

柳贵钧, 王飞, 付强, 等. 2015. 北京首都国际机场暖切初雷天气的特征分析 [J]. 气候与环境研究, 20 (5): 571–580. Liu Guijun, Wang Fei, Fu Qiang, et al. 2015. Characteristics of first thunderstorm caused by warm shear at Beijing Capital International Airport [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (5): 571–580, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15027.

北京首都国际机场暖切初雷天气的特征分析

柳贵钧 王飞 付强 沈晗 纪鹏飞

民航华北空管局气象中心, 北京 100621

摘 要 针对近两年北京首都国际机场的两次暖切初雷进行研究, 总结预报经验, 探讨预报的可行性, 结果表明: 1) 两次暖切初雷中, 500 hPa 高度层均有浅槽存在, 且 500 hPa 高度层的正涡度区到达本场附近的时间与雷雨发生时间一致, 同时低层有较强的辐合抬升; 2) 从雷达图像来看, 两次雷雨发生时, 本场附近均存在明显的速度辐合, 雷雨回波为局地生成; 3) 相当黑体温度 (Black Body Temperature, TBB) 越低, 对流越旺盛, 所以 TBB 等值线图可以用来推断对流的发展趋势; 4) 在雷雨发生时段, 基于风云 2 号气象卫星的雷暴云指数值介于 0~0.5 之间, 雷暴云指数的变化趋势可以较准确表征雷雨发生的时间。

关键词 暖切初雷 相当黑体温度 雷暴云指数 双偏振雷达 风云 2 号气象卫星

文章编号 1006-9585(2015)05-0571-10

中图分类号 P457

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15027

Characteristics of First Thunderstorm Caused by Warm Shear at Beijing Capital International Airport

LIU Guijun, WANG Fei, FU Qiang, SHEN Han, and JI Pengfei

Beijing Meteorological Center of Civil Aviation Administration of China, Beijing 100621

Abstract Two first thunderstorms at Beijing Capital International Airport caused by warm shear was analyzed. The feasibility and success in forecasting the storms is also reported. The results can be summarized as follows: 1) During the two warm-shear thunderstorms, a shallow trough appeared at the 500 hPa level, and the time that the positive vorticity in the 500 hPa layer arrived at the airport was consistent with the timing of the thunderstorm. Furthermore, there was strong convergence in the lower uplift region. 2) From the radar images, it can be seen that an obvious convergence speed appeared near the airport, and the radar echo was generated locally when the thunderstorms occurred. 3) The lower the Black Body Temperture (TBB), the stronger the thunderstorms. Therefore, the convection development trend can be inferred from the TBB contour map. 4) During the thunderstorm periods, the thunderstorm index value from FY-2E satellite ranged from 0 to 0.5. The value accurately characterized the timings of the thunderstorms.

Keywords Warm-shear thunderstorm, Black body temperature, Thunderstorm cloud index, Dual polarization radar, FY-2E satellite

1 引言

雷雨是一种强对流现象 (陈洪滨和朱彦良,

2012), 对民航的正常运行影响较大, 当前雷雨的预报已经成为航空气象关注的重点 (周继业, 2002)。其中, 初雷是每年的第一场雷暴, 当出现初雷时, 即可说明进入雷雨季, 就需要重点关注雷

收稿日期 2015-02-06; 网络预出版日期 2015-07-12

作者简介 柳贵钧, 男, 1967 年出生, 本科, 工程师, 主要从事航空气象预报。E-mail: gui jun_liu@163.com

通讯作者 王飞, E-mail: wangf43@sina.com

暴天气(朱乾根等, 2000), 因此初雷的准确预报具有重要意义。北京首都国际机场(以下简称首都机场)初雷出现的时间一般在 4、5 月(苏丽楠等, 2008), 处于春夏换季期, 天气系统难以准确把握, 卫星雷达指示特征均不明显, 造成初雷预报的准确率较低(朱克云等, 2011), 当前初雷预报已经成为航空气象的难点之一。

近两年首都机场初雷均由暖性切变线(以下简称暖切)引起, 暖切是指在暖气团内, 东南风与西南的风向切变, 这种切变线一般呈东西向, 在特定情况下会引起对流天气, 过去已有一些学者就暖切进行了深入研究, 并取得一些成果: 张立生等(2007)对 2002 年 6 月长江中下游暖切降水过程进行分析, 发现暖切对流天气具有明显的突发性和局地性, 确定低层暖切可以提供有利对流的低空辐合条件; 胡伯威和彭广(1996)、胡伯威(1997)发现与大气低层一条强的湿度梯度带耦合的指数可以用来解释长江流域梅雨末期暖气变形天气发生发展的过程; 刘贵萍等(2012)利用卫星及相当黑体温度(Black Body Temperature, TBB)等值线和常规资料叠加后, 对贵阳地区一次暖切变型飚线过程进行深入分析, 总结云图演变特征以及暖切触发机制, 对确定中尺度对流系统形成的位置和时间有一定指示作用。首都机场近两年初雷过程中在 850 hPa 均存在暖切, 但两次初雷过程的预报效果均不理想, 本文将在前人基础上对这两次过程进行深入研究, 探讨暖切初雷预报的可行性, 为以后的预报提供参考。

2 资料选取

研究中所用资料包括: 1) NCEP 再分析资料。利用 NCEP 资料获取华北地区的高空风温、正涡度平流图, 时间分辨率为 6 h, 空间分辨率 1° (纬度) $\times 1^{\circ}$ (经度); 2) 首都机场双偏振雷达资料。分别对雷达强度和径向速度图进行对比分析; 3) 风云 2 号气象卫星(FY2E) TBB 资料。通过 TBB 等值线图分析雷暴发生位置、强度及发展趋势, TBB 资料时间分辨率为 1 h, 空间分辨率 1° (纬度) $\times 1^{\circ}$ (经度); 4) FY-2E 红外亮温资料。通过 FY-2E 红外 1、3、4 通道亮温数据定量计算雷暴云指数。FY-2E 时间分辨率为 1 h, 空间分辨率为 10 km。

3 天气形势分析

3.1 初雷过程分析

2013 年 5 月 2 日夜間首都机场的观测人员听到雷声, 并通过闪电定位仪确定本场发生初雷, 初雷发生时段为 16:57(世界协调时, 下同)至 19:16。从 5 月 2 日 850 hPa 风温图(图 1)中可以看出, 本场底层一直处于西南气流控制, 靠近本场北部的位置持续有西南风和东南风的暖式切变, 随着暖切逐步东移南压, 本场不稳定性不断增大, 12:00(图 1a)在本场附近形成了明显的辐合中心, 在 18:00(图 1b)暖切位置已经南压至本场附近, 有强烈的辐合, 当时本场发生雷雨, 直到 3 日 00:00(图 1c)850 hPa 才逐渐转为槽后偏北气流, 雷雨已经结束。

