

## 2007 年 4 月 23 日广东飚线的移动 和地面中尺度结构特征分析

吴多常 孟智勇<sup>†</sup>

北京大学物理学院大气与海洋科学系, 气候与海-气实验室, 北京 100871; <sup>†</sup>通信作者, E-mail: zymeng@pku.edu.cn

**摘要** 基于观测和分析, 研究了 2007 年 4 月 23 日发生在广东的一次飚线的移动预报因子和地面中尺度结构特征。结果表明, 该飚线的移动与 1000~500 hPa 等厚度线的走向以及飚线前部的低空垂直风切变方向基本一致。同时该飚线的移动方向还可通过 Corfidi 矢量法, 由低空急流的反向矢量和 850~300 hPa 层间的平均风速矢量合成得到。该飚线具有显著的地面中尺度结构特征, 其中包括地面风场的辐合辐散线以及飚前中尺度低压、雷暴高压和尾流低压等。飚线前部有很强的辐合, 对应强降水区有很强的辐散, 后部也有明显的辐合, 雷暴高压处在辐散中心附近, 尾流低压则处于飚线后部辐合线之后。另外, 还将该飚线的移动和地面中尺度特征与美国的飚线做了对比分析。

**关键词** 飚线; 地面中尺度结构; 移动特征; 观测分析

**中图分类号** P444

## On the Motion and Mesoscale Surface Structure of a Squall Line on April 23, 2007 in Guangdong

WU Duochang, MENG Zhiyong<sup>†</sup>

Laboratory for Climate and Ocean-Atmosphere Studies, Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871; <sup>†</sup> Corresponding author, E-mail: zymeng@pku.edu.cn

**Abstract** The movement and the mesoscale surface structure of a squall line on April 23, 2007 in Guangdong is explored based on observations. It is shown that the moving direction of the squall line is parallel to the contours of the 1000–500 hPa layer thickness and the low-level vertical wind shear in front of the squall line. Meanwhile, the motion of the squall line can be estimated by the sum of inversed low-level jet and mean flow in the 850–300 hPa layer as proposed by Corfidi. Typical mesoscale surface structure of a squall line is observed including convergence and divergence lines, prelows, storm highs and wake lows. There is strong convergence line at the leading edge and in the back part of the squall line, and strong divergence line corresponding to the precipitation areas. The storm highs are between the divergence line and the convergence line in front of the squall line but much closer to the former, while the wake lows are behind the convergence line in the back of the squall line. These features of Guangdong squall line are also compared with those of squall lines in America.

**Key words** squall line; mesoscale structural feature; movement; observation

飚线是一种中尺度对流系统, 往往由狭窄的活跃雷暴带和较大范围的层状降水区组成。镶嵌在飚线中的强雷暴常常引起局地暴雨和灾害性强风, 有时还会产生冰雹甚至龙卷。飚线因巨大的短时破坏

力得到了气象业务和科研部门的广泛关注。

飚线一般形成在具有较强条件性不稳定、丰富的水汽以及有利的低层抬升环境条件下。江淮地区在春夏季节交替之际, 常处于高空副热带急流和温

国家公益性行业(气象)科研专项经费(GYHY201306004)和国家自然科学基金(41075031, 40921160380)资助

收稿日期: 2012-05-08; 修回日期: 2012-12-09; 网络出版日期: 2005-05-08

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2442.N.20130508.1438.001.html>

带急流之间,又处于西南低空急流的左前方,是有利于出现飑线的重要天气类型<sup>[1]</sup>。由于观测资料的分辨率不够高,国内目前对飑线的研究大多为飑线发生的天气背景分析<sup>[2-3]</sup>或雷达图像分析<sup>[4-6]</sup>,针对飑线的中尺度结构及其移动特征的研究还不多见。

目前,随着我国雷达监测网和地面自动站网的日趋完善,从观测角度研究我国飑线的结构和演变特征已成为可能。本文的研究目的就是通过观测分析,揭示 2007 年 4 月 23 日发生在我国广东省的一次飑线的移动特征和中尺度结构。

### 1 资料介绍

本文采用的分析资料包括国家气象局的常规地面探空资料,加密地面自动气象站的观测资料,桂林、广州、阳江、汕头和厦门 5 部 S 波段多普勒雷达的组合反射率,以及 NCEP (National Centers for Environmental Prediction)的 FNL (Final Operational Global Analysis)全球最后分析资料。NCEP-FNL 资料空间分辨率为 1°×1°,时间分辨率为 6 小时,FNL 资料包括地面、1000~10 hPa 的 26 层气压层以及地面边界层和对流层顶的分析资料,分析变量包括地面气压、海表面气压、温度、海表面温度、土壤相

关的变量、冰盖、相对湿度、经向风、纬向风和臭氧等。

### 2 飑线的概况

2007 年 4 月 23 日 20 时 30 分(世界时,下同),一条飑线在广东和广西两省的交界处生成(图 1(a)),之后以大约每小时 60 km 的速度向东南方向移入广东省境内,并在移动过程中逐渐增强(图 1(b))。该系统在 24 日 00 时左右发展为长约 400 km 的横跨整个广东省的强飑线(图 1(c)),且出现弓状结构。24 日 03 时左右(图 1(d)),飑线在沿海地区开始断裂,强度有所减弱。断裂后,东侧的回波带经揭阳、潮州、汕头逐渐向福建和海上移动,继续保持着强的带状回波,在福建及其沿海持续了数小时才消亡。西侧的回波带则经深圳、中山、阳江向南部移动,之后回波强度大大减弱,整个飑线过程历时约 12 小时<sup>[7]</sup>。

