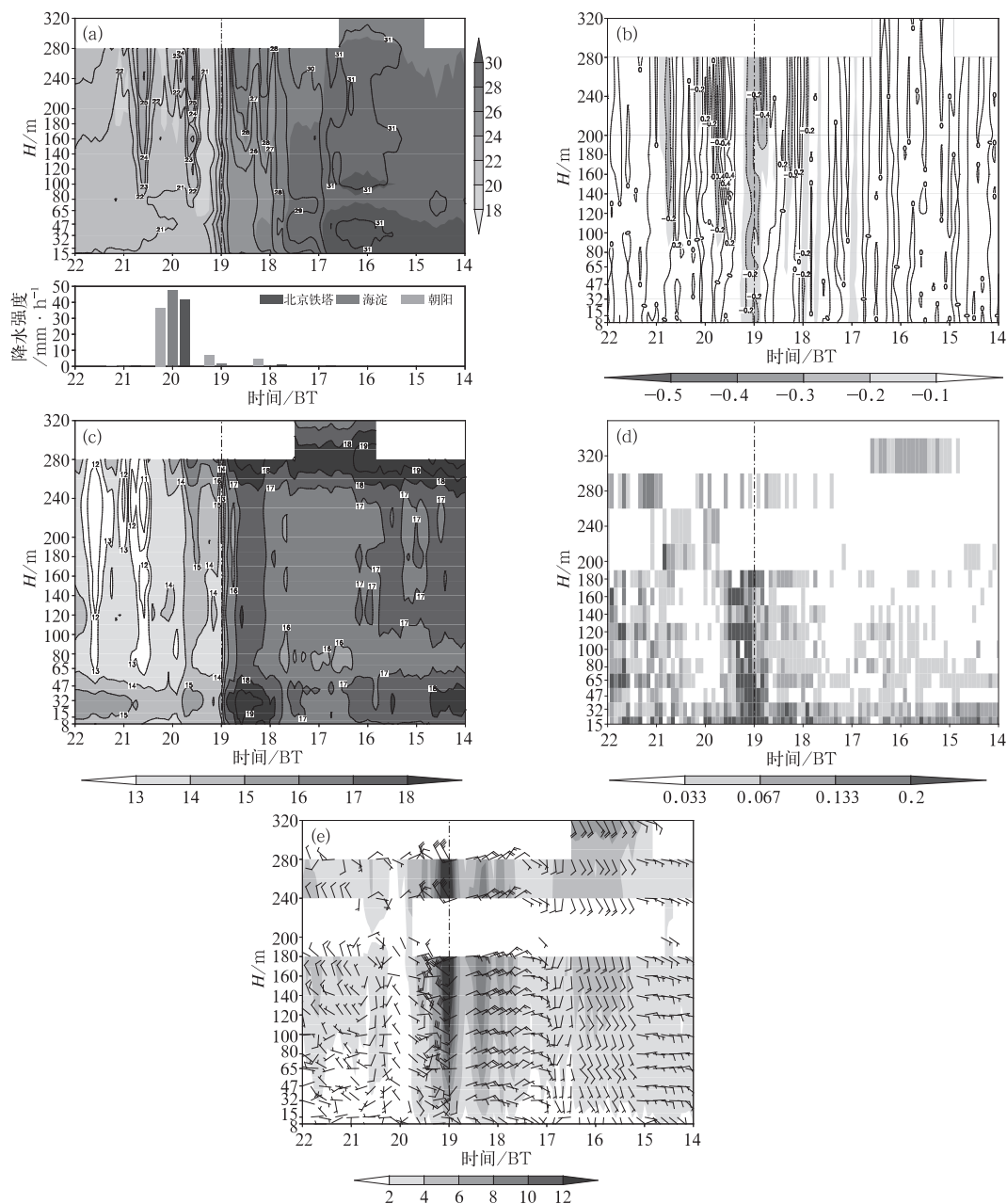


图 6 同图 3, 但为 2015 年 8 月 7 日 14—21 时: (a) 同图 3a, (b) 同图 3b, 但为温度变率(单位: $^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$); (c) 同图 3b, (d) 同图 3c, (e) 同图 3d (说明同图 3)

