

# 一次热带气旋外围飏线对广州白云机场的影响

钟加杰 李 萍 刘 峰

(民航中南空管局气象中心,广州 510405)

**提 要:** 使用常规探测资料、NCEP 再分析资料和多普勒雷达产品,分析 0809 号热带气旋北冕 8 月 4 日在登陆前对华南天气的影响。结果表明,在热带气旋北侧外围的偏东风低空急流给广东沿海地区输送充足的水汽以及日升温和副热带高压下沉运动的共同作用,积累了不稳定能量,飏线天气在由弱冷空气造成的边界层辐合线的作用下得以爆发。弓形回波后弱反射率因子通道的出现,说明发展到最强盛阶段的飏线影响白云机场。阵风锋和下击暴流伴随着飏线影响白云机场,产生了强雷暴,近地面层风速迅速加大、风向突然改变以及强降水造成的地面能见度的骤降等,严重影响飞行安全的天气。综合分析风切变等雷达产品判断阵风锋和下击暴流产生的影响飞行安全的低空风切变,飞机飞行时应特别关注飏线低层下击暴流产生的辐散型风切变。  
**关键词:** 热带气旋外围 飏线 阵风锋 下击暴流 低空风切变

## Impact of a Squall Line in Outer Periphery of Tropical Cyclone on Guangzhou Baiyun Airport

Zhong Jiajie Li Ping Liu Feng

(Meteorological Center of Middle South Regional Air Traffic Management Bureau of CAAC, Guangzhou 510406)

**Abstract:** Based on NCEP reanalyzed data and Doppler radar products, a squall line process in outer periphery of tropical cyclone "KAMMURI" on August 4, 2008 was analyzed. It showed that the establishment of the low-level jet and temperature rising caused by sinking and downdraft within sub-tropical high created the sufficient water vapor and unstable condition in South China. The squall line weather burst out under the action of the boundary convergence line which was caused by weak cold air. The appearance of the weak echo channel behind the arc echo showed that the squall line attacking the airport was in the most powerful stage. Thunderstorm, gust front and downburst were together with the sudden change of the wind direction and the sudden decrease of the ground visibility. Vertical section and wind

shear radar products were used to analyze the low-level wind shear threatening the safety of flights.

**Key Words:** outer periphery of tropical cyclone squall line gust front downburst  
low-level wind shear

## 引 言

2008年8月4日08时,热带低压北冕在南海东北部形成,随后缓慢向西北偏西方向移动,强度逐渐加强。4日傍晚到夜间,处于热带气旋外围的广东沿海自东向西出现雷雨和雷暴大风天气,其中佛山、花都、新会和台山降水量超过50mm,南海录得大风为 $23\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,江门杜阮镇环镇公路上约1km内的电线杆被吹倒。此次天气过程造成广州白云机场雷雨天气长达4小时,最大阵风为 $18\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。广州白云机场因此短暂关闭,导致20多个航班备降周边机场,1500多名旅客在机场短暂滞留。本文尝试分析此次天气过程产生的水汽、动力和热力学条件以及对广州白云机场的影响,为日后更好地做好航空气象保障工作提供参考。

## 1 使用资料

使用常规探测资料、FNL全球再分析资料、FY-2C红外云图和多普勒雷达产品进行分析。其中,地面气压、温度、位温和降水量等,使用常规地面探测资料。考虑到海上的探空资料较少,因而采用NCEP提供的每天4次的 $1^\circ\times 1^\circ$ FNL全球再分析资料进行高空形势以及相对湿度、散度、垂直速度和对流有效位能等物理量的分析。雷达资料使用的是广州白云机场民航气象中心多普勒天气雷达METEOR-1500C和广东省气象局的新一代雷达产品。

## 2 热带气旋外围飊线

此次天气过程中,副热带高压脊线在

$30^\circ\text{N}$ 附近,位置偏东,主体在东海海面,南海北部有热带辐合带活动,热带辐合带上热带云团活跃。0809号热带气旋北冕于8月5日08时加强为热带风暴,8月4日08时热带辐合带上该热带气旋初期的热带低压以 $15\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的速度向西北偏西方向移动。到了傍晚19时,热带低压移动方向的右前部即广东东部地区形成一条东北—西南向的 $\alpha$ 中尺度的带状MCS(中尺度对流系统),该对流系统自东向西移动,影响广东沿海地区。

