

唐明晖,姚秀萍,王强,等,2017.不同强度台风相伴随的内陆台前飑线对比分析[J].气象,43(8):912-923.

不同强度台风相伴随的内陆台前飑线对比分析^{*}

唐明晖¹ 姚秀萍² 王 强³ 丁小剑¹

1 湖南省气象台,长沙 410007

2 中国气象局气象干部培训学院,北京 100081

3 怀化市气象台,怀化 418000

提 要: 本文应用多种常规观测资料和非常规观测资料,以两个强度差异较大的台风(201409 号台风威马逊和 200606 号台风派比安)在内陆造成的台前飑线为研究对象,从飑线产生的实况、大尺度环流背景及飑线不同阶段进行分析,重点以飑线初生阶段的环境条件和成熟阶段的地面中尺度特征、垂直结构进行对比分析。分析结果表明:(1)“威马逊”飑线主要是台风倒槽和副热带高压(以下简称“副高”)的相互作用引起的;而“派比安”飑线则是由台风倒槽、副高、西风槽相互作用引起的;两次过程副高位置的不同造成台风外围东南急流位置的差异,“派比安”飑线过程中东南急流更有利于飑线的持续。(2)飑线初生阶段,充沛的水汽来源、明显的条件不稳定、不稳定能量的积累、对流抑制能量的减小均为飑线的初生提供了有利的条件,地面辐合线使得离散的对流单体组织发展成飑线;而水汽条件、地面辐合线位置的差异导致了两次飑线初生位置的不同;对流有效位能(CAPE)、对流抑制位能(CIN)差异预示着“派比安”飑线过程对流发展潜势强于“威马逊”飑线过程。(3)飑线成熟阶段:由地面温压场特征分析出“派比安”飑线冷池中心比“威马逊”飑线更明显;垂直动力结构更有利于强对流的产生和发展。(4)西风槽底部和台风倒槽顶部在湘北的结合,使得已衰减的“派比安”飑线再次增强发展形成Ⅱ阶段飑线。(5)和以往研究的西风带飑线相比,这两次飑线过程并没有分析出那么强的“雷暴高压”、正变压,但有冷池、明显的温度梯度、气压梯度,低层的垂直风切变主要是由风的方向变化所导致。

关键词: 内陆,台前飑线,对比分析,副热带高压,西风带飑线,雷暴高压,冷池

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.08.002

Contrastive Analysis of Inland Pre-TC Squall Line Accompanied by Typhoons with Different Intensities

TANG Minghui¹ YAO Xiuping² WANG Qiang³ DING Xiaojian¹

1 Hunan Meteorological Observatory, Changsha 410007

2 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

3 Huaihua Meteorological Observatory of Hunan, Huaihua 418000

Abstract: Based on conventional and unconventional observation data, and with squall lines preceding tropical cyclone caused by two typhoons (Typhoon 201409 Rammasun and Typhoon 200606 Prapiroon) of great intensity differences in inland (Hunan Province and Jiangxi Province) as analysis objects, we diagnosed reasons of differences from the aspects of observation, large-scale circulation background and difference stages of squall line. Our contrastive analysis focused on environmental circumstances of initial stage, surface mesoscale characteristics and vertical structure of mature stage. The results show that inverted typhoon trough and subtropical high lead to the squall line preceding Rammasun, while squall line preceding Prapiroon is caused by the inverted typhoon trough, subtropical high and westerly trough; the different

^{*} 中国气象局预报预测核心业务发展专项(CMAHX20160210)、中国气象局灾害天气国家重点实验室开放课题重点项目(2014LASW-A03)和国家自然科学基金项目(41475041)共同资助

2016年5月9日收稿; 2017年5月26日收修定稿

第一作者:唐明晖,主要从事短时强对流天气预报预警的研究. Email:tmh790827@126.com

locations of subtropical high bring about the difference between positions of southeast jet surrounding these two typhoons, and the southeast jet surrounding Prapiroon is more favorable to the maintenance of squall line. In the initial stage, abundant vapor source, distinct convective instability, accumulation of instable energy and decrease of convective inhibition provide beneficial conditions, and the scattered convective cells are organized into squall lines by the surface convergence line; the different vapor conditions and locations of surface convergence line lead to different positions of two squall lines initially; potential instability of conditional unstable air layer, CAPE (convective available potential energy) and CIN (convective inhibition) indicate the convective development potential of squall line Prapiroon is more intense than the squall line Rammasun. The temperature characteristics of squall line preceding Prapiroon is more evident than that of Rammasun; vertical dynamic structure benefits the generation and development of severe convection; compared with previous research on westerly squall lines, thunderstorm high and positive variation of pressure are not found in these two squall line processes, but cold pool, distinct temperature gradient and pressure gradient have been detected, and vertical wind shear in the bottom layer relies mainly on the wind vector difference. When the bottom of westerly trough and the top of inverted typhoon trough are combined in the north of Hunan Province, convective cells strengthen and form the squall line of later stage. Compared with previous westerly squall line, during the two squall line processes, strong thunderstorm high pressure and positive pressure are not fingered out instead of cold pool, obvious temperature gradient and pressure gradient, and the lower vertical wind shear is given by the wind vector difference.

Key words: inland, squall line preceding typhoon, contrastive analysis, subtropical high, westerly squall line, thunderstorm high, cold pool

引 言

飚线是一种线状中尺度强对流系统,具有突发性强、灾害性大的特点,常造成巨大的财产损失和人员伤亡,因此,倍受学者们关注。国外学者(Laing and Fritsch, 2000; Blustein and Jain, 1985; Parker and John, 2000; Powell, 1990; Meng et al, 2013) 从对流触发机制、飚线加强原因等方面进行了深入研究;国内学者(孙虎林等, 2011; 马中元等, 2011; 王秀明等, 2012; 于庚康等, 2013; 伍志方等, 2014; 李娜等, 2013; 农孟松等, 2014; 郑媛媛等, 2014; 刘莲等, 2015; 郑丽娜和刁秀广, 2016) 从地面中尺度物理特征、非绝热加热过程、边界层中尺度辐合线、地形的诱发和维持、天气系统热力结构、灾害性大风成因、风切变矢量随高度变化、低层的垂直风切变和冷池的相互作用等方面对飚线的发展做了很多的研究。但是,上述研究大多以中纬度西风带飚线为主要研究对象,影响飚线的背景系统多种多样,除了最为常见的冷锋、静止锋、低涡、切变线等外,在热带气旋(tropical cyclone, TC)移动路径的前方,外围雨带之外数百千米的远处,因为 TC 的靠近带来的环流、

水汽等背景条件的变化而产生飚线,这种飚线我们通常称为台前飚线(Meng and Zhang, 2012; 张云济, 2010)。台前飚线作为 TC 移动前方的强对流系统,它的传播速度比螺旋雨带快(Powell, 1990),带来不亚于 TC 的灾害,比如 2009 年第 5 号台风麦莎, 2008 年第 9 号强热带风暴北冕、2010 年第 5 号热带风暴蒲公英生成的台前飚线给沿海各省带来了狂风暴雨,导致电线杆吹倒,甚至导致了机场千余旅客滞留,因而对台前飚线的研究也非常重要。

相比中纬度西风带飚线而言,国内外对台前飚线的研究还较少,张云济(2010)、Meng and Zhang (2012)对 17 例台前飚线的各项特征进行统计并作动力分析,指出:台前飚线具有清晰的冷池和气压涌升,雷达回波特征可能受到 TC 的半径、移向和强度变化等特征的影响;与中纬度飚线相比,台前飚线持续时间较短,最大长度较小,最大雷达回波强度较强,移动速度则相当,但具有更充沛的水汽。陈永林等(2009)、梁佳等(2008)和刘佳等(2013)用中尺度模式 WRF 对“麦莎”台前飚线进行高分辨率的模拟,研究结果表明:台前飚线区为强的风切变区和风向切变区;台前飚线的形成与台风强度关系不大,与台风外围环境流场关系较大;成熟时期的台前飚线

