

王国荣,卞素芬,王令,等. 用地面加密自动观测资料对北京地区一次飑线过程的分析[J]. 气象,2010,36(6):59-65.

用地面加密自动观测资料对北京地区一次飑线过程的分析^{*}

王国荣¹ 卞素芬¹ 王 令¹ 李青春²

¹ 北京市气象台, 北京 100089

² 北京城市气象研究所, 北京 100089

提 要: 利用北京地区 S 波段 Doppler 雷达和地面 5 分钟加密自动站资料对发生在北京地区的一次典型飑线过程进行分析。结果表明:(1)飑线影响时自动站气象要素出现风向突变、风速骤增、温度下降、气压陡升等突变;(2)降水和雷暴大风与地面涡度有很好的对应。降水发生的位置及其与正涡度区的距离的变化能预示对流单体未来的发展趋势;(3)地面水汽通量(P)能直观地反映雷暴单体的地面出流,地形辐合线以及低层水汽输送等中小尺度特征。雷暴单体地面出流造成的正水汽通量与地形引起的正水汽通量的合并以及低层的东风配合加强了山前的辐合和抬升作用,是此次过程中雷暴在山前地区得到发展并造成局地强降水以及雷暴大风的主要原因。利用地面水汽通量制作雷暴发展潜势预报有意义。

关键词: 加密自动站, 雷暴大风, 地面涡度, 地面水汽通量

Analysis on a Typical Squall Line Case with Surface Automatic Weather Observations

WANG Guorong¹ BIAN Sufen¹ WANG Ling¹ LI Qingchun²

¹ Beijing Meteorological Observatory, Beijing 100089

² Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089

Abstract: A typical squall line taking place in Beijing area is analyzed with the S-band Doppler weather radar data and intensive surface AWS observations in Beijing. The results indicate that: (1) meteorological elements show abrupt changes during the influence of the squall line, such as mutation in the wind direction, surge in wind speed, drop of temperature and steep rising of pressure; (2) there is a good relationship among surface vorticity, precipitation and thunderstorm winds. The position of precipitation and the variation of the distance between precipitation and positive vorticity can be used to indicate the future trend of convective cells; (3) surface water vapor flux shows some small scale characteristics, such as surface outflow of thunderstorm, terrain convergence and low-level water vapor transport. The combination of positive water vapor flux from thunderstorm's outflow and terrain convergence has strengthened the convergence and lift in the front of the mountain, this is the main reason for the quickly development of thunderstorm in the front of mountain and subsequently local heavy rain and thunderstorm winds. The surface water vapor flux can be used as an indicator of the future trend for the thunderstorms.

Key words: AWS (automatic weather station), thunderstorm winds, surface vorticity, surface water vapor flux

引 言

飑线是产生强对流天气的主要系统之一,它是

一种带(线)状的中尺度对流系统,是非锋面的或狭窄的活跃雷暴带。许多学者对飑线做了研究,如文献[1-2]详细分析了飑线过程的天气尺度特征;文献[3-6]仔细分析了与飑线系统相对应的雷达回波特

^{*} 气象新技术推广项目(CMATG2008Z08),公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906039)和中央公益性科研院所科研业务基金项目(iumky200904)

2009年7月15日收稿; 2010年2月7日收修定稿

第一作者:王国荣,主要从事天气动力学研究工作. Email: wguor@sina.com

征。颜文胜等^[7]认为弓形回波后弱反射率因子通道的出现标志着飑线发展到最强盛阶段;罗碧瑜等^[8]指出飑线在基本速度图上有中层径向辐合和“牛眼”特征。文献[9-11]分析表明与飑线内弓形回波相对应的多普勒径向速度出现中层径向辐合(MARC)将预示出现地面大风。边界层内雷暴流出边界与雷暴之间距离的变化在一定程度上可以预示未来雷暴强弱的变化。

飑线是一种深厚的对流系统,在飑线的带状对流带上往往分布着有多个更小尺度的(γ 中尺度)的强对流单体(雷暴单体),这些对流单体往往是造成局地暴雨和雷暴大风等灾害天气的元凶。因此对这些 γ 中尺度雷暴单体的研究是飑线研究的一个重要内容。近年来多种非常规的新型探测资料被广泛应用于中小尺度天气系统的研究中。郭虎等^[12-13]利用 Doppler 雷达、地面加密自动站、风廓线雷达及 GPS 水汽分布等多种新型探测资料对北京香山一次局地大暴雨和北京奥体中心局地暴雨的 γ 中尺度强降雨落区和暴雨结构进行了精细分析。研究表明:边界层动力特征(如地形抬升、边界层辐合线等)与局地暴雨密切相关。Doppler 雷达、加密自动站等资料能很好地捕捉和刻画边界层内的中小尺度信息。漆梁波等^[14]的研究也表明多普勒雷达、自动站及风廓线仪等非常规资料能很好地揭示飑线的发生、发展、