### 2.1 水汽和不稳定能量条件

对流的产生首先需要丰富的水汽和不稳定层结。层结中的不稳定能量是一种潜在的能量,只有在外力的冲击下,触发气流强烈地上升,才能爆发对流。

图1显示,处于热带低压时期的北冕北部外围环流影响到华南沿海地区,偏东气流起着水汽输送的作用。从4日08时到20时,随着气旋中心的进一步北移,850hPa层次上华南沿海的流线密度加大。汕头及其东部的风速由 $6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增加到 $12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,形成了低空偏东风急流<sup>[1]</sup>,加速了水汽的输送。华南中部和东部沿海的水汽更加充沛,相对湿度值由70%上升到了80%~90%。

图2显示,对流爆发所需要的不稳定能量从4日上午到下午是一个不断积累的过程。4日14时华南东部和中部沿海的对流有效位能CAPE从08时的 $1000\sim 1500\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增加到 $2000\sim 2500\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。有研究<sup>[3-4]</sup>指出,台湾或巴士海峡附近有热带气旋活动,副热带高压控制江南和华南时,广州最容易出现酷热天气。高温的产生是副热带高压和台风外围共同影响的结果,高温使低层大气内能得到不断积蓄。从4日08—14

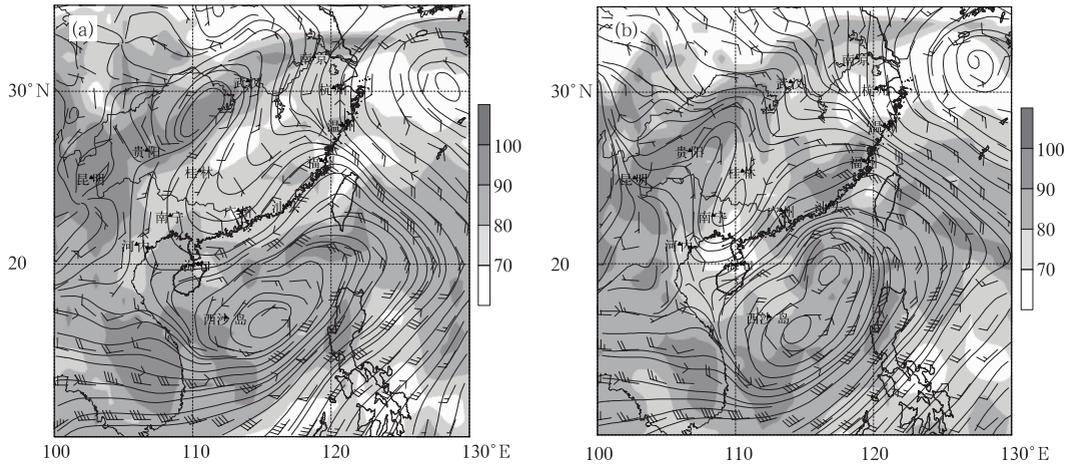


图1 2008年8月4日08时(a)和20时(b)850hPa流场和相对湿度(阴影)

