

方 翀, 郑永光, 林隐静, 等. 2014. 导致区域性雷暴大风天气的云型分类及统计特征分析. 气象, 40(8): 905-915.

# 导致区域性雷暴大风天气的云型 分类及统计特征分析<sup>\*</sup>

方 翀 郑永光 林隐静 朱文剑

国家气象中心, 北京 100081

**提 要:** 利用 2005—2011 年的静止卫星、常规探空和重要天气报资料, 文章选取了 18 次典型区域性雷暴大风过程, 在分析 500 hPa 天气形势基础上对导致雷暴大风的强对流云型进行了分类分析, 其发展过程可划分为初始、发展、成熟和消亡四个阶段。对静止卫星观测的定量特征分析表明, 对流云团中 IR1 通道和水汽(WV)通道的亮温差基本为负值, 其值的不断减小预示着强对流在持续发展; 在监测和预报雷暴大风天气时, 需要特别关注长椭圆形强对流云带的右侧和其右侧的孤立对流云团, 尤其是 TBB(红外亮度温度)低负值区、TBB 高梯度区、IR1 和 WV 通道亮温差值区及大梯度区均配合的区域。在定性分析的基础上对静止卫星 IR1 与 WV 通道的亮温特征进行了定量统计分析, 获得了雷暴大风出现站点附近的红外亮温、水汽亮温、IR1 与 WV 通道亮温差和红外亮温梯度的分布情况, 结果发现大部分站点的雷暴大风天气出现在以下时段: 红外亮温由急剧下降到平缓下降之间的过渡期; IR1 与 WV 通道亮温差由迅速下降转为缓慢下降或稳定少变的时间点前后, 且多数处于 IR1 和 WV 通道亮温差由正转负临近的时间段内; 红外亮温梯度达到最大的时间点附近或开始下降的时候。

**关键词:** 雷暴大风, 云型, 红外亮温, 通道亮温差, 亮温梯度

**中图分类号:** P405, P426      **文献标志码:** A      **doi:** 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2014. 08. 001

## Classification and Characteristics of Cloud Patterns Triggering Regional Thunderstorm High Winds

FANG Chong ZHENG Yongguang LIN Yinjing ZHU Wenjian

National Meteorological Centre, Beijing 100081

**Abstract:** Based on the satellite data, observational data of upper-air and significant weather report from 2005 to 2011, the weather situation at 500 hPa and the cloud patterns of 18 processes of thunderstorm high winds are classified and analyzed. The development of cloud patterns can be divided into 4 stages: initial, growing, mature and dissipating. The brightness temperature difference between IR1 channel and water vapor channel is mostly negative, and the number's decreasing indicates that the severe convective clouds are still developing. We need to pay more attention to the right part or the right single-cell storm of the elongated strong convective clouds when we monitor and forecast the cloud system of thunderstorm high winds, especially the low TBB areas, the high TBB gradient part and the area coordinating with the negative area of IR1 and WV channel brightness temperature difference. Quantitative statistical analysis of the characteristic value are made on the basis of subjective analysis, and we get the distribution of the infrared brightness temperature, water vapor brightness temperature, channel brightness temperature difference and infrared brightness temperature gradient near the sites observing the thunderstorm high winds. We discover that the majority of thunderstorm high winds often take place during the period when the infrared

<sup>\*</sup> 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206003)、国家重点基础研究计划(973 计划)项目(2013CB430106)、国家自然科学基金项目(41375051)共同资助完成  
2014 年 1 月 3 日收稿; 2014 年 4 月 30 日收修定稿  
第一作者: 方翀, 主要从事中小尺度强对流天气研究. Email: fangchong@cma. gov. cn

brightness temperature develops from a sharp decline to a gentle decline and at the time point when the channel brightness temperature gently slows down or becomes stable. Moreover, most examples are near the time period when the channel brightness temperature difference changes from positive to negative, and at the point when the infrared brightness temperature gradient approaches the largest area or begins to decline.

**Key words:** thunderstorm high winds, cloud pattern, infrared brightness temperature, brightness temperature difference, brightness temperature gradient

## 引 言

卫星云图是大气运动状况的直观表征,预报业务中经常根据云图上云或云区的型式、范围、边界、色调、暗影和纹理等 6 个基本特征来识别和分析天气,尤其是云型的变化特征对天气分析和预报有重要的指示作用。

强对流天气是天气预报业务中的重要预报对象之一,国内外专家学者在利用云图资料对强对流天气进行监测和预报等方面进行了深入研究,取得了大量成果。例如方宗义等(2006)对卫星监测分析和研究暴雨云团的国内外若干研究结果和进展给予了简要综述;胡波等(2009)通过对梅汛期强降水云团特征分析,指出云顶亮温的宏观特征与中高层的垂直速度及水汽通量密切相关;朱亚平等(2009)对一次锋面气旋云系中的强对流云团进行识别,发现水汽和红外通道亮温差对强对流云团能进行较好定位;许爱华等(2011)将江西省强对流发生的云型分为 8 种,并指出 8 种云型特征与低槽、切变、冷空气、东风波、热带气旋、高低空急流、副热带高压等影响系统的强弱、相对位置有密切关系;徐小红等(2012)对一次春季强飏线过程中强对流云微物理特征进行了研究,并根据多光谱综合分析归纳出卫星探测对流强信号;陈英英等(2013)对一次强天气过程的云结构特征进行了综合分析,结果表明对流云团的生长中心云顶黑体亮温 TBB 低值区和陡变的温度梯度区相对应及云体的合并有助于对流云的发展和维持等。这些研究成果为利用云图分析和预报强对流天气提供了依据和参考。

雷暴大风作为强对流天气中最主要的一种,由于其突发性和严重致灾性,需要利用静止卫星云图、雷达等多源资料进行深入的研究。目前国内针对雷暴大风(尤其是针对飏线)的天气学诊断和雷达特征的研究较多,如姚叶青等(2008)利用多普勒雷达资

料研究了飏线发展过程中垂直结构演变特征,戴建华等(2012)使用多普勒天气雷达、风廓线仪等资料对 2009 年 6 月 5 日的一个飏线前超级单体风暴进行了详细分析,指出飏前超级单体在飏线主体移动和演变的临近预报中有重要指示意义,潘玉洁等(2012)使用双多普勒雷达对华南一次飏线系统的中尺度结构特征进行了分析,张芳华等(2005)、俞小鼎等(2006)、郑媛媛等(2004)、邵玲玲(2006)、于庚康等(2013)、陈涛等(2013)和伍志方等(2014)也对飏线发生发展、传播机制和组织结构等特征进行了研究。