虽然比中纬度和热带飏线的变压强度小,但是具有更强的低层暖湿空气入流,中层的入流范围也更加宽广。

以上国内对台前飏线的研究也仅限于沿海省(市)台前飏线的研究,而深入内陆(初生于内陆、发展于内陆)的台前飏线因个例极少,对其发生发展物理机制的认识更是空白。2014年7月18日和2006年8月2日分别受“威马逊”和“派比安”的影响,湖南、江西出现了两次明显的飏线天气过程,带来了大范围雷雨大风、局地短时强降水等强对流天气,并带来较大的灾情。本文利用多种观测资料,对两次强度存在一定差异的台风所带来的台前飏线进行对比分析,以探讨导致其实况差异的主要原因,旨在提高此类深入内陆的台前飏线的预报预警能力,也是对台前飏线研究的一个重要且有意义的补充。

1 资料及两次台前飏线的判定依据、特征

本文所用的资料包括常规观测资料、中小尺度自动站资料、地面危险报资料、地面观测分钟数据资料、NCEP(National Centers for Environmental Prediction) $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 再分析资料、MST1(meteorology satellite 1)云图资料和长沙S波段多普勒气象雷达(海拔高度为630.7 m)资料、湖南SWAN(severe weather auto-nowcasting)拼图资料、温州台风网资料。如不做特殊说明,本文时间均为北京时。

Meng and Zhang(2012)、张云济(2010)对台前飏线进行统计后从其生成地点、生命期内飏线长度和反射率因子强度、生命史、移速给出了初步判据:产生在距离台风中心600 km以外的前右象限的地方;生命期内最长的长度不超过220 km,最强反射率因子值为57~62 dBz;持续时间4 h左右;以平均 $12.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度远离TC中心运动。

本文也对这两次飏线进行了统计分析。值得说明的是,因“派比安”飏线在8月2日22:00快速衰减,但3日01:00又发展成飏线,故在计算各项特征量平均值时分为I和II阶段。涉及到飏线的各项特征的统计及描述,其定义参照如下(张云济,2010):

(1) 生成时刻:对流系统开始持续满足飏线标准(Bluestein and Jain,1985;俞小鼎等,2006)的时刻。

(2) 消亡时刻:对流系统持续满足飏线标准的

最后时刻。

(3) 持续时间:对流系统持续满足飏线标准的时间长度。

(4) 生成/消亡地点:在生成/消亡时刻,飏线40 dBz区域前缘的中点。

(5) 长度:飏线40 dBz区域两端点间的直线距离。

(6) 移动速度:飏线生命期内,飏线前缘中点逐小时连线所形成折线的路径;长度与持续时间之比。

(7) 移动方向:飏线生成地点与消亡地点连线与正北向的夹角,偏西为负;偏东为正,取 $-180^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 。

(8) 飏线前缘:40 dBz雷达回波前缘。

把这两次飏线统计结果与Meng and Zhang(2012)和张云济(2010)给出的台前飏线的初步判据进行对照,根据飏线每间隔1 h的位置计算出移动速度,对各类特征量进行列表(表1和表2)分析:“威马逊”飏线和“派比安”I、II阶段最大回波强度分别为62.0、62.0和60.0 dBz;最长长度分别为560.9、469.2和260.8 km;持续时间分别为4.5、5.3和2.3 h,平均移动速度分别为12.2、17.0和11.3 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

两次飏线的长度、持续时间、移动速度和前人(Meng and Zhang,2012;张云济,2010)统计的台前飏线特征值均有差别,特别是“威马逊”飏线和“派比安”I阶段长度远远大于其统计的平均值(220 km)。究其原因,可能是这两次飏线在内陆生成后持续向内陆发展、移动,不同程度地受到西风槽、副热带高压(以下简称副高)以及江西和湖南特殊地形的影响;当然也不排除受样本个数的影响,由于受文章篇幅限制,没进行详细探讨。但是,从飏线的云图特征、生成地点、多普勒雷达回波特征、移动速度分析,还是可以判断这两次深入内陆的飏线为台前飏线(如无特殊说明,“台前飏线”简称为“飏线”,下同)。

2 两次飏线实况对比分析

“威马逊”是西北太平洋台风,生成后向西北方向移动,2014年7月18日15:30和19:30先后在海南文昌市及广东湛江市登陆(图1蓝色线),登陆时强度均为强台风,其中心附近最大风力为17级($60\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。19日07:10在广西防城港第三次登陆,登陆时强度为强台风,其中心附近最大风力为15级($48\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$);20日04:00在云南境内减弱为

表 1 飚线各项特征统计表
Table 1 Statistics of squall line features

	时间/BT	前 1 h 最强回波强度/dBz	长度/km	前 1 h 速度/ $m \cdot s^{-1}$	平均移动速度/ $m \cdot s^{-1}$
“派比安”飚线	17:00	61.0	360.4	/	I 阶段:17.0
	18:00	61.0	305.8	17.0	
	19:00	62.0	275.2	16.9	
	20:00	60.0	437.7	19.0	
	21:00	60.0	380.7	18.9	
	22:00	57.0	469.2	13.2	
	01:00	57.0	167.5	/	
02:00	60.0	213.6	11.7		
03:00	58.0	260.8	11.0		
“威马逊”飚线	16:30	62.0	412.0	/	12.2
	17:30	61.0	453.3	10.8	
	18:30	62.0	387.1	12.5	
	19:30	62.0	560.9	10.0	
	20:30	57.0	441.1	14.8	

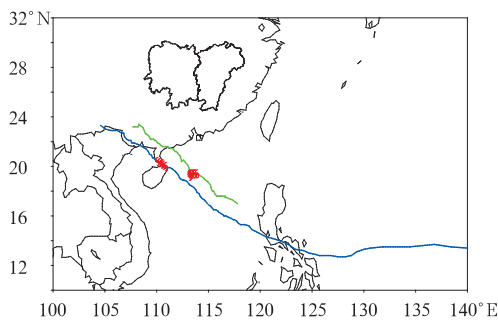


图 1 台风威马逊(蓝线,2014 年 7 月 13 日 02:00 至 20 日 05:00)和台风派比安(绿线,2006 年 8 月 1 日 14:00 至 4 日 21:00)移动路径

(红色标记是飚线阶段对应台风中心所处位置)
Fig. 1 Typhoon tracks of Rammasun from 02:00 BT 13 to 05:00 BT 20 July 2014 (blue line), and Prapiroon from 14:00 BT 1 to 21:00 BT 4 August 2006 (green line) (Red marks represent the location of typhoon center during the squall line phase)

热带低压。“派比安”是南海台风,生成后向西北方向移动,2006 年 8 月 3 日 19:20 在广东茂名市登陆(图 1 绿色线),登陆时强度为台风,中心附近最大风力为 12 级($33 m \cdot s^{-1}$);8 月 4 日 17 时在广西南宁境内减弱成热带低压。

从移动路径方向来看,“威马逊”和“派比安”均为西北方向,但“威马逊”路径位置相对“派比安”要偏西,“派比安”路径位置更靠近湖南、江西;从台风强度看,“威马逊”比“派比安”明显要强。