爆发过程及其回波和风场的空间结构特点。

北京及其周边地区二百多个地面加密自动站能很好地捕捉中小尺度天气系统,本文利用 Doppler 雷达和北京地区地面 5 分钟加密自动站资料对 2008 年 9 月 16 日发生在北京地区的一次典型的飑线过程进行分析。捕捉暴雨和大风等灾害天气的中小尺度特征,为中小尺度强对流天气的短时临近预报提供有用的信息和参考。

1 过程回顾和天气背景

2008 年 9 月 16 日午后到傍晚,一次飑线系统自西向东移过本市。

系统过境历时约 2 个半小时,造成雷雨大风,局部暴雨,过程最大降水量为密云太师屯的 37.9 mm,还有多个站降水量超过 20 mm。有 13 个自动站先后观测到地面大风。最大极大风出现在十三陵水库,达到 $23.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。此次过程虽然没有达到局地暴雨量级,但由于瞬时雨强非常大,同时还有地面大风、雷电等灾害天气出现,因此其带来的破坏力也非常大。逐小时的雨量分布清楚地显示此次过程降水量分布不均、历时短、雨强大等中小尺度强对流特征(图 1)。

9 月 16 日 08 时,在 500 hPa 天气图上,中高纬

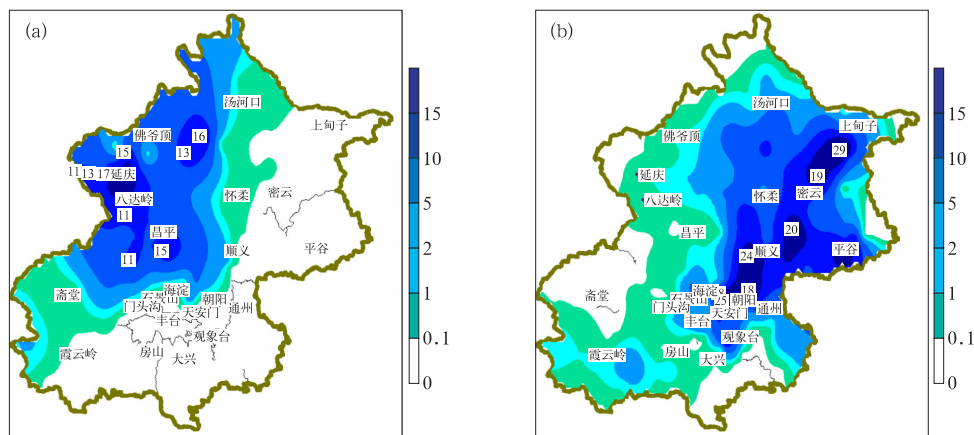


图 1 2008 年 9 月 16 日自动站 1 小时累积降水量分布(单位:mm)
0900—1000 UTC (a)和 1000—1100 UTC (b)

Fig. 1 AWS 1 hour accumulated precipitation distribution (units:mm)
(a) 0900—1000 UTC, (b) 1000—1100 UTC September 16, 2008

欧亚大陆为两槽一脊形势,贝加尔湖以西有一深厚的冷槽,槽前不断有冷空气补充南下,在主槽前部的河套、内蒙古一带有风场的切变存在。850 hPa 和 700 hPa 天气图上,张北、大同一带的有一条东北—西南走向的切变存在,北京正好处于切变线的下游,850 hPa 和 700 hPa 为西南风,有暖平流,500 hPa

偏西风,此种天气背景下,北京地区容易出现对流性降水,特别是在热力条件更好的午后到傍晚时分。

从探空曲线计算可知:08 时的 K 指数为 26,沙氏指数 4.5,CAPE 值为 $546.6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,表明此时大气不具备明显的不稳定。到 14 时, K 指数为 26,沙氏指数变为 -3.0,CAPE 值为 $1810.0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,

