0577-6619/2009/67(5)-0828-39 *Acta Meteorologica Sinica* 气象学报

0509 号台风(Matsa)登陆螺旋云带的增幅及其台前飑线的特征研究*

陈永林[1] 王 智[1] 曹晓岗[1] 满莉萍[1] 朱龙彪[2]
CHEN Yonglin[1] WANG Zhi[1] CAO Xiaogang[1] MAN Liping[1] ZHU Longbiao[2]

1. 上海中心气象台,上海,200030
2. 宁波市气象台,宁波,315020
1. *Shanghai meteorology center*, *Shanghai* 200030, *China*
2. *Ningbo meteorology observatory*, *Zhejiang* 315020, *China*
2007-09-25 收稿,2008-03-20 改回.

Chen Yonglin, Wang Zhi, Cao Xiaogang, Man Liping, Zhu Longbiao. 2009. Characteristic analysis of the strengthening spiral bands and the preceding squall lines in association with the 0509 Typhoon "Matsa". *Acta Meteorologica Sinica*, 67(5): 828—839

Abstract The space-time characteristics of clouds, wind, and rainfall of the landfalling spiral bands of the 0509 Typhoon "Matsa" were analyzed quantitatively based on the FY-2C satellite, Doppler radar, wind profiler and auto weather station (AWS) observation data. The analysis shows there were six outer and inner spiral bands landfalling in East China. The spiral bands strengthened obviously with the minimum cloud top black body temperature declined by about 20.2 ℃ on average. The time span of the spiral bands from landfall to weakening was about 12.8 h and the interval between landfalls of the spiral bands was about 8.6 hours. When the outer spiral bands made the landfall, wind speed strengthened by about 2.0 m/s. The outer spiral bands brought about precipitation of averagely 19 mm and 75 mm in maximum. The inner spiral bands contributed to precipitation of about 139.6—174.2 mm and 396 mm in maximum. The wind speed strengthened by about 4.1 m/s evenly and 9.0 m/s in maximum during the landfall of the inner spiral bands. Several squall lines formed and separated from the front of the spiral bands during their landfall. The width of the squall lines was about 5 km with a large gradient, and the length varied from tens to hundreds kilometer. The echo reflectivity of the squall lines strengthened by about 5—10 dBz during landfall. The moving direction of the squall lines was the same as the typhoon, and the moving speed was about 46 km, 2.5 times of the typhoon. The squall line appeared like an arc with two or several chains in the radar echo, and the chains combined to be a large arc when the squall lines made landfall. There was slow wind with an inverse "V" or "S" shape in the radial velocity distribution of the Doppler radar echo. A confluence line between southeast and northeast winds appeared in the small-scale surface wind field. When the squall line passed through, the wind speed doubled and the wind direction changed by 47°—135°. It contributed to 6.9—29.1 mm precipitation and 90 mm maximum precipitation. The wind speed strengthened by about 4 m/s on average and 10 m/s in maximum. The maximum gust speed was about 26.4 m/s. The wind speed above 500 meter height was twice of that at ground surface. The gust zone can extend into the upper levels of the troposphere.
Key words Typhoon, Spiral Bands, Squall Line, Ahead, Typhoon, Strengthening

摘 要 利用 FY-2C 卫星、Doppler 雷达、风廓线和加密自动站等资料,对 0509 号台风"Matsa"(以下简称 Matsa)螺旋云带登陆过程中云、回波、风雨等时空分布特征量进行了深入的研究,对螺旋云带、飑线风雨增幅进行了定量分析。结果表明:Matsa 先后有 6 条外、内对流螺旋云带登陆并影响中国大陆,对流螺旋云带登陆过程中增幅显著,云顶最低亮温平均下降 20.2 ℃,螺旋云带登陆至减弱维持时间 12.8 h,登陆间隔 8.6 h。外螺旋云带登陆时风速增幅 2.0 m/s,最大增幅 4.1 m/s。同时可带来

* 资助课题:国家科学技术部和上海市科委共同资助的"世博专项"项目(2005BA908B15,05DZ05815):"灾害天气短时临近预报预警业务系统建设与改进"和上海市气象局预报员专项(2005y6):"登陆台风螺旋带风雨的增幅研究"。
作者简介:陈永林,主要从事天气分析和预报研究。E mail:yl-901@163.com

平均 19 mm、最大 75 mm 的降水量。内螺旋云带登陆时风速增幅 4.2 m/s,最大增幅 9.0 m/s,最大瞬时风速达 30.2 m/s,同时可带来 139.6—174.2 mm、最大 396 mm,1 h 最大降水 59.8 mm。对流螺旋云带在登陆过程中,在其前沿部位不断有台前飑线向外分离,台前飑线的回波宽度一般在 5 km 左右,回波梯度特大,长度从几十公里到几百公里不等,登陆时回波增幅 5—10 dBz。台前飑线的移动方向与台风移动方向基本一致,移动平均 46 km/h,是同时刻台风时速的 2.5 倍。台前飑线的形成特点为先出现双链或多链小弧弓形回波,在登陆中演绎成大弧。在速度图上,台前飑线中分布着倒 V 型或 S 型零速度线。在地面小尺度风场上,表现出具有东南与东北风向辐合线,切变辐合甚至涡旋扰动的特征非常显著。飑线过境时,风向扰动 47—135°,风速增大 1 倍以上,地面瞬时风速平均增幅为 4 m/s,最大可达 10 m/s。瞬时极大风速 26.4 m/s,同时可带来 6.9—29.1 mm、最大 90 mm 的降水量。500 m 以上的风速比近地面大 1 倍,大风区厚度可伸展至对流层上部。

关键词 台风,螺旋带,台前,飑线,增幅

中图法分类号 P458.1+24

1 引 言

台风可分为螺旋带风雨和内墙风雨。如 0012 号 Prapiroon 台风尚在福建以东海面,数百公里外的江苏便发生了特大暴雨。李英等(2007)在对 9406 号台风"Tim"分析中指出,"Tim"在福建登陆不久,1000 km 外的河南、河北等地暴雨频发。0509 号台风"Matsa"还在台湾以东海域时,淮河流域及以南地区已暴风骤雨不断(图 1a)。其中 2005 年 8 月 6 日上午浙江舟山金塘和东亭的极大风速分别达到 49.1 和 49.2 m/s,上海南汇芦潮港也达到 37 m/s。6 日 08 时—7 日 08 时浙江的宁波北仑柴桥镇水文站 24 h 雨量 589 mm(超过百年一遇),舟山金塘 538 mm(创 1953 年建站以来记录),上海徐家汇 213.7 mm。已有研究对台风螺旋云雨带(朱佩君等,2005;陈子通,2003;Wang,2002a,2002b)及其中尺度结构特征(骆荣宗,1997;Yamasaki,2005;陈永林等①,2008)做了详细的分析,对台风 Matsa 风雨分布特征、成因及中尺度系统结构等特征也有一些研究结果(何立富等,2006;张寒等②,2006;陈云蔚等③,2006;董美莹等,2006;冀春晓等,2007;李英等,2004),但未见对螺旋带增幅和台前飑线做定