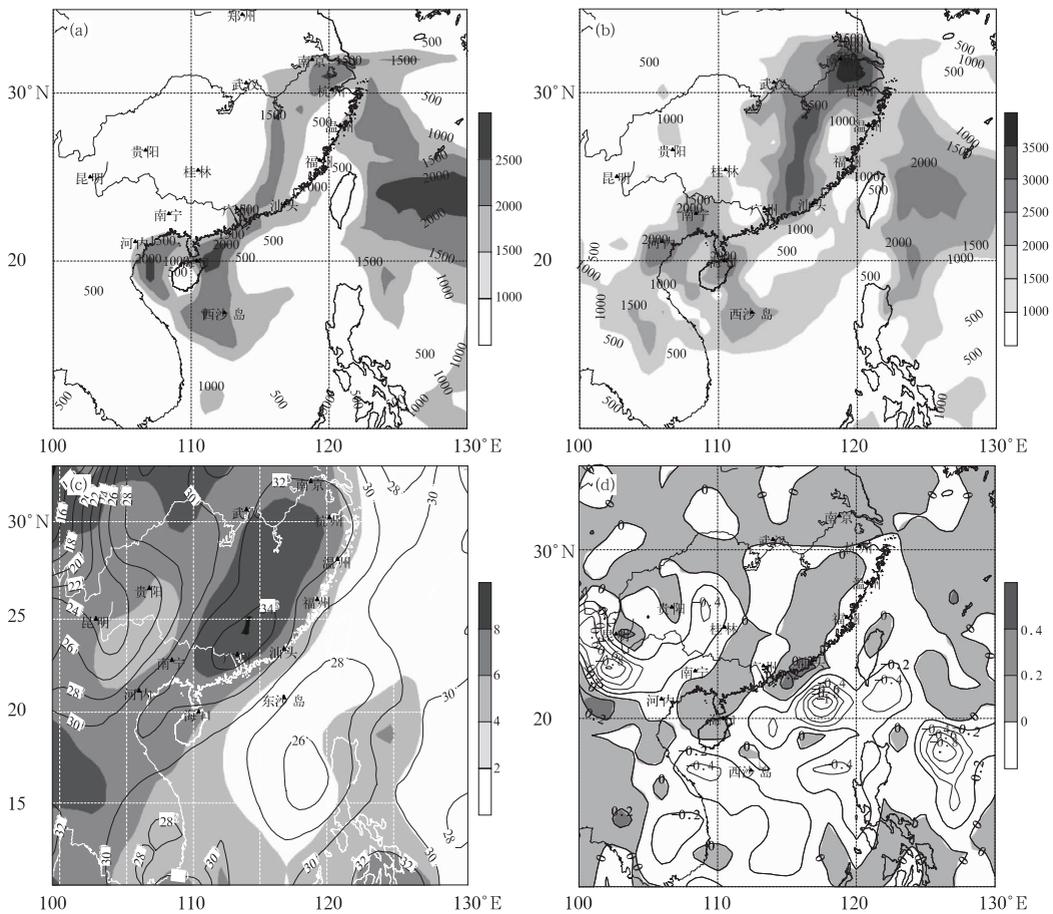


图2 2008年8月4日08时、14时对流有效位能(a、b)、14时地面温度及6小时正变温(c,阴影) 08时500hPa垂直速度(d,阴影区为下沉区)

时,华南沿海地区地面温度升高了 $6^{\circ}\text{C}$ ,到14时成为 $32\sim 34^{\circ}\text{C}$ 的高温区,同时4日08时500hPa垂直速度是 $0\sim 0.2\times 10^{-1}\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ 弱气流下沉区,说明高温区的产生是日升温和副热带高压反气旋环流控制下的下沉运动的共同结果。

## 2.2 弱冷空气造成的辐合线

一般来讲,在某一地区的大尺度环境具有充足的不稳定能量条件时,对流系统在何时、何地发生取决于是否具备触发条件<sup>[4]</sup>。Wilson<sup>[5]</sup>认为发展成对流风暴的初始对流大多发生在边界层辐合线或辐合带上,并成为对流天气短时预报的主要依据。

由图3a可见,桂林到南宁之间位温相对密集,地面风为偏北风。说明地面有弱冷空气活动。降水与弱冷空气南下造成的辐合线有关。20时925hPa上华南中东部沿海有一条明显的辐合线(图3b)。热带气旋外围北部的偏东风与其西部的西北风汇合,产生了散度值为 $(-30\sim -10)\times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ 的辐合区,此辐合区与降水和雷暴出现的位置一致。同时,天气区内的气流下沉区也转变为垂直速度为 $-0.04\sim -0.02\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ 的上升区。在这高温高湿的环境中,飊线及其强雷暴和强降水在由弱冷空气造成的边界层辐合线的作用下得以爆发。

## 3 飊线对广州白云机场的影响

### 3.1 飊线的影响

图4(见彩页)可见大范围的带状分布的对流风暴。8月4日20时03分,珠江三角洲及附近出现东北西南分布的对流回波带,有3个主要的回波群,西南端在台山、江门一带,强度 $40\sim 55\text{dBz}$ ;中间部分对流单体较分散,强度也较弱一些,分布在东莞和广州番禺附近;东北端回波最强,呈弓形,回波中心强