因此在短短的6个小时内,大气的不稳定性明显加大,不稳定能量的积蓄为此次过程提供了有利条件。

2 基于新一代天气雷达产品的分析

2.1 雷达回波演变

从午后开始,切变线上不断有对流回波新生。14:30(北京时,下同)张北雷达探测范围内有块状对流回波,回波最大强度50 dBz,北京西边地区有分散的对流回波块呈西南—东北走向分布,与切变线的方向一致。这些对流回波块向东移动,移动过程中不断有新生对流发展,同时分散的对流块相互合并、发展,并逐渐演变呈东北—西南走向的带状回波。16:12时该带状回波已位于北京边缘,回波带中有多个强对流单体,最大回波强度在50 dBz以上,已经初具飊线结构(图2a)。南郊S波段雷达1.5°仰角的径向速度图上,与图2a中圆圈对应区域的有一个径向速度对(图2a右上角),最大正负速度差达

25 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。17:12,对流回波带已发展成一条组织性很好的典型飊线。飊线上强回波中心对应处有明显的弓形回波出现(图3),1.5°仰角的径向速度图上为一大风速区,最大负径向速度达20 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,大片的负径向速度区内有最大27 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 正径向速度存在。沿弓形回波作垂直剖面可以看到大于30 dBz的强回波倾斜向上伸展,在弓形回波前沿(入流一侧)有明显的弱回波区存在(图3)。此后回波继续东移,与对流单体相伴随的地面出流和低层的东风气流在山前辐合抬升,导致回波在北部山区和石景山山前辐合带上得到进一步发展,18:20,回波最大强度达到60 dBz,顶高16 km(图2c)。19:00以后强回波中心基本移出北京市(图2d)。从回波的发展演变可以看到,回波带的走向和移向移速都是与北京上空的切变线的走向和移向移速一致的。20时以后,回波基本移出北京市,对应的切变也移动到北京市下游,此时不稳定能量得到释放,20时的K指数为-49,CAPE值为17.2 $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

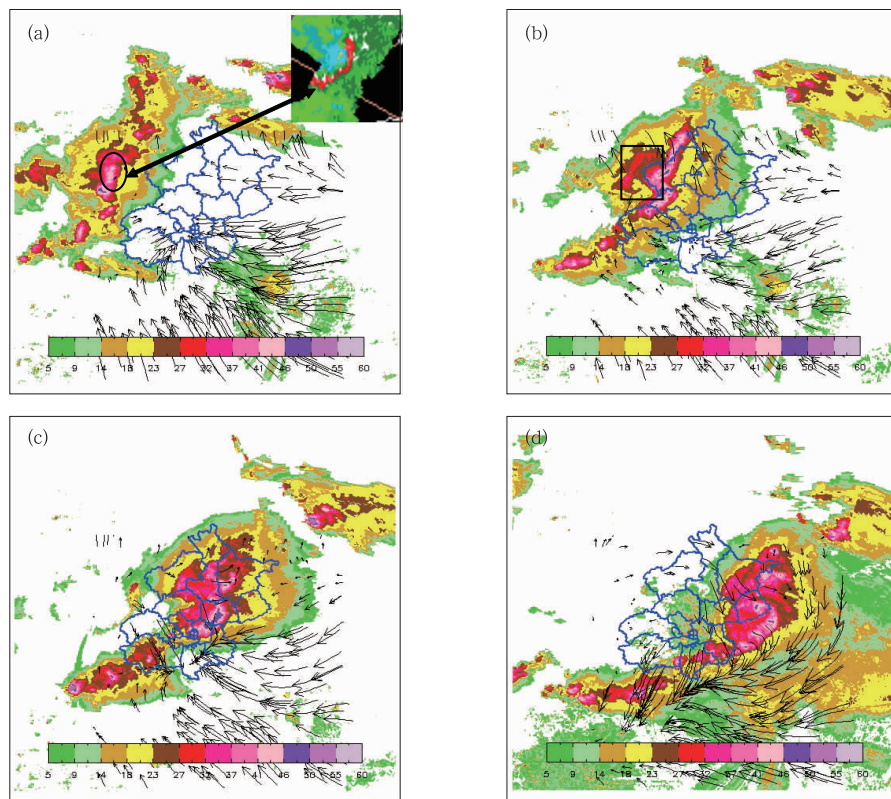


图2 2008年9月16日北京S波段雷达组合反射率因子

(a) 16:12(北京时,下同); (b) 17:12; (c) 18:12; (d) 19:12

图中叠加了对应时刻的VDRAS反演的0.1875 km高度上的水平风场

Fig. 2 Composite radar reflectivity factor of S-band Doppler radar in Beijing
(horizontal wind field at 0.1875 km height retrieved from VDRAS at that time is overlapped)