而在 500 hPa 风温图(图 2)中可以看出冷涡位置偏东, 中心已经入海, 冷涡后部的横槽位于 45°N 附近, 横槽后部没有明显冷中心, 直至 12:00 本场西南和东北北部方向有浅槽逐渐发展东移, 在 18:00 到达本场附近, 触发局地雷雨, 直到 00:00 后浅槽移出, 雷雨结束。

虽然从 500 hPa 风温图来看, 风向偏北, 没有明显的冷平流, 但是从 500 hPa 位势高度的涡度图(图 3)看到: 北京西北部有一明显的正涡度区, 不断南压到达本场, 18:00(图 3b)正涡度区到达本场, 触发雷雨。虽然当日高空槽较浅, 冷空气不明显, 但在槽区附近有明显的正涡度平流, 从而确定高空满足干冷空气配置。

雷暴的生成需要有持续的抬升力将地面气块抬升, 克服对流抑制能量, 直至自由对流高度以上, 即抬升触发机制, 因此上升速度的存在也是雷雨发生的一个必要条件(周志敏和郭学良, 2009)。图 4 是首都机场上升速度的径向剖面图, 而首都机场就在 (40°N , 116°E) 附近。从图中可以看到: 12:00 本场处于强的上升速度区, 顶高已经到达 200 hPa 高度, 强的上升气流可以达到较高的高度, 从而产生高度较高的积雨云, 而发生强对流天气(齐琳琳等, 2005), 直到 18:00 雷雨发生后, 本场上升速度逐渐减弱, 上升高度也显著降低, 雷雨逐渐减弱, 当 00:00 雷雨结束后, 本场已无明显上升速度。可能由于低层暖切的存在, 雷雨发生之前, 低层 850 hPa 与 700 hPa 附近, 甚至到地面均存在较强的上升速度, 说明低层有较强的辐合抬升机制。

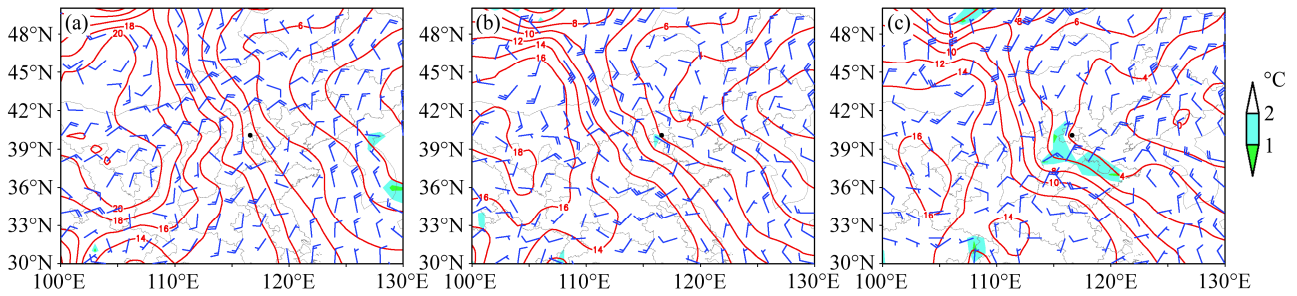


图1 华北地区2013年5月 (a) 2日12:00、(b) 2日18:00、(c) 3日00:00 850 hPa风 (风羽, 长杠表示风向, 一杆代表4 m/s)、温度 (实线, 单位: $^{\circ}\text{C}$)、温度露点差 (阴影)

Fig. 1 850-hPa wind (barbs, long barbs represent wind directions, one barb represents 4 m/s), temperature (solid lines, units: $^{\circ}\text{C}$), and depression of dew point (shadings) in North China at (a) 1200 UTC 2 May, (b) 1800 UTC 2 May, and (c) 0000 UTC 3 May 2013

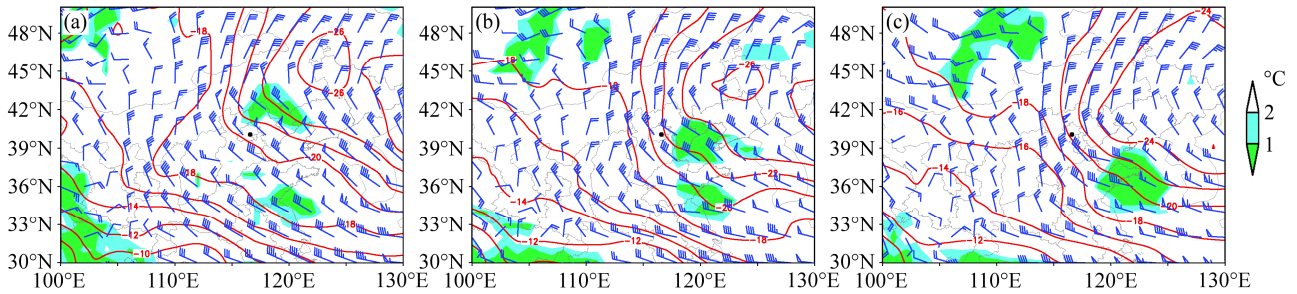


图2 同图1, 但为500 hPa

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for 500 hPa

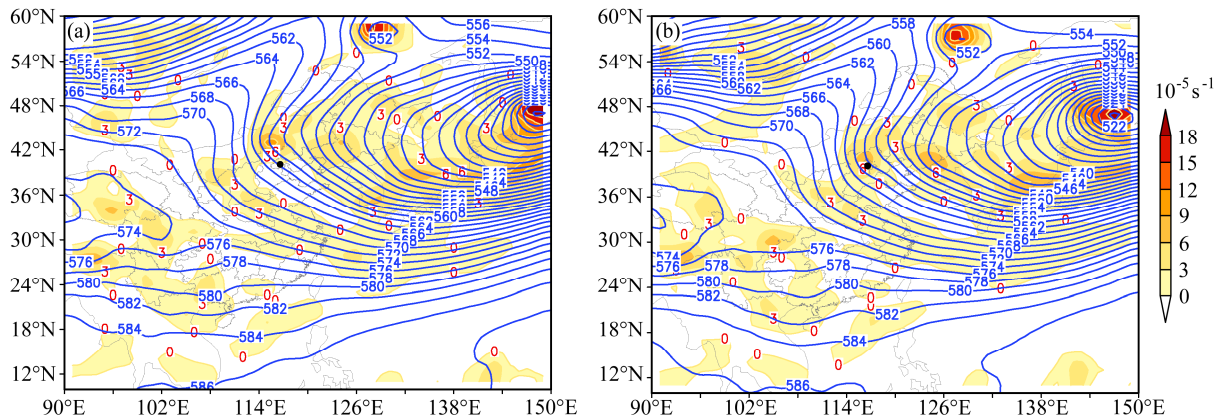


图3 华北地区2013年5月2日 (a) 12:00和 (b) 18:00 500 hPa位势高度 (实线, 单位: dagpm) 和涡度 (阴影)

Fig. 3 500-hPa geopotential height (solid lines, units: dagpm) and vorticity (shadings) in North China at (a) 1200 and (b) 1800 on 2 May 2013