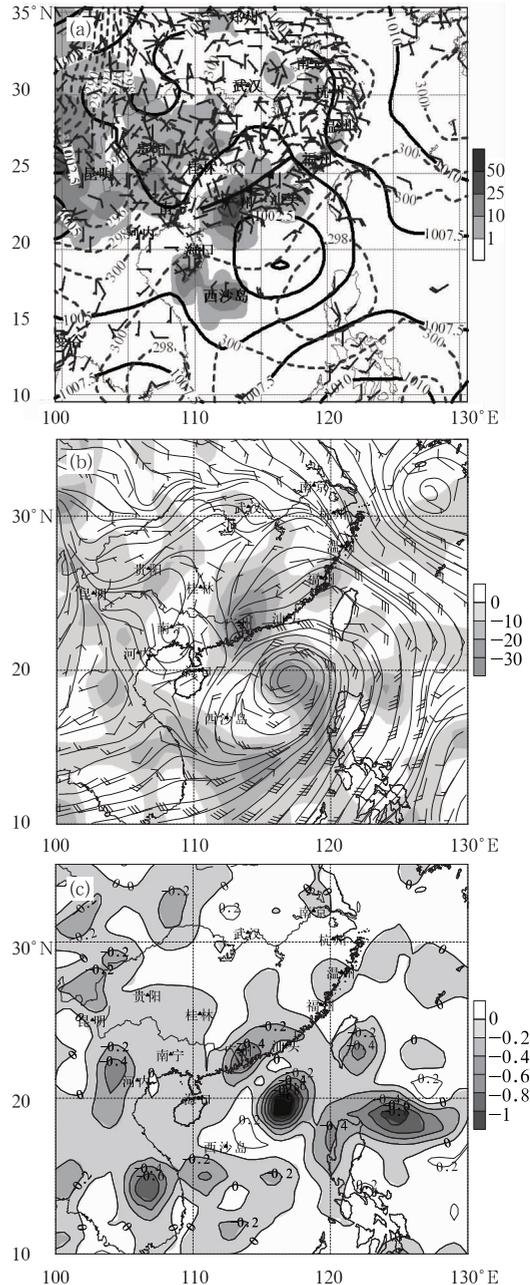


图3 (a)2008年8月4日20时地面气压场、位温(虚线)、4日08时至5日08时降水量(阴影); (b)925hPa高度场、流场和散度场(阴影为辐合区); (c)500hPa垂直速度(阴影为上升区,单位: $10^{-1}\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ )

度达到 $58\text{dBz}$ ,位于河源西南部。这些回波群向西推进,移速约为 $30\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。在西移过程中,东北端的风暴稍有减弱;中间回波群

逐渐增强并合并在一起,强度有所增强,强度在 50~55dBz;西南段回波也不断增强。20 时 32 分,3 个回波群逐渐合并成一线,这时断续型的飑线<sup>[6]</sup>已经形成。

飑线后部有两个明显的后侧入流急流槽口(图 4b 箭头所示),分别在东莞和南海附近。回波合并后继续向西推进,于 21 时到达台山、广州白云机场、广州增城一线。飑线逐渐成弓形,弓形回波的顶端在佛山的三水附近。这时,北面的入流槽口逐渐消失,南面的入流槽口则逐渐南移,出现在弓形回波顶端的后部。飑线继续向西移,在入流槽口顶端附近的回波则继续增强。21 时 32 分,入流槽口南移至台山的西北部,这时弓形回波顶端的强度达到 60dBz。之后飑线继续西移,强度逐渐减弱。颜文胜等<sup>[7]</sup>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,伍志芳等<sup>[8]</sup>也认为最强反射率因子和最大风速一般位于弓形回波的顶部,而回波顶点的后侧,则有明显的入流急流进入云体内,说明飑线正是在其最强盛的时期影响白云机场。

### 3.2 飑线和阵风锋

图 5(见彩页)显示飑线影响广州白云机场的情况。对比 C 波段的机场多普勒雷达回波强度与 S 波段的广东省气象局回波强度发现,在广东省气象局雷达回波强度上,飑线的前沿出现一条强度 10~15dBz 的弱线状回波,在白云机场雷达上也是出现了一些断续的弱回波。在白云机场雷达速度回波上,线状回波对应的位置表现为一条偏东与偏西风的弱辐合线。图 5d 是 20 时 50 分高度 500m 水平面上的白云机场雷达水平风场反演图。图中可分析出两条辐合线。飑线后部是 8~18 m·s<sup>-1</sup> 的东南大风,飑线前部是弱西北风,形成一条长约 80km 的辐合带,而在飑线的前部存在另一条西北风和东南风的辐合

带,此辐合带比飑线上的辐合要弱,范围也要小,长度约 40km。此弱辐合带与雷达回波上出现的弱线状回波的位置一致,是由飑线的下沉气流向外流出后与低层气流交汇后抬升形成的,也就是阵风锋的位置<sup>[9-10]</sup>。由于阵风锋强度弱,出现高度低,有时雷达不能探测到。此次白云机场雷达强度回波探测不明显,而广东省气象局雷达则能够清楚探测到,因而应使用多部雷达的强度并配合速度回波进行综合分析和判断。从图 5c(见彩页)上还可以看到在距雷达中心 50km 的范围内的右上角和左下角分别有一个距离圈和沿径线对称的两个速度值相反的大值中心,这说明有辐散性的气流和气旋性中心。图 5d(见彩页)中的反演风场中则相应分别得到一个 20km 左右的辐散气流和中尺度气旋,同时还显示出飑线后部的入流急流槽口(图 4b 箭头所示)确实存在 14~18m·s<sup>-1</sup> 的偏东入流大风。