这次飑线过程范围广、强度大、持续时间长,沿途伴有强雷暴、暴雨和大风天气。24 日雨势最强,广东省 26 个站降暴雨,顺德为大暴雨,花都出现雷雨大风,最大风速 30 m/s,曲江的沙溪镇出现冰雹。广州九佛自动观测站记录小时降雨量达 56.6 mm,瞬时风速达 23.8 m/s<sup>[7]</sup>。此过程造成广东省部分地

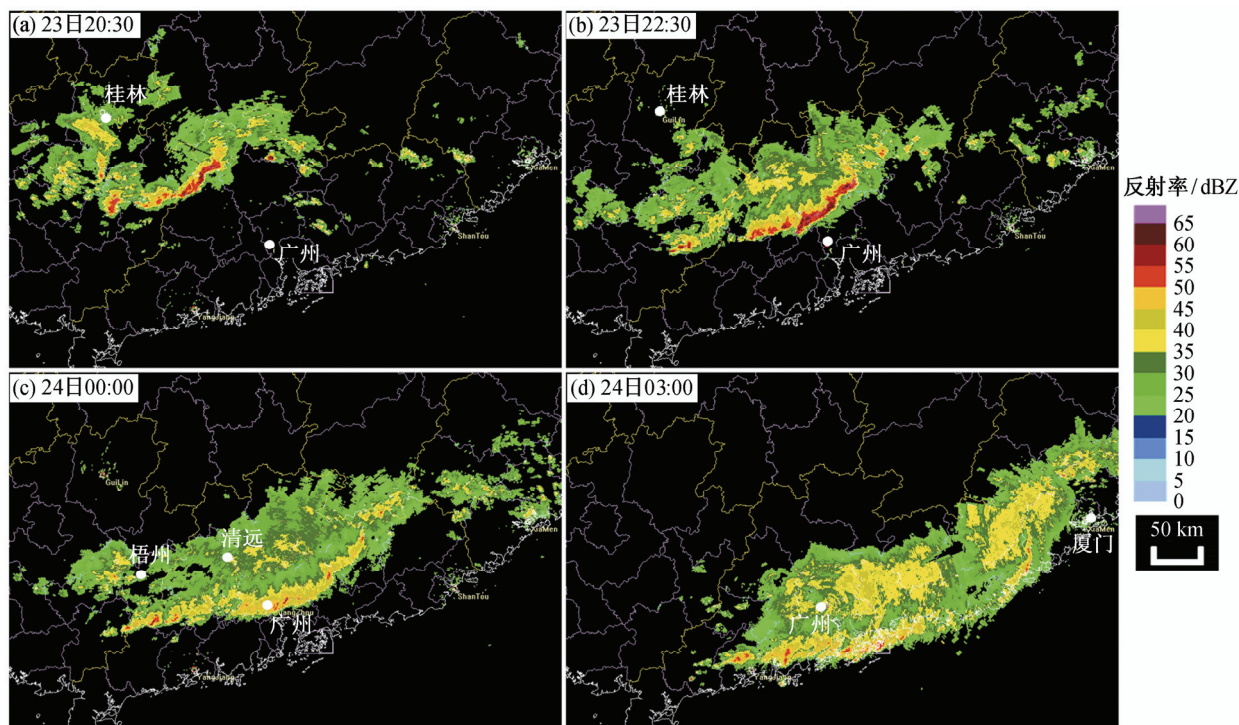


图 1 飑线的雷达组合反射率随时间的演变  
Fig. 1 Evolution of the observational radar composite reflectivity of the squall line

区不同程度受灾, 据广东省防汛抗旱总指挥部统计, 全省倒塌或损坏房屋 3405 间, 受灾人口 12.8 万人, 5 人死亡, 10 人受伤; 农作物受灾面积 11.3 千公顷, 成灾面积 6.7 千公顷, 直接经济损失达 2.65 亿元。

其中广州周围地区近 30 多条电线杆被吹倒, 公路树被吹倒或折断约 3000 多棵, 还造成白云国际机场 80 个航班出现不同程度的延误。

### 3 飊线的天气背景分析

这次飊线过程是在中层浅槽和地面准静止锋的天气形势下形成的。23 日 18 时, 在四川省和重庆市交界的上空 500 hPa 层上有一个浅槽(图 2(a)), 一条准静止锋从中国西部一直延伸到日本(图 2(b)), 其中黑色长方形区域指示 2.5 小时后飊线生成的位置), 该锋面经向的位温和相当位温梯度很大, 具有类似梅雨锋的特征。锋面的南边和北边分别有向北和向南的气流, 这两支气流使向北输送的暖湿空气和向南输送的干冷空气在锋面处交汇辐合, 且随着时间的推移辐合不断增强, 强对流沿着锋面形成并迅速发展成飊线。

除了有利的天气形势外, 充沛的水汽是强对流发展的一个重要因素。锋面南边的很强的西南气流不断地从海上输送暖湿空气, 为对流和降水提供了充沛的水汽条件。

### 4 飊线的移动特征

这次飊线在广东和广西两省交界处生成后向东南方向移动, 且在发展过程中移动方向发生了变化,

在其消亡阶段, 移动方向转为东南偏东方向, 几乎以由西向东的方向移入南海(图 3)。飊线的移动实际上是每个风暴单体的位移与风暴单体传播的合成。Merritt 等<sup>[8]</sup>通过对美国上百个中尺度对流系统(其中大部分为中尺度对流复合体)的移动路径的研究, 发现大部分系统的移动方向近似平行于 1000~500 hPa 层之间的等厚度线。我国飊线的移动方向是否也有类似特征呢?