3.2 初雷过程分析

2014年3月31日首都机场观测人员在08:54听到雷声, 并通过闪电定位仪确定发生雷雨天气, 持续1 h左右。从850 hPa高度风温图 (图5) 中看出: 在00:00本场北部存在暖式切变, 随着暖切不断东伸, 本场转为槽前西南气流控制, 造成低空有一定的暖空气输入。而在06:00暖切逐渐东移, 本场逐

渐转为槽前气流, 在低空存在一定的辐合。12:00槽经过本场, 本场雷雨结束。同时在500 hPa的风温图 (图6) 可见在本场北面有一浅槽波动, 槽线在06:00临近本场, 有弱的冷空气甩下, 直到12:00东移出本场。

同样从500 hPa风温图上来看, 气流偏西, 似乎没有冷平流, 但是从500 hPa位势高度和涡度图

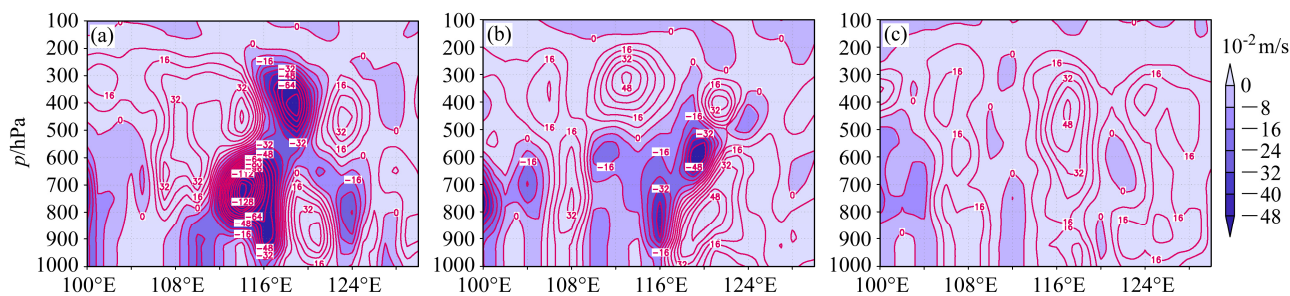


图4 首都机场 2013 年 5 月 (a) 2 日 12:00、(b) 2 日 18:00、(c) 3 日 00:00 40°N 上升速度 (实线与阴影, 单位: 10^{-2} m/s) 径向剖面

Fig. 4 Radial cross sections of ascending velocity (solid lines and shadings, units: 10^{-2} m/s) of 40°N at Beijing Capital International Airport at (a) 1200 UTC 2 May, (b) 1800 UTC 2 May, and (c) 0000 UTC 3 May 2013

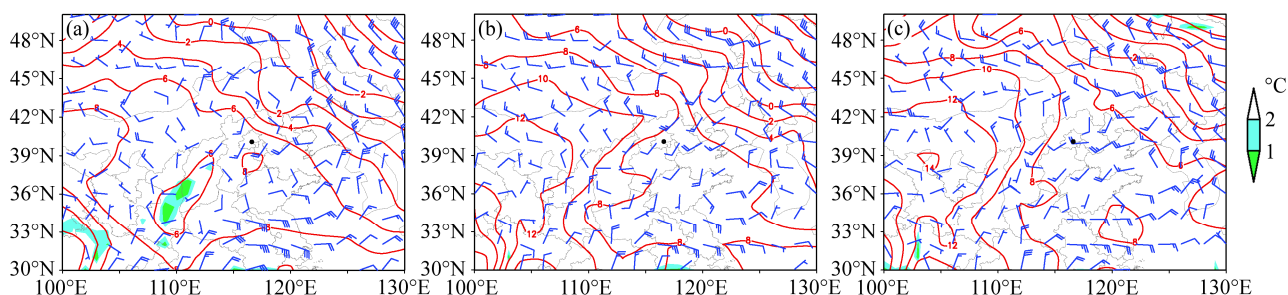


图5 华北地区 2014 年 3 月 31 日 (a) 00:00、(b) 06:00、(c) 12:00 850 hPa 风 (风羽, 长横杠表示风向, 一杆代表 4 m/s)、温度 (实线, 单位: °C)、温度露点差 (阴影)

Fig. 5 850-hPa wind (barbs, long barbs represent wind directions, one barb represents 4 m/s), temperature (solid lines, units: °C), and depression of dew point (shadings) in North China at (a) 0000 UTC, (b) 0600 UTC, and (c) 1200 UTC on 31 Mar 2014

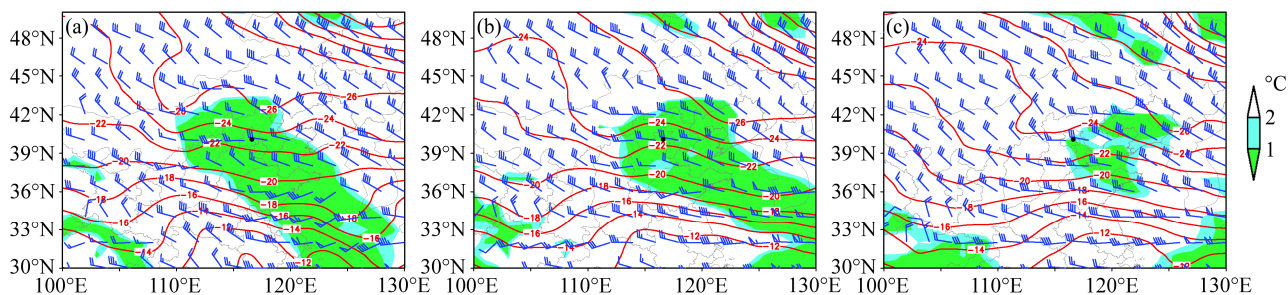


图6 同图 5, 但为 500 hPa

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for 500 hPa

(图 7), 可见 00:00 至 06:00 期间正涡度区在本场北边不断东移南压, 从正涡度区不断甩下冷空气, 从而确定高层满足冷空气条件。

图 8 是上升速度径向剖面图, 强的上升区主要集中在西边, 本场主要在低层 700 hPa 以下存在较大的上升速度, 说明低层暖切造成较强的辐合抬升, 00:00 至 06:00 期间本场的上升速度不断增大, 强度最大为 -0.48 m/s, 顶高到达 300 hPa 高度, 强的上升条件为对流云的形成提供便利, 从而触发对流天气。

综上所述, 两次初雷过程中在 850 hPa 高度层

均存在暖切, 雷雨发生之前中低层有较强的辐合上升速度, 500 hPa 高度层均对应有浅槽或横槽存在, 而且 500 hPa 正涡度平流临近本场的时间与雷雨发生时间一致, 因此确定 500 hPa 高度的槽线和正涡度区的位置对于暖切初雷的预报具有重要意义。