但目前针对产生雷暴大风云系的发展特征研究还非常少见,尤其在定量化统计分析方面更难以见到相关研究。由于静止卫星的观测特点,常常能够较天气雷达更早捕捉到对流信息,且静止卫星较天气雷达观测范围更广,更易于对大范围的强对流云系的移动和发展进行观测,另一方面,目前的业务天气雷达是测雨雷达,主要观测强对流云系中雨滴和冰相粒子的发展和分布状况,而静止卫星主要观测的是云顶的发展和分布特征,两者可以互为补充,因此对利用静止卫星资料分析强对流天气(包括雷暴大风天气)是十分必要的。本文的研究目的是对区域性雷暴大风出现时的天气形势和云型特征及变化进行定性分析,为主观应用静止卫星资料提供参考,并对不同通道的亮温分布和演变特征进行定量统计分析,为静止卫星云图资料的客观应用以及综合其他多源观测资料监测和临近预报雷暴大风天气提供基础。

## 1 资料和方法

本文将我国中东部地区分为东北、华北、华东、华中和华南 5 个区域,每个区域 24 h 内超过 10 站出现 8 级以上雷暴大风天气作为一次区域性雷暴大风天气过程。雷暴大风天气资料来自 2005—2011 年的国家级气象观测站地面观测和重要天气报数

据,对雷暴大风多发区域(如华北地区)的个例按照雷暴大风出现站次多少进行了一定剔除,尽量保证每个区域都有个例入选,最终挑选了 18 次典型雷暴大风天气过程(如表 1)。

使用风云二号(简称 FY2)红外 1(简称 IR1)通道云图数据,对 18 次雷暴大风过程的云型特征进行了定性分析,并结合 500 hPa 大气环流形势对其进行了分类。在此基础上分析红外云图、可见光云图和水汽云图的发展变化特征。另外,由于在晴空区域水汽通道接收到的是由对流层中上层 500~200 hPa 水汽放射的辐射,而红外通道的辐射多来自近地面,因而 IR1-WV 为很大的正值,而在强对流上升区域,水汽通道接收到的辐射来自平流层的水汽,平流层水汽吸收较冷的云顶的射出辐射,而以较高的平流层温度放出辐射,故 IR1-WV 为负值, Schmetz 等(1997)利用 MeteoSAT 卫星资料指出:对于强对流云,水汽通道亮温比红外通道高 6~8 K 左右。所以本文也对 IR1 通道和水汽(WV)通道的亮温差进行计算分析,以获取识别雷暴大风云系及判断未来发展变化的量化特征。

需要说明的是,由于 2005—2009 年为 FY2C 的数据,而 2010—2011 年为 FY2E 的数据,为避免卫星传感器不同导致观测数据的定标存在差异而影响分析结果,主观定性分析方面对所有过程进行了综合分析,而客观定量分析上综合资料情况,仅对 2005—2009 年 13 次天气过程的 FY2C 观测数据进行了分析,这些过程分别是 2007 年 6 月 26 日、2007 年 7 月 22 日、2007 年 8 月 2 日、2007 年 8 月 3 日、2008 年 6 月 3 日、2008 年 6 月 25 日、2008 年 7 月 6 日、2008 年 7 月 11 日、2008 年 7 月 20 日、2009 年 6 月 3 日、2009 年 6 月 5 日、2009 年 6 月 14 日、2009 年 6 月 16 日。FY2C 静止卫星云图数据水平分辨率为 0.05°。

针对这 13 次雷暴大风天气过程,剔除重复记录,共得到 390 站次雷暴大风记录;然后根据雷暴大风出现的大致时间,向前推 1~1.5 h,向后推 0.5~1 h,作为提取卫星数据的时间范围;最后,由于云图上强对流云团特征量的表征区域与地面雷暴大风出现区域可能不完全一致(如强对流云团的出流边界导致的雷暴大风往往位于静止卫星云图上 TBB 的负值中心区和大梯度区的前侧等),需要确定一个合适的空间范围,该范围既不能太大也不能太小,故以雷暴大风出现站点附近最近的网格点为中心网格

点,分别向东西南北拓展 6 个网格点作为提取云图特征量的空间范围,最终得到一组 13×13 个网格点的数据,该数据网格大致相当于一个 50 km×50 km 的正方形,与业务中的实际使用经验范围较为接近。

在确定雷暴大风记录和时间空间范围后,提取计算每站次雷暴大风相应时空范围内的 IR1 通道亮温(后均简称红外亮温)、水汽亮温、IR1 通道与水汽通道亮温差等数据,并在此基础上根据其物理意义取最小值,得到 390 站次的红外亮温、水汽亮温、通道亮温差极值。由于个别极值点不能完全代表整个强对流云团的特征,故在计算极值的同时也计算一定范围内的平均值用于分析,同样考虑到强对流云团特征量的表征区域与地面雷暴大风出现区域可能有一定偏差,而偏差之外的区域有可能是晴空区域,如果对所有格点进行平均可能掩盖了特征量的实际分布状况,故对雷暴大风站点每个时次提取的 13×13 个特征量数据从低到高进行排序,提取排序后的前 50 个数据,按照如下方式进行计算,  $I_{ave} = extremum(I_{t1}, I_{t2}, \dots, I_{ts})$ , 其中  $I_m = \frac{1}{50} \sum_{j=1}^{50} I_{j,m}$  ( $I_{j,m}$  为第  $n$  个时次排序为  $j$  的数据)。最终得到 390 站次的各种特征量的平均值  $I_{ave}$ 。

对雷暴大风站点每个时次的 13×13 个网格点的红外亮温数据,分别计算其与周围 8 个格点的红外亮温的差值及空间距离,将该差值的绝对值除以空间距离,得到 IR1 通道亮温梯度(后均简称红外亮温梯度)数据,在剔除重复数据后从高到低进行排序,得到亮温梯度极值,并提取排序后的前 100 个数据,按照前述类似方法得到亮温梯度平均值。