为了进一步说明飑线和阵风锋对白云机场的影响,分析白云机场跑道上自动化观测系统探测到的 2 分钟一次的地面风、气温和气压等气象要素的变化情况(图 6a)。可以看到,白云机场先后经历了一次阵风锋和飑线的影响。阵风锋的影响情况是,20 时 37 分前是风向不定或弱偏北风 1m·s<sup>-1</sup>,20 时 35 分后转为 130° 的东南风 14m·s<sup>-1</sup>;相对应的气压值由 1000.3hPa 升为 1001.5hPa,增加了 1.2hPa;温度和相对湿度保持不变。说明阵风锋过境对飞行的影响,主要是发生风向突变和风速加大,并且风向上的辐合造成了气压的上升。而飑线过境的影响要比阵风锋剧烈得多。21 时以后,机场地面风速增大到 10m·s<sup>-1</sup> 以上,最大达到 18m·s<sup>-1</sup>;21:00—21:30,温度骤降 10℃;气压上升 3.5hPa;并出现强雷暴和强降水,强降水带来的水汽造成相对湿度急升和地面能见度的急降,地面能见度最低降到 550m。恶劣天气的出现对机场的飞行产生了极大的影响,造

成了大量飞行航班的返航或备降。

图 6b 是白云机场雷达的 VVP 产品(风廓线产品),显示出 1~2km 高度之间每隔 10 分钟的低空风的变化情况。从图中同样可以看到阵风锋和飊线过白云机场的情况。

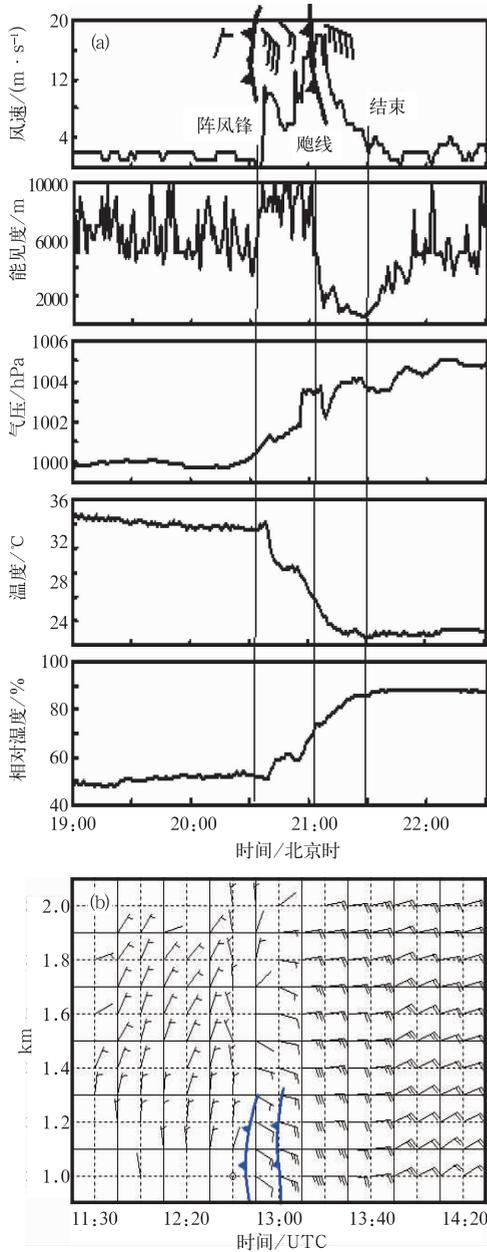


图 6 自动化观测系统(a)和雷达探测(b)过境白云机场的阵风锋和飊线  
(a) 过境前后的地面观测要素变化;  
(b) 过境前后的雷达 VVP 产品

12:40—12:50 前后,低空的弱东北风转为东南风,前后具有明显的风向的辐合;13:00 前后,飊线后部的  $8\sim 14\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  偏东大风迅速控制机场,伴随飊线的西移是前后风速上的辐合。风向上的辐合和风速上的辐合产生的抬升作用分别对应了阵风锋和飊线的对流天气。