选取受这两次飚线影响的国家气象站分钟观测数据进行分析,2014 年 7 月 18 日湖南株洲站飚线大风过境前后时间段内(18:30—19:30,图 2a 和 2b):气压由 996.6 hPa(18:58)骤升至 999.3 hPa(19:13),后又迅速下降;温度由 31.9℃(18:57)降到 23.7℃(17:16);相对湿度明显增大,由 69%(19:03)上升到 99%(19:15);风场变化剧烈,风向顺转、风速剧增,由 $2.9 m \cdot s^{-1}$ (18:56)东风迅速转为 $11.2 m \cdot s^{-1}$ (19:01)的东南风。

2006 年 8 月 2 日飚线过境前后湖南衡阳站温、压、湿、风等气象要素也呈现显著的变化特征(20:30—21:30,图 2c 和 2d):气压由 994.9 hPa(20:43)涌升至 997.5 hPa(20:56)后又有所下降;温度由 26.1℃(20:49)降到 23.8℃(21:00);风场由东风($1 m \cdot s^{-1}$,20:47)迅速转为南风($11.5 m \cdot s^{-1}$,20:57),相对湿度明显增大。上述地面气象要素的变化特点说明株洲、衡阳的大风产生与飚线过境密切相关。

对两次飚线过程国家自动站记录的雷雨大风站次比较:“派比安”飚线 I 阶段最大风速最大;“派比安”过程比“威马逊”过程要多 4 站次(表 2)。从间隔 1 h 飚线位置移动图比较(图 3):“派比安”飚线比“威马逊”飚线影响范围要广、持续时间更长;“威马逊”飚线(图 3a)在湖南、江西中南部生成,西移北上影响湖南和江西;“派比安”飚线过程(图 3b)在湖南、江西及广东交界处生成,西移北上影响湖南和江西,在湖南中部断裂减弱消失后在湖南东北部再次发展成飚线。

表 2 两次飊线位置和国家气象站雷雨大风对比

Table 2 Comparison of the two squall lines' position and national weather stations' thunderstorm

	“威马逊”飊线	“派比安”飊线	
		I 阶段	II 阶段
雷雨大风站数	12 站	15 站	1 站
维持时间/h	4.5	5.3	2.3
生成时刻/BT	2014 年 7 月 18 日 16:30	2006 年 8 月 2 日 17:00	2006 年 8 月 3 日 01:00
消亡时刻/BT	2014 年 7 月 18 日 21:20	2006 年 8 月 2 日 22:24	2006 年 8 月 3 日 03:23
生成地点	江西南南中南部交界处	湖南、江西、福建交界处	湖南北部
消失地点	湖南中北部	湖南中部	湖北南部
最大风速/ $m \cdot s^{-1}$	25	27	20

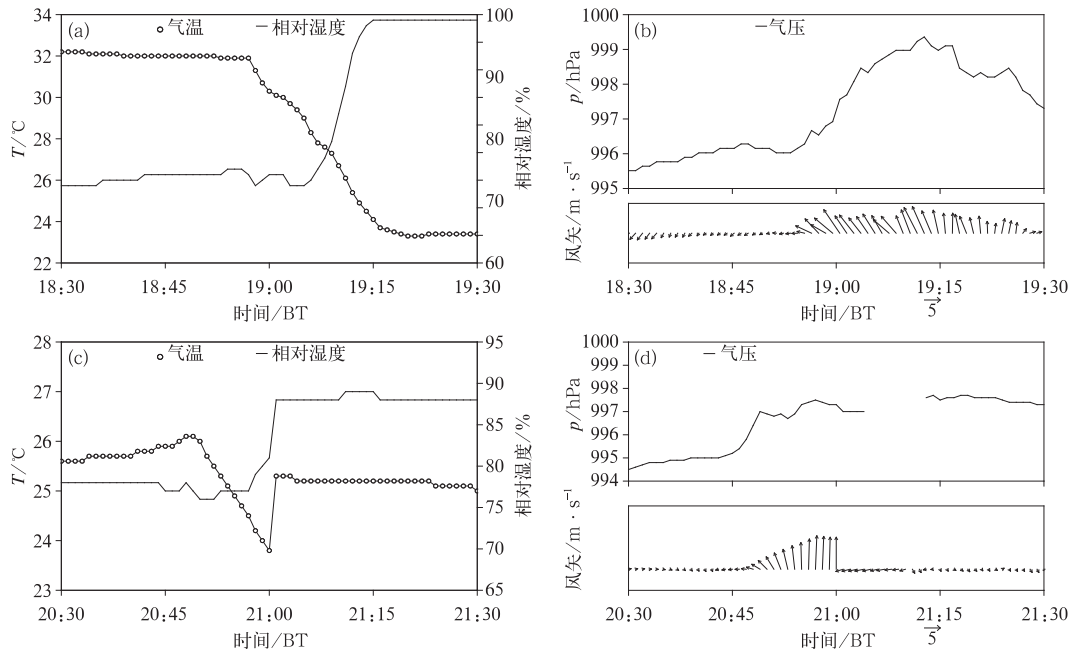


图 2 两次台风过程中飊线过境前后气温和相对湿度(a, c)、气压和风(b, d)分钟时序图

(a, b)2014 年 7 月 18 日 18:30—19:30, (c, d)2006 年 8 月 2 日 20:30—21:30

(衡阳站 2006 年 8 月 2 日 21:05—21:12 气压数据缺失)

Fig. 2 Sequence diagrams of temperature and relative humidity (a, c), pressure and wind vector (b, d) before and after the squall lines

(a, b) 18:30—19:30 BT 18 July 2014, (c, d) 20:30—21:30 BT 2 August 2006

(Pressure data of Hengyang Station are absent during 21:05—21:12 BT 2 August 2006)

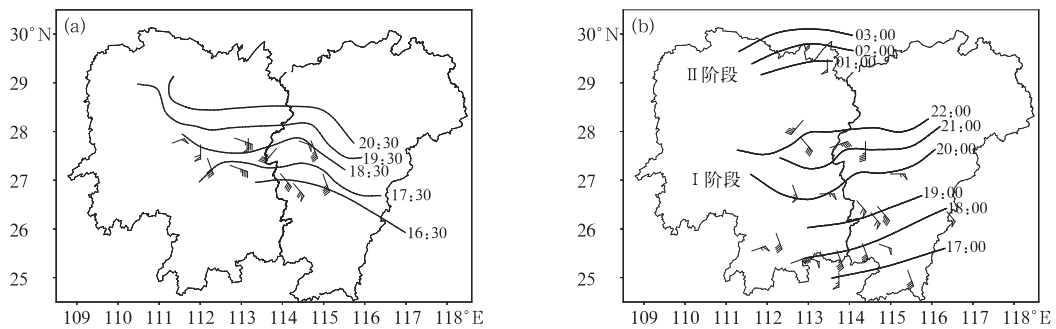


图 3 台风威马逊(a)和派比安(b)飊线生成后每隔 1 h 的位置及国家气象站大风分布

Fig. 3 Hourly locations of squall lines (a) Rammasun and (b) Prapiroon and

gales at national weather stations

这两次过程,“威马逊”飚线生成于台风登陆后 1 h,“派比安”飚线在台风登陆前 26 h 就已生成;台风强度差异较大,“威马逊”强度明显强于“派比安”。但“威马逊”飚线过程持续时间比“派比安”飚线过程要短,影响范围要小,是什么原因导致?下文将从大尺度环流背景、不同演变阶段(初生阶段、成熟阶段)对两次飚线进行对比分析。