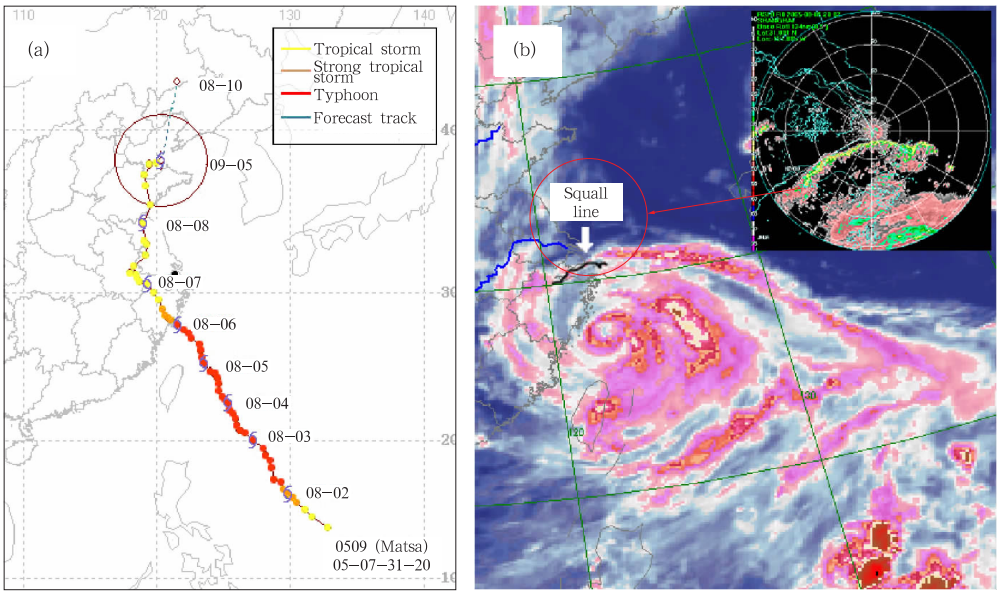

图 1 0509 台风"Matsa"路径(a)和 2005 年 8 月 5 日 20 时红外云图及同时刻(20 时 02 分)上海 WSR-88D 雷达反射率因子(b)

Fig. 1 (a) The track of the 0509 typhoon "Matsa", where yellow, rosy and carmine curves denote tracks tropical cyclone, strong tropical cyclone, and typhoon, respectively, and the blue curve denotes forecast track. (b) Sketch of the satellite IR cloud and Shanghai WSR-88D radar base reflectivity at 20:02 BST 5 August 2005

① 陈永林,王智,杨引明. 2008. 0509 号麦莎台风次天气尺度系统的非对称性结构特征分析. 大气科学研究与应用,2008 (1):9-17

② 张寒,庞盛荣. 2006. 台风麦莎(0509) 陆上长久维持诊断分析. 浙江气象,28(1):9-13

③ 陈云蔚,朱渭龙等. 2006. "麦莎"台风过程回顾及地形对台风降水影响. 浙江气象,27(1):1-9

量研究。陈联寿等在论述“登陆热带气旋研究的进展”中指出,登陆热带气旋研究已经成为热带气旋研究中一个新的领域,新的探测技术能初步揭示出热带气旋登陆过程中发生的多种改变。Matsa 是近年来沪、浙地区筹建高密度自动站以来最为典型的非对称、多螺旋云带登陆台风,是研究螺旋云带风雨特征不可多得的个例。本文通过对 FY-2C 卫星、多普勒雷达、风廓线和加密自动气象站等探测资料,重点研究 Matsa 螺旋云带登陆过程中的云带、回波和风雨等时空变化。目的在于对螺旋云带、台前飑线登陆时风雨增幅有一个初步的定量概念。分析表明,从 4 日早晨到 6 日下半夜共有 6 条螺旋风雨带在向北传播中影响了苏、沪、浙地区,登陆时风雨增幅显著,其中第 3、4 条登陆对流螺旋云带在其前沿频繁产生台前飑线(图 1b)。

2 螺旋云带特征分析

台风螺旋云带是由对流旺盛、环绕台风中心排列规则的积云体组成,是一个宽约几十至几百公里、长约数千公里,高可伸展至对流层顶部的中尺度对流系统。螺旋云带随台风移动,同时绕台风中心旋转,风雨带之间存在着下沉运动间隙区。所以,台风来临时风雨以阵性为特征。螺旋云带经过时会造成气压下降、风速增大、风向随之急转等现象。螺旋云带的运动有两种方式:(1)整条螺旋云带在台风中心附近作顺时针沿径向外传,螺旋云带较多产生在前半圆,尤其是在运动方向的右前象限;(2)螺旋云带内回波单体按气旋性环流向台风中心作切向运动,新的单体在螺旋云带上风端形成和发展,移到下风端后消失,在雨带的上风端又不断产生新的单体向内移进,而此时螺旋云带整体却在沿径向向外传播。从实际探测跟踪并结合动力学矢量分析方法发现:Matsa 以第 1 种方式登陆沪浙地区,并爆发台前飑线。在台风移动右前方,台风螺旋云带和台前飑线的径向移动方向与台风移动方向一致,特别是台前飑线脱离对流螺旋云带母体后向外扩展速度加快。

2.1 登陆螺旋云带

分析 FY-2C 卫星图像发现,Matsa 自 7 月 31 日在菲律宾以东洋面上生成,至 8 月 7 日 02 时在皖南减弱为热带风暴,始终保持着非对称、多螺旋结构。从 4 日早晨进入台湾以东海域,到 6 日早晨登陆浙江,螺旋云带在围绕台风中心向外传播中,先后有 6 条登陆并影响了苏、浙、沪地区。需要指出的是,螺旋云带在登陆过程中,均有不同程度的增强现象。

首条登陆螺旋低云带:Matsa 的首条登陆螺旋云带为低云带。该低云螺旋云带于 4 日 07 时在闽浙沿海登陆,登陆时云顶最低亮温 −34 ℃(图 2a),当天下午在向外传播中与西风槽云系相遇。由于两个不同性质气团交界面存在着显著的斜压效应,对流得到强烈发展,当天上半夜在江苏境内发展形成一个中尺度对流复合系统(MCS),4 日 21 时对流发展最为旺盛,云顶最低亮温达 −85 ℃(图 2b),云顶最低亮温下降了 51 ℃,云顶亮温≤−52 ℃的长轴直径在 230 km 以上。该登陆低云螺旋带于 5 日 04 时脱离台风主体演变为西风槽云带。所以,第 1 条登陆螺旋云带的生命史应为 21 h。

当第 1 条螺旋云带于 4 日 15 时到达江苏境内时,第 2 条对流螺旋带于 4 日 15 时登陆浙江宁波。4 日 13 时登陆前云顶最低亮温 −55 ℃(图 2c),登陆后的 4 日 16 时 30 分发展到 −71 ℃(图 2d),3 h 云顶降温 16 ℃。云顶亮温<−32 ℃的区域在 300 km 以上,最后于 4 日 23 时在江苏境内与第 1 条螺旋云带合并。该登陆对流螺旋带生命史为 8 h。

Matsa 的第 3 条登陆对流螺旋带于 5 日 06 时在浙江中部登陆,登陆前云团已发展旺盛,云顶最低亮温 −77 ℃,所以登陆不久就趋减弱。但紧邻的另一条对流螺旋云带于 5 日 10 时登陆浙江中部,5 日 09 时登陆前 1 h 云顶最低亮温 −54 ℃(图 2e),5 日 14 时下降到 −77 ℃(图 2f),5 h 降温 23 ℃,云顶亮温≤−52 ℃的长轴在 350 km 以上。最后于 5 日 20 时在浙西北内陆减弱。该登陆对流螺旋云带生命史为 10 h。

第 4 条登陆对流螺旋云带:Matsa 的第 3 条登陆对流螺旋带是一环围绕台风中心长达一周半的特强螺旋云带,外螺旋带的东半圈始终活动在琉球群岛的黑潮海域,能量供给充足,对流云带维持旺盛状态。因此,Matsa 的第 3 条登陆对流螺旋带在浙西北内陆减弱时,它的东半圈于 20 时 30 分从杭州湾以东登陆上海,成为第 4 条登陆对流螺旋带。5 日 19 时 30 分登陆前云顶最低亮温 −41 ℃(图 2g),5 日 21 时登陆时达到 −53 ℃(图 2h),登陆前后降温 12 ℃。最后于 6 日 01 时进入江苏后减弱消散。生命史为 5 h。分析雷达图像发现,在该对流螺旋带的前沿爆发出一条台前飑线。