(a) 16:12; (b) 17:12; (c) 18:12; (d) 19:12 BT September 16, 2008

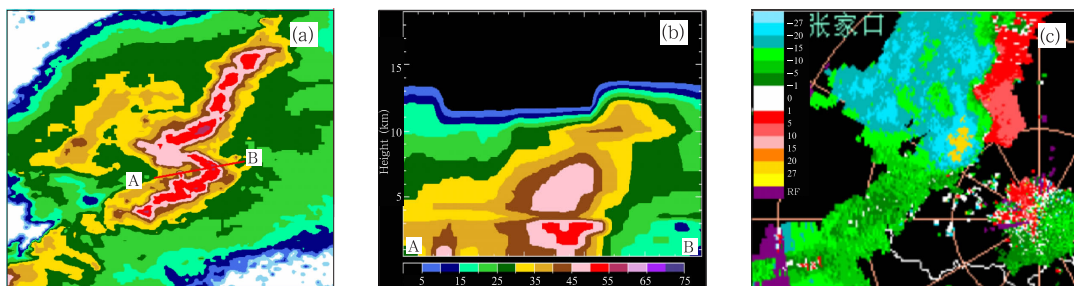


图 3 与图 2b 中矩形区域对应弓形回波(a)和径向速度(b)以及沿 AB 线的垂直剖面(c)
Fig. 3 The bow echo (a) and radial velocity (b) in the region in Fig. 2b and a cross section along line AB (c)

2.2 VDRAS 反演的低层风场变化

基于多普勒天气雷达资料的四维变分分析系统(VDRAS)能结合雷达资料以及地面自动站等探测资料反演出边界层内的三维的风场、垂直速度、温度扰动等信息,为分析局地的中小尺度系统提供了重要手段。从 VDRAS 反演的低层风场可以清楚地看到,本次降水过程中,低层始终维持有较明显的东风。低层的东风在北京西部的山前辐合抬升(图 2a),当对流回波自西向东移近时,雷暴前沿的出流也与地面的东风形成辐合(图 2b, 2c),进一步加强了山前的辐合抬升作用,使得对流回波在上述山前地区得到强烈发展,造成局地大雨和雷暴大风的灾害天气。当回波移动到平原地区后,回波前沿的出流再一次与地面东风形成一条辐合线(图 2d),稍后在该辐合线上,回波强度又出现短暂的加强。之后,由于没有明显的雷暴出流和东风的辐合形成,对流性回波逐渐减弱为层状云回波,降水强度也明

显减弱。

因此,低层东风的维持以及地形辐合抬升作用在本次降水和地面大风过程中起了重要作用,这与文献[12-13]的结果是一致的。

3 5 分钟地面加密自动站资料分析

文献[9,14]指出典型飊线影响时气象要素在短时间内产生急剧变化。北京地区布置了十分密集的地面加密自动观测站,能实时获得每 5 分钟的观测资料。这种高时空分辨率资料在捕捉和分析飊线,特别是飊线的中小尺度特征方面十分有用。

3.1 单站气象要素变化

选取八达岭站自动站资料进行分析。该站点在飊线影响时出现了短时强降水和地面大于 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风。图 4 为八达岭站降水发生前后各个气象要素的逐 5 分钟变化。降水开始前,该站点一直