3 飚线环流背景对比

2014 年 7 月 18 日 20 时,副高西脊点位于 112°E 附近(图 4a),副高 588 线到达湖南西部,湖南、广东东部处于副高 588 线内,“威马逊”此时已在广东南部登陆,强度为强台风级别,副高与台风低压环流之间有强的气压梯度,700~850 hPa 形成了低空东南风急流,急流轴由台风外围东北侧沿副高 588 线向西北延伸到湖南中部。

2006 年 8 月 2 日 20 时,副高西脊点位于 118°E 附近(图 4b),副高 588 线位于江苏、安徽境内,湖南、江西处于中国西部大陆暖高压和副高之间的狭长的低压区域内,500 hPa 华北槽底部延伸到湖南西部,700 hPa 在湖南西部和贵州东部有强的风切变生成(图略)。“派比安”台风在南海北部海上,强度为台风级别,850 hPa 形成了低空东南风急流,急流轴由台风外围东北侧沿副高 584 线向西北延伸至湖南、江西南部。

综合以上分析可知,副高位置的不同造成了中低空台风外围东南急流位置的差异,“威马逊”飚线过程东南急流主要位于广东北部,“派比安”飚线过程东南急流扩展到江西、湖南南部,“威马逊”飚线过程东南急流位置比“派比安”飚线过程要偏南,“派比安”飚线过程中东南急流更有利于飚线的持续。

4 两次飚线过程不同阶段对比分析

参照张云济(2010)对台前飚线的各项特征定义,本文对两次飚线的初始阶段和成熟阶段定义如下:

初生阶段:离散的对流单体生成到开始满足台前飚线标准的阶段;

成熟阶段:持续体扫满足 35 dBz 回波长和宽之比 ≥ 5 的阶段。

因 NCEP 再分析资料时间间隔为 6 h,2014 年

7 月 18 日 14 时、2006 年 8 月 2 日 14 时离对应飚线初生时间(表 2)临近,故 4.1 节主要选取 14 时再分析资料对飚线初生阶段进行环境条件分析;2014 年 7 月 18 日 20 时、2006 年 8 月 2 日 20 时飚线均处于成熟阶段,故 4.2 选取 20 时再分析资料对该阶段进行分析。

4.1 初生阶段对比分析

4.1.1 对流潜势分析

对 2014 年 7 月 18 日 14 时(飚线生成前 2.5 h)、2006 年 8 月 2 日 14 时(飚线生成前 3 h)850 hPa 水汽通量(图 5 等值线)、比湿(图 5 阴影)和风场进行分析,发现台风和副高南侧的东南气流相互促进,形成台风外围东南急流,将海面上空的水汽源源不断地向北输送,导致此阶段距离台风中心 10 个纬距内,850 hPa 比湿均超过了 $12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,湖南、江西中部以南($\leq 27^{\circ}\text{N}$)地区,850 hPa 比湿甚至达到了 $16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上。可见,充沛的水汽输送保证了初生阶段所需要的水汽条件。

从台风强度来说,“威马逊”(强台风级别)强于“派比安”(台风级别);但是,“派比安”飚线过程,湖南、江西处在副高 584 线边缘;“威马逊”飚线过程,湖南东部、江西处于副高 588 线控制。因此,“派比安”飚线过程东南急流位置比“威马逊”飚线过程要偏北(图 5 风场),造成“派比安”飚线过程中湖南、江西 850 hPa(图 5 阴影)比湿大于“威马逊”飚线过程,其中“派比安”过程 850 hPa 比湿 $\geq 15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的面积明显大于“威马逊”过程。

从 2014 年 7 月 18 日和 2006 年 8 月 2 日 14 时 θ_{se}^* (饱和假相当位温)分布来看,湖南、江西地区中

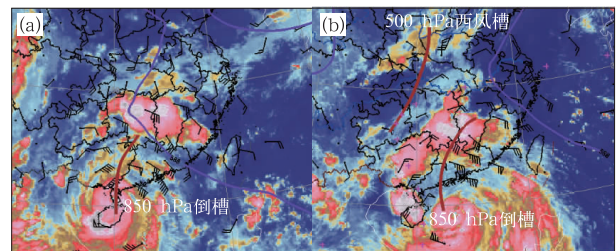


图 4 2014 年 7 月 18 日(a)和 2006 年 8 月 2 日(b)的 20:00 850 hPa 风场、500 hPa 高度场和 MST1 红外图像叠加图

Fig. 4 The 850 hPa wind field, 500 hPa height field and MST1 infrared cloud images at 20:00 BT of 18 July 2014 (a) and 2 August 2006 (b)

低层 θ_{se}^* 随着高度增加而减小(图略):“威马逊”飊线过程, $\theta_{se700\text{ hPa}}^* - \theta_{se500\text{ hPa}}^*$ 、 $\theta_{se800\text{ hPa}}^* - \theta_{se500\text{ hPa}}^*$ 分别为 7.3 和 16.8 K;“派比安”飊线过程对应值分别为 0.8 和 14.1 K, 均具有一定的条件不稳定性(王秀明等, 2014)。对受这两次飊线过程影响的湖南长沙站 08

和 14 时饱和假相当位温廓线进行分析, 很明显其对应的 θ_{se}^* 随着高度的增加而减小(图 6)。

Meng and Zhang(2012)指出:天气尺度的抬升不再是对流初始化的最直接的强迫因子, 对流有效位能(CAPE)的累积, 为对流的发生提供了有利条

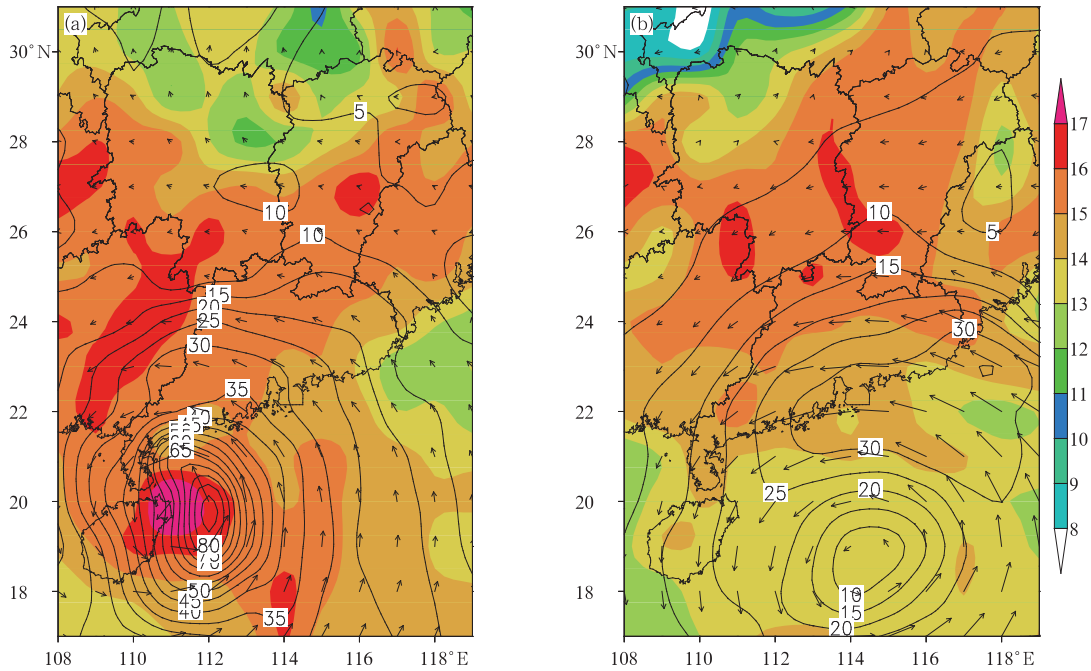


图 5 2014 年 7 月 18 日(a)和 2006 年 8 月 2 日(b)的 14:00 850 hPa 比湿(阴影, 单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、水汽通量(等值线, 单位: $\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)、风场(箭头, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 5 850 hPa specific humidity (shaded area, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), vapor flux (contour line, unit: $\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), wind field (arrow, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 14:00 BT of 18 July 2014 (a) and 2 August 2006 (b)