第 5 条登陆对流螺旋云带:当 Matsa 的第 4 条登陆对流螺旋云带于 20 时 30 分从杭州湾以东登陆

上海时,第 5 条登陆对流螺旋云带于 5 日 21 时也从东海登陆浙北(图 2i),两者几乎同时登陆。第 5 条登陆对流螺旋云带登陆前云顶最低亮温 −46 ℃。由于该对流螺旋云带登陆时与外界被第 4 条阻隔,能量得不到交换,对流未能充分发展,5 日 22 时登陆后云顶亮温仅下降到 −56 ℃(图 2j),降温 10 ℃。最后于 6 日 08 时在苏南减弱消散。生命史为 11 h。

第 6 条登陆对流螺旋云带:Matsa 的第 6 条登陆对流螺旋云带由台风内墙演变而来,于 6 日 02 时在浙中登陆,6 日 02 时登陆时云顶最低亮温 −91 ℃(图 2k),登陆后 6 日 07 时降至 −100 ℃(图 2l),5 小时降温 9 ℃,虽然螺旋云带增幅不大,但 −90 ℃的云顶亮温面积扩大近 10 倍。Matsa 的内墙云系登陆后先增强后发散演变为螺旋云带,6 日 09 时越杭州湾再次登陆上海,7 日 00 时在江苏减弱,生命史 22 h。该对流螺旋云带是造成沪浙地区台风强风雨的主要天气系统。

可见,Matsa 共有 6 条螺旋云带登陆并影响了苏、沪、浙地区,登陆过程中云顶最低亮温平均下降了 20.2 ℃。对流螺旋云带自登陆至减弱消散的时间 5—22 h,平均 12.8 h。螺旋云带登陆间隔 1—15 h,平均 8.6 h。

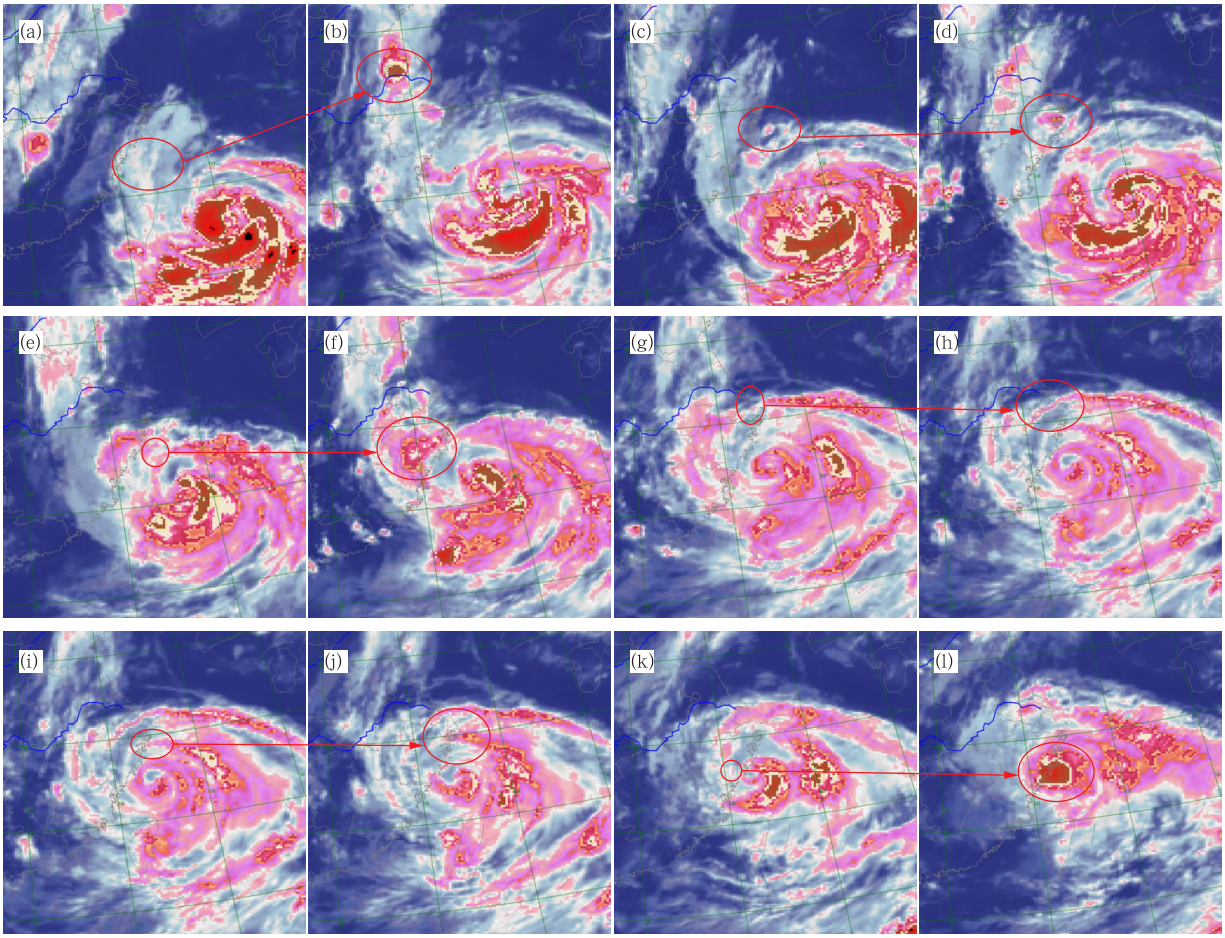

图 2 2005 年 8 月 4—6 日台风"Matsa"部分登陆对流螺旋云带的对比图像

(a. 4 日 07 时,b. 4 日 21 时.,c. 4 日 13 时,d. 4 日 16 时,e. 5 日 09 时,f. 5 日 14 时,g. 5 日 19 时,h. 5 日 21 时,i. 5 日 21 时,j. 5 日 22 时,k. 6 日 02 时,l. 6 日 07 时,标记区域为对流螺旋云带登陆前后增幅对比)

Fig. 2 Comparison of IR cloud images of partially landfalling convective spiral bands in 07:00 BST (a), 21:00 BST (b), 13:00 BST (c), 16:00 BST (d) 4 August, 09:00 BST (e), 14:00 BST (f), 19:00 BST (g), 21:00 BST (h), 21:00 BST (i), 22:00 BST (j) 5 August, and 02:00 BST (k), 07:00 BST (l) 6 August 2005, where the circled areas indicate the spiral bands before or after landfall

2.2 登陆台前飑线

飑线是指风向、风速的不连续带,沿着飑线侧向排列着许多雷暴对流单体,可发生雷暴、暴雨、大风、冰雹,甚至龙卷风等剧烈天气现象。实践表明,飑线

源自于大尺度天气系统中对流泡的强烈爆发和快速向前移动,从中分离出来的中尺度对流天气系统。台前飑线与西风带锋前飑线物理意义相同,但图像和移动方向相反。

分析 4—6 日 850—500 hPa 假相当位温发现,在台风前沿 3 个纬度内,850 和 700 hPa 假相当位温差平均为 12 ℃,850 和 500 hPa 差达 20 ℃,斜压效应相当显著(图 3),期间以 5 日 20 时锋区最强。