从 23 日 12 时 1000~500 hPa 之间厚度的分布情况(图 4(a))可以看出, 等厚度线从贵州到广东均为西北东南走向。飊线的移动方向是从广西省和湖南省的边界向广东境内运动, 也恰恰是西北—东南走向。在 24 日 06 时(图 4(b)), 飊线移出广东省时, 方向几乎是由西向东的, 此时 1000~500 hPa 之间的等厚度线走向在广东东南部也接近东西走向。因此, 1000~500 hPa 层之间等厚度线的走向对我国南方飊线的移动方向也有很好的指示意义。

Bluestein<sup>[9]</sup>还指出, 低层垂直风切变的方向对飊线的移动方向也有指示意义。图 5 显示 24 日 00 时 925~600 hPa 的垂直风切变以及当时飊线前后方香港和梧州的探空观测资料。飊线前后的低层垂直风切变有明显的差异。飊线后方垂直风切变几乎平行于飊线, 前方则与飊线近似垂直且与飊线的移动方向相近。

上述两种判定方法其实是对大气斜压性这一物理本质的两种不同的表述。两固定气压层间的等厚度线可以表征为这两层间的平均温度等值线, 而垂直风切变为高层与低层风速矢量差, 在地转平衡条

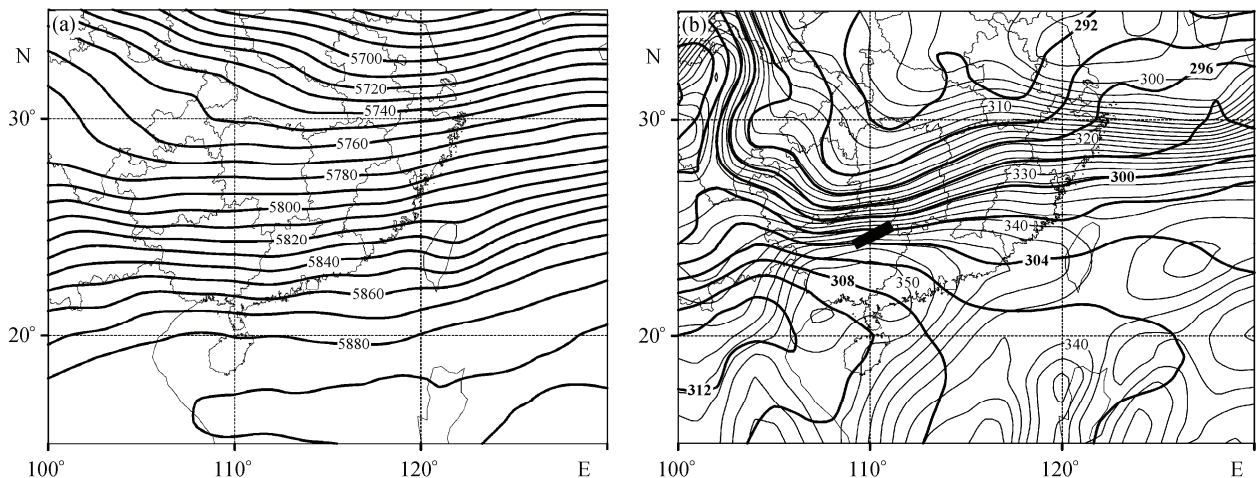
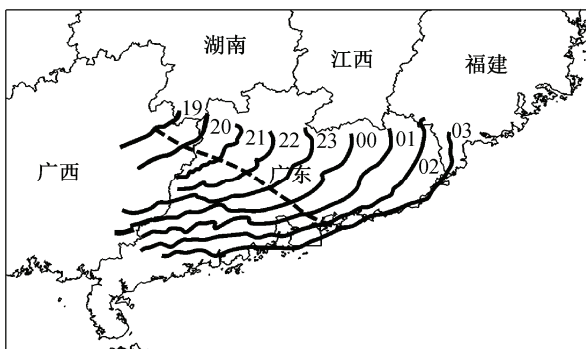


图 2 4 月 23 日 18 时 500 hPa 位势高度(m)(a)、850 hPa 位温(K, 粗等值线)和相当位温(K, 细等值线)(b)  
Fig. 2 Geopotential height (m) at 500 hPa (a), potential temperature (K, heavy contour) and equivalent potential temperature (K, thin contour) at 850 hPa (b) at 1800 UTC, April 23 based on NCEP-FNL analysis



实线为各对应时刻的飑线前缘;虚线为各实线中点的连线,指示飑线的移动路径

图 3 观测的飑线前缘等时线

Fig. 3 Isochrones of the observed squall line

件下,垂直风切变可视为这两层间的热成风,由热成风与平均温度间的关系可知平均温度等值线的走向与热成风方向一致。因而两固定气压层间的等厚度线的走向基本上与两层间垂直风切变方向相同。