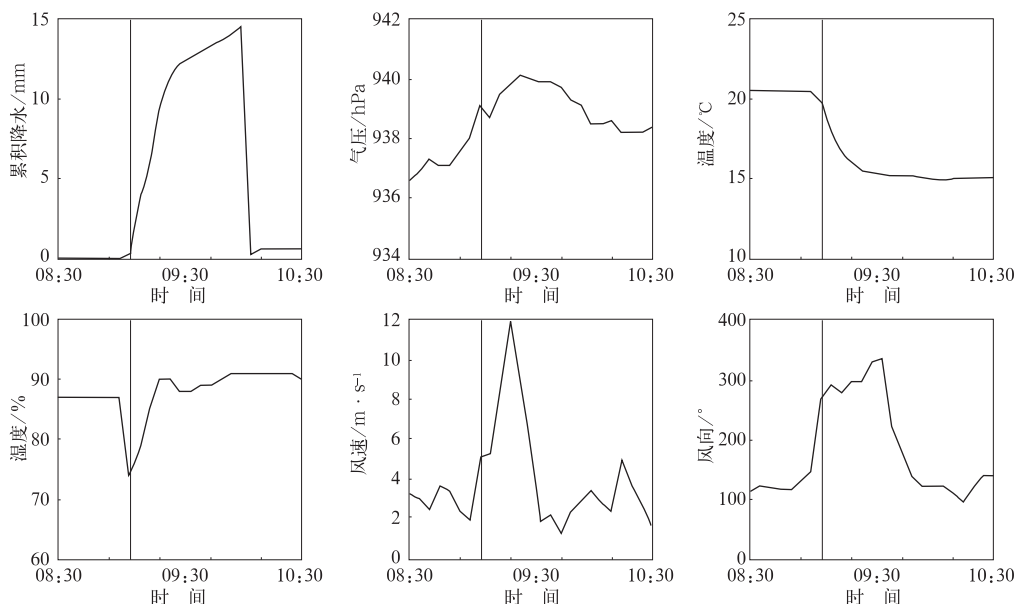


图 4 2008 年 9 月 16 日 8:30 至 10:30 八达岭自动站 5 分钟间隔的气象要素时间变化
Fig. 4 Variation of 5 min interval meteorological elements Station at A1468

维持着 $2\sim 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的东南风,气压有一个逐步上升的过程,温度、湿度均没有明显变化。在降水开始的时刻,风向由东南风跃变到西北风,同时风速增加到 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,相对湿度出现突然的下降,约由 87% 下降到 75% ,温度下降,降幅约 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,气压有一小幅的突升。这可能是雷暴单体前沿的阵锋风先到达,飊线中的雷暴云后部的强下沉气流将相对于环境空气夹卷进去,导致水滴蒸发使得下沉气流降温,下沉气流快速下冲到地面,在地面形成快速推进的冷堆,形成阵风锋^[5]。此后随着主体降水的到来下沉气流快速下冲到地面形成地面高压(降水开始后的第 $5\sim 20$ 分钟,地面气压上升了 3 hPa ,此阶段也正是雨强最强的时段),同时由于降水到达地面,地面的相对湿度也明显地增大,温度迅速下降。降水开始后 $10\sim 15$ 分钟,自动站风速有一个陡然加大,这与降水回波主体对应的强烈下沉气流(下击暴流)有关。雷暴单体过境后,雨强迅速减小,地面气压逐渐恢复到降水发生前的水平,风速也迅速减小,

15 分钟内由 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 迅速减小到 $1.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,同时风向又由西北风跃变回东南风。

单站自动站分析表明飊线经过时,受雷暴单体影响,气象要素出现了风向突变,风速突然加大,温度陡降,气压陡升等变化,雷暴单体过境后,地面气压,风向风速又迅速恢复,这与姚叶青等^[8]分析是一致的。

3.2 近地面辐合与降水落区、地面大风的关系

很多研究都指出低层辐合或边界层辐合线对暴雨的落区和发展潜势都有较好的指示意义。此次飊线过程中逐 5 分钟的自动站观测的地面涡度与降水以及地面大风的分布(图 5)表明:(1)降水一般分布在地面正涡度大值区后侧;(2)飊线内强雷暴单体对应的地面大风常与地面正涡度大值区相对应,一般出现在正涡度区中心附近。另外,地面大风也可能出现在跟降水相对应的负涡度区中(图 5a),此类地面大风是由于降水引发的强烈的下沉运动引起的。(3)地面正涡度中心与雷达回波强中心有很好的