在以上基础上探究雷暴大风天气在卫星云图上的数据化体现。

## 2 雷暴大风的天气形势和云型分类

### 2.1 天气形势分类

参考类似文献(于波等,2013)中强对流天气的分类方法,首先将 18 个个例根据天气形势简单分为槽后型、槽前型和副热带高压(以下简称副高)边缘型(表 1)。

表 1 表明雷暴大风个例中槽后型的天气形势占 60%左右,因此雷暴大风天气更易于发生在 500 hPa 高空槽后这种天气形势下。

表 1 雷暴大风个例的天气形势分类

Table 1 Weather situation classification of thunderstorm high winds

天气形势	槽后型	槽前型	副高边缘型
雷暴大风个例/ 年. 月. 日	2005. 5. 31、2005. 8. 1、2007. 6. 26、2009. 6. 3、 2009. 6. 5、2009. 6. 14、2010. 5. 15、2009. 6. 16、 2008. 7. 11、2008. 6. 25、2008. 6. 3	2007. 4. 17、2007. 8. 2、 2007. 8. 3、2008. 7. 6、 2011. 4. 17	2007. 7. 22 2008. 7. 20

2.2 云型分类

对这 18 次雷暴大风过程的 IR1 通道云图云型进行分析,可将其分为 3 类:长椭圆形、准圆形、多孤立对流云团或不规则云型(表 2)。

表 2 表明,雷暴大风云型以单一长椭圆形为多,超过总数的 60%以上,且类型二与类型一发展过程也较类似,但是因为垂直风切变或其他对流发展条件的改变等原因导致长椭圆形对流带的东段或西段消亡而转变呈准圆形。

表 2 雷暴大风个例的云型分类

Table 2 Cloud structure classification of thunderstorm high winds

云型	第一类云型 单一长椭圆形云体,其一侧有不断 有新单体生成并入主单体	第二类云型 初生和初期发展为长形,之后其 东段或西段消失,转为准圆形	第三类云型 多个孤立对流云团 或不规则云型
雷暴大风个例/ 年. 月. 日	2005. 5. 31、2007. 4. 17、2007. 8. 2、2007. 8. 3、 2008. 7. 20、2009. 6. 14、2010. 5. 15、 2011. 4. 17、2007. 6. 26、2007. 7. 22、 2008. 6. 3、2008. 7. 6、2008. 7. 11	2005. 8. 1 2009. 6. 3 2009. 6. 5	2008. 6. 25 2009. 6. 16

2.3 天气形势和云型综合分析

综合以上雷暴大风天气过程的高空形势和云型,可将以上 18 次过程分为以下 5 类,并给出各种类型的典型个例(表 3 中带括号的个例)以便分析。

可见若雷暴大风天气过程发生在槽后,则第一、第二、第三类云型都有可能出现,但以第一类云型最为多见;若出现在槽前或副高边缘,则主要为第一类云型(表 3)。

表 3 雷暴大风天气形势+云型分类及典型个列表

Table 3 Weather situation and cloud structure classification of thunderstorm high winds and typical cases

类型	槽后一型	槽后二型	槽后三型	槽前型	副高边缘型
天气形势+ 云型	槽后+ 一类云型	槽后+ 二类云型	槽后+ 三类云型	槽前+ 一类云型	副高边缘+ 一类云型
个例(括号内 为典型个例) /年. 月. 日	2005. 5. 31、2007. 6. 26、 2009. 6. 14、2010. 5. 15、 2008. 7. 11、2008. 6. 3 (2009. 6. 14)	2005. 8. 1、 2009. 6. 5 (2009. 6. 3)	2009. 6. 16 (2008. 6. 25)	2007. 4. 17、2007. 8. 2、 2007. 8. 3、2008. 7. 6 (2011. 4. 17)	2008. 7. 11 (2008. 7. 20)

3 雷暴大风云型定性分析

在综合天气形势和云型特征的类别中,槽后一型最为普遍,造成的社会影响和灾害常常也最大,故对槽后一型作详细分析,并将其他类型与其进行比较。

3.1 槽后一型云图特征

此类型天气形势为 500 hPa 冷涡后部的弱冷空

气南下配合低层(850 hPa)的暖低压而产生的雷暴大风天气(图略),其雷暴大风区域主要出现在 08 时冷涡槽底略偏后部,雷暴大风云团的移动发展方向为 500 hPa 引导气流方向并略向右偏。

此类型对流云系的发展方向沿着中层冷空气的移动方向自北向南,发展过程主要分为四个阶段(图 1)。

(1) 初始阶段:红外云图上出现直径 $\leq 100$  km 的椭圆或圆形的小块云系并迅速发展,红外亮温迅速降低,该阶段一般持续 1~2 h;

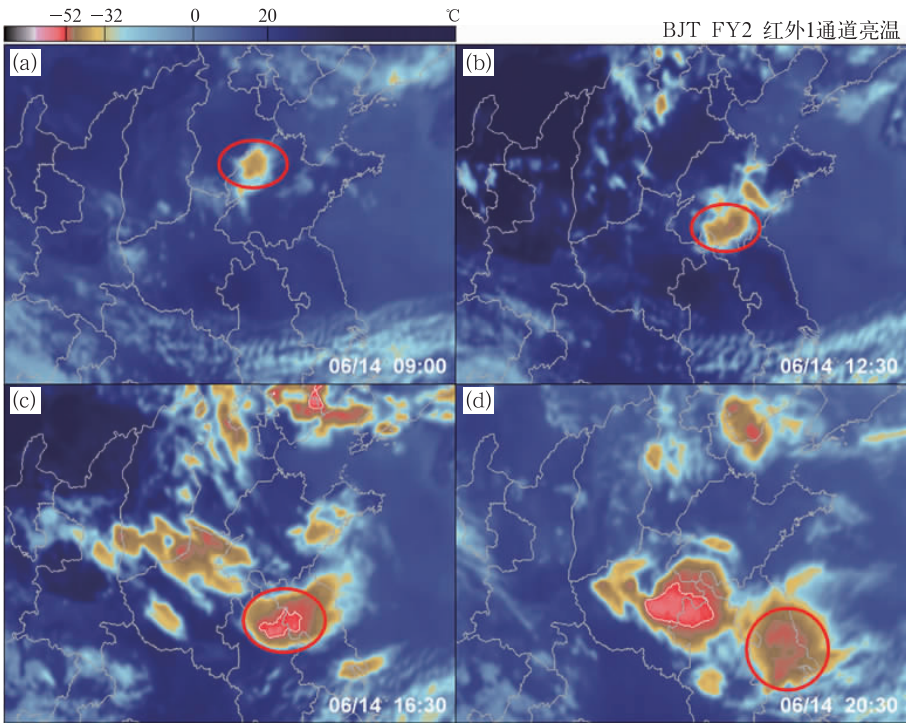


图 1 2009 年 6 月 14 日槽后一型(2009. 6. 14)云图(圆圈处为所指强对流云团)  
(a) 初始(09:00), (b) 发展(12:30), (c) 成熟(16:30), (d) 消亡(20:30)