### 3.3 低空风切变分析

航空气象保障工作中需要特别关注严重影响飞机起飞和着陆安全的低空风切变<sup>[11-12]</sup>,低空风切变是与雷暴、下击暴流、龙卷、阵风锋和低层逆温等中尺度天气系统紧密联系的。为了进一步分析低空风切变,制作了过机场雷达站沿东西方向的强度和多普勒速度垂直剖面图(图 7a,见彩页)。从强度图上可以看到,飊线主体是宽度  $30\sim 40\text{km}$  的强回波带,在飊线前后几千米处,各存在一条宽度只有几千米,强度为  $10\sim 25\text{dBz}$  的弱回波带。从速度场的分布来看,西侧的高层存在上升和下沉共存的小尺度的气流,低层则是比高层大的下沉气流,在近地面层达到最大值  $15\sim 20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,此下沉气流是向西辐散的;在东侧,则是较弱的向东南辐散的下沉气流。Fujita<sup>[13]</sup>把在地面上或地面附近形成的风速达到  $17.9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  或以上的灾害性风的向外爆发的强下沉气流称为下击暴流。在此次过程中,飊线主体的下沉气流在近地面层形成辐散性外流为  $15\sim 20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,达到了下击暴流的强度。飊线的辐散气流向两侧流出后,与外围的低层气流交汇,这种辐合抬升的作用产生了弱线状回波,即为阵风锋。

根据分析结果给出下击暴流和阵风锋气流的示意图(图 7b,见彩页)。飞机在具有下击暴流和阵风锋的气流中飞行时,会在不同的部位获得不同的空速。在飞越下击暴流时,先是逆风飞行空速大,得到较大的升力;而在突然转为顺风时,空速迅速减小,升力立

即减少,造成飞机飞行高度骤降。如果要恢复升力,只能加大飞行仰角。如果仰角极大时,仍不能取得足够大的升力,则会失速。在起飞和降落时,飞行高度极低,一旦失速,飞机就会触地失事。在飞越阵风锋时,是由顺风转为逆风,加大的升力改变了原先正常降落的高度,无法继续下降,只能复飞。

白云机场多普勒雷达提供了速度径向风切变产品。此产品是通过计算同一径线上径向速度的切变值,得到辐合辐散的强度和出现的位置。图 7b(见彩页)显示,0.5km 高度上飊线对应的是  $4.0\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  以上的辐散型风切变,在接近飊线的偏西侧是  $-0.5\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  的辐合型风切变。根据此产品判断,飞机飞行更应关注飊线低层的辐散型风切变,此产品为值班预报员准确和及时发布机场风切变警报提供了依据<sup>[14]</sup>。

#### 4 结 语

(1) 此次飊线形成于热带气旋的外围。随着热带气旋的靠近,其北侧的偏东风低空急流输送了对流产生需要的水汽,日升温和副热带高压反气旋环流控制下的下沉运动产生的高温区积累了不稳定能量。在这高温高湿的环境之下,飊线天气在由弱冷空气造成的边界层辐合线的作用下得以爆发。

(2) 分析雷达回波图发现,飊线具有一个逐渐加强的过程。弓形回波后弱反射率因子通道的出现,标志着飊线发展到最强盛阶段,而此时飊线开始影响白云机场。

(3) 阵风锋和下击暴流伴随着飊线影响白云机场,产生了强雷暴、近地面层风速迅速加大和风向突然改变以及强降水造成的地面能见度骤降等严重影响飞行安全的天气。

(4) 通过制作雷达回波剖面图和使用风切变产品,进一步分析阵风锋和下击暴流产

生的影响飞行安全的低空风切变,为值班预报员发布机场风切变警报提供依据。飞机飞行时应特别关注飊线低层的下击暴流产生的辐散型风切变。

#### 参 考 文 献

- [1] 刘勇. 登陆台风对陕西一次强雷暴天气的作用[J]. 气象科学, 2005, 25(3): 312-318.
- [2] 黄忠, 张东, 蔡安安, 等. 台风远外围大范围强对流天气成因综合分析[J]. 气象, 2007, 33(1): 25-31.
- [3] 黄忠, 熊亚丽, 林良勋. 广州市 37℃ 以上酷热天气形势及相关要素分析[J]. 气象, 2005, 31(7): 24-29.
- [4] 张春喜, 朱佩君, 郑永光, 等. 一次春季暴雨不稳定条件和对流触发机制的数值模拟研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2005, 41(5): 746.
- [5] Wilson J W, Schreiber W E. Initiation of convective storms at radar observed boundary-layer convergence lines[J]. Mon Wea Rev, 1986, 114(2): 516-536.
- [6] 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 雷达气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2001: 420-421.
- [7] 颜文胜, 江瑛. 利用多普勒雷达网对一次典型的飊线过程分析[J]. 广东气象, 2006, 28(3): 44-46.
- [8] 伍志芳, 叶爱芬, 胡胜, 等. 中小尺度天气系统的多普勒统计特征[J]. 热带气象学报, 2004, 20(4): 396-397.
- [9] M J 巴德, G S 福布斯, J R 格兰特, 等. 卫星与雷达图像在天气预报中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 301-305.
- [10] 刘峰, 敖淑珍, 林智, 等. 影响广州白云机场的一次强对流天气过程[J]. 广东气象, 2008, 30(3): 17-20.
- [11] 刘峰, 李萍. 华南一次典型 MCC 过程的成因及天气分析[J]. 气象, 2007, 33(5): 77-82.
- [12] 刘峰, 刘式达, 文丹青. 广州白云机场“721”低空风切变天气过程综合分析[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2007, 43(1): 23-29.
- [13] Fujita TT. Downbursts and microbursts-An aviation hazard[R]. American Meteorological Society 19th Radar Meteorology Conference(Miami), 1980: 102-109.
- [14] 胡家美, 刘峰, 黄奕铭, 等. 冰雹和低空风切变天气的多普勒雷达回波特征[J]. 广东气象, 2008, 30(1): 24-28.