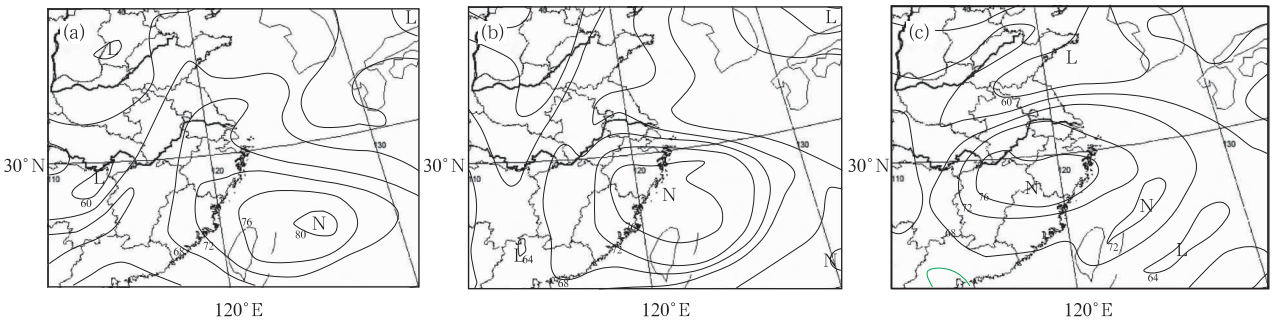

图 3 2005 年 8 月 4 日 20 时—6 日 20 时 850—500 hPa 假相当位温

(a. 4 日 20 时 850 hPa,b. 5 日 20 时 700 hPa,c. 6 日 20 时 500 hPa,图中等值线间隔 4℃)

Fig. 3 Pseudo-equivalent potential temperature at (a) 850 hPa at 20:00 BST 4 August, (b) 700 hPa at 20:00 BST 5 August, and (c) 500 hPa at 20:00 BST 6 August 2005

由于斜压作用,表现在华东 Doppler 雷达拼图和上海单站 Doppler 雷达基本反射率因子图像上,5—6 日从台风前方螺旋带北部边缘频繁向外爆发、分离出台前飑线(图 4、图 5)。较为典型的台前飑线分别发生于 5 日下午浙中沿海、5 日傍晚和上半夜的浙北沿海及 6 日上午江苏长江北岸、6 日下午淮河中上游等 5 条。在此,对前 3 条演绎复杂、登陆增幅显著的台前飑线作较详细分析。

第 1 条台前飑线:当 Matsa 的第 3 条对流螺旋云带于 5 日中午前自东向西在浙江中部登陆时,12 时 54 在它前沿开始出现带状排列的对流泡(图 4a),之后迅速发展成弓状回波,最大强度 45 dBz,弧长在 200 km 以上,弧宽 5 km 左右。5 日 14 时 06 分增强到 55 dBz,增幅 10 dBz,随后在沿海不断新生弓状回波,成为双弓或多弓链式回波带。16 时 18 分多弓回波带与母体完全分离,即第 1 条台前飑线发展成熟(图 4b)。此后,随着多弓回波带的登陆逐渐演绎拉长为单弓状回波带后进入杭州湾。该台前飑线于 5 日 18 时从杭州湾登陆上海,1 h 后因远离对流螺旋云带主体,在浙江西北部减弱消散。该台前飑线的移动方向与台风一致,与对流螺旋云带分离后,加速前进,不但比台风主体移速快,而且也比对流螺旋云带快。该台前飑线从 12 时 54 分在浙江石浦出现对流泡,至 18 时从杭州湾登陆上海,5 h 内移动190 km,移速达 38 km/h,而同时刻的台风仅 18 km/h,即飑线的时速是台风的 2 倍多。

第 2 条台前飑线:正当第 1 条台前飑线在浙西北地区减弱时,5 日 17 时 24 分在浙北沿海台风前方螺旋云带北部边缘又新生带状排列的对流泡(图 4c),17 时 42 分形成小弧多弓状回波带,回波最大强度 45 dBz,弧长在 200 km 以上,弧宽 5 km 左右。19 时 18 分进入杭州湾与螺旋云带主体完全分离,即第 2 条台前飑线发展成熟(图 4d),回波最大强度 55 dBz,比登陆前增幅 10 dBz,5 日 20 时后从杭州湾登陆上海,6 日 03 时前后在西进到达安徽长江段时减弱消失。该台前飑线从 17 时 24 分在浙江普陀出现对流泡,至 19 时 18 分进入杭州湾,在不足 2 h 的时间内移动 80 km,而同时刻的台风移速仍为 18 km/h,即飑线的时速也是台风的 2 倍多。

第 3 条台前飑线:当第 2 条台前飑线正影响上海一带时,5 日 20 时 19 分在浙北沿海台风前方螺旋云带北部边缘再次新生带状对流泡(图 5a),随后迅速发展加强与母体分离,21 时 58 分发展成为台前飑线(图 5b),回波最大强度 45 dBz,弧长 200 km 以上,弧宽 5 km 左右。5 日 23 时 32 分,该台前飑线正在影响上海(图 5c)。有意义的是,该台前飑线在向西北登陆过程中,它的前沿短弧多弓合并演变为长弧,最后当整条飑线登陆时演变为单长弓(图 5d)。而且,多弓状对流回波带在登陆过程中略有增强,登陆前回波最大强度 45 dBz,登陆过程中增强

到 50 dBz 以上。该台前飑线从 20 时 19 分在浙江象山出现对流泡,至 21 时 58 分到达杭州湾北部,在不足 1 小时 40 分内移动 100 km,此时的台风移速仍为 18 km/h,即飑线的时速是台风的 3 倍多。

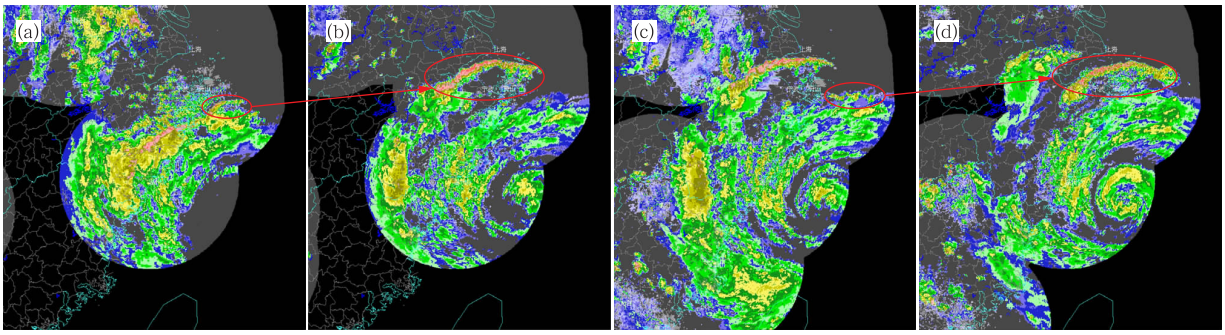

图 4 华东 Doppler 雷达拼图 0.5°基本反射率因子图像

(a. 2005 年 8 月 5 日 12 时 54 分,b. 5 日 16 时 18 分,c. 5 日 17 时 24 分,d. 5 日 19 时 18 分。图中标记区域为在对流螺旋回波带母体前沿生成和发展分离后的台前飑线)

Fig. 4 Radar reflectivity assemble at 0.5° elevation in East China at (a) 12:54 BST, (b) 16:18 BST, (c) 17:24 BST, (d) 19:18 BST 5 August 2005, where the circled areas indicate the squall lines which formed, developed and separated in the front of the convective spiral bands