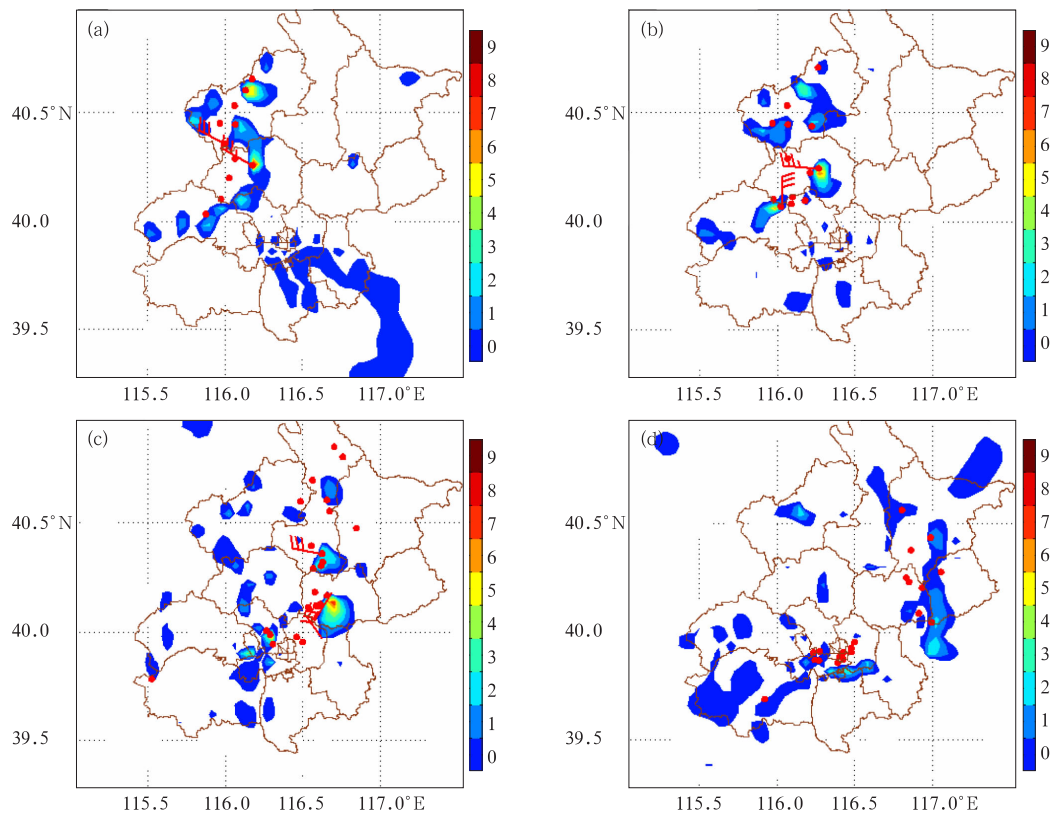


图 5 地面涡度与降水和大风的关系

阴影为地面涡度(只显示了 0 的涡度,单位: $10^5\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$);红色原点表示观测时刻 1 分钟内出现降水的位置;红色风向标为观测时刻的 2 分钟平均的风向风速(只有风速 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的才标记)

Fig. 5 The relationship among surface vorticity, precipitation and thunderstorm winds

Shadow is for surface vorticity (only positive vorticity is shown, units: $10^5\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$);

red circle is the positon of 1-min averaged precipitation at observing time;

red windbarb is the 2-min averaged wind at observing time (only $\geq 10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ is marked)

的对应。地面的强正涡度中心往往就是雷达单体中心,这是因为地面大的正涡度对应了强的上升运动,这种强上升运动正是与强对流单体移动方向前侧的强的上升气流对应的。(4)降水发生的位置及其与正涡度区的距离的变化能预示对流单体未来的发展趋势。在对流单体的发展和成熟阶段,地面降水一般出现在地面正涡度中心的后侧,此时降水引起的下沉气流也主要在正涡度区的后侧(与地面的负涡度区相对应),不会抑制正涡度区对应的上升气流,同时由降水引发的下沉气流到达地面后会向四处扩散,又有利于正涡度区辐合加强,从而有利于上升气流的维持和加强。这种上升气流的补充是对流单体维持和发展的重要条件。此类情况下,降水位置与正涡度中心的距离相对稳定(图 5a,b,c)。当降水出现在正涡度区域之上时,降水引起的下沉运动抑制了低层上升运动的发展,这往往预示着该对流单体已处于衰退阶段。此外,当降水位置逐渐远离正涡度区位置时,也预示着对流单体组织性的减弱(图 5d)。

3.3 地面水汽通量分析

相关研究中多次指出,对于北京地区的降水而

言,低层东风条件是非常重要的。这是因为低层的东风一方面带来了充足的水汽,另一方面东风能在北京西部的山前形成辐合抬升。文献[8-9]的研究表明近地面辐合加强,诱发扰动,扰动在边界层中的传播和发展是局地暴雨回波加强和暴雨落区形成的重要的动力源。文献[5,7]则指出边界层内雷暴出流边界与雷暴之间距离的变化在一定程度上可以预示未来雷暴强弱的变化。

定义了地面水汽通量 P ,其中 u 为水平风在 x 方向上的风量, V 为水平风在 y 方向上的风量, rh 为相对湿度。

$$P = u \cdot rh \cdot \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{|u|}$$

P 能综合反映地面水汽条件和动力辐合条件。当地面吹西风时 $P > 0$,地面吹东风时 $P < 0$ 。 P 值的大小是风速大小和湿度大小的综合结果。利用 5 分钟自动站资料分析此次飊线过程中 P 和降水的关系,能够很好地揭示与地面水汽通量对小尺度对流系统造成的降水的影响。