# 钟加杰等：一次热带气旋外围飊线对广州白云机场的影响

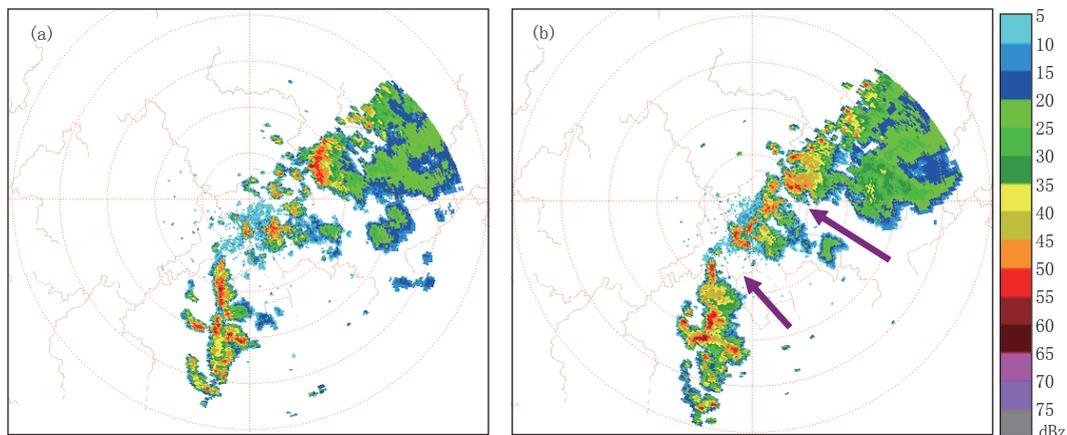


图 4 2008年8月4日广东省气象局多普勒雷达强度回波(仰角1.5°)反映的飊线演变  
(a) 20:03; (b) 20:32

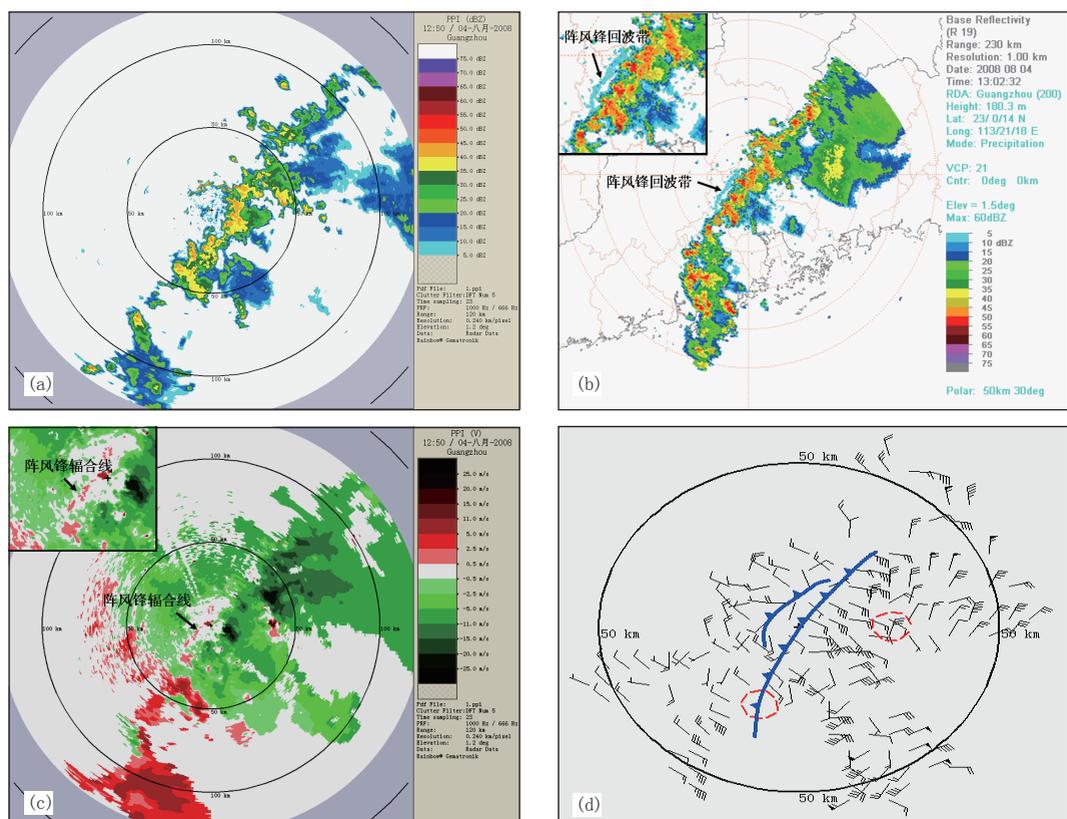


图 5 多普勒雷达回波分析影响白云机场的阵风锋和飊线  
(a) 20:50白云机场雷达强度回波(仰角1.2°); (b) 21:02广东省局雷达强度回波(仰角1.2°);  