等厚度线和垂直风切变只能给出飑线移动方向的预示,那么如何判断飑线移动速度的大小呢? Corfidi 等<sup>[10]</sup>对 Merritt 等<sup>[8]</sup>的工作做了扩展和概括,提出一种预报中尺度对流系统的短期(6~12 小时)运动的简单方法。在这个方法中,中尺度对流系统的移动速度矢量  $V_{MCC}$  可以用单体的移动速度矢量  $V_{CL}$  与新单体生成方向的矢量  $V_{PROP}$  之和来表示(图 6(a))。研究发现,  $V_{CL}$  的方向与 850~300 hPa 间的平均风的方向一致,而新单体生成方向的矢量  $V_{PROP}$  反向平行于低空急流(LLJ)的方向,且大小相当。如用  $V_{mean(850-300hPa)}$  表示 850~300 hPa 间的平均风矢量,

$V_{850hPa}$  表示 850 hPa 层上的最大风速矢量,即低空急流<sup>[10]</sup>,则系统的移动速度可用以下公式表示:

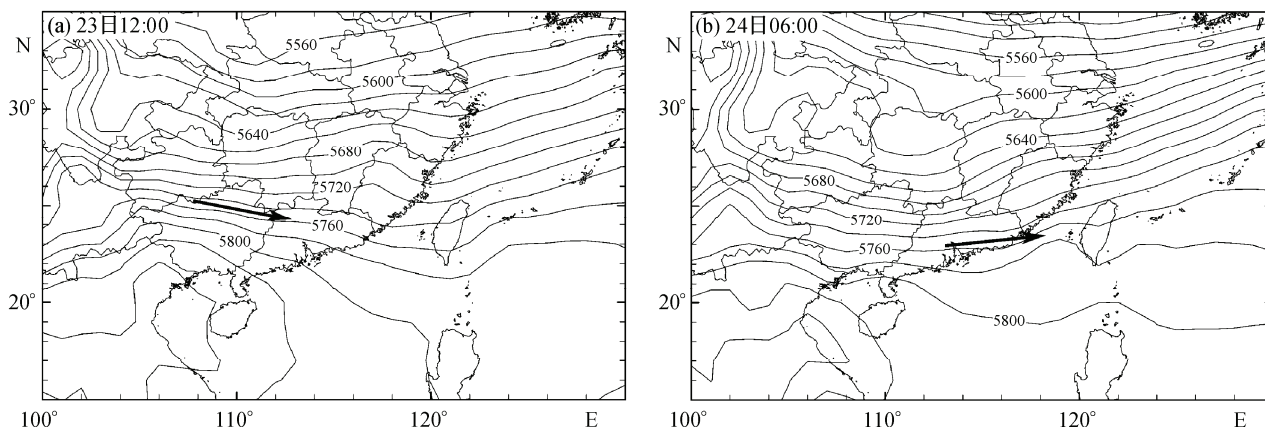
$$V_{MCC} = V_{mean(850-300 hPa)} - V_{850hPa} \quad (1)$$

由于这个矢量方法只需要低空急流和多层次平均风两种信息,因而对判断飑线的移动速度非常实用。下面讨论此方法是否适用于广东的这条飑线。

图 6(b)~(d)分别给出 24 日 00 时 850~300 hPa 之间的平均风速、低空急流和由式(1)得到的飑线移动矢量(图 6(d)中实线箭头)。该时刻低空急流取 15 m/s, 850~300 hPa 间的平均风速大小为 20 m/s,则由矢量关系可得飑线的移动速度大小约为 12.5 m/s,与从雷达动画中得到的移速十分接近(13.5 m/s)。这个结果表明, Corfidi 矢量法也适用于该飑线。此外图 6(d)还表明,由 Corfidi 矢量法得到的飑线移动矢量与 1000~500 hPa 间的等厚度线走向也十分接近。3 种飑线移动的判据预报结果基本一致。实际上,我们还对 2008 年的十多次飑线过程做了矢量分析,发现不同个例中的上述 3 个矢量基本满足式(1),说明 Corfidi 的矢量法对发生在我国的飑线也具有普遍适用性。

### 5 飑线的中尺度结构特征

飑线过境时出现的中尺度天气一般表现为风向突变、风速剧增、气压骤升、气温陡降和湿度增加等情形,且往往产生很强的降水。图 7 显示清远站在飑线过境前(23 日 12 时)的探空观测资料和飑线过境过程中地面各个要素的变化,可见地面各要素呈现出明显的突变特征,例如 30 mm 的降水,4 hPa 的



黑色箭头为飑线移动前方厚度等值线指示的飑线可能移动方向

图 4 4 月 23 日 12 时(a)和 24 日 06 时(b)1000~500 hPa 间的厚度等值线(m)

Fig. 4 1000~500 hPa thickness (m) at 1200 UTC, April 23 (a) and 0600 UTC April 24 (b)