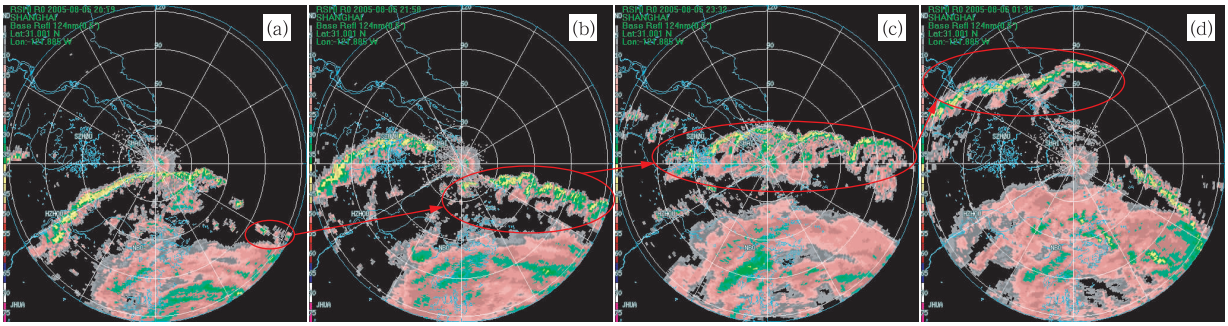

图 5 2005 年 8 月 5 日上海 WSR-88D 雷达 0.5°基本反射率因子台前飑线图像

(a. 5 日 20 时 19 分,b. 5 日 21 时 58 分,c. 5 日 23 时 32 分,d. 6 日 01 时 35 分。图中标记区域为台前飑线在对流螺旋回波带母体前沿生成和发展分离演绎过程)

Fig. 5 Echo of the squall line ahead of the typhoon in the Shanghai Doppler radar reflectivity field at 0.5° elevation at 20:19 BST (a), 21:58 BST (b), 23:32 BST (c), 5 August, and 01:35 BST (d) 6 August 2005, where the circled areas indicate the squall lines which formed, developed and separated in front of the convective spiral bands

由上可见,台前飑线生成于台风前进方向、对流螺旋云带的前沿部位。胚胎形成后,在加速前进中与对流螺云旋带母体分离,移动方向保持与台风移动方向基本一致。移动平均时速达 46 km,是台风时速的 2.5 倍。台前飑线的形成特点是,先出现双链或多链小弧弓形回波,在登陆中演绎成大弧。台前飑线的回波宽度特窄,一般在 5 km 左右,回波梯度特大。当台前飑线远离对流螺旋带母体后,因能量得不到补给而快速减弱消失。

2.3 台前飑线在径向速度图中的二维风场

分析上海 Doppler 雷达径向速度图发现,台前飑线内有较强的涡旋扰动存在,台前飑线登陆时风速增幅显著。

2.3.1 风场与飑线走向一致

在 5 日 20 时 02 分基本反射率因子图上,一条由 40 dBz 以上的弓状对流回波带构成的台前飑线,正从杭州湾水面欲登陆上海。在同时刻的径向速度图上,是一条入流速度 25—32 m/s,出流速度 13—18 m/s 的强风带,中间速度大于两侧,气流自东海向杭州湾流动;经过 4 个体扫后的 20 时 25 分,弓状对流回波带登陆上海南郊,在回波带中出现较大面积 50 dBz 的回波区,说明回波带在登陆过程中由于

下垫面由平滑过渡到粗糙,地形扰动使对流有一个明显的增强过程。在 20 时 25 分径向速度图上,原从杭州湾登陆上海 13—18 m/s 的出流区增强到 18 m/s,说明登陆时风速也有一个显著的增强过程。Matsa 除了单弓状台前飑线外,更多的台前飑线是以多弓连接为特点。5 日 23 时 43 分位于上海北部一带,以东西走向的飑线就是一个较典型的多弓连接飑线,表现在同时刻的径向速度图上,也是多弓连接的风场。由此说明,台前飑线对流与台前飑线风场分布具有一致性。

可见,台前飑线实际上是一条强风、强雨带,风带与强对流回波带走向一致,风速大小与飑线上对流强度相对应,中间风速强于两侧,飑线登陆时受下地面扰动作用,风场有一个增大过程,增幅在 5 m/s 左右。

2.3.2 台前飑线中的小尺度涡旋

Doppler 雷达径向速度是建立在假设大气中存在丰富降水粒子的基础之上,还受到探测距离等因子的影响。由于台前飑线的前方往往是晴空无云区,所以探测台前飑线中的小尺度扰动较为困难,但在 5 日夜间上海 Doppler 雷达径向速度图上还是探测到了飑线内多个小尺度扰动的存在。

在 5 日 23 时 08 分的反射率因子图像上,在上海及以东海面上分布着由 4 个弓状回波首尾相接、且已从对流螺旋云带中分离出来的台前飑线,在雷达东北象限的长江口横沙岛东部是其中一个首尾相连的两弓接点。对应在同时刻的径向速度图上,在两弓接点处出现一个呈倒 V 型的零速度线图形,该图形自形成至减弱维持时间长达 8 个体扫,直至 23 时 55 分以后才消失,生命期 47 min。

6 日 04 时 41 分,从长江口东部海面又移进一对首尾相接的弓状回波带,对应在同时刻的径向速度图上,在雷达东北象限的长江口东部,也是一个零速度线呈倒 V 型图形。其中 04 时 47—59 分为 S 结构。该图形持续到 05 时 22 分以后才消失,生命期 41 min。

6 日 06 时 38 分,在长江口北水道东部出现一对首尾相接的弓状对流回波带,在同时刻的径向速度图上,在雷达东北象限的长江口北水道东部也出现一个零速度线呈倒 V 型图形,该图形自 6 时 26 分开始形成,到 8 时 12 分才结束,持续近 2 h。

由径向速度分析规则可知,径向速度图中零速度线呈倒 V 型或 S 型的图形对应的是流场的切变辐合甚至是涡旋流场。说明,小尺度扰动确实存在于台前飑线之中。

2.4 台前飑线的风场的垂直结构

5 日 17—22 时 30 分台前飑线影响青浦时的风廓线(图 6a)显示,21 时之前青浦为正东风,21 时 30 分突然转为东北,22时又转为东南,22时30分又

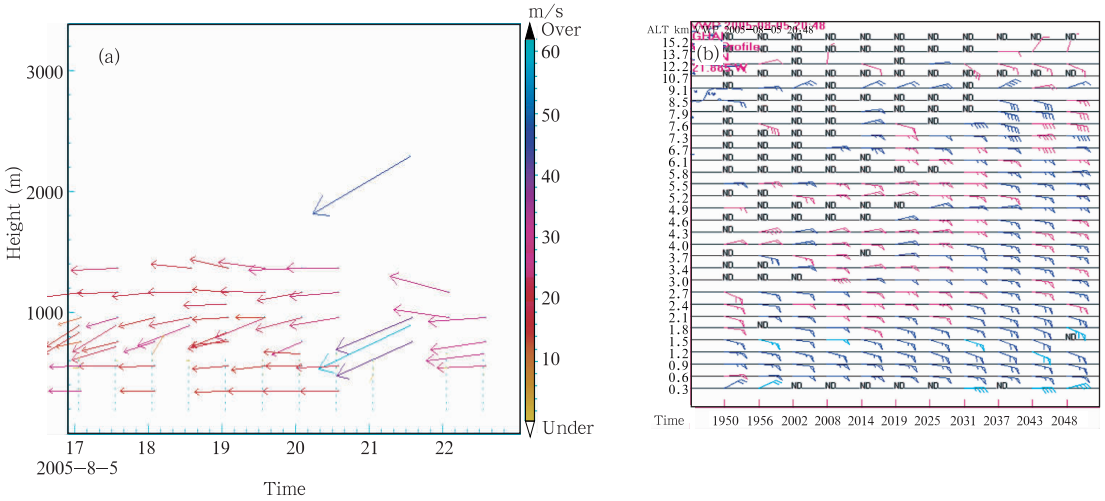

图 6 2005 年 8 月 5 日 17—23 时青浦风廓线垂直风分布(a)和 19 时 50 分—20 时 48 分上海 WSR-88D 雷达 VWP 图(b)