4 雷达图像分析

4.1 2013 年 5 月 2 日雷达图像分析

当前, 双偏振雷达已成为判断雷雨最有效的方式之一 (张鸿发等, 2001), 本文从 2013 年 5 月 2

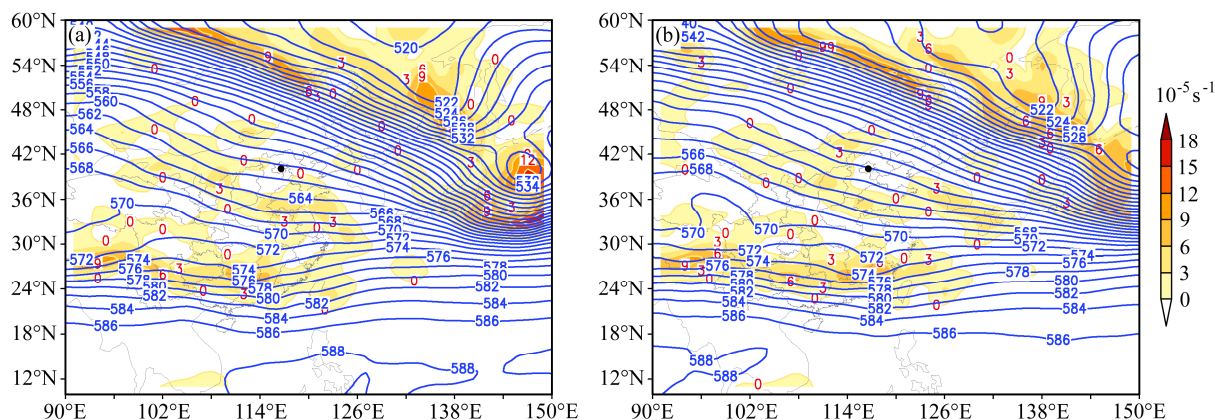


图7 华北地区 2014 年 3 月 31 日 (a) 00:00、(b) 06:00 500 hPa 位势高度 (实线, 单位: dagpm) 和涡度 (阴影)

Fig. 7 500-hPa geopotential height (solid lines, units: dagpm) and vorticity (shadings) in North China at (a) 0000 UTC and (b) 0600 UTC 31 Mar 2014

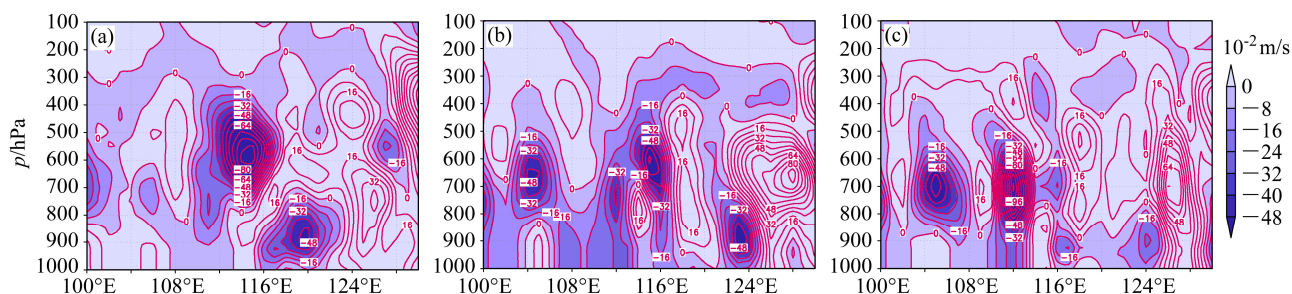


图8 首都机场 2014 年 3 月 31 日 (a) 00:00、(b) 06:00、(c) 12:00 40°N 上升速度 (实线与阴影, 单位: 10^{-2} m/s) 径向剖面

Fig. 8 Radial cross sections of ascending velocity (solid lines and shadings, units: 10^{-2} m/s) of 40°N at Beijing Capital International Airport at (a) 0000 UTC, (b) 0600 UTC, and (c) 1200 UTC on 31 Mar 2014

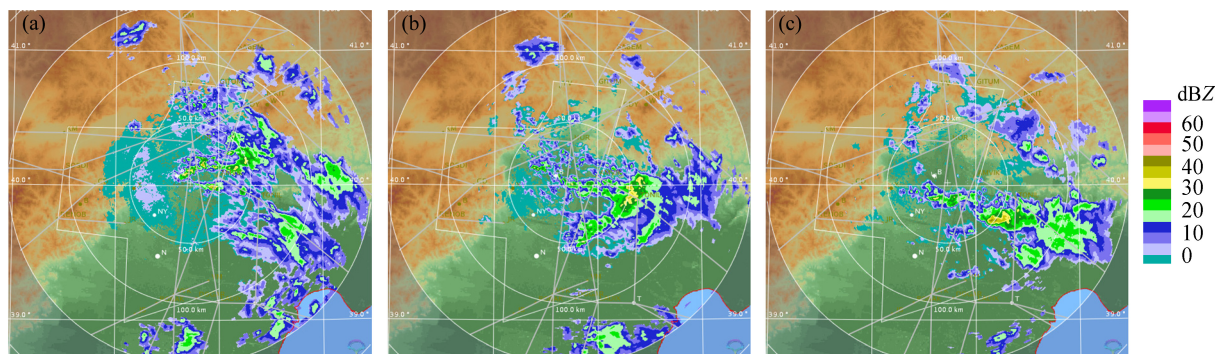


图9 首都机场 2013 年 5 月 2 日 (a) 16:16、(b) 17:46、(c) 19:01 1.5°仰角雷达回波强度

Fig. 9 Radar return intensity of 1.5° elevation angle at Beijing Capital International Airport at (a) 1616 UTC, (b) 1746 UTC, and (c) 1901 UTC on 2 May 2013

日仰角 1.5°的雷达强度图(图 9)可以看到: 在 16:16 (图 9a) 之前, 本场西南方向有回波出现, 但强度较弱, 主要往东北方向移动; 在雷雨发生时段(图 9b), 本场西南方向有强回波出现, 移动方向也逐渐转为东南方向; 直到 19:01 (图 9c) 本场雷雨结束后, 雷达回波强度才逐渐减弱。从而可以确定: 此次雷雨过程的回波明显为局地激发生成, 初期并

没有显著的系统性特征, 直到雷雨快发生时, 图中才显示出明显的雷雨回波。

而从 0.5°仰角的雷达图(图 10)中的雷达回波生消情况基本与 1.5°仰角的雷达回波一致。同样, 此次雷雨过程的回波明显为局地激发生成, 初期并没有显著的系统性特征, 雷雨发生后, 雷达强度图中才显示出明显的雷雨回波, 但是 0.5°仰角雷达回

波强度更强一点。

从图 11 中可以发现, 零等风速线呈“S”型, 说明本场低层明显为暖平流; 另外, 径向速度来向(冷色)中心最大风速核为 10~14 m/s, 而径向速度去向(暖色)中心最大风速只有 2~6 m/s, 入流速度明显大于出流速度, 说明低层有速度辐合。在 17:46 (图 11b) 的雷达速度图中可见, 在发生速度辐合的同时, 还发生了气旋性旋转, 造成本场不断