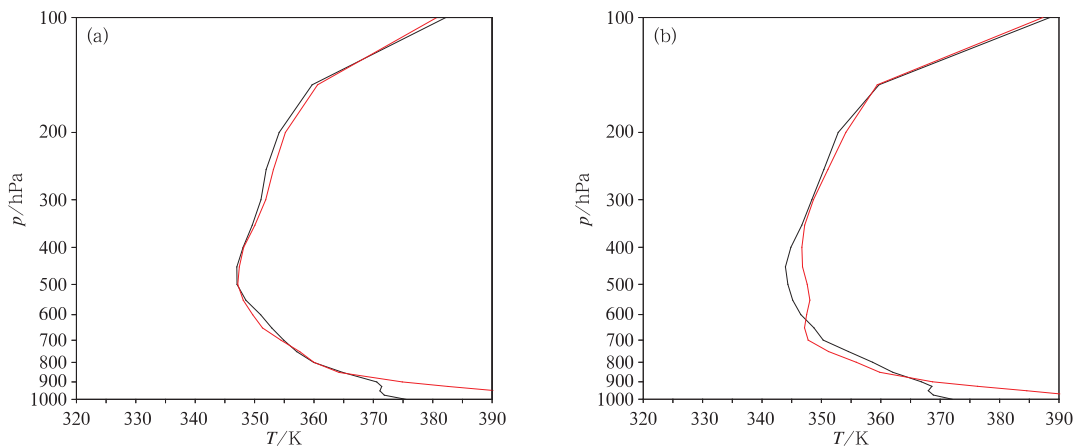


图 6 2014 年 7 月 18 日(a)和 2006 年 8 月 2 日(b)长沙站饱和假相当位温廓线分析 (黑线和红线分别表示 08:00 和 14:00)

Fig. 6 Analysis of saturation pseudoequivalent potential temperature for Changsha Station on 18 July 2014 (a) and 2 August 2006 (b) (Black and red lines respectively show 08:00 BT and 14:00 BT)

件,而减弱的对流抑制位能(CIN)和增强的CAPE则为对流的发展提供了有利的条件环境。2014年7月18日、2006年6月2日的08时,江西和湖南CAPE均已达到了 $1300.00 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上(表3),且随着午后的升温,14时CAPE进一步增加:“威马逊”飊线过程从 $1346.11 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (08时)增加到 $2129.96 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (14时),增加了 $783.85 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$;“派比安”飊线过程从 $1397.94 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (08时)增加到 $2491.03 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (14时),增加了 $1093.09 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。对应的CIN减小均非常明显,14时降到0左右。但对比这两次过程,08和14时“派比安”飊线的CAPE比“威马逊”飊线要大,CIN要小,预示着前者的对流性发展潜势强于后者。

表 3 两次台风过程CAPE和CIN的演变

Table 3 Evolution of CAPE, CIN on 08:00 BT, 14:00 BT 18 July 2014 and 08:00 BT, 14:00 BT 2 August 2006

	CAPE/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$		CIN/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	
	“威马逊” 飊线	“派比安” 飊线	“威马逊” 飊线	“派比安” 飊线
08:00	1346.11	1397.94	31.22	28.39
14:00	2129.96	2491.03	0.23	0

4.1.2 触发条件分析

边界层辐合线反映了对流层低层的抬升机制,其与风暴的触发新生和发展密切相关(丁青兰等,2006),对两次过程飊线初生前的地面风场资料(2014年7月18日16时、2006年8月2日17时)进行分析:湘赣中部偏南的地区(图7a红色虚线)、

湘赣粤交界处(图7b红色虚线)均有明显辐合线存在。2014年7月18日、2006年8月2日14时,湖南、江西地区中南部($\leq 27^\circ\text{N}$)的 $\theta_{\text{se}850 \text{ hPa}} \geq 350 \text{ K}$ (图7),已处于高温高湿、极有利于强对流产生环境中,而地面辐合线的生成使得离散的单体(图略)在对流有利的区域组织发展成飊线。对比分析也发现,“威马逊”飊线的地面辐合线位置比“派比安”飊线略偏北1个纬度,可见地面辐合线位置的差异导致了两次飊线初生位置的不同,前者比后者偏北。

综合以上分析可知,在两次飊线初生阶段,强的低空东南急流将南部充沛的水汽源源不断地输到湘赣地区,中低层条件不稳定、CAPE的增加和CIN的减小均为其产生提供了有利的对流条件,地面辐合线的触发抬升导致了飊线初生。然而初生阶段水汽条件、CAPE的差异预示着此后两次飊线发展对流潜势差异,且地面辐合线位置差异导致了飊线初生位置的不同。

4.2 成熟阶段对比分析

4.2.1 地面中尺度结构对比分析

两次飊线成熟阶段,均有东西向弧状分布的强回波带(图8),内部含有多个弓形回波,最强中心强度达 65 dBz 以上,飊线后有明显的弱回波通道。

由于受到TC外围气流的影响,飊线流场特征并不如西风带飊线那么表现清晰,但从地面风场(图8)仍能分析出弓形回波上有辐散,弓形回波前

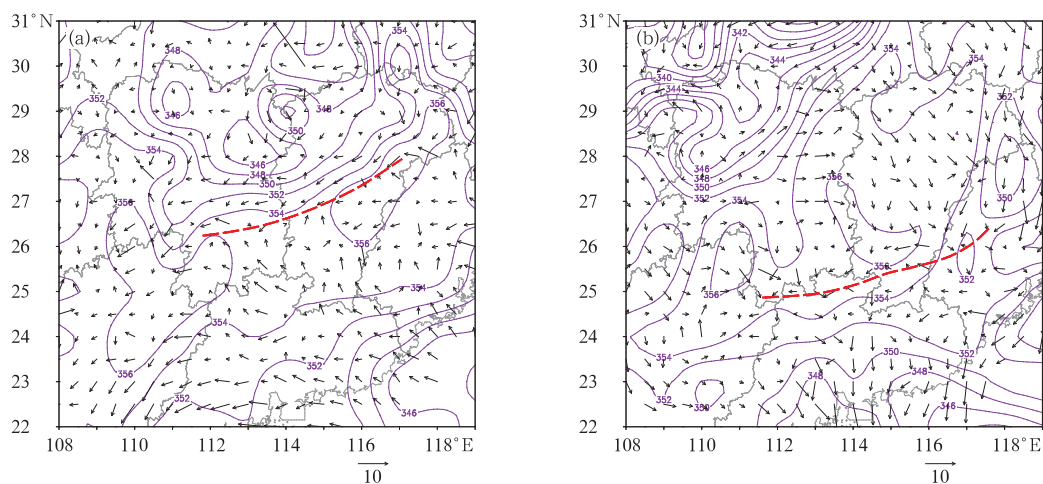


图 7 2014年7月18日(a)和2006年8月2日(b)的14:00 $\theta_{\text{se}850 \text{ hPa}}$ (等值线,单位: K)及地面风场(箭头,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 7 The $\theta_{\text{se}850 \text{ hPa}}$ (contour, unit: K), surface wind field (vector, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 14:00 BT of 18 July 2014 (a) and 2 August 2006 (b)