Fig. 6 (a) Vertical wind profile observed by the wind profiler at Qingpu station from 17:00 to 23:00 BST 5 August 2005. (b) Vertical wind profile (VWP) from 19:50 to 20:48 BST 5 August 2005 from Shanghai WSR-88D radar, the unit of the y-axis in (b) is km

恢复为东风,台前飑线过境时风速增大了1倍以上,而且风层抬高。表明台前飑线过境时,多个层面上的风速都出现了明显的增大,垂直方向上扰动增强。这一现象在6日05—08时第2条次天气尺度系统影响青浦时,风速同样迅速增大,在500 m以上的风速比近地面大1倍。

从上海Doppler雷达VAD风廓线图像(VWP)(图6b)可见,尽管VWP产品反演的是雷达站周围20 km范围内的风场情况,但当螺旋对流带移近雷达站时,5日20时19分前后VWP图像上3000—8400 m的风向发生了由东北向东南旋转,旋转角度不小于90°。这与青浦风廓线雷达所得数据基本一致。

可见,台前飑线过境时风向发生了由东北向东南的明显突变,风层厚度可伸展至对流层上部,风速增大1倍以上,500 m以上的风速比近地面大1倍。

3 螺旋云带、飑线风雨增幅分析

台风螺旋云带宽度常在几十至几百千米、长度数千千米,影响时间在1 h至数小时不等,属大尺度天气系统,以若干代表站1 h风雨平均值走势,分析螺旋云带影响时的风雨增幅特征。而台前飑线宽度常在几至几十千米、长度数百千米,影响时间在几分至几十分钟,属中小尺度天气系统,因此以其基本采样资料(宁波10 min、上海6 min),分析风雨的增幅特征。

3.1 螺旋云带风雨增幅

3.1.1 螺旋云带风雨对宁波的影响

Matsa螺旋风雨带对宁波地区的影响开始于4日15时,结束在7日05时(图7a)。Matsa的首条螺旋云带于4日07时在闽浙沿海登陆,4日06—11时宁波地区平均风速从1.7 m/s增大到4.2 m/s,增幅2.1 m/s。其中胜山从1.9 m/s增大到5.8 m/s,增幅3.9 m/s。由于该螺旋云带在移经沪浙地区时维持纯低云,因此宁波、上海均无雨。

第2条对流螺旋云带于4日15时登陆浙江,4日13—16时宁波风速从3.8 m/s增大到5.4 m/s,增幅1.6 m/s。其中昌国盐场从4.6 m/s增大到8.4 m/s,增幅3.8 m/s。随后风速减小,雨量却增大,16—20时每小时雨量在2.0—4.8 mm,累计14.8 mm。望海岗15—20时每小时雨量在1.0—34.7 mm,累积降水63.7 mm。

第3条登陆对流螺旋带于5日6时在浙中登陆,宁波地区5日08—13时风速从6.1 m/s增大到8.4 m/s,增幅2.3 m/s。其中昌国盐场从10.7 m/s增大到15.2 m/s,增幅4.5 m/s。随后风速减小,雨量却增大,13—17时每小时雨量在1.5—5.9 mm,累计22.7 mm。芝山13—17时每小时雨量在1.0—40.1 mm,累积降水86.0 mm。

第4—6条对流螺旋云带由内墙发展而来,对流螺旋云带之间空隙很小,在宁波的每小时风雨走势图上也较难区分开来。5日17时—6日08时风速从7.1 m/s增大到13.5 m/s,增幅6.4 m/s,昌国盐场5日16时—6日05时风速从11.6 m/s增大到22.5 m/s,增幅10.9 m/s。随后风速减小,雨量增大,该内墙螺旋带造成宁波5日18时—7日03时累计雨量174.2 mm,其中6日08—11时每小时雨量在9.2—11.2 mm。春晓累积降水396 mm,1 h最大降水59.8 mm。

3.1.2 螺旋带风雨对上海的影响

Matsa螺旋雨带于5日03时开始影响上海(平均雨量0.1 mm),7日06时结束(图7b)。

第1、2条登陆螺旋带对上海地区没有明显影响。

第3—5条对流螺旋云带主体对上海没有影响,螺旋带内爆发出的飑线对上海的影响在下节中讨论。

第6条对流螺旋云带系内墙中发展而来,6日15—18时对上海有明显的影响。上海风速从20.9 m/s增大到22.9 m/s,增幅2.0 m/s,嘉定6日15—19时风速从18 m/s增大到25.1 m/s,增幅7.1 m/s,金山6日20时达到30.2 m/s。该时段内上海地区平均累积降水139.6 mm,其中浦东179 mm。

可见,外螺旋云带仅对宁波产生了影响(2条),而内螺旋云带对宁波(4条)和上海(1条)均有影响。螺旋云带风雨以阵性为特征,一般情况先刮风后下雨,雨峰发生在风峰向风谷的过渡阶段。外螺旋云带使风速平均增大2.0 m/s,最大增幅4.1 m/s。同时,带来平均19 mm、最大75 mm的降水量;内螺旋

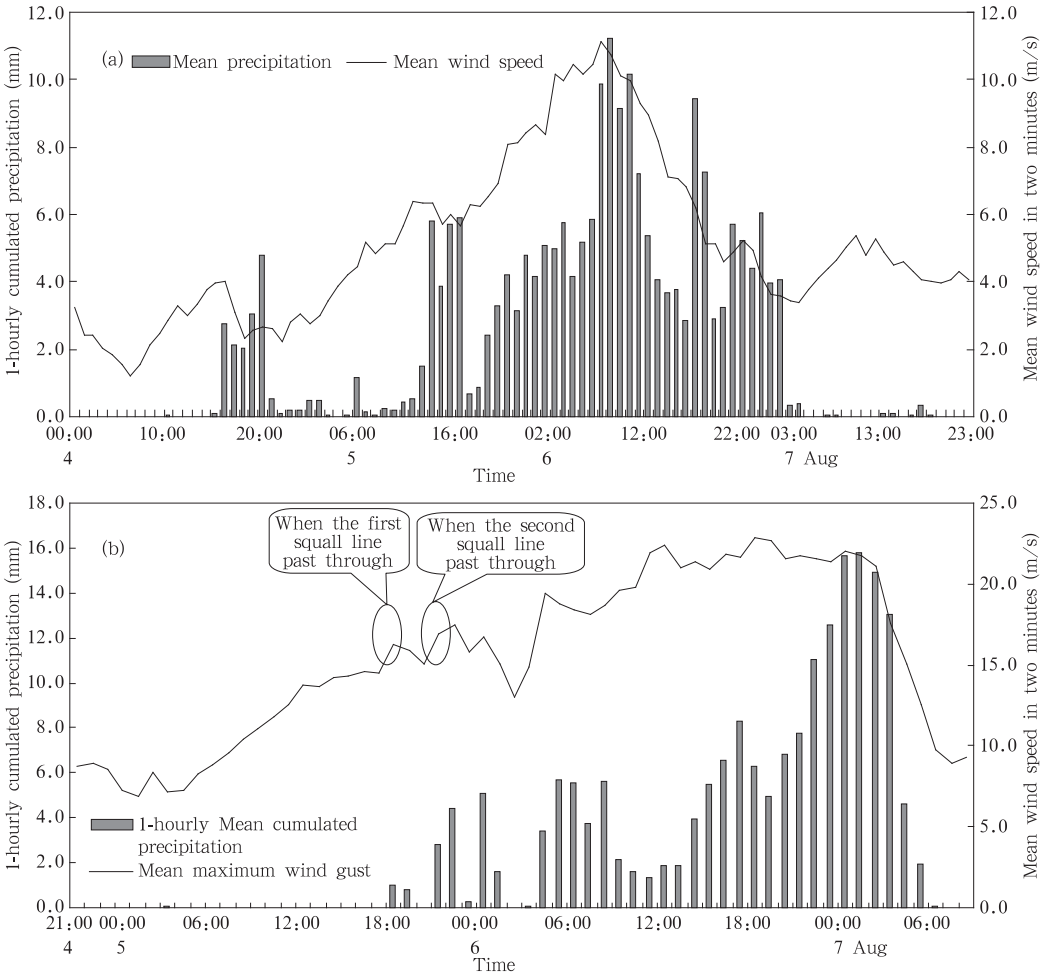

图 7 2005 年 8 月 4—7 日宁波 10 个自动站的每小时雨量平均值和 2 min 平均风速的变化趋势(a)以及上海 11 个自动站的每小时雨量平均值和 1 h 最大阵风的 11 站平均值变化趋势(b)