有局地雷暴触发生成。直至 19:01 风场才逐渐减弱, 气旋性旋转消失, 本场雷雨才结束。

4.2 2014 年 3 月 31 日雷达图像分析

从图 12 中可以看到, 在 06:18 (图 12a) 回波较弱, 暂时还没有明显的天气特征。而从 08:53 (图 12b) 开始, 在本场南边存在一条明显的西南—东北方向辐合线。一般而言, 雷暴倾向于在边界层辐合线附近生成和加强, 本场附近存在明显的辐合

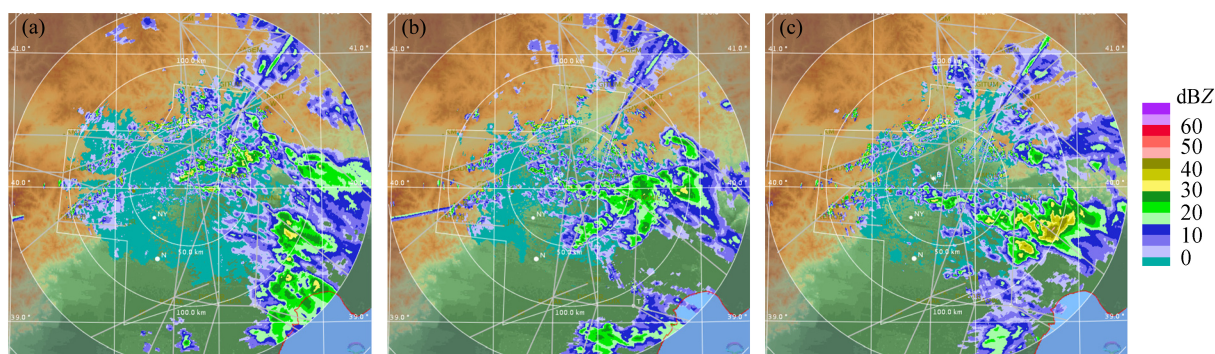


图 10 同图 9, 但为 0.5° 仰角

Fig. 10 Same as Fig. 9, but for 0.5° elevation angle

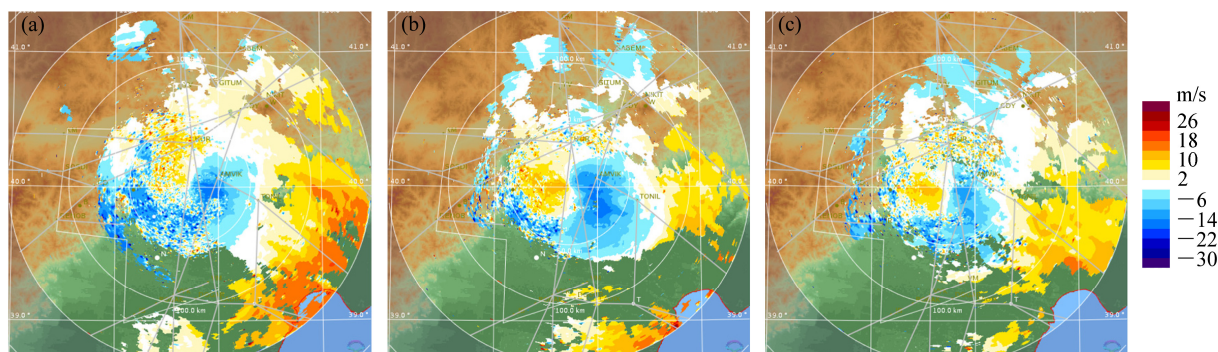


图 11 首都机场 2013 年 5 月 2 日 (a) 16:16、(b) 17:46、(c) 19:01 雷达径向速度

Fig. 11 Radar radial velocity at Beijing Capital International Airport at (a) 1616 UTC, (b) 1746 UTC, and (c) 1901 UTC 2 May 2013

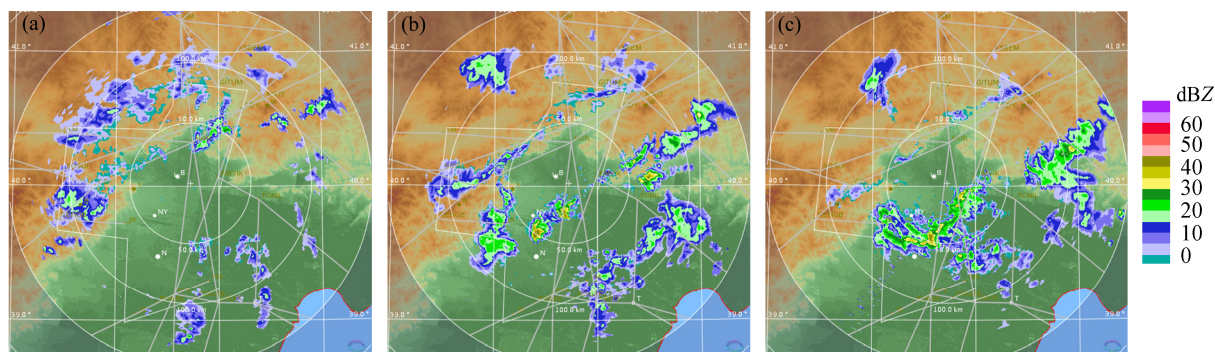


图 12 首都机场 2014 年 3 月 31 日 (a) 06:18、(b) 08:53、(c) 09:33 1.5° 仰角雷达强度

Fig. 12 Radar intensity of 1.5° elevation angle at Beijing Capital International Airport at (a) 0618 UTC, (b) 0853 UTC, and (c) 0933 UTC 31 Mar 2014

线,造成局地雷暴不断触发生成。随着回波逐渐东移,在 09:33 (图 12c) 回波主体已经远离本场,本场雷雨结束。因此,可以确定雷雨回波明显为局地生成,本场雷雨发生后雷达强度图中才显示出明显的带状雷雨回波,在发展初期并没有明显的系统性特征。

同样在 0.5° 仰角的雷达图 (图 13) 中的雷达回波生消情况基本与 1.5° 仰角的雷达回波一致,但回波强度更强,在机场南侧有一条辐合线状回波,初期并没有显著的系统性特征,明显属于局地激发生成。

从 06:18 (图 14a) 雷达径向速度图来看,本场处于暖平流区,无明显辐合区,而在 08:53 (图 14b) 可见机场南边有一条西南—东北向的辐合线,辐合线范围中临近本场位置有暖色的出流区,确定本场附近有一定速度辐合,在 09:33 (图 14c) 之后辐合线已经消失,本场雷雨结束。

首都机场周边的山呈簸箕状,而本场位于平原区,地形比较复杂,而从雷达图中可见雷达回波产生在平原,与山区关联不大,说明这两次雷雨主要

在平原发生,属于局地触发,因此当有暖切初雷天气发生时,可能需要重点关注平原地区回波。同时,500 hPa 高空槽到达本场时间也与雷达回波的生消有很大关联,进一步确定 500 hPa 高空槽对于暖切初雷的发生发展具有重要意义。

