

Sepat 台风(0709)登陆过程中眼放大现象研究*

李 英¹ 钱传海² 陈联寿¹
LI Ying¹ QIAN Chuanhai² CHEN Lianshou¹

1. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京,100081

2. 国家气象中心,北京,100081

1. *State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*

2. *National Meteorological Center, Beijing 100081, China*

2009-01-31 收稿,2009-04-06 改回.

Li Ying, Qian Chuanhai, Chen Lianshou. 2009. A study on the eyewall expansion of Typhoon Sepat (2009) during its landfall process. *Acta Meteorologica Sinica*, 67(5):799 – 810

Abstract Structure change would occur when typhoons approach or cross an island, and that will usually give rise to their intensity change, track turns, and variations in associated high winds and heavy rains. A phenomenon of eyewall expansion related to Typhoon Sepat (0709) was found when it was crossing the Taiwan Strait. A study was conducted to investigate the causes of the eyewall expansion and its relationship with the typhoon intensity change using data from Shanghai Typhoon Institute, FY- II satellite remotely sensed images, Taiwan hourly radar echoes, and NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ reanalysis fields. It is found that (1) Sepat's eyewall actually broke down and dissipated after it made landfall at the island of Taiwan, but a new and expanding eyewall formed as soon as Sepat entered the Taiwan Strait and approached China mainland. It expanded into a big eye with about 600 km in diameter finally. (2) The eyewall expansion actually was a formation process of cloud band ring, which was composed by the diffused convective cloud clusters from the core region of typhoon and its spiral bands, It was associated with many factors including the decrease of underlying temperature, the weakening of unstable atmospheric stratification, the enhancement of outgoing winds, and expanding descending motion in typhoon core region, etc. (3) An arc humidity frontal zone occurred in the western periphery of the typhoon in lower layer due to the intrusion of dry air from environmental circulation. The front was favorable for the development of convection, but disadvantageous for the further expansion of eyewall clouds because of the descending motion on the dry side of the frontal. In this connection, diffused convective cloud clusters were organized by the circular typhoon circulation into an arc form near the front and joined the spiral cloud clusters in the eastern part of the typhoon circulation, leading to the form up of a ring eyewall. (4) The typhoon decaying was closely related to the typhoon eyewall expansion. Because condensational heating was weakened and the heating source was dispersed over the typhoon center in this process, the typhoon warm core couldn't be sustained, resulting in the decreasing of typhoon intensity. On the other hand, the input of environmental water vapor and energy was held back by the enhancing radial outflow of the typhoon in lower to middle layers, convection in the typhoon core region was thus attenuated.

Key words Landfalling typhoon, Eyewall expansion, Humidity front

摘 要 台风登陆过程中常发生结构变化,从而引起其强度、路径以及风雨分布等一系列变化,导致登陆台风灾害十分复杂。0709号台风 Sepat 在穿过台湾岛时结构变化明显,出现了台风眼放大现象。基于上海台风研究所台风资料、FY- II 卫星半小时一次的遥感资料、台湾雷达逐时合成回波图像以及 NCEP 每日 4 次 $1^\circ \times 1^\circ$ 格距的再分析资料,研究了 Sepat 登陆过程中的眼放大现象。结果表明:(1) Sepat 登陆台湾后眼墙塌陷,眼消失,但随后在从台湾海峡移向大陆过程中重新出现了台风眼并伴有眼放大现象,眼直径扩展至约 600 km;(2) 这种眼放大现象,实际上是台风内核区对流云团分裂扩散过程中与外围螺旋云

* 资助课题:国家重点基础研究发展规划项目(2009CB421504),国家自然科学基金项目(40675033,40730948),公益性行业(气象)科研专项(GYHY200706020)。

作者简介:李英,主要从事台风研究。E-mail:liyings@cma.gov.cn

带一起重新发展出的环状结构。台风眼的扩大与眼区下垫面温度降低、低层大气不稳定性减弱、径向外流加强、下沉运动区范围扩大等因素有关;(3) 在台风外围,环境干空气侵入台风环流并在其西部形成了弧状湿度锋。锋区既促进对流运动发展,也阻碍了台风眼区云团进一步向外扩散,使对流云团在锋区附近排列成半圆弧状云带,并在台风气旋性环流组织下与台风东部的螺旋云带一起形成了环状眼墙;(4) 台风的减弱消亡与其眼区放大现象密切相关。台风眼放大过程中,由于眼内干空气下沉范围加大、对流凝结潜热加热减弱,不利于暖心结构维持,台风强度亦随之衰减。同时,其增强的径向外流在一定程度上阻止水汽能量向台风内核区输入,促使台风内核对流运动的减弱和消亡。