Fig. 7 (a) 1-h mean precipitation (bar) and 2-min mean wind speed (line) from 10 stations in Ningbo city (a) from 4 to 7 August, 2005. (b) As in (a), but from 11 stations in Shanghai

云带可使风速平均增大 4.2 m/s,最大增幅 9.0 m/s,最大瞬时风速 30.2 m/s。同时,带来 139.6—174.2 mm 的降水量,最大 396 mm ,1 h 最大降水 59.8 mm。

3.2 台前飑线风雨的增幅

3.2.1 飑线风雨对宁波的影响

从华东雷达反射率因子拼图和宁波 10 min 加密自动站风雨资料上看到,5 日 13 时 06 分—16 时 36 分台前飑线影响了宁波地区。13 时 06 分台前飑线从宁波东南海面进入国昌盐场,国昌盐场风向由前 10 min 的 58°顺转至 105°,20 min 后风向逆转回 82°。期间风速由 13.9 m/s 增大到 15.2 m/s,雨量 1 mm;14 时 20 分飑线进入南郊公园,风向由前 10 min 的 69°顺转为 116°,10 min 后逆转回 82°。期间风速由 3.3 m/s 增大到 7.7 m/s,雨量 9 mm;14 时 50 分飑线进入春晓,风向由前 10 min 的 148°顺转为 283°,10 min 后逆转至 163°,20 min 风向逆转回 125°。期间风速保持在 1.6—4.7 m/s,雨量 8.6 mm;15 时 10 分飑线的第 2 弓进入南郊公园,风向由前 20 min 的 7°顺转为 96°。期间风速保持在 1.2—2.7 m/s,雨量 9.9 mm。15 时 20 分飑线进入芝山,风向由前 10 min 的 43°顺转为 125°,20 min 后逆转回 89°,芝山累计雨量 90 mm。由于 30 min 前回波带就已靠近测站,风速由9.2 m/s增大到

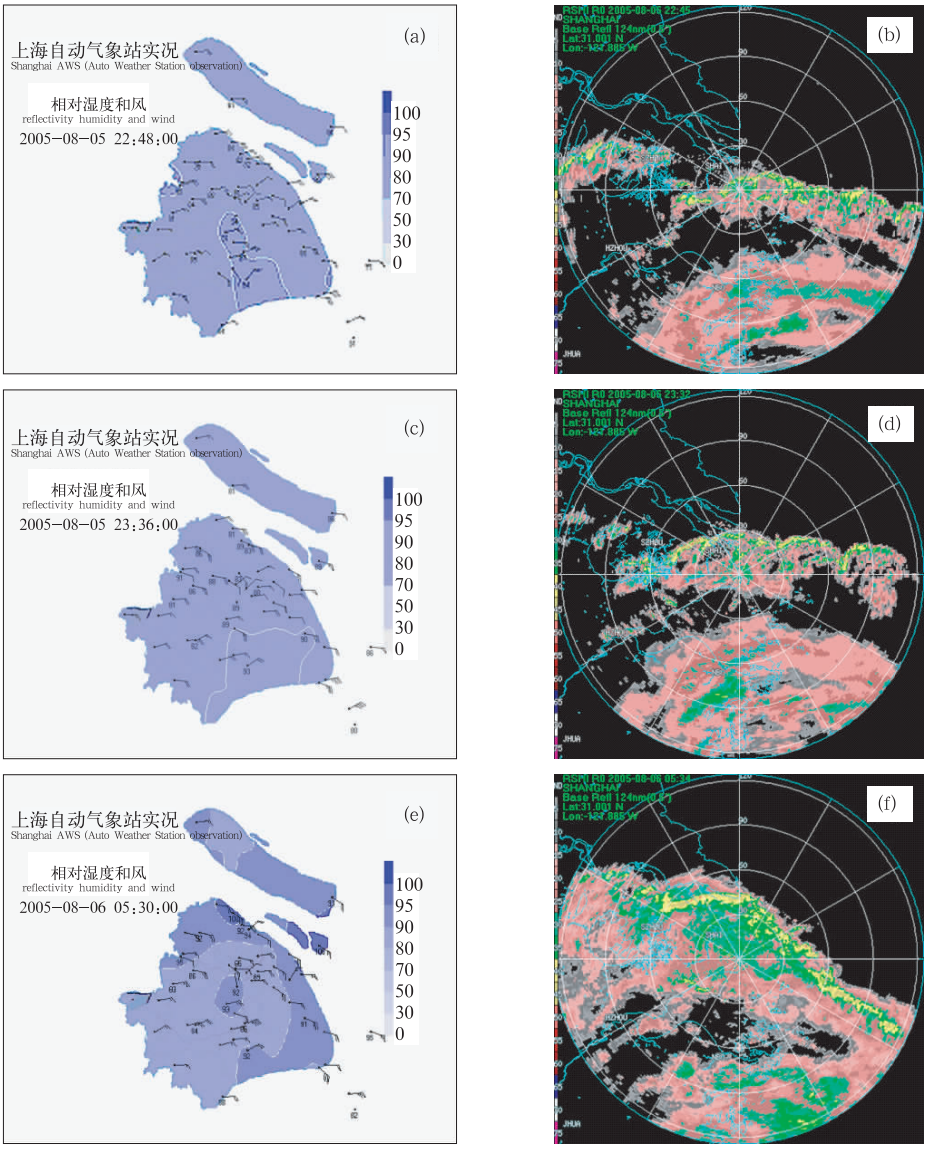

图 8 2005 年 8 月 5 日夜间上海自动站风场(a、c、e)和
上海 WSR-88D 雷达基本反射率因子图像(b、d、f)
(a、b. 5 日 22 时 48 分, c、d. 5 日 23 时 36 分,e、f. 6 日 5 时 30 分)

Fig. 8 Shanghai auto weather station wind observation (a,c,e) and Shanghai WSR-88D radar base reflectivity (b,d,f) of 22:48 BST (a,b), 23:56 BST (c, d) 5 August, and 05:30 BST (e, f) 6 August 2005

12.1 m/s,雨量 6 mm。

3.2.2 飑线风雨对上海的影响

从华东雷达反射率因子拼图和上海 6 min 加密自动站风雨资料上看到,5 日 18 时 00—30 分、20 时 06 分—22 时 06 分和 22 时 06 分—6 日 00 时 36 分,先后有 3 条台前飑线影响了上海地区。5 日 18 时弓状飑线自杭州湾登陆上海金山,18 时 30 分离开。金山 17 时瞬时风速 14.9 m/s,18 时突然增大到 26.4 m/s,增幅 11.5 m/s ,1 h 雨量 10.7 mm;20 时 06 分又一条弓状飑线自杭州湾登陆上海,20 时 18 分金山和芦潮港风向分别顺转 30°和 80°,风速增大 4 和 6 m/s,雨量分别为 27.3 mm 和15.6 mm;20 时 18 分奉贤顺转 40°,风速增大 4 m/s,雨量 22.5 mm;20 时 30 分闸港顺转 60°,风速增大 8 m/s,雨量7.4 mm;20 时 42 分浦东顺转 80°,风速增大6 m/s,雨量29.1 mm。21 时 00 分青浦顺转