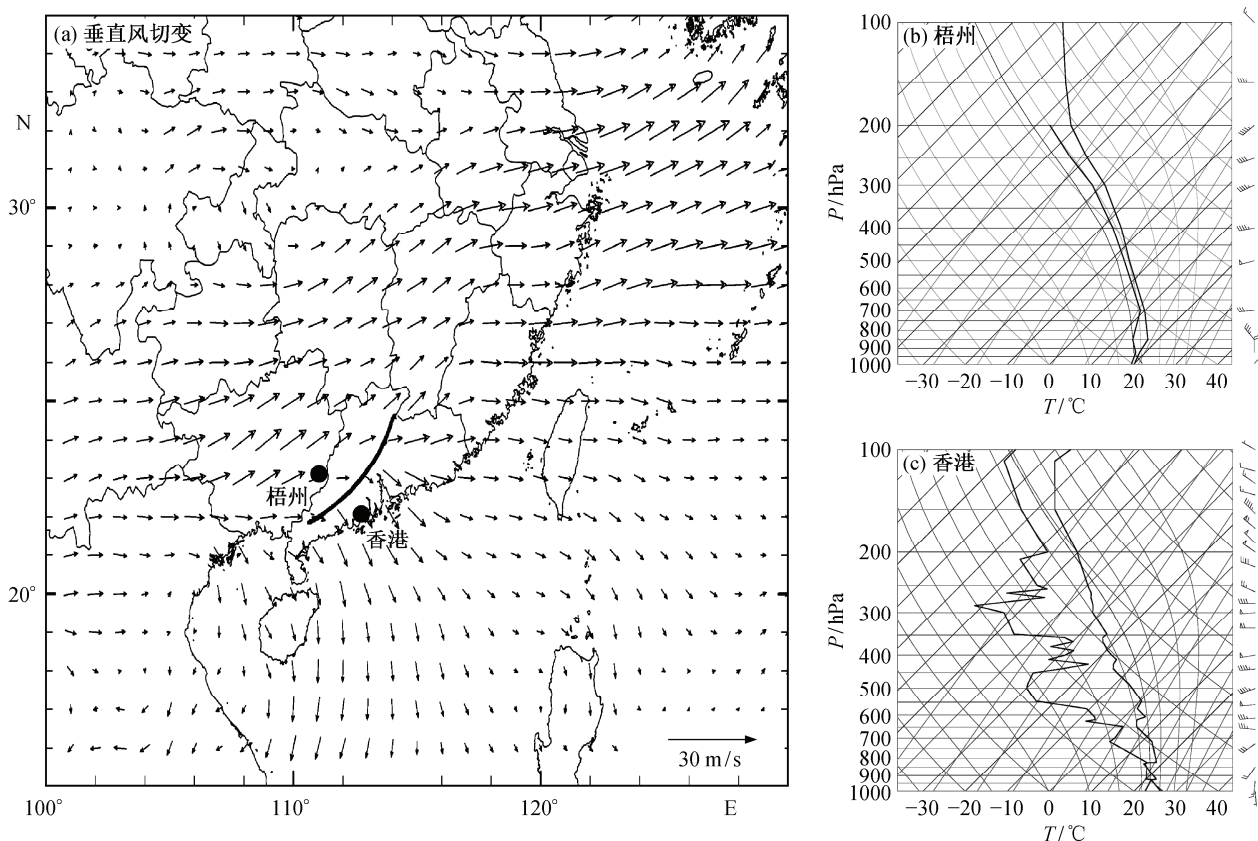


图 5 (a) 4 月 24 日 00 时 925~600 hPa 间的垂直风切变(m/s, 黑色粗线为飊线前缘的位置); 梧州(b)和香港(c)站的探空图(美国 Wyoming 大学探空网 <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>, 风向杆半杆是 5 kt, 满杆是 10 kt, 三角是 50 kt (1 kt = 0.514 m/s)

Fig.5 (a) Vertical wind shear (m/s) between 925 and 600 hPa (black heavy line denotes the leading edge of the squall line); Radiosonde data of Wuzhou (b) and Hongkong (c) at 0000 UTC, April 24 (the sounding network of the University of Wyoming, <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>). Each half barb counts 5 kt, each full barb counts 10 kt, and each flag counts 50 kt (1 kt = 0.514 m/s)

升压, 4°C 的降温和 10 m/s 的风速增加。

图 8 是 24 日 00 时的地面风场、海平面气压场和降水的分布。从图 8 可以很明显地分辨出飊线所具有的地面中β尺度的天气特征。在广东省东南部有一个中心值为 1007 hPa 的闭合低压, 对应飊线前方的位置, 一般称为飊前低压, 被认为是补偿下沉气流绝热增温所致<sup>[11]</sup>。飊线的前缘地面有明显的辐合线, 存在强上升气流; 沿着飊线后方的降水带有 4 个呈带状排列的雷暴高压; 雷暴高压处于地面辐散中心附近。下沉气流在地面的辐散向后的流出气流与环境流形成了类似于飊线前缘的辐合线, 在此辐合线的后部出现了尾流低压。该飊线南部地面中低压和中高压与辐合和辐散中心线的相对位置可以概括为图 9(a)的概念模型。该概念模型与 Fujita 模型<sup>[12]</sup>(图 9(b)) 以及 JH 模型<sup>[13]</sup>(图 9(c))有一定区别。

3 个模型的主要区别在于雷暴高压和尾流低压与流场辐合辐散线的相对位置。Fujita 模型和 JH 模型中雷暴高压比较靠前, 位于地面辐散线与飊线前缘辐合线之间, Fujita 模型尾流低压基本与飊线后部辐合线重合, JH 模型尾流低压则位于地面辐散线与飊线后部辐合线之间。