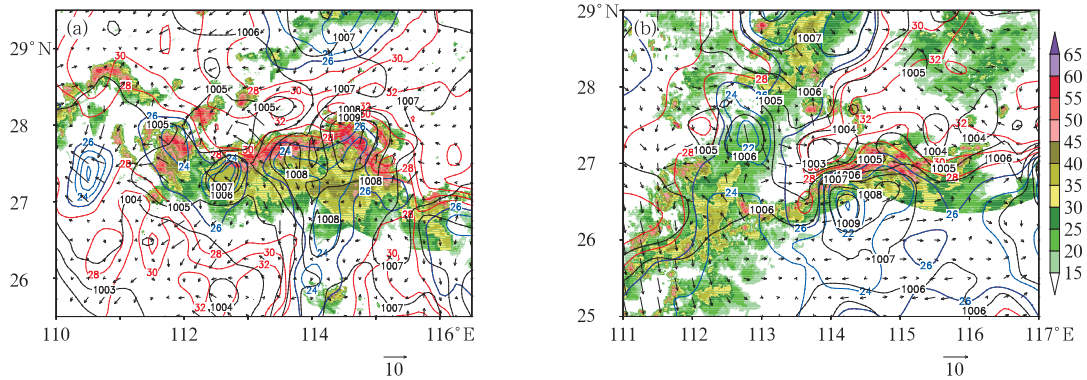


图 8 2014 年 7 月 18 日 19:00(a)和 2006 年 8 月 2 日 20:00(b)的 0.5° 仰角 SWAN 反射率因子(阴影,单位: dBz)、地面温度场(单位: $^\circ\text{C}$; $\leq 26^\circ\text{C}$, 蓝线; $\geq 28^\circ\text{C}$, 红线)、风矢量(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、气压场(黑线,单位: hPa)

Fig. 8 The 0.5° elevation SWAN reflectivity (shaded area, unit: dBz), surface temperature field (unit: $^\circ\text{C}$; $\leq 26^\circ\text{C}$, blue line; $\geq 28^\circ\text{C}$, red line), wind vector (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and pressure field (black line, unit: hPa) at 19:00 BT 18 July 2014 (a) and 20:00 BT 2 August 2006 (b)

部的冷性下沉气流到达地面并向外扩散与低层暖湿空气交汇而形成了辐合。

气压场(图 8 黑线)分析出飊线后侧有中高压中心(“雷暴高压”),“威马逊”飊线中心气压(“雷暴高压”)达 1009.5 hPa(图 8a),后侧伴有 $2.2\text{ hPa}\cdot\text{h}^{-1}$ 的正变压存在(图略);“派比安”飊线中高压(“雷暴高压”)达 1009 hPa(图 8b),后侧伴有 $2.0\text{ hPa}\cdot\text{h}^{-1}$ (图略)。这两条飊线小时正变压强度比中纬度西风带飊线(约为 $9.4\text{ hPa}\cdot\text{h}^{-1}$;张云济,2010)小。相比西风带飊线而言,由于飊线处于强的台风环流之中,飊线的运动有远离台风的趋势,因此整体地面气压场特征(主要是“雷暴高压”特征)不如中纬度西风带飊线显著,这和张云济(2010)研究结果相符。

由于飊线对流系统内降水的强烈蒸发冷却,导致了明显温度梯度大值区(图 8 红色和蓝色等值线),“威马逊”和“派比安”飊线的冷池中心分别达到了 22°C (图 8a 蓝线)、 20°C (图 8b 蓝线),与中高压中心(“雷暴高压”)基本重合,这是由于飊线尾部中层吸入的干冷空气下沉至地面加速水滴蒸发、降温所致。

以上对比分析得到的“派比安”飊线的冷池温度比“威马逊”飊线低,说明“派比安”飊线比“威马逊”飊线对流性更强,其中冷池温度差异和刘佳(2012)对台风麦莎对比控制试验研究出的“较弱的台前飊线对应较弱的冷池,而较强的台前飊线对应较强的冷池”结论是符合的。

4.2.2 对流单体风暴属性对比分析

这两次过程飊线在东移北上过程中均给醴陵

(长沙多普勒雷达图所在的位置为:方位 150.1° 、径向距离 103.0 km, 0.5° 仰角对应高度为 2.2 km)带来了雷雨大风天气(2014 年 7 月 18 日 18:30, $19\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;2006 年 8 月 2 日 21:58, $22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),在组合反射率(CR)产品上叠加风暴追踪信息,发现对应的雷雨大风分别是由 Z5 单体(“威马逊”飊线)、B0 单体(“派比安”飊线)造成,分别维持了 7 和 8 个体扫。对 Z5 单体、B0 单体的最大反射率因子(dBzM)、垂直积分液态水含量(VIL)、移动速度(MV)进行对比分析(表 4):这两个单体的 dBzM 超过了 60 dBz,单体的 $VIL > 30\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, $MV > 6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,但“派比安”飊线中单体 Z5 的移动速度大于“威马逊”飊线中单体 B0;前者最大值、最小值分别为 14 和 $11\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;后者最大值、最小值分别为 10 和 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。雷暴大风产生时“派比安”飊线 B0 单体速度达到了 $13\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,明显大于“威马逊”飊线单体 Z5($10.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。分析结果和表 1 统计的两次飊线的移动速度结果(“派比安”飊线的移动速度大于“威马逊”飊线)吻合,一般来说,构成飊线的单体移动速度越快,则导致飊线产生雷雨大风的几率越大,相对来说,对应的雷雨大风的风速也更大。另从 Z5 单体、B0 单体的风暴趋势(图 9)分析出:雷暴大风产生时(图 9 红色三角形所指时间),单体的最大反射率因子高度(图 9 黄色线)、质心高度(图 9 紫色线)、顶高均处于下降阶段且底高都低于 1.5 km(图 9 白色竖线)。

4.2.3 垂直结构对比分析

过“威马逊”飊线强中心(28.0°N 、 112°E)做径

表 4 对流风暴单体属性列表
Table 4 Property list of convective cell

Z5(“威马逊”飢线:2014 年 7 月 18 日)				B0(“派比安”飢线:2006 年 8 月 2 日)			
时间/BT	$dBz/M/dBz$	$VIL/kg \cdot m^{-2}$	$MV/m \cdot s^{-1}$	时间/BT	$dBz/M/dBz$	$VIL/kg \cdot m^{-2}$	$MV/m \cdot s^{-1}$
18:03	62.0	34.0	6.0	21:27	61.0	35.0	14.0
18:09	61.0	49.0	8.0	21:33	60.0	47.0	11.0
18:15	60.0	63.0	8.0	21:39	61.0	44.0	11.0
18:21	61.0	55.0	9.0	21:45	60.0	53.0	11.0
18:27	61.0	54.0	10.0	21:51	60.0	50.0	12.0
18:33	60.0	55.0	10.0	21:57	60.0	49.0	13.0
				22:03	60.0	45.0	11.0