(c) 20:50白云机场雷达速度回波(仰角1.2°); (d) 20:50白云机场雷达反演风场(高度500m)  
上一个圆圈显示下击暴流, 下一个圆圈显示中尺度气旋

# 钟加杰等：一次热带气旋外围飊线对广州白云机场的影响

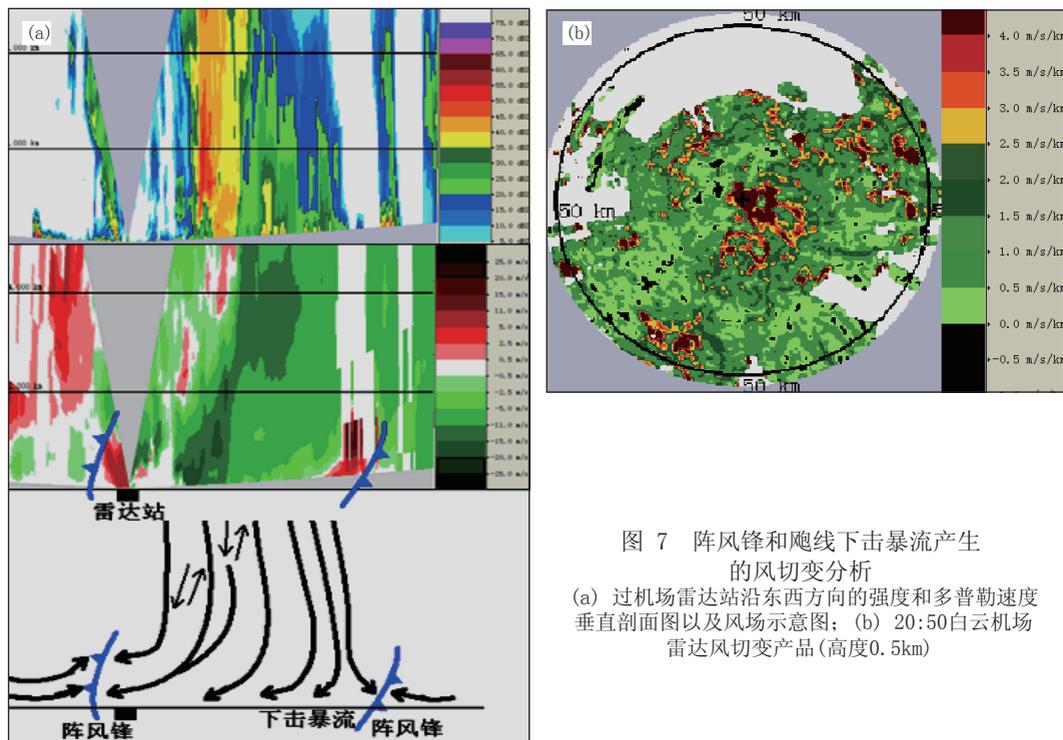


图 7 阵风锋和飊线下击暴流产生的风切变分析

(a) 过机场雷达站沿东西方向的强度和 Doppler 速度垂直剖面图以及风场示意图；(b) 20:50 白云机场雷达风切变产品 (高度 0.5 km)