## 6 结论

本文通过对 2007 年 4 月 23 日广东飊线的结构和演变特征的观测分析, 得到以下初步结论。

1) 高原槽东移、良好的高低空配置以及充沛的水汽综合导致本次飊线的发生发展。中层的浅槽与槽前低层的准静止锋配置, 触发了初始对流, 加之来自南海的充沛的水汽, 对流越来越强并迅速发展成为飊线。

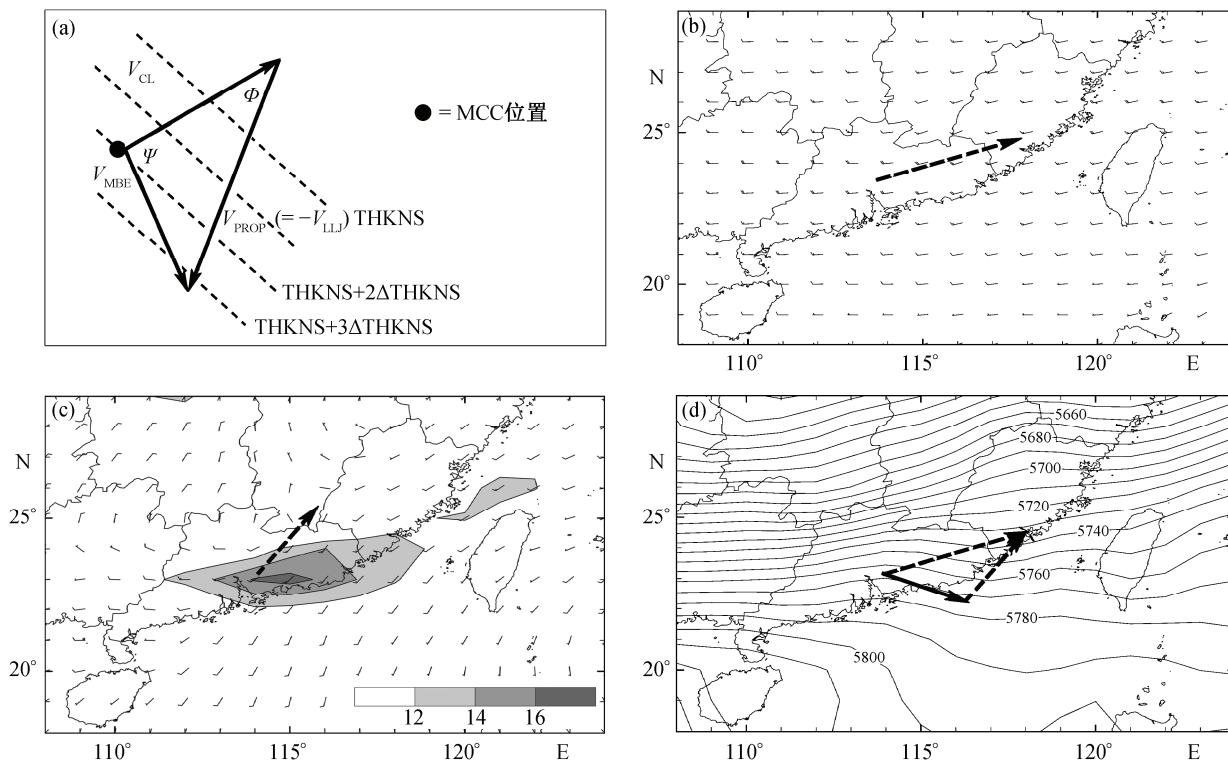


图 6 (a) 矢量法示意图<sup>[10]</sup>; (b) 24 日 00 时 850~300 hPa 间的平均风速(m/s, 风向杆半杆为 5 m/s, 满杆为 10 m/s, 箭头为平均风速矢量); (c) 850 hPa 风场(m/s, 风向杆半杆为 5 m/s, 满杆为 10 m/s)和风速(m/s, 阴影, 箭头为最大风速矢量); (d) 飑线移动矢量, 实线箭头为(b)中矢量(长虚线箭头)与(c)中矢量的反向矢量(短虚线箭头)之和, 与 1000~500 hPa 间的等厚度线(m)走向一致

Fig. 6 (a) Schematic of vector method<sup>[10]</sup>, (b) mean wind (m/s, each half wind barb denotes 5 m/s and each full barb denotes 10 m/s) of 850~300 hPa layer at 0000 UTC, April 24, the arrow represents the vector of mean wind; (c) wind field (m/s, the same convention as in (b) and magnitude (shaded, every 2 m/s) at 0000 UTC, April 24, the arrow represents the vector of maximum wind; (d) vector of squall line motion (the solid arrow) at 0000 UTC, April 24, which is the sum of the vector in (b) (long-dashed arrow) and the inversed vector in (c) (short-dashed arrow), it is consistent with the trend of 1000~500 hPa thickness contour (m)