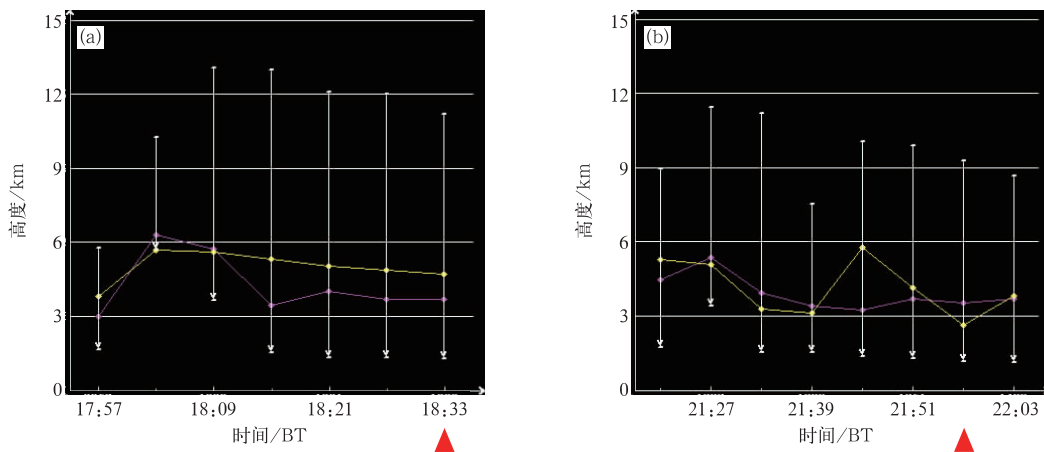


图 9 对流单体风暴演变趋势图

(a) Z5(“威马逊”飢线), (b) B0(“派比安”飢线)

(紫色线表示质心高度, 白竖线表示风暴顶高减风暴底高, 黄色线表示最大反射率因子高度, 红色三角形表示飢陵雷暴大风产生时间)

Fig. 9 Diagram of convective storm trend centroid height (purple line), storm-bottom height (white line), the maximum reflectivity height (yellow line)

(a) Z5 (Rammasun squall line), (b) B0 (Prapiroon squall line)

(Red triangle shows the time of thunder gale occurrence)

向垂直剖面(图 10a 和 10b), 分析出以下特征: 800 hPa 以下 θ_{se} 线梯度大(图 10a 等值线), 为明显的高能高湿区, 中低层为上干冷、下暖湿的对流不稳定层结; 辐合伸展到 350 hPa, 300 hPa 以上出现了强辐散中心(图 10b 阴影), 有利于垂直上升运动的维持; 东南急流处于辐合中心; 低层到高层风随高度顺转, 和以往研究的湖南的西风带飢线不同(叶成志等, 2013; 俞小鼎等, 2006), 低层的垂直风切变主要以风速变化为主(图 10b), 0~850 hPa 垂直风切变为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

过“派比安”飢线中心(26.0°N、113°E)做径向垂直剖面(图 10c 和 10d), 分析出以下特征: 800 hPa 以下为 θ_{se} 线梯度大值区(图 10c 等值线); 飢线 900 hPa 以下为正涡度区域(正涡度中心达到了 $4 \times$

10^{-5} s^{-1}), 以上为负涡度区域(图 10c 阴影), 有利于强对流的垂直伸展和对流性结构的维持; 垂直方向辐合伸展到 400 hPa, 400 hPa 以上转为辐散(图 10d 阴影); 类似于“威马逊”飢线, 东南急流处于风场的辐合中心, 低层到高层; 风随高度顺转, 低层垂直风切变主要以风速变化为主(图 10d), 0~850 hPa 垂直风切变为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

对比两个飢线成熟阶段的垂直结构, 诊断出“派比安”飢线动力条件强于“威马逊”飢线: 前者低层正涡度和辐合、高层负涡度和辐散的结构清晰(图 10c、10d 红框), 这种垂直结构使得低层入流进入飢线内部后形成深厚的上升运动, 平衡低层辐合和高层的辐散, 加快飢线后部的流出气流, 使得飢线迅速发展; 而后者低层正涡度中心出现在飢线南侧, 但垂

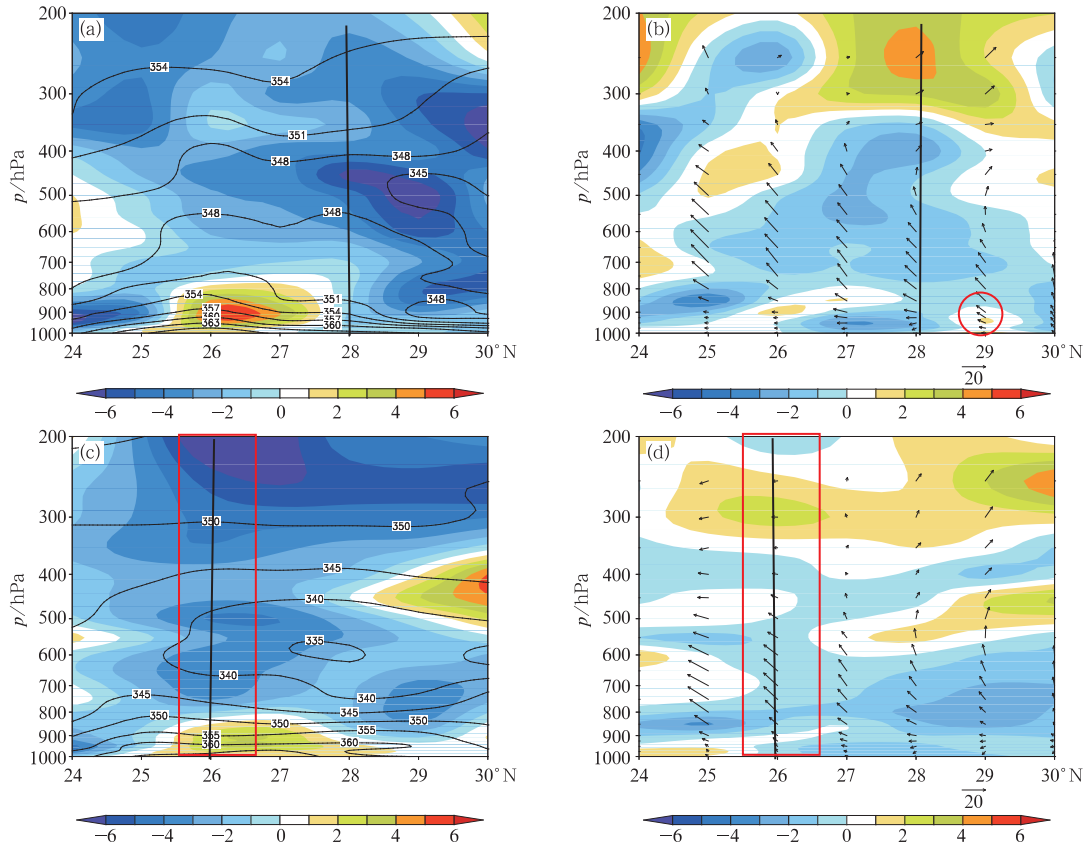


图 10 2014 年 7 月 18 日 20:00 经向垂直剖面(a, b, 28.0°N、112°E)、
2006 年 8 月 2 日 20:00 经向垂直剖面(c, d, 26.0°N、113°E)
(a, c) 涡度(阴影, 单位: 10^{-5} s^{-1})和 θ_{se} (实线, 单位: K),
(b, d) 散度(阴影, 单位: 10^{-6} s^{-1})和风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 10 The 20:00 BT 18 July 2014 meridional vertical section (28.0°N, 112°E) (a, b) and
the 20:00 BT 2 August 2006 meridional vertical section (26.0°N, 113°E) (c, d)
(a, c) vorticity (shaded area, unit: 10^{-5} s^{-1}), θ_{se} (contour, unit: K),
(b, d) divergence (shaded area, unit: 10^{-6} s^{-1}), wind field (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