5 气象卫星产品分析

气象卫星主要是利用不同大气粒子对不同波段辐射吸收和散射特性的不同而进行监测,就其数据产品而言,可分为云图产品及卫星导出产品。其中静止卫星因其探测频率较高,对生命史较短的中小尺度系统有较强的监测能力,成为了局地天气预报的一种强有力手段,在实际工作中已有较为成熟的应用 (俞小鼎等, 2012)。

5.1 相当黑体温度资料分析

本文介绍的两次初雷均属于局地激发型雷暴,系统特征不明显,在 FY-2E 云图上并没有明显的指示特征,但在 FY-2E TBB 图中却有一定的指示特征 (徐妮, 2012)。TBB 是利用在红外波段内云顶和

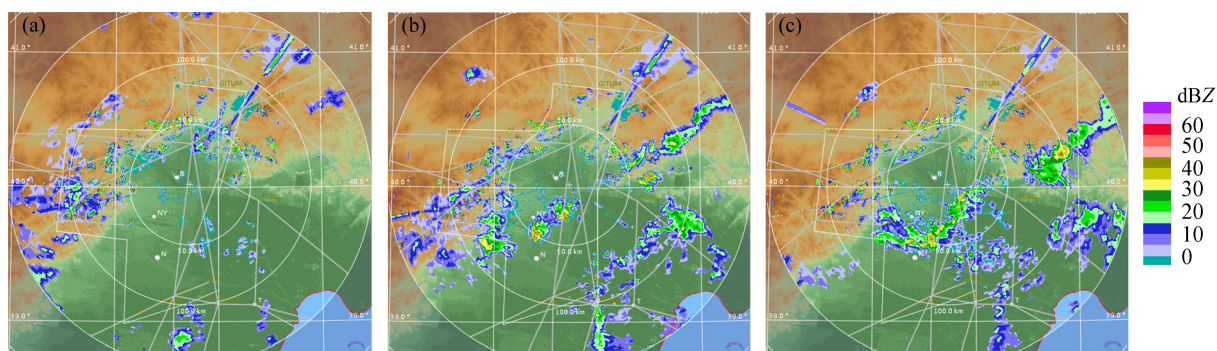


图 13 同图 12, 但为 0.5° 仰角

Fig. 13 Same as Fig. 12, but for 0.5° elevation angle

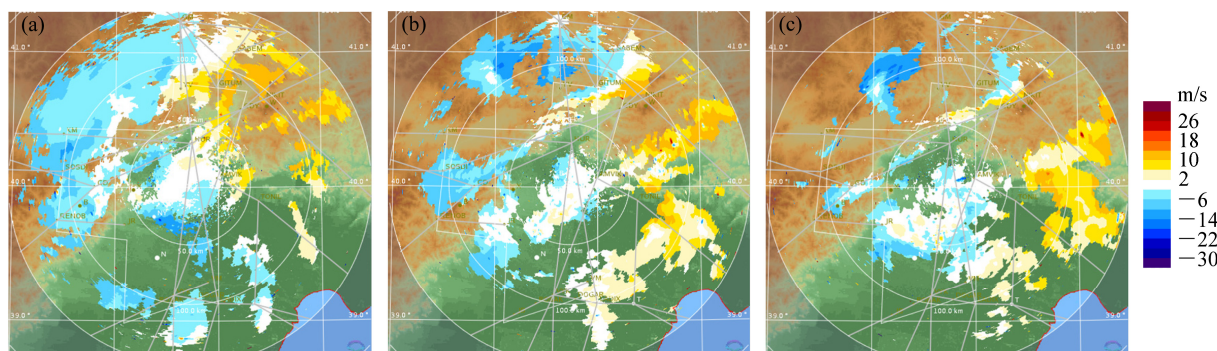


图 14 首都机场 2014 年 3 月 31 日 (a) 06:18、(b) 08:53、(c) 09:33 雷达径向速度

Fig. 14 Radar radial velocity at Beijing Capital International Airport at (a) 0618 UTC, (b) 0853 UTC, and (c) 0933 UTC 31 Mar 2014

无云或少云区的辐射很少被大气吸收的特性,通过应用普朗克函数处理转换成辐射亮度温度,它在天气尺度、中小尺度系统诊断预报以及短期气候诊断分析中有广阔的应用前景(杨本湘和潘志军, 2005)。

5.1.1 2013 年 5 月 2 日 TBB 资料分析

图 15 是 2013 年 5 月 2 日华北地区 TBB 等值线分布图,其中图 15a 是 12:00 的图像,本场的亮温为 6 °C,对流不明显,暂时没有出现雷雨;图 15b 是 17:00 图像,机场附近 TBB 值已低至 -12 °C,较小的值对应本场附近有较深厚的对流过程,而且等值线密集主要处在东南方向,当时雷雨也主要影响东南方向。一般来说, TBB 等值线的密集区常位于雷达强回波区(沈宏彬, 2004),雷达强度图中回波主体位置与 TBB 图等值线密集区基本一致,从而可以确定 TBB 与雷暴的发生和发展是相关的。图 15c 是 23:00 图像,本场亮温已经在 6 °C 以上,雷雨已全部结束。由此可见, TBB 值越低,对流越强,等值线密集区即对流强烈发展区。

5.1.2 2014 年 3 月 31 日 TBB 资料分析

图 16 介绍的是 2014 年 3 月 31 日的初雷过程,从 07:00 图像(图 16a)可以看出,虽然本场周边

地区 TBB 值较低,但是本场 TBB 处在 0~6 °C 之间,当时本场没有对流天气;图 16b 是 09:00 图像,本场处在 -12 °C 等值线边缘处,在 08:57 本场闻雷一声;图 16c 中温度已经逐渐升高至 0 °C 以上,等值线密集区已经东移远离本场,雷雨结束。