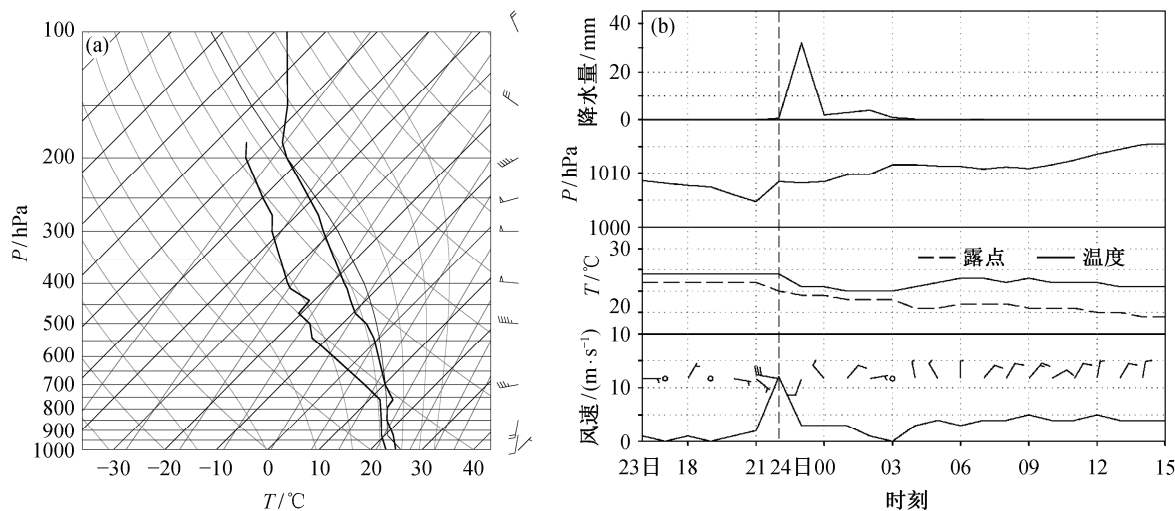


图 7 (a) 清远站 4 月 23 日 12 时的探空图(美国 Wyoming 大学探空网 <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>, 风向杆半杆是 5 kt, 满杆是 10 kt, 三角是 50 kt, 1 kt = 0.514 m/s); (b) 清远站 4 月 23 日 16 时到 24 日 15 时之间地面要素变化(竖虚线为飑线前缘扫过清远站的时间, 风向杆半杆表示 2 m/s, 满杆表示 4 m/s, 圆圈表示静风)

Fig. 7 (a) Radiosonde data of Qingyuan at 1200 UTC, April 23 (the sounding network of the University of Wyoming, <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>), each half barb counts 5 kt, each full barb counts 10 kt, and each flag counts 50 kts (1 kt = 0.514 m/s); (b) evolution of surface variables from 1600 UTC, April 23 to 1500 UTC, April 24 (the vertical dashed line denotes the time when the leading edge of the squall line passed Qingyuan station, each half barb counts 2 m/s, each full barb counts 4 m/s, and the circle denotes zero)

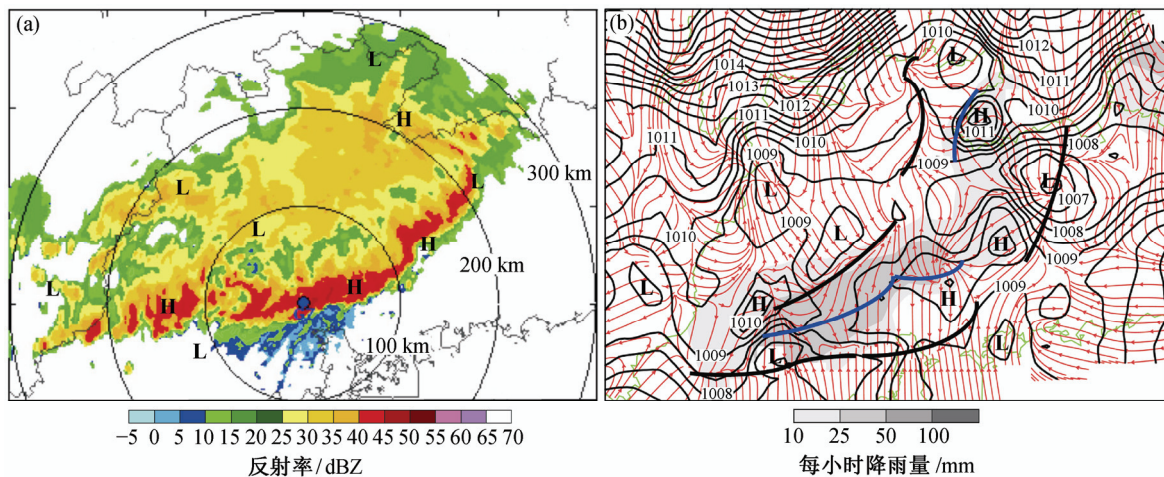


图 8 (a) 24 日 00 时广州雷达 0.5° 仰角的反射率; (b) 24 日 00 时海平面气压(黑色等值线, hPa), 23 日 23 时到 24 日 00 时的每小时降雨量(阴影, mm), 以及 10 m 风场(红色流线)(黑色粗线为地面辐合线, 蓝色粗线为地面辐散线, 大写字母 H 表示海平面高压中心, L 表示海平面低压中心, 这些气压中心也同样标在(a)中示意它们同飊线雷达回波的相对位置)