从图中可以看到,16:30 时回波主体尚位于北京西边,与回波强中心对应,地面上有一个正的水汽

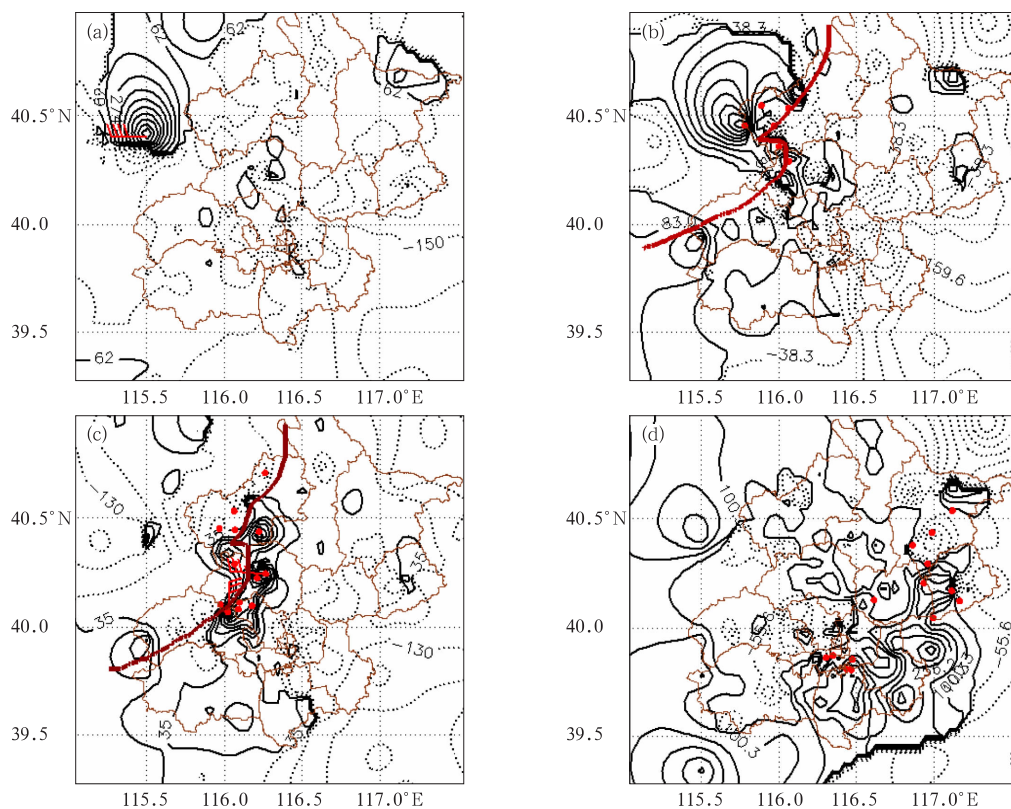


图6 地面水汽通量与降水和大风的关系

等值线为水汽通量(实线为正值,虚线为负值);红色原点表示观测时刻1分钟内出现降水的位置;红色风向标为观测时刻的2分钟平均的风向风速(只有风速 $\geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的才标记);(b)和(c)中棕色粗线表示该时刻飊线的位置
Fig. 6 The relationship among surface water vapor flux, precipitation and thunderstorm winds
Contours are for water vapor flux (solid line positive, dotted line negative); red circle is the position of 1-min averaged precipitation at observing time; red windbarb is the 2-min averaged wind at observing time (only $\geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ is marked); the brown thick line in (b) and (c) shows the location of the squall line at the time

通量中心,表明此处受对流单体的出流造成的西风控制。同时在北京的房山、门头沟、石景山一带有正的水汽通量沿北京西部山前呈西南—东北走向分布(图6a),这些正水汽通量清楚地显示了地形辐合线的存在。北京范围内其他地区主要为东风控制。随着回波东移,与降水回波对应的地面出流超前于回波主体率先进入北京地区,并与地形辐合引起的正水汽通量合并,上述正水汽通量合并打通,使得来自对流单体引起的干冷的地面出流能够更加顺利地与山前暖湿东风气流汇合,在出流边界上又会激发出新的对流,对比图6a和图6b,发现此过程中山前的负水汽通量明显加大,这表明正负水汽通量的辐合激发了空气的上升运动,这种上升运动反过来又加大了低层风场和水汽进一步向上升中心辐合。这种正反馈作用在对流的发展阶段起主要作用,能迅速地向辐合中心输送大量水汽,并把水汽带向空中,表现在雷达回波上,该阶段回波强度加强,强回波中心升高,此阶段是雷暴单体发展加强和飊线系统成型的阶段。20分钟以后(图6c),在上述水汽通量的辐合区,对流得到强烈发展,对应地面出现瞬时强降水和地面大风,地面大风主要分布在正水汽通量的中心位置,该位置也是地面出流最大的地方。到18:45时降水回波移到北京东部地区,地面上有大片的正水汽通量,但没有明显的水汽通量辐合存在,因此此后回波逐渐减弱并移出本市。