综上所述, TBB 等值线图对于雷雨的发生发展有一定的指示作用, TBB 值越低,对流顶越高,对流越强,等值线密集区即未来对流强烈发展区。

5.2 风云卫星云指数特征

鉴于 FY-2E 静止卫星较高的时间分辨率,本文尝试利用不同通道数据定量分析卫星数据,探讨获取具有指示性参数的可行性。考虑到各通道的物理意义不同,在定义云指数的基础上(Dostalek et al., 1997),朱克云等(2011)利用红外通道与中红外通道的特征定义了雷暴云指数,通过 FY-2C 资料计算雷暴云指数来研究青藏高原雷暴,取得一定的成果。本文在此基础上,利用 FY-2E 红外通道、水汽通道及中红外通道的资料研究北京平原地带的雷暴云指数 I_{FY} :

$$I_{FY} = \frac{I_1 - I_3}{|I_1 - I_4|}, \quad (1)$$

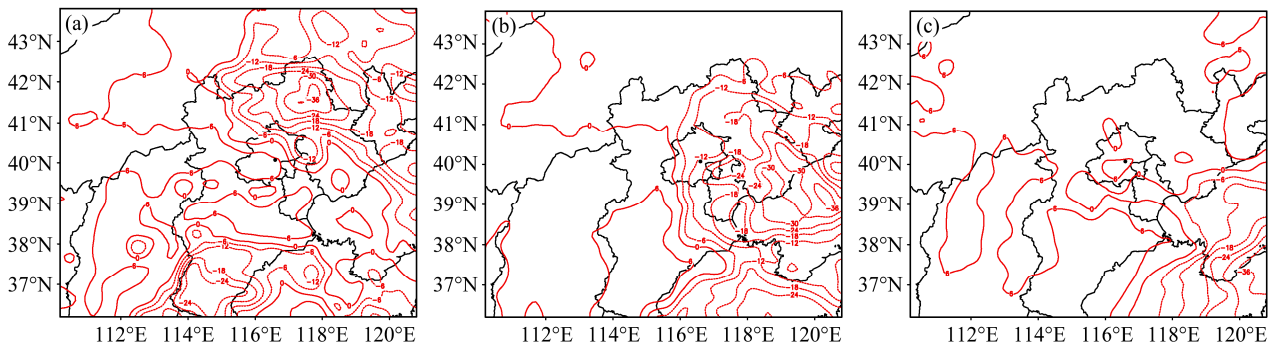


图 15 华北地区 2013 年 5 月 2 日 (a) 12:00、(b) 17:00、(c) 23:00 TBB (单位: °C)

Fig. 15 Black body temperature (TBB, units: °C) in North China at (a) 1200 UTC, (b) 1700 UTC, and (c) 2300 UTC on 2 May 2013

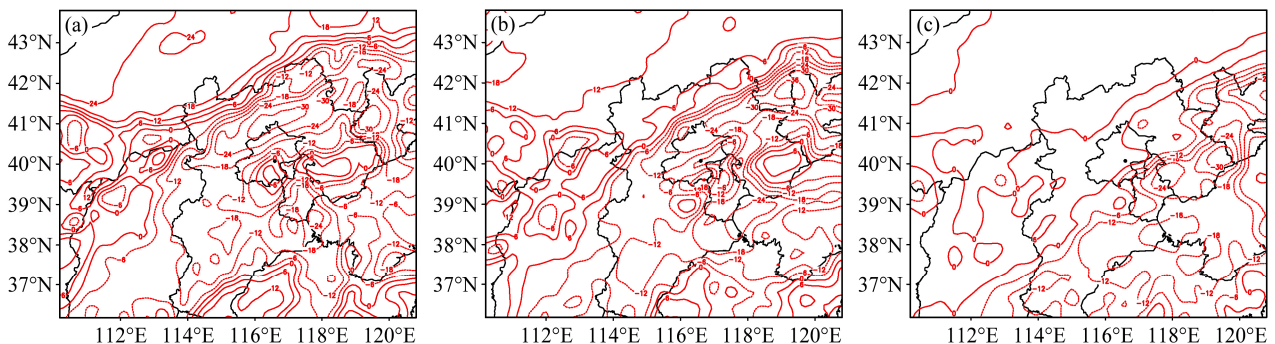


图 16 华北地区 2014 年 3 月 31 日 (a) 07:00、(b) 09:00、(c) 12:00 TBB (单位: °C)

Fig. 16 TBB (°C) in North China at (a) 0700 UTC, (b) 0900 UTC, and (c) 1200 UTC on 31 Mar 2014

其中 I_1 、 I_3 、 I_4 分别是 FY-2E 远红外通道、水汽通道及中红外通道的亮温数据。

本文分别利用 2013 年 5 月 2 日和 2014 年 3 月 31 日的 FY-2E 卫星数据中的红外 1、3、4 通道数据, 通过公式 (1) 计算得到首都机场的雷暴云指数, 并以散点图的形式展示, 探讨雷暴云指数的可行性。

5.2.1 2013 年 5 月 2 日雷暴云指数

图 17 是首都机场 2013 年 5 月 2 日 09:00 至 20:00 的 FY-2E 雷暴云指数分布图, 从图中可以看出: 当日 13:00 雷暴云指数达到最大值 26, 接着有较大的下降趋势, 在 17:00 已经低至 0.54, 而 18:00 达到最小值 0.22, 而 19:00 以后又逐渐升高。当日雷暴发生时段为 17:00 至 19:00, 与雷暴云指数低值所在时段相一致。因此可以确定雷暴云指数位于低值区, 且大多数介于 0~0.5 之间时, 可以表征雷雨发生的时间。

5.2.2 2014 年 3 月 31 日雷暴云指数

从首都机场 2014 年 3 月 31 日 00:00 至 11:00 雷暴云指数分布 (图 18) 可见: 从 00:00 至 07:00 云指数值不断升高, 达到最大值 3.5, 接着云指数就剧烈下降, 09:00 低至 0.36, 接着又逐渐升高。

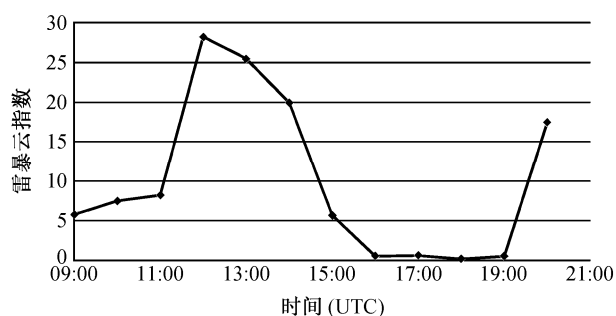


图 17 首都机场 2013 年 5 月 2 日雷暴云指数

Fig. 17 Thunderstorm index at Beijing Capital International Airport on 2 May 2013

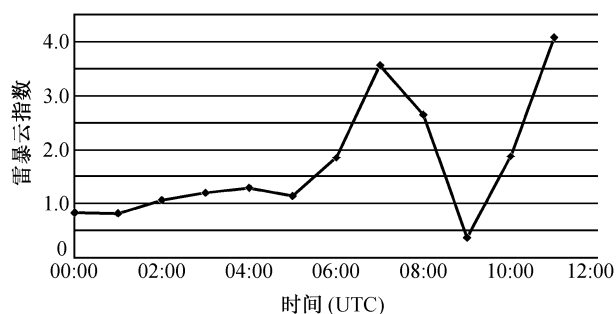


图 18 同图 17, 但为 2014 年 3 月 31 日

Fig. 18 Same as Fig. 17, but for 31 Mar 2014

当日在 09:00 左右本场闻雷一声, 与指数最低值所处时间相符, 随着雷雨结束, 云指数值又逐渐增高。从以上的分析中可以看出: 雷暴云指数低值所在的时段对判定雷暴发生发展的时间有较好的指示作用。

6 结论

通过 NECP、雷达、卫星资料进行深入研究, 本文获得了一些具有表征意义的结论:

(1) 两次过程不单纯在 850 hPa 有暖切, 在 500 hPa 均存在浅槽或横槽配合, 两次过程中 500 hPa 槽都起到了至关重要的作用, 500 hPa 正涡度区到达本场的时间与雷雨发生时间一致, 雷雨发生前和发生时, 低层存在较强辐合抬升条件。

(2) 从雷达图像来看, 两次初雷过程低层为暖平流, 本场均存在明显的辐合区, 而且雷雨回波明显为局地生成, 初期并没有明显的系统性特征。

(3) TBB 温度越低, 对应的云顶越高, 对流越旺盛。TBB 等值线的密集区常常位于雷暴的雷达强回波区, TBB 等值线密集区的对流体未来都是发展的, 从而可以推断对流的发展趋势。

(4) 在雷雨发生时段, FY-2E 雷暴云指数一般介于 0~0.5 之间, 其变化趋势可以准确表征雷雨发生的时间, 对雷暴的预报有着较好的指示作用。

参考文献 (References)

- 陈洪滨, 朱彦良. 2012. 雷暴探测研究的进展 [J]. 大气科学, 36 (2): 411-422. Chen Hongbin, Zhu Yanliang. 2012. Review on the observation investigation of thunderstorms [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (2): 411-422, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11064.
- Dostalek J F, Weaver J W, Purdom J F W, et al. 1997. Picture of the quarter: Nighttime detection of low-level thunderstorm outflow using a GOES multispectral image product [J]. Wea. Forecasting, 12 (4): 947-950, doi: 10.1175/1520-0434(1997)012<0948:POTQND>2.0.CO;2.
- 胡伯威, 彭广. 1996. 暖切变型江淮梅雨锋结构及其形成和维持机制 [J]. 大气科学, 20 (4): 463-472. Hu Bowei, Peng Guang. 1996. The structure of the warm shear-line type Jianghuai Meiyu front and the mechanism of its formation and maintenance [J]. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 20 (4): 463-472.
- 胡伯威. 1997. 与低层“湿度锋”耦合的带状 CISK 和暖切变型梅雨锋的产生 [J]. 大气科学, 21 (6): 679-686. Hu Bowei. 1997. The band of CISK coupled with low level “Moisture Fronts” and the genesis of warm shear line-type Meiyu fronts [J]. Scientia Atmospherica Sinica (in

- Chinese), 21 (6): 679–686.
- 刘贵萍, 陶祖钰, 龚娅. 2012. 贵阳地区一次春季暖切变型飑线的云图分析 [J]. 云南大学学报 (自然科学版), 34 (S1): 50–55. Liu Guiping, Tao Zuyu, Gong Ya. 2012. Analysis on cloud images of a warm-shear squall line process of Guiyang area in spring [J]. Journal of Yunnan University (in Chinese), 34 (S1): 50–55.
- 齐琳琳, 刘玉玲, 赵思雄. 2005. 一次强雷雨过程中对流参数对潜势预测影响的分析 [J]. 大气科学, 29 (4): 536–548. Qi Linlin, Liu Yuling, Zhao Sixiong. 2005. The analyses of convective parameters and their potential predictability in a severe thunderstorm rain [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (4): 536–548.
- 沈宏彬. 2004. 雷达回波和卫星云图在预报雷暴天气中的应用 [J]. 四川气象, 24 (3): 47–50. Shen Hongbin. 2004. The applications of radar echoes and satellite cloud images on the forecasting of thunderstorm weather [J]. Journal of Sichuan Meteorology (in Chinese), 24 (3): 47–50.
- 苏丽楠, 付强, 窦利军. 2008. 首都机场初雷统计分析 [C]//2008 年北京气象学会科技优秀论文集. 北京: 北京气象学会, 151–158. Su Linan, Fu Qiang, Dou Lijun. 2008. Beijing Capital International Airport early thunder statistical analysis [C]//2008 Beijing Meteorological Society Proceedings of Outstanding Scientific and Technological (in Chinese). Beijing: Beijing Meteorological Society, 151–158.
- 徐妮. 2012. FY-2 卫星资料在广汉机场一次雷暴预报中的应用 [J]. 中国科技信息, (18): 48, 53. Xu Wei. 2012. The application of FY-2 satellite products in short-time forecasting and nowcasting of a thunderstorm of Guanghan Airport [J]. China Science and Technology Information (in Chinese), (18): 48, 53.
- 杨本湘, 潘志军. 2005. “FY-2C” 卫星云图导出产品在天气分析中的应用 [J]. 气象卫星与气象雷达, 25 (4): 34–37. Yang Benxiang, Pan Zhijun. 2005. Application of products from FY-2C satellite cloud picture to weather analysis [J]. Journal of Sichuan Meteorology (in Chinese), 25 (4): 34–37.
- 俞小鼎, 周小刚, 王秀明. 2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展 [J]. 气象学报, 70 (3): 311–337. Yu Xiaoding, Zhou Xiaogang, Wang Xiuming. 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 70 (3): 311–337.
- 张鸿发, 郗秀书, 王致君, 等. 2001. 偏振雷达观测强对流雹暴云 [J]. 大气科学, 25 (1): 38–48. Zhang Hongfa, Qie Xiushu, Wang Zhijun, et al. 2001. Polarization radar observations on hailstorms [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25 (1): 38–48.
- 张立生, 孙建华, 赵思雄, 等. 2007. 长江中游暖切变型暴雨的分析研究 [J]. 气候与环境研究, 12 (2): 165–180. Zhang Lisheng, Sun Jianhua, Zhao Sixiong, et al. 2007. A study on heavy rainfall associated with warm shear line in the middle reaches of the Yangtze River in summer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (2): 165–180.
- 周继业. 2002. 成都双流机场初雷浅析 [J]. 四川气象, 22 (2): 37–38. Zhou Jiye. 2002. Analysis of Chengdu Shuangliu Airport at the beginning of thunder [J]. Journal of Sichuan Meteorology (in Chinese), 22 (2): 37–38.
- 周志敏, 郭学良. 2009. 强雷暴个例云内闪电与上升气流及液水含量关系的三维数值模拟 [J]. 气候与环境研究, 14 (1): 31–44. Zhou Zhimin, Guo Xueliang. 2009. 3D modeling on relationships among intracloud lightning, updraft and liquid water content in a severe thunderstorm case [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (1): 31–44.
- 朱克云, 张杰, 任景轩, 等. 2011. 基于通道差异及云指数法的西藏雷暴卫星云图特征分析 [J]. 高原气象, 30 (6): 1633–1639. Zhu Keyun, Zhang Jie, Ren Jingxuan, et al. 2011. Characteristic analysis on satellite image of thunderstorm in Tibet based on different channel and cloud index methods [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 30 (6): 1633–1639.
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文. 2000. 天气学原理和方法 [M]. 北京: 气象出版社, 401. Zhu Qianggen, Lin Jinrui, Shou Shaowen. 2000. Principle and Method of Synoptic Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 401.