Fig. 8 (a) Guangzhou radar reflectivity of 0.5 degree; (b) mean sea level pressure (black contour, hPa), 1 hour rainfall between 2300 UTC, April 23 to 0000 UTC, April 24 (shaded, mm), and 10 m flow field (red streamline)(the heavy black lines demote the surface convergence, the heavy blue lines denote the surface divergence, capital letters H denote high pressure center, L denote low pressure center, these pressure centers are also marked on panel (a) to show their relative position to the squall line)

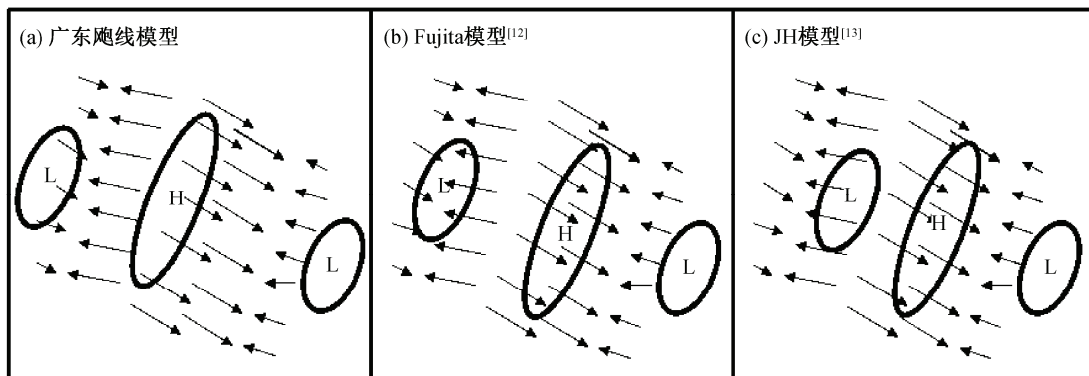


图 9 飊线海平面中低压和中高压与地面辐合和辐散线的相对位置关系

Fig. 9 Relative position between the low or high pressure centers and the convergence or divergence lines at the ground

2) 飊线在生成和发展的阶段, 由西北向东南移动, 从广西省和湖南省的交界处移入广东省; 在飊线逐渐减弱的过程中, 飊线的移动方向逆时针偏转了一定角度, 并从广东省的东部移出。本文的研究结果显示, 该飊线的移动与 1000~500 hPa 等厚度线的走向以及飊线前部的低空垂直风切变方向基本一致。同时该飊线的移动方向还可通过 Corfidi 矢量法由低空急流反向矢量和 850~300 hPa 层间的平均风矢量合成得到。该结果预示着北美的飊线移动预报判据可能也适用于我国的飊线。

3) 本文利用较密的地面观测资料, 分析了该飊

线的地面中尺度结构特征。飊线扫过之处, 出现了明显的升压和降温; 飊线前部有很强的辐合, 对应强降雨区有很强的辐散, 后部也有明显的辐合, 海平面气压图上表现为飊前中尺度低压、雷暴高压和尾流低压。雷暴高压处在辐散中心附近, 尾流低压则处于飊线后部辐合线之后。该特征与前人关于美国飊线的地面中尺度结构特征模型有一定的差别。

致谢 本文所用雷达资料由南京大学赵坤教授提供, 雷达拼图软件由中国气象科学研究院刘黎平研究员提供, 在此表示衷心感谢。

## 参考文献

- [1] 陆汉城, 杨国祥. 中尺度天气原理和预报. 北京: 气象出版社, 2004
- [2] Chen G T J, Chou H C. General characteristics of squall lines observed in TAMEX. *Mon Wea Rev*, 1992, 121: 726–733
- [3] 丁一汇, 李鸿州, 章名立, 等. 我国飊线发生条件的研究. *大气科学*, 1982, 6(1): 18–27
- [4] 杨梅, 尹小飞, 黄祖辉, 等. 利用 CINRAD WSR-98D 探测飊线天气过程. *气象科技*, 2004, 32(3): 195–197
- [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. *气象*, 2006, 32(10): 88–93
- [6] 廖玉芳, 俞小鼎, 郭庆. 一次强对流系列风暴个例的多普勒天气雷达资料分析. *应用气象学报*, 2003, 14(6): 656–662
- [7] 陈荣, 顾松山, 黄延刚. 一次强飊线过程的多普勒雷达特征. *广东气象*, 2008, 30(1): 20–23
- [8] Merritt J H, Fritsch J M. On the movement of the heavy precipitation areas of mid-latitude mesoscale convective complexes // 10th Conf on Weather Forecasting and Analysis. Clearwater Beach, 1984: 529–536
- [9] Bluestein H B. Synoptic-dynamic meteorology in midlatitudes, vol II, observations and theory of weather systems. Oxford : Oxford University Press, 1993: 520–522
- [10] Corfidi S, Merritt J, Fritsch J. Predicting the movement of mesoscale convective complexes. *Wea Forecasting*, 1996, 11: 41–46
- [11] Houze R A, Biggerstaff M I, Rutledge S A, et al. Interpretation of Doppler weather radar displays of midlatitude mesoscale convective systems. *Bull Amer Meteor Soc*, 1989, 70: 608–619
- [12] Fujita T T. Analytical mesometeorology — a review. *Meteor Monogr*, 1963, 5: 77–125
- [13] Johnson R H, Hamilton P J. The relationship of surface pressure features to the precipitation and airflow structure of an intense midlatitude squall line. *Mon Wea Rev*, 1988, 116: 1444–1473