4 小 结

地面加密5分钟自动站观测能很好地捕捉雷暴出流,地面辐合等小尺度系统特征,利用该资料对2008年9月16日发生在北京地区的一次典型飊线过程的分析表明:

(1) 飊线影响时自动站的风向发生突变,风速骤增,温度下降,气压陡升,这些变化都是短时的突变,没有明显的先兆可循。

(2) 地面涡度与降水和雷暴大风有很好的对应。地面大风一般出现在正涡度区中心附近或者跟降水相对应的负涡度区中;降水发生的位置及其与正涡度区的距离的变化能预示对流单体未来的发展趋势。在对流单体的发展和成熟阶段,地面降水一般出现在与对流单体对应的地面正涡度中心的后

侧,此时降水引起的下沉气流也主要在正涡度区的后侧(与地面的负涡度区相对应),不会抑制正涡度区对应的上升气流,此时降水位置与正涡度中心的距离相对稳定。当降水出现在正涡度区域之上时,降水引起的下沉运动抑制了低层上升运动的发展,此时往往预示着该对流单体已处于衰弱阶段。此外,当降水位置逐渐远离正涡度区位置时,也预示着对流单体组织性的减弱。

(3) 地面水汽通量(P)能直观地反映雷暴单体的地面出流,地形辐合线以及低层水汽输送等中小尺度特征。雷暴单体地面出流造成的正水汽通量与地形引起的正水汽通量的合并以及低层的东风配合加强了山前的辐合和抬升作用,是雷暴在山前地区得到发展和造成强降水以及雷暴大风的主要原因。利用地面水汽通量可以提前对雷暴的发展潜势作出预报。

参考文献

- [1] 谢健标,林良勋,颜文胜,等. 广东2005年“3·22”强飊线天气过程分析[J]. 应用气象学报, 2007, 18(3): 321-329.
- [2] 陈元昭,梅传义,朱小雅,等. 一次飊线天气过程分析[J]. 广西气象, 2006, 27(1): 6-9.
- [3] 李向红,薛荣康,唐伍斌. 一次强飊线天气过程的新一代天气雷达探测和临近预报[J]. 气象, 2006, 32(9): 60-67.
- [4] 李淑玲,刁秀广,朱敏,等. 一次飊线过程多普勒雷达资料分析[J]. 气象, 2009, 35(3): 60-65.
- [5] 王莉萍,崔晓东,常英,等. 一次飊线天气的非常规气象资料特征分析[J]. 气象, 2006, 32(10): 88-94.
- [6] 廖晓农,于波,卢丽华. 北京雷暴大风气候特征及短时临近预报方法[J]. 气象, 2009, 35(9): 18-29.
- [7] 颜文胜,汪瑛. 利用多普勒雷达网对一次典型飊线过程的分析[J]. 广东气象, 2006, 28(3): 44-46.
- [8] 罗碧瑜,贺汉青. 3.22 飊线在多普勒雷达产品中的特征[J]. 广东气象, 2007, 29(1): 34-35.
- [9] 姚叶青,俞小鼎,张义军,等. 一次典型飊线过程多普勒天气雷达资料分析[J]. 高原气象, 2008, 4, 27(2): 373-381.
- [10] 陈荣,顾松山,黄延刚. 一次强飊线过程的多普勒雷达特征[J]. 广东气象, 2008, 30(1): 20-23.
- [11] 樊利强,王迎春,陈明轩. 利用雷达资料反演方法对北京地区一次强对流天气过程的分析[J]. 气象, 2009, 35(11): 9-17.
- [12] 郭虎,段丽,卜素芬,等. 利用加密探测产品对“06731”北京奥体中心局地暴雨结构特征的精细分析[J]. 热带气象学报, 2008, 24(3): 219-227.
- [13] 郭虎,段丽,杨波,等. 0679 香山局地大暴雨的中小尺度天气分析[J]. 应用气象学报, 2008, 19(3): 265-275.
- [14] 漆梁波,陈永林. 一次长江三角洲飊线的综合分析[J]. 应用气象学报, 2004, 15(2): 162-173.