Fig. 1 First type cloud of northwest flow on 14 June 2009

(a) initial (09:00 BT), (b) developing (12:30 BT), (c) mature (16:30 BT), (d) dissipating (20:30 BT)

(2) 发展阶段:云系逐渐发展成长宽比为 2 : 1 到 4 : 1 的长形椭圆,长宽比不断变大的过程也是强对流不断增强的过程,该阶段出现雷暴大风并呈明显增多趋势,该阶段一般持续 2~4 h;

(3) 成熟阶段:云系长宽比开始逐渐减小,红外亮温较低,该阶段中前期雷暴大风天气仍然较多,之后渐趋减少,该阶段一般持续 2~4 h;

(4) 消亡阶段:云系发展成准圆形结构后,中心区红外亮温升高,红外亮温梯度减小,并最终消亡。

在 IR1 通道(图 2a),出现雷暴大风时的 TBB 低值区(低于-42℃区域)形状呈 2 : 1 到 4 : 1 的长形椭圆状,当其中心区域逐渐接近圆形时,雷暴大风频次减少,雷暴大风区域是云团移动前方 TBB 梯度最强的区域。

在可见光通道(图 2b),中层冷空气的前缘均出现了较为明显的上冲云顶和暗影现象,且其右前侧云系非常光滑,说明对流发展非常旺盛,形成了飚线结构。

在水汽通道(图 2c),雷暴大风区域的云系比周围强对流区域更加亮白,与可见光云图类似,水汽云图右前侧光滑,且亮白中心区位于其弧形区域顶端,

说明该区域的对流云系高度较高、对流发展旺盛。

图 2d 表明,在强对流云团的区域范围内,IR1 通道和水汽通道亮温差值基本为负值,与晴空状态相反;负值绝对值的不断增大预示着强对流仍然在发展,未来仍可能出现明显的雷暴大风天气。当 IR1 通道和水汽通道亮温差值为负值时,其值的增大(即强对流云团开始成熟,雷暴大风频次趋于减少)较 TBB 的升高有一定提前量,故对雷暴大风云团发展状态的判断具有更好的指示性。

由于雷达是预警雷暴大风的主要工具,在利用卫星云图对雷暴大风进行分析的同时,简要分析了该次雷暴大风的雷达反射率特征。

如图 3a,13:21 在徐州附近的对流单体发展已较旺盛,相当于云图第二阶段(发展阶段)前期,之后迅速发展,14:34(图 3b)出现了阵风锋结构(箭头指向处),并在阵风锋移动方向的右侧尾部有新单体生成,新单体生成后也迅速发展,此时原单体虽略有减弱,但仍然较强,二者共同推动阵风锋继续向南推进(图 3c),经过蚌埠之后,两个强单体连接并形成飚线结构(图 3d),此时已进入第三阶段(成熟阶段),阵风锋开始消失,雷暴大风在该阶段中后期趋于减少。



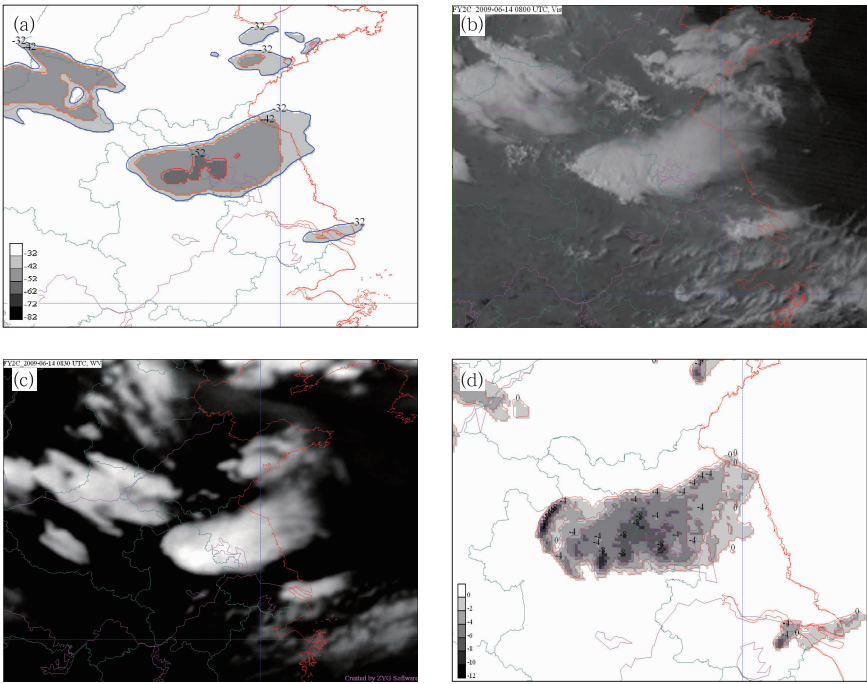


图 2 2009 年 6 月 14 日槽后一型(2009.6.14)多通道云图特征

(a) TBB (16:00), (b) 可见光 (16:00), (c) 水汽 (16:30), (d) 亮温差 IR1-WV (17:00)

Fig. 2 Multi-channel cloud characteristics of the first-type cloud of northwest flow on 14 June 2009

(a) TBB (16:00 BT), (b) VIS (16:00 BT), (c) WV (16:30 BT), (d) IR1-WV (17:00 BT)