Fig. 6 Changes of physical quantities with time of tower from 14:00 to 21:00 BT 7 August 2015
(a) temperature (shadow, unit: $^{\circ}\text{C}$) and potential temperature (contour, unit: $^{\circ}\text{C}$),
(b) change rate of temperature (unit: $^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$), (c) specific humidity (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$),
(d) low-level wind shear (unit: s^{-1}), (e) wind field (shadow: full wind speed)
(instructions the same as Fig. 3)

更为剧烈。这种强降水前要素剧烈变化特征在比湿分布上也较为清晰,提前量约 10~20 min(图 6c),冷暖平流前期变化并不明显;低空风切变在强降水开始前 1 h 增大到“中度”(图 6d),由于强降水发生期间伴随短时雷暴大风,所以强降水开始后低空风切变和风速风向变化激烈(图 6e);垂直速度(图略)显示 19 时从地面到 325 m 出现 $>2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的强上升区,19:20 由强上升区变为强下沉区,反映出雷暴的强下沉气流,与雷暴大风现象一致。总体来看,相对于无地面辐合线型,铁塔气象要素变化对地面辐合线型短时强降水的发生具有一定预报能力,对强降水临近预报具有指导意义。

3 两类强降水类型合成分析

为了进一步凝练两类短时强降水个例的共性,

将两类个例的天气尺度环流场与北京铁塔气象要素变化场进行了合成分析。环流场合成结果表明,无地面辐合线型的天气尺度垂直运动条件、925 hPa 及以下的水汽条件较好于地面辐合线型,但在地面上,地面辐合线型弱上升运动及弱冷平流均强于无地面辐合线型(图略)。

与此同时,我们将每个个例短时强降水发生前 7 h 与发生过程中 1 h,共 8 h 的北京铁塔数据进行了合成分析,结果表明,无地面辐合线型铁塔气象要素在短时强降水发生前与发生时变化不剧烈,基本无法捕捉短时强降水来临的信号(图略);地面辐合线型在强降水发生前 1 h,温度和位温开始明显下降(图 7a),温度变率逐渐增大,最大达每分钟 -0.35°C (图 7b),风速也在强降水发生前 1 h 逐渐增大到 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,增强到边界层急流强度;比湿在强降水开始前 3 h 显著增大,降水开始前 20 min