直方向高层辐散特征还是非常明显。

对此时两次飊线前部(飊线移动的下游地区)的涡度、散度条件进行诊断,发现以下差异:(1)“威马逊”飊线的前部(28°N 以北)辐合特征减弱,900 hPa 甚至出现了辐散(图 10b 红圈所示);而“派比安”飊线的前部(26°N 以北),辐合中心值增大,辐合特征增强;(2)“威马逊”飊线的前部(28°N 以北),垂直涡度为负,而“派比安”飊线前部(26°N 以北),低层正涡度结构维持。这也可以解释为什么“威马逊”飊线北上的过程中,过了 28.5°N(7 月 18 日 21:00 以后)就迅速衰减,而“派比安”飊线 I 阶段北上的过程中仍维持强飊线阶段(8 月 2 日 20:00 以后),一直到 22:24 才衰减成多单体风暴。

随着飊线远离台风外围螺旋带母体,两次过程的飊线分别于 2014 年 7 月 18 日 21:20、2006 年 8 月 2 日 22:24 后进入了衰减阶段。“派比安”飊线衰

减为断裂的多单体后,随着台风低压倒槽北上后和西风槽在湘东北结合(图略),再次触发了飊线生成并发展。这和张云济(2010)统计研究得出的结论“温度较低的清晨和早间则完全没有台前飊线的生成”相异,“派比安”飊线 II 在有利的环境因素下于清晨(2006 年 8 月 3 日 01:00)再次生成。

5 结论与讨论

本文以两次强度存在一定差异的台风在湖南、江西造成的飊线过程为研究对象,对比分析了其雷雨大风实况的差异,从大尺度环流背景和飊线不同阶段(初生、成熟阶段)进行对比分析,得出以下结论:

(1)“威马逊”虽强度明显强于“派比安”,但产生飊线后者比前者影响范围更广、持续时间更长、“威马逊”飊线过程仅生成一次飊线,而“派比安”飊

线过程前后共生成两次飑线。

(2)“威马逊”飑线主要影响系统是台风倒槽、副高;而“派比安”飑线的主要影响系统是台风倒槽、副高、西风槽;副高位置的不同造成低空台风外围东南急流位置的差异,后次过程东南急流位置更有利于飑线的持续。

(3)飑线初生阶段,台风和副高南侧的东南气流提供了充沛的水汽;中低层处在明显的条件不稳定层结下;地面不稳定能量的积累与增加、CIN的减小,以上条件均为飑线的产生提供了一定有利的对流发展潜势;地面辐合线使得离散的对流单体组织发展成飑线;而初生阶段低层东南急流、地面辐合线位置的差异导致了两次过程飑线初生位置的不同;CAPE、CIN的差异预示着“派比安”飑线过程的对流性发展潜势强于“威马逊”台前飑线过程,维持时间更长,影响区域更大。

(4)飑线成熟阶段,地面变压场分析出,都有正变压,明显的冷池和温度梯度、气压梯度;但“派比安”飑线的冷池温度比“威马逊”飑线低,表征了前者的对流发展比后者强。垂直动力条件,“派比安”飑线低层正涡度和辐合、高层负涡度和辐散的结构非常清晰,动力条件强于“威马逊”飑线;和以往研究的西风带飑线不同,低层垂直风切变主要由风的方向变化所导致。

(5)这两次飑线的长度、持续时间、移动速度与Meng and Zhang(2012)、张云济(2010)统计的台前飑线对应特征值均有差别;“派比安”过程飑线Ⅱ阶段在清晨生成,和张云济(2010)统计研究的结论“温度较低清晨和早间则完全没有台前飑线的生成”相异。

另本文依旧有许多尚未解释的问题,比如TC究竟是以何种方式、在何种程度上对飑线的特征产生影响,在环境合适的情况下TC在飑线的生成过程中又是起到了怎样的动力学影响,TC的强度和飑线的强度是否会存在相互促进或抑制作用等,这些均有待于更详细和深入的工作。

由于深入内陆的台前飑线个例非常有限,且受到资料的限制,本文对比分析的部分结果不具有统计显著性,仅作为内陆的台前飑线研究的一项开创性工作,也是对台前飑线的有益补充。

参考文献

陈永林,王智,曹晓岗,等,2009.0509号台风“麦莎”登陆螺旋云带的增幅及其台前飑线的特征研究[J].气象学报,67(5):828-839.
丁青兰,秦勇,陈明轩,等,2006.局地强对流暴雨的多普勒天气雷达

个例分析[J].气象科技,34(3):286-290.
李娜,冉令坤,高守亭,2013.华东地区一次飑线过程的数值模拟与诊断分析[J].大气科学学报,37(3):595-608.
梁佳,丁治英,王瑜,等,2008.0509号台风“麦莎”外围飑线的数值模拟[J].科学技术:信息研究,(26):20-28,26.
刘佳,2012.台风“麦莎”的动力学特征与台风强度对台风前部飑线发展过程影响的研究[D].南京:南京信息工程大学大气科学学院:110-112.
刘佳,沈新勇,张大林,等,2013.台风“麦莎”的强度对台风前部飑线发展过程影响的研究[J].大气科学,37(5):1025-1037.
刘莲,王迎春,陈明轩,2015.京津冀一次飑线过程的精细时空演变特征分析[J].气象,41(12):1433-1446.
马中元,苏俐敏,湛芸,等,2011.一次强飑线及飑前中小尺度系统特征分析[J].气象,40(8):916-929.
农孟松,翟丽萍,屈梅芳,等,2014.广西一次飑线大风天气的成因和预警分析[J].气象,40(12):1491-1499.
孙虎林,罗亚丽,张人禾,等,2011.2009年6月3—4日黄淮地区强飑线成熟阶段特征分析[J].大气科学,35(1):105-120.
王秀明,俞小鼎,周小刚,2014.雷暴潜势预报中几个基本问题的讨论[J].气象,40(44):389-399.
王秀明,俞小鼎,周小刚,等,2012.“6.3”区域致灾雷暴大风形成及维持原因分析[J].高原气象,31(2):504-514.
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[J].气象,40(6):655-667.
叶成志,唐明晖,陈红专,等,2013.2013年湖南首场致灾性强对流天气过程成因分析[J].暴雨灾害,32(1):1-10.
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[J].大气科学,36(1):47-59.
俞小鼎,姚秀萍,熊庭南,等,2006.多普勒天气雷达原理及业务应用[M].北京:气象出版社:2-5,33-38.
张云济,2010.2007—2009年我国登陆台风台前飑线的统计特征[D].北京:北京大学:2-5.
郑丽娜,刁秀广,2016.一次华北飑线的阵风锋天气过程分析[J].气象,42(2):174-182.
郑媛媛,张雪晨,朱红芳,等,2014.东北冷涡对江淮飑线生成的影响研究[J].高原气象,33(1):261-269.
Blustein H B, Jain M H, 1985. Formation of mesoscale lines of precipitation: severe squall lines in Oklahoma during the spring [J]. J Atmos Sci, 42(16):1711-1732.
Laing A G, Fritsch J M, 2000. The large scale environments of the global populations of mesoscale convective complexes [J]. Mon Wea Rev, 128(8):2756-2776.
Meng Zhinyong, Yan Dachun, Zhang Yunji, 2013. General feature of squall lines in east China [J]. Mon Wea Rev, 141(2):1629-1647.
Meng Zhinyong, Zhang Yunji, 2012. On the squall lines preceding landfalling tropical cyclones in China [J]. Mon Wea Rev, 140(5):445-470.
Parker M D, Johnson R H, 2000. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems [J]. Mon Wea Rev, 128(10):3413-3436.
Powell M D, 1990. Boundary layer structure and dynamics in outer hurricane rainbands. Part I: Mesoscale rainfall and kinematic structure [J]. Mon Wea Rev, 118(4):891-917.