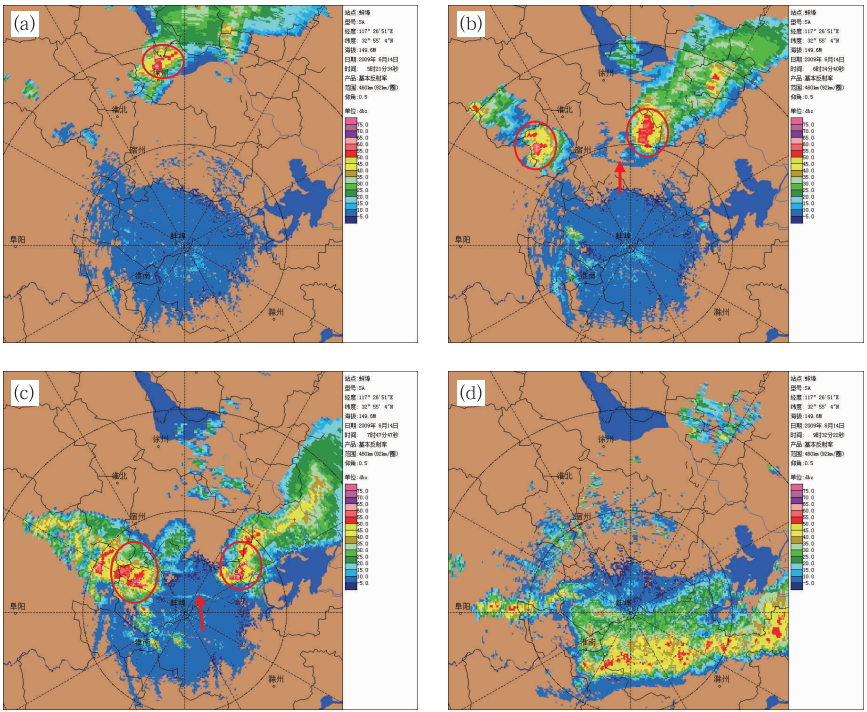


图 3 2009 年 6 月 14 日雷达反射率演变特征

(a) 13:21, (b) 14:34, (c) 15:47, (d) 17:32

Fig. 3 Evolution of radar reflectivity characteristics on 14 June 2009

(a) 13:21 BT, (b) 14:34 BT, (c) 15:47 BT, (d) 17:32 BT

3.2 其他型雷暴大风过程云图特征

3.2.1 槽后二型

槽后二型的天气形势与槽后一型基本一致。2009 年 6 月 3 日在 500 hPa 图上亦有冷涡存在,由于对流云系的右侧在 500 hPa 上有反气旋结构,故右侧无新单体生成,造成发展阶段(即第二阶段)的后期云型即发展为准圆形(图 4a)。但多层的系统配合、强的垂直风切变和 500 hPa 冷平流使对流仍

然维持了很长时间,大风亦主要出现在其前方偏右侧。2009 年 6 月 5 日也属于西北气流二型,其转为准圆形的原因是强对流云系偏东,系统在东移南下过程中东段入海减弱消失,而西段仍在加强东移,最终发展成为准圆形。

槽后二型的雷暴大风区域与一型类似,均是云团移动前方 TBB 梯度最强的区域,但主要位于正前方和偏右侧,偏左侧即使 TBB 梯度较强,也很少出现雷暴大风。

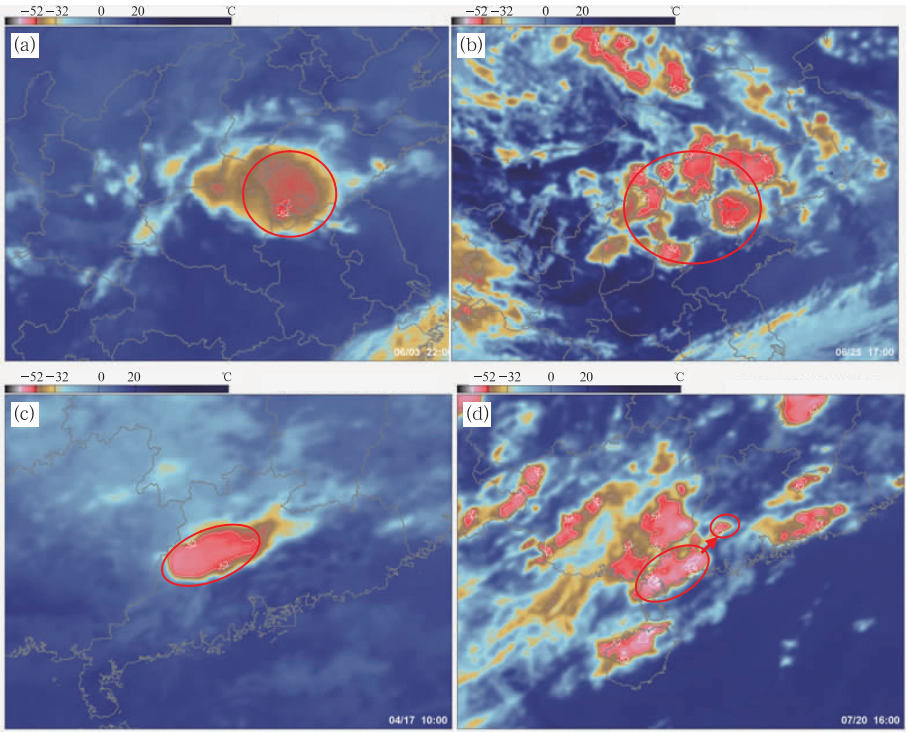


图 4 其他型雷暴大风过程云图(圆圈处为所指强对流云团)  
(a) 2009 年 6 月 3 日 22:00, (b) 2008 年 6 月 25 日 17:00,  
(c) 2011 年 4 月 17 日 10:00, (d) 2008 年 7 月 20 日 16:00

Fig. 4 Other types of clouds of convective thunderstorm high winds  
(a) 22:00 BT 3 June 2009, (b) 17:00 BT 25 June 2008,  
(c) 10:00 BT 17 April 2011, (d) 16:00 BT 20 July 2008

3.2.2 槽后三型

在天气形势上,槽后三型一般没有明显的冷涡或低涡较弱,只是在槽后西北气流中不断有短波槽东移,500 hPa 冷平流并不明显,但低层有切变线、露点锋和暖中心,有利于强对流的触发和发展。由于中层冷平流不明显等原因,该型强对流组织性偏差,云系发展较散乱(图 4b)。

云系发展特征与前述类型也略有区别,该类型的云系较为分散,主要分为初始发展、旺盛和减弱消

亡三个阶段。虽然云系不是很规则,但是发展到旺盛阶段,其多个云系单体还是逐渐发展成类似长椭圆形的结构,当云系从零散的长形合并成一个准圆形时,雷暴大风明显减弱;最强的雷暴大风区域仍然在旺盛期的中心及其右侧,几个几乎相连的单体中,最右侧的单体雷暴大风最强。

3.2.3 槽前型

槽前型由于雷暴大风发生地点处于对流层中层槽前,无明显的冷平流,但在 850 hPa 图上有切变线

存在,切变线的北侧有较强的垂直风切变。2011 年 4 月 17 日 08 时在切变线的北部还有冷中心存在,冷空气和切变线共同激发了该次强对流天气过程。

在云型特征方面(图 4c),槽前型后期不一定会发展为准圆形的成熟阶段,而有可能东移入海消亡或直接减弱消亡。

在 2011 年 4 月 17 日的过程中还注意到,当 IR1 与 WV 通道亮温差的负值突然减小,梯度也增大时,对流爆发性加强。

3.2.4 副高边缘型

副高边缘型的强对流区域主要位于副热带高压西北部边缘,热力不稳定,此时若中层有冷平流,有利于出现雷暴大风等强对流天气。需要注意的是,冷平流不一定是偏北气流,需要关注等温线分布情况,如 2008 年 7 月 20 日过程冷区反而在强对流区域的南侧,偏南气流为弱冷平流。