60°,风速增大6 m/s,雨量 14.8 mm。

可见,宁波和上海共受到 4 条台前飑线的影响,飑线过境前风向多为东北风,过境时转为东南风,离开后又恢复为东北风。风向扰动角度在 47°—135°,平均 79°。平均风速增幅在 1.3—4.4 m/s,平均 2.7m/s。瞬时风速增幅 4—8 m/s,平均5.7 m/s,瞬时最大增幅 11.5 m/s,瞬时极大风速26.4 m/s。平均雨量 6.9—29.1 mm,最大雨量90 mm。

3.2.3 飑线过境时的风场特征

在 5 日 22 时 45 分上海雷达反射率因子图上,飑线正位于上海南部自东南向西北传播中(图 7),由于该飑线是由弧长极短的多个弓状回波首尾相接构成,结构复杂。所以在对应的 22 时 48 分上海加密风场图上,在上海东南郊和西南郊各有一个东南风与东北风的倒槽,在强回波带处风速扰动明显,瞬时风速增幅在 4 m/s 左右,23 时 12 分另一飑线过松江站时,瞬时风速从 4 m/s 增大到 14 m/s。23 时 30 分飑线到达长江口,浦东三闸港为东风 20 m/s,比前 6 min 增大 4 m/s,而三闸港下游的川沙站为东北风 4 m/s,风切变相当大,风速切变达 16 m/s。

可见,在弓状回波的首尾相接处,存在着东南与东北的风向辐合线,而且还有 16 m/s 以下的风速辐合存在。飑线过境时,瞬时风速平均增幅为 4 m/s,极大可达 10 m/s。

4 结论与讨论

通过对 0509 号台风"Matsa"螺旋云带登陆过程中云、回波、风雨等时空分布的深入分析,得到主要结果:

(1) Matsa 对流螺旋云带在登陆过程中增幅显著,并分离出多条台前飑线。云顶最低亮温平均降温 20.2℃,台前飑线对流回波增强 5—10 dBz。螺旋云带自登陆至减弱的维持时间 12.8 h,登陆间隔 8.6 h。

(2) 台前飑线生成于台风的前进方向、对流螺旋云带的前沿部位。移动方向保持与台风移动方向基本一致,移动平均时速 46 km,是同时刻台风时速的 2.5 倍。台前飑线的形成特点为先出现双链或多链小弧弓形回波,在登陆中演绎成大弧。台前飑线的回波宽度特窄,一般在 5 km 左右,回波梯度特大。当台前飑线远离对流螺旋云带母体后,因能量得不到补给而快速减弱消失。

(3) 台前飑线实际上是一条强风、强雨带,风带与强对流回波带走向一致,风速与飑线上对流强度相对应,中间风速强于两侧,飑线登陆时受下垫面扰动作用,风场有一个增大过程,增幅在 5 m/s 左右。

(4) 台前飑线过境时风向有东北向东南的明显突变,风速增大 1 倍以上,500 m 以上的风速比近地面大 1 倍,风层厚度可伸展至对流层上部。

(5) 螺旋云带风雨以阵性为特征,螺旋云带影响时一般情况先刮风后下雨,雨峰发生在风峰向风谷的过渡阶段。外螺旋云带影响时可使风速增大 2.0 m/s,最大增幅 4.1 m/s。同时,带来平均 19 mm、最大75 mm的降水量。内螺旋云带可使风速增幅4.2 m/s,最大增幅9.0m/s,最大瞬时风速达 30.2 m/s。同时可带来 139.6－174.2 mm,最大 396 mm,1 h最大降水59.8 mm。

(6) 飑线过境时风向扰动 47°—135°,风速增幅在 1.3—4.4 m/s,瞬时风速增幅 4—8 m/s,瞬时最大增幅 11.5 m/s,瞬时极大风速 26.4 m/s。同时可带来 6.9—29.1 mm,最大 90 mm 的降水量。

(7) 在弓状回波的首尾相接处,存在着东南与东北风向辐合线,而且还有 16 m/s 以下的风速辐合存在。飑线过境时,瞬时风速平均增幅为 4 m/s,最大可达 10 m/s。

References

Chen Lianshou, Luo Zhexian, Li Ying. 2004. Research advances on tropical cyclone landfall process. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 62(5): 541-549

Chen Zitong. 2003. Spiral bands analysis in landfall of the tropical cyclone "Huangfeng". J Tropi Meteor (in Chinese), 19: 56-64

Dong Meiying. 2006. Analysis of distribution and cause of wind gusts in Zhejiang during the influence period of the typhoon "Matsa" in land. Sci Technol Rev (in Chinese), 24(4): 29-31

He Lifu, Yi Jie, Chen Tao. 2006. Structural and peripheral heavy rainfall characteristics of the typhoon 0509 "Matsa". Mon Meteor (in Chinese), 32(3): 93-100

Ji Chunxiao, Chen Lianshou, Zhao Fang. 2007. A numerical study on sustaining of landfalling typhoon Matsa. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 65(3): 888-895

Li Ying, Chen Lianshou, Xu Xiangde. 2004. The characteristics of sub-synoptic scale circulation of tropical cyclones sustaining overland. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 62(3): 257-268

Li Ying, Wang Jizhi, Chen Lianshou. 2007. Study on undulant rainfall characteristics of the typhoon "Matsa". China Sci Bull (in Chinese), 52(3): 344-353

Luo Rongzong. 1997. Observation analysis of mesoscale spiral bands

and heavy rainfall of the typhoon 9012. J Tropical Meteor (in Chinese), 13(2): 173-179

Wang Yuqing. 2002a. Vortex Rossby waves in a numerically simulated tropical cyclone, Part I: overall structure, potentional vorticity, and kinetic energy budgets. J Atmos Sci, 59(7): 1213-1238

Wang Yuqing. 2002b. Vortex Rossby waves in a numerically simulated tropical cyclone, Part II: the role in tropical cyclone structure and intensity changes. J Atmos Sci,59(7): 1239-1262

Yamasaki. 2005. A study of the mesoscale structure of typhoon Flo (T9019): A case of COMPARE model intercomparison. J Meteor Soc, 83(6): 1057-1084

Zhu Peijun, Zheng Yongguang, Wang Hongqing, et al. 2005. Numerical simulation analysis on typhoon spiral rainfall bands. Chinese Sci Bull (in Chinese), 50(5): 486-494

附中文参考文献

陈联寿,罗哲贤,李英.2004.登陆热带气旋研究的进展.气象学报.62(5):541-549

陈子通.2003.登陆过程中热带风暴“黄蜂”螺旋云带的分析.热带气象学报,19:56-64

董美莹等.2006.“麦莎”台风影响期间浙江的大风分布特征和成因分析.科技导报,24,(4):29-31

何立富,尹洁,陈涛等.2006.0509 号台风麦莎的结构与外围暴雨分布特征.气象,32 (3):93-100

冀春晓,陈联寿,赵放.2007.登陆台风 Matsa 维持机理的数值研究.气象学报,65(3):888-895

李英,陈联寿,徐祥德.2004.登陆热带气旋维持的次天气尺度环流特征. 气象学报.62(3):257-268

李英,王继志,陈联寿等.2007.台风麦莎(Matsa)的波状降水特征研究.科学通报,52(3):344-353

骆荣宗.1997.9012 号台风中尺度螺旋雨带与暴雨的观测分析.热带气象学报,13(2):173-179

朱佩君,郑永光,王洪庆等.2005.台风螺旋雨带的数值模拟研究.科学通报,50(5):486-494