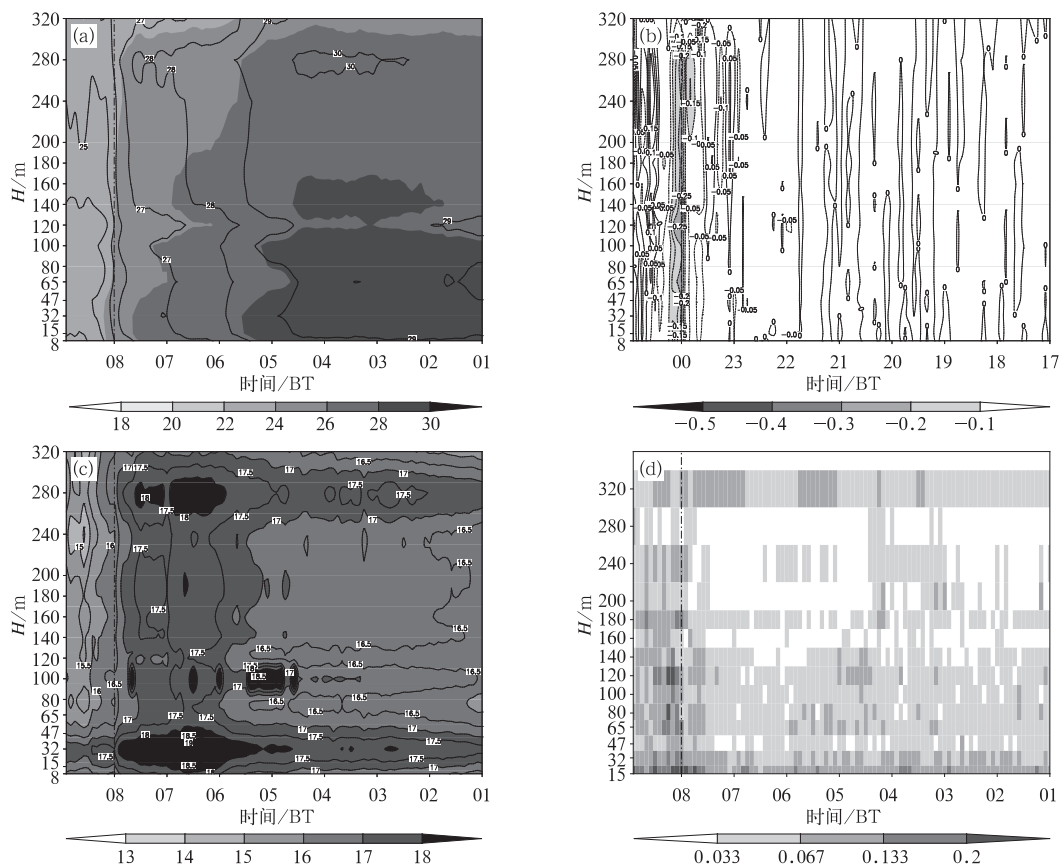


图7 地面辐合线型强降水个例铁塔要素合成分析

(a)位温和温度(单位: $^\circ\text{C}$), (b)温度变率(单位: $^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$), (c)比湿(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (d)低空风切变(单位: s^{-1})
(说明同图3)

Fig. 7 Component analysis of the convergence line type rainfall

(a) potential temperature and temperature (unit: $^\circ\text{C}$), (b) change rate of temperature (unit: $^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$),
(c) specific humidity (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (d) low-level wind shear (unit: s^{-1})

(instructions the same as Fig. 3)

内比湿减小了 $3.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 7c); 低空风切变在强降水开始前 20 min 增大到“强烈”到“严重”程度 (图 7d), 比湿跟低空风切变的提前量约为 10~20 min。这种特征源于雷暴云团下沉气流前沿或地面冷空气与地面偏南暖湿气流对峙形成地面辐合线, 辐合上升运动增强了该区域的水汽及能量聚集, 加强了天气尺度的垂直上升运动。而辐合线一侧近地面干冷空气被北京铁塔观测到, 在强降水产生前体现出要素变化特征, 为短时强降水的发生具有一定预报指示意义。

4 结论与讨论

本文重点应用铁塔气象要素及衍生物理量, 结合 VDRAS、地面自动站、NCEP 资料等常规和非常规观测资料, 将短时强降水分类并针对边界层要素演变特征进行了分析研究, 寻找到短时强降水发生的提前信号, 为夏季短时强降水天气预报预警提供参考。

(1) 通过对 2013—2015 年北京铁塔发生短时强降水个例初步分析, 将短时强降水个例分为地面辐合线型和无地面辐合线型。

(2) 铁塔气象要素变化基本无法预判无地面辐合线型短时强降水的发生, 强降水前期未发现明显预报指示信号。

(3) 铁塔气象要素变化对地面辐合线型强降水发生具有一定预报指导意义。地面辐合线型在强降水发生前 1 h, 温度和位温开始明显减小, 温度变率显著增大, 最大达每分钟下降 0.35°C ; 在强降水开始前 3 h, 地面至 325 m 比湿增大, 降水开始前 20 min, 比湿减小 $3.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 低空风切变在强降水开始前 20 min 增大到“强烈”到“严重”程度, 比湿跟低空风切变的提前量约为 10~20 min。

本文将 325 m 以下气象要素代表边界层要素变化并不严谨, 但由于目前观测资料的限制, 边界层气象要素探测手段仍很有限, 还需不断挖掘边界层新资料的研究及应用。

致谢:衷心感谢中国科学院大气物理研究所铁塔分部提供的北京气象铁塔数据并给予的耐心指导帮助; 感谢北京市气象台季崇萍及付宗钰对本文的建议。

参考文献

程雪玲, 胡非, 曾庆存, 等, 2014. 北京 325 m 气象塔塔体对测风影响的数值模拟[J]. 气象科技, 42(4): 545-549, 569.