该型的雷暴大风云系发展特征比较独特,在第二阶段(即发展阶段)对流单体常沿着中层气流方向跳跃式发展(图 4d),且有时产生雷暴大风的主体云系在发展阶段与其他对流云系结合,出现短暂的长

宽比减小的现象,但之后若长宽比再度增大,说明该云系还在发展过程中,雷暴大风天气仍然会继续出现。

4 IR1 与 WV 通道亮温分布和演变特征

仅对雷暴大风的云型进行分类及对一些特征量的定性分析难以在业务中进行方便快捷的客观定量应用,因此需要对云系特征进行定量分析。

4.1 平均值分布和极值分布特征

在 390 站次的红外亮温平均值中,最小值为 $-78.47^{\circ}\text{C}$ ,平均值为 $-53.67^{\circ}\text{C}$ ,出现雷暴大风的红外亮温平均值主要区间为 $-60\sim-50^{\circ}\text{C}$ ,占到 38%,而红外亮温平均值在 $-60\sim-40^{\circ}\text{C}$ 之间的站次占比达到 2/3 左右, $-40^{\circ}\text{C}$ 以上的比率最小,仅占 8%,说明出现雷暴大风时,其红外亮温平均值一般都要达到 $-40^{\circ}\text{C}$ 以下。

水汽通道亮温平均值分布与红外亮温平均值分

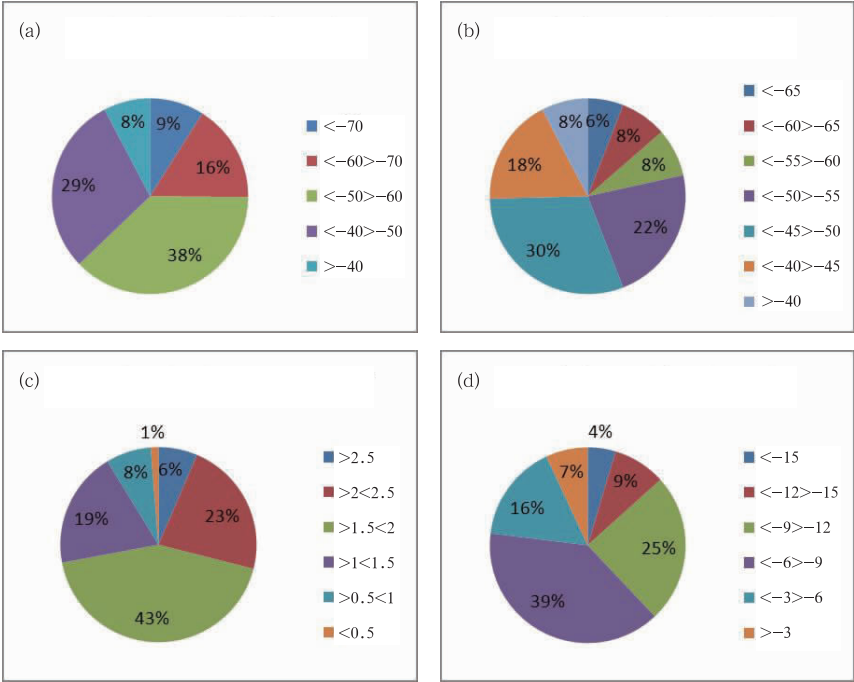


图 5 各种云图特征量的平均值或极值分布

(a) 红外亮温(IR1 通道)平均值, (b) 水汽亮温平均值, (c) 红外亮温梯度平均值, (d) 通道亮温差极值

Fig. 5 Distribution of average or extreme values of various cloud features

(a) average of infrared brightness temperature, (b) average of water vapor brightness temperature,

(c) average of infrared brightness temperature gradient, (d) extreme value of channel brightness temperature difference



布比较类似,最大值为  $-22.34^{\circ}\text{C}$ ,最小值为  $-69.08^{\circ}\text{C}$ ,平均值为  $-49.97^{\circ}\text{C}$ ,70% 的雷暴大风站次出现在  $-55\sim-40^{\circ}\text{C}$  区间内,高于  $-40^{\circ}\text{C}$  的站次仅占 8%。

而在红外亮温梯度平均值中,最大值为  $3.89^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ ,最小值为  $0.24^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ ,均值为  $1.73^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ ,出现雷暴大风的红外亮温梯度平均值主要区间为  $1.5\sim 2^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ ,占比接近 50%,而红外亮温梯度平均值在  $1\sim 2.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$  的站次占全部的 85%,说明雷暴大风出现时,其红外亮温梯度平均值一般都需要达到  $1^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$  以上。

另外,在 390 站次的 IR1 通道与水汽通道的亮温差极值中,最小值为  $-20.3^{\circ}\text{C}$ ,平均值为  $-8.1^{\circ}\text{C}$ ,通道亮温差极值在  $-3^{\circ}\text{C}$  以上的仅占 7%,接近 2/3 的站次集中在  $-12\sim-6^{\circ}\text{C}$  的区间内,说明在出现雷暴大风时,通道亮温差负值均比较明显,极值一般都会达到  $-3^{\circ}\text{C}$  及以下。

4.2 水汽亮温极值与红外亮温梯度极值散点分布

图 6 中可以看到,水汽亮温极值较为集中在  $-70\sim-40^{\circ}\text{C}$  的区间内,其中尤以  $-55\sim-43^{\circ}\text{C}$  之间居多,而亮温梯度极值则集中在  $1\sim 4.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$  的区间内,尤以  $2\sim 3^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$  之间居多,且随着水汽亮温极值的变小,亮温梯度极值不断增大,说明越低的水汽亮温需要越大的亮温梯度,才易出现雷暴大风天气。

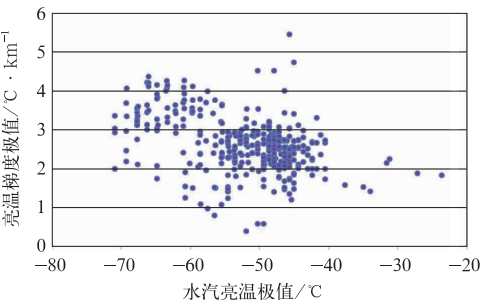


图 6 水汽亮温极值与亮温梯度极值散点分布图

Fig. 6 Distribution of extreme value scatters of water vapor brightness temperature and brightness temperature gradient

4.3 IR1 亮温极值与通道亮温差极值散点分布

图 7 中可以看出,红外亮温极值较为集中在  $-75\sim-42^{\circ}\text{C}$  的区间内,而通道亮温差极值则集中

在  $-15\sim-2^{\circ}\text{C}$  的区间内,且随着红外亮温极值的变小,通道亮温差极值也不断减小,说明越低的红外亮温需要越小的通道亮温差,才易出现雷暴大风天气。

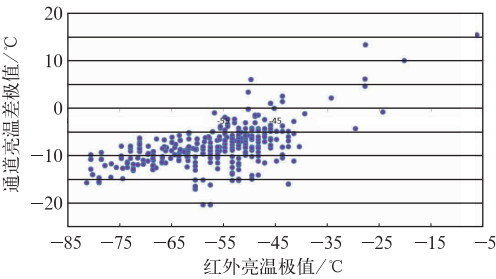


图 7 红外亮温极值与通道亮温差极值散点分布图

Fig. 7 Distribution of extreme value scatters of infrared brightness temperature and channel brightness temperature difference

4.4 时间演变特征

由于本文采用的部分雷暴大风数据没有明确的发生时间,故选取数据中有雷暴大风出现确定时间的部分站点,随机挑选了 9 个出现雷暴大风的站点个例,画出其逐 30 min(或 60 min,依卫星数据而定)红外亮温平均值、通道亮温差平均值、亮温梯度极值随时间变化图,以识别雷暴大风出现时间与上述要素变化的关系。

需要指出的是,由于静止云图的时间分辨率为 30 min(或 60 min),无法准确确定其亮温、通道亮温差和亮温梯度真正的极值点,所以只能假定在能获得的逐 30 min(或 60 min)数据中的极值附近为其极值点,并在此基础上进行分析,可能与实际情况略有差异。

由以上红外亮温变化与雷暴大风时间对应(图 8)来看,大多数雷暴大风出现前都有一个红外亮温急剧下降的过程,之后逐渐转为平缓下降,雷暴大风常常出现在急剧下降时段和平缓下降时段之间的过渡期,并非亮温最低的时候。

IR1 与 WV 通道亮温差变化与雷暴大风时间对应(图 9)表明,大多数雷暴大风出现前也有一个通道亮温差迅速下降的过程,之后转为缓慢下降或稳定少变,雷暴大风大多出现在刚进入缓慢下降或稳定少变的时间点前后,而且多数处于通道亮温差由正转为负临近的时间段内。

红外亮温梯度变化与雷暴大风时间对应 (图 10) 显示,大多数雷暴大风出现前有一个亮温梯

度增大的过程,雷暴大风大多出现在亮温梯度达到最大的时间点附近或开始下降的时候。

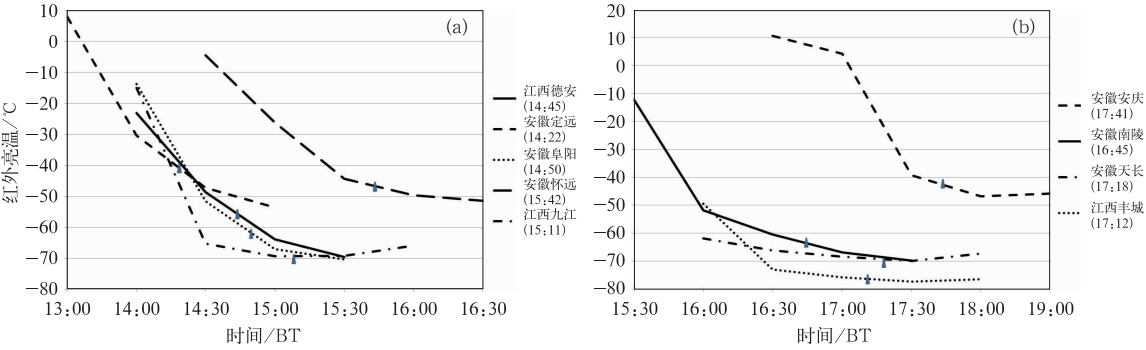


图 8 红外亮温平均值随时间变化与雷暴大风出现时间对应图  
(三角处为雷暴大风发生时间)

Fig. 8 Average change over time of the infrared brightness temperature with the thunderstorm high winds  
(Triangle refers to the time with high winds)

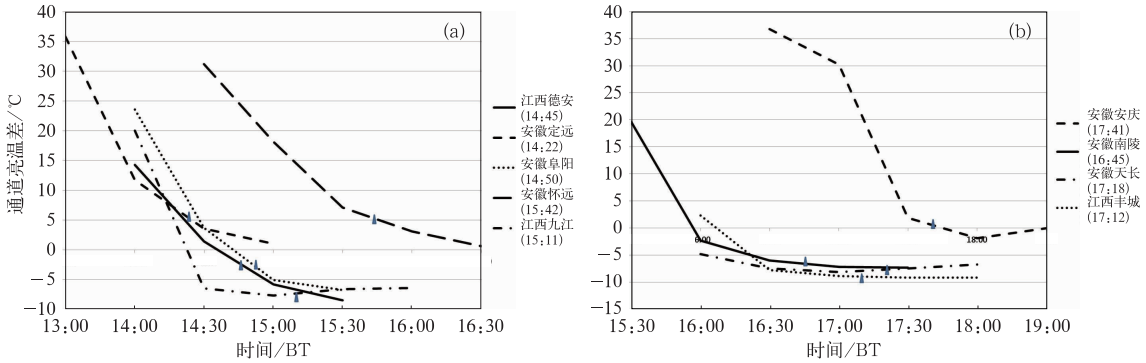


图 9 通道亮温差平均值随时间变化与雷暴大风出现时间对应图  
(三角处为雷暴大风发生时间)

Fig. 9 Average change over time of the channel brightness temperature different with the thunderstorm high winds  
(Triangle refers to the time with high winds)