- 花丛, 张碧辉, 张恒德, 2015. 2013 年 1—2 月华北雾、霾天气边界层特征对比分析[J]. 气象, 41(9): 1144-1151.
- 江玉华, 王强, 张宏升, 等, 2010. 在北京气象塔上测量城市边界层辐射特征[J]. 高原气象, 29(4): 918-928.
- 孔凡超, 赵庆海, 李江波, 2016. 2013 年 7 月冀中特大暴雨的中尺度系统特征和环境条件分析[J]. 气象, 42(5): 578-588.
- 李倩, 刘辉志, 胡非, 等, 2004. 大风天气下北京城市边界层阵风结构特征[J]. 中国科学院研究生院学报, 21(1): 40-44.
- 李昕, 安俊琳, 王跃思, 等, 2003. 北京气象塔夏季大气臭氧观测研究[J]. 中国环境科学, 23(4): 353-357.
- 刘熙明, 胡非, 邹海波, 等, 2010. 北京地区一次典型大雾天气过程的边界层特征分析[J]. 高原气象, 29(5): 1174-1182.
- 刘小红, 洪钟祥, 1996. 北京地区一次特大风过程边界层结构的研究[J]. 大气科学, 20(2): 223-228.
- 蒙伟光, 闫敬华, 扈海波, 2007. 城市化对珠江三角洲强雷暴天气的可能影响[J]. 大气科学, 31(2): 364-376.
- 孙继松, 2005. 气流的垂直分布对地形雨落区的影响[J]. 高原气象, 24(1): 62-69.
- 孙继松, 王华, 王令, 等, 2006. 城市边界层过程在北京 2004 年 7 月 10 日局地暴雨过程中的作用[J]. 大气科学, 30(2): 221-234.
- 孙密娜, 易笑园, 闫志超, 等, 2013. 渤海西岸降雪过程中偏东风在 250 m 塔层内的特征分析[J]. 气象与环境学报, 29(5): 35-42.
- 王坚红, 杨艺亚, 苗春生, 等, 2017. 华南沿海暖区辐合线暴雨地形成力机制数值模拟研究[J]. 大气科学, 41(4): 784-796. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.1702.16182.
- 王学永, 金维明, 洪钟祥, 等, 1986. 雷暴型风切变及其对飞机飞行影响的初步探讨[J]. 大气科学, 10(1): 55-67.
- 王正兴, 江玉华, 李炬, 等, 2009. 在北京气象铁塔上测量城市边界层辐射的研究[J]. 高原气象, 28(1): 20-27.
- 吴彬贵, 张宏升, 张长春, 等, 2008. 天津南部地区平流雾过程塔层气象要素特征分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 44(5): 744-750.
- 姚日升, 涂小萍, 杜坤, 等, 2015. 两次冰雹过程边界层气象要素变化特征[J]. 高原气象, 34(6): 1677-1689.
- 喻谦花, 郑士林, 吴葵, 等, 2016. 局部大暴雨形成的机理与中尺度分析[J]. 气象, 42(6): 686-695.
- 翟国庆, 孙淑清, 1986. 单站边界层风场结构与强对流天气[J]. 气象, 12(11): 6-8.
- 张光智, 卞林根, 王继志, 等, 2005. 北京及周边地区雾形成的边界层特征[J]. 中国科学: 地球科学, 35(S1): 73-83.
- 赵树海, 1994. 航空气象学[J]. 北京: 气象出版社: 59-89.
- Chen M X, Sun J, Wang Y C, 2007. A frequent-updating high-resolution analysis system based on radar data for the 2008 summer Olympic[C]// Preprints, the 33rd International Conference on Radar Meteorology. Cairns, Australia: American Meteor Society.
- Dutton E G, 1990. Annual forcing of the surface radiation balance diurnal cycle measured from a high tower near Boulder, Colorado [J]. J Climate, 3(12): 1400-1408.
- Li P Y, Fu G, Lu C G, et al, 2012. The formation mechanism of a spring sea fog event over the Yellow Sea associated with a low-level jet[J]. Wea Forecasting, 27(6): 1538-1553.