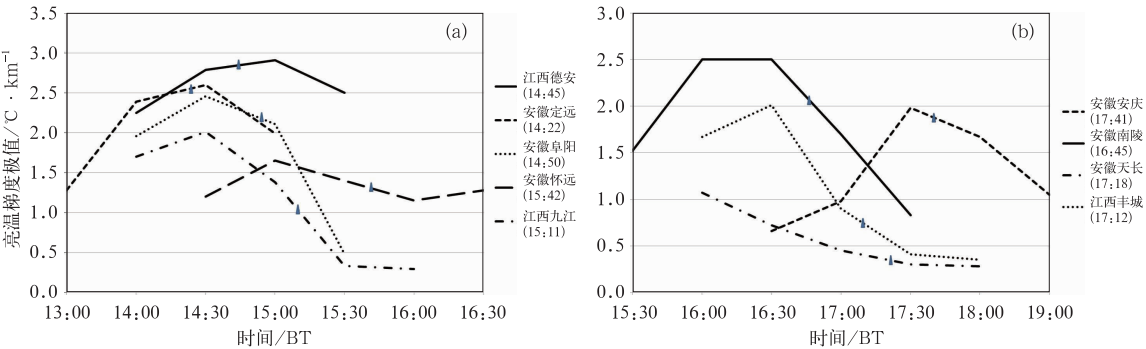


图 10 亮温梯度极值随时间变化与雷暴大风出现时间对应图  
(三角处为雷暴大风发生时间)

Fig. 10 Extreme value change over time of the brightness temperature gradient with thunderstorm high winds  
(Triangle refers to the time with high winds)

## 5 结论和讨论

本文对2005—2011年的18次典型区域性大范围雷暴大风过程的天气形势、云型和不同通道亮温分布进行了定性和定量分析,主要获得如下结论:

(1) 雷暴大风天气的天气形势大致可分为槽后、槽前和副高边缘三类,区域性雷暴大风云型可大致分为三类,以单一长椭圆形云体为主。结合雷暴大风的天气形势和云型,可将雷暴大风过程分为五类,其中最常见的槽后一型,其发展可分为初始、发展、成熟、消亡四个阶段。

(2) 雷暴大风对流云团中IR1通道和水汽通道的亮温差基本为负值,负值的不断降低预示着强对流在发展中,当其停止减小时,雷暴大风天气一般开始减弱。在监测和预报雷暴大风云系时,需要非常关注长形强对流云带的右侧和右侧单体,尤其在TBB、TBB梯度区、通道亮温差负值区及梯度区均配合的区域。

(3) 出现雷暴大风时,其红外亮温平均值一般都要达到 $-40^{\circ}\text{C}$ 以下,红外亮温梯度平均值一般都需要达到 $1^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ 以上,IR1与WV通道亮温差极值一般在 $-3^{\circ}\text{C}$ 以下,越低的水汽亮温需要越大的亮温梯度,越低的红外亮温需要越小的通道亮温差,才易出现雷暴大风天气。

(4) 大部分站点的雷暴大风出现在以下时段:红外亮温由急剧下降到平缓下降之间的过渡期;通道亮温差在由迅速下降刚转为缓慢下降或稳定少变的时间点前后,且多数处于通道亮温差由正转负临近的时间段内;红外亮温梯度达到最大的时间点附近或开始下降的时候。

需要说明的是,由于静止卫星能够较业务天气雷达更早捕捉到对流云的发展信息,本文的研究目的是为了加强该类资料在短临预报业务中的应用,希望能够获得一些雷暴大风在静止卫星资料上的定量特征,为使用静止卫星资料和其他多源观测资料客观监测和临近预报雷暴大风天气提供基础。但由于静止卫星的观测特点,仅能观测到对流云顶特征,决定了不可能仅依靠该资料就完全能够监测和预报雷暴大风天气,因此还需要综合其他多源观测资料,比如天气雷达和自动站观测资料等,来综合监测和临近预报雷暴大风天气。同时,由于部分对流风暴

会同时产生雷暴大风、冰雹和暴雨,因此可以推断产生雷暴大风的对流风暴云图特征部分会与同时产生暴雨、雷暴大风和冰雹的对流风暴的云图特征相同,但在某些方面也会存在差异。由于本文的研究目的和篇幅所限,因此本文仅是强对流云图特征研究的一部分,下一步我们将进一步研究产生冰雹天气的云图特征,以及产生不同类型强对流天气云图特征的差异。

## 参考文献

- 陈涛,代刊,张芳华. 2013. 一次华北飑线天气过程中环境条件与对流发展机制研究. 气象, 39(8): 945-954.
- 陈英英,唐仁茂,李德俊,等. 2013. 利用雷达和卫星资料对一次强对流天气过程的云结构特征分析. 高原气象, 32(4): 1148-1156.
- 戴建华,陶岚,丁扬,等. 2012. 一次罕见飑前强降雹超级单体风暴特征分析. 气象学报, 70(4): 609-627.
- 方宗义,覃丹宇. 2006. 暴雨云团的卫星监测和研究进展. 应用气象学报, 17(5): 583-593.
- 胡波,杜惠良,滕卫平,等. 2009. 基于云团特征的短时临近强降水预报技术. 气象, 35(9): 104-111.
- 潘玉洁,赵坤,潘益农,等. 2012. 用双多普勒雷达分析华南一次飑线系统的中尺度结构特征. 气象学报, 70(4).
- 邵玲玲,黄宁立,郭锐,等. 2006. 一次强飑线天气过程分析和龙卷强度级别判定. 气象科学, 26(6): 627-632.
- 伍志方,庞古乾,贺汉青,等. 2014. 2012年4月广东左移和飑线内超级单体的环境条件和结构对比分析. 气象, 40(6): 655-667.
- 许爱华,马中元,叶小峰. 2011. 江西8种强对流天气形势与云型特征分析. 气象, 37(10): 1185-1195.
- 徐小红,余兴,朱延年,等. 2012. 一次强飑线云结构特征的卫星反演分析. 高原气象, 31(1): 258-268.
- 姚叶青,俞小鼎,张义军,等. 2008. 一次典型飑线过程多普勒天气雷达资料分析. 高原气象, 27(2): 373-381.
- 于波,鲍文中,王东勇,等. 2013. 安徽天气预报业务基础与实务. 87-100.
- 于庚康,吴海英,曾明剑,等. 2013. 江苏地区两次强飑线天气过程的特征分析. 大气科学学报, 36(1): 47-59.
- 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等. 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用. 北京: 气象出版社.
- 张芳华,张涛,周庆亮,等. 2005. 2004年7月12日上海飑线天气过程分析. 气象, 31(5): 47-52.
- 郑媛媛,俞小鼎,方翀,等. 2004. 一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析. 气象学报, 62(3): 317-328.
- 朱亚平,程周杰,刘健文. 2009. 一次锋面气旋云系中强对流云团的识别. 应用气象学报, 20(4): 428-436.
- Schmetz J, Tjemkes S A, Gube M, et al. 1997. Monitoring deep convection and convective overshooting with METEOSAT. Adv Spac Res, 19: 433-441.