关键词 登陆, 台风眼, 放大, 湿度锋

中图法分类号 P458.1⁺24

1 引言

台风眼是台风结构中最为显著的特征之一。眼内风速微弱,多数情况下为弱下沉运动,基本为无云或少云区。而紧靠眼区的台风眼墙内有强烈的对流运动,最大的降水常出现在这里,台风内最大风力也出现在眼墙内或离眼墙不远处。因此,台风巨大的破坏力常常由其眼墙区引起。同时,台风强度变化与台风眼结构变化及其动力过程密切相关。如台风发展程度与其眼的外形和直径就有一定关系。台风生成初期,其眼是不规则的,范围也较大,而发展愈强的台风,眼的外形愈对称,大多数台风眼的直径也愈小(陈联寿等,1979)。用一个简单的 Sayer-Eliassen 模式就能较好地解释涡旋加强过程中眼的收缩现象(Shapiro, et al, 1982)。台风强度的明显变化还与同心双眼墙的替代过程相关。外眼墙的增强和向内传播通常可抑制并逐步代替内眼墙的对流发展,在此过程中台风先减弱随后加强(Willoughby, et al, 1982, 1990; 陈善敏, 1986; Blackwell, 2000)。Wang(2002)研究了热带气旋部分眼墙的替代过程,指出来自外螺旋雨带的扰动可加强眼墙内的涡旋 Rossby 波,使眼墙变形而部分塌陷并伴随着强度减弱,但塌陷的眼墙随后可通过轴对称化过程恢复,又使热带气旋强度加强。可见台风强度变化与台风眼墙的动力过程密不可分,实际业务中确定台风强度以及最大风速半径很大程度上依赖于对台风眼结构的了解。

关于台风眼结构及其变化的研究发现,台风眼墙具有多边形眼壁、内嵌中尺度涡旋和涡旋 Rossby 波等特征(Lewis, et al, 1982; Kuo, et al, 1999; Wang, 2002b; 康健伟等, 2007)。Liu(1999)和 Zhang(2000, 2001)基于飓风 Andrew 精细的模拟结果,研究了飓风 Andrew(1992)内核的动力结构、垂直运动强迫过程以及超梯度流的作用等。徐亚梅(2007)也

利用中尺度数值模拟结果,分析了 8807 号台风登陆前后的内核结构变化特征。影响热带气旋的内核结构变化的因子很多,除其内部过程外,大尺度环流、边界层过程和陆面地形等外部过程的影响也十分重要(Wang, et al, 2004)。尤其在登陆过程中,岛屿、海岸、山脉地形对台风内核结构变化有显著影响。如台湾地形对登陆台风的路径、强度、结构和降水分布均有重要影响(Wu, et al, 1999)。Wu 等(2003)研究了台风 Zeb(1998)与吕宋岛地形的相互作用,发现登陆过程中台风眼墙的演变过程为:登陆前收缩,登陆后塌陷和入海后重建。最近他们的数值试验结果表明(Wu, et al, 2009),在 Zeb 台风眼墙的变化过程中,与台风内核水平尺度相当的中尺度陆面和地形变化起着关键作用。

事实上,登陆过程中台风眼结构变化十分复杂,不同个例的变化特征不尽相同。如 2007 年第 9 号台风 Sepat(圣帕)在先后登陆台湾岛和中国东南沿海过程中,出现了台风眼塌陷和重建过程,并具有眼墙扩大现象。这是比较少见的。在此过程中不仅引起华南暴雨,还在福建龙岗引发龙卷,给其风雨预报和防御增加了难度。本文基于上海台风研究所台风资料、FY-Ⅱ 卫星半小时 1 次的红外遥感图像及黑体亮度温度(TBB)数值产品、台湾雷达逐时合成反射率以及 NCEP 每日 4 次 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 格距再分析资料,对 Sepat 登陆过程中台风眼的变化特征及其扩大的原因进行探讨。

2 Sepat 台风登陆过程及其眼区云系变化

2.1 Sepat 台风登陆概况

超强台风 Sepat 于 2007 年 8 月 12 日 18 时(世界时,下同)在菲律宾吕宋岛以东西北太平洋上生成后,向偏西方向移动并迅速加强,15 日 09 时加强为超强台风,并逐渐向台湾东部沿海靠近。17 日 20 时减弱为强台风,于 21 时 40 分在台湾花莲一带登

陆。登陆时中心附近最大风速 50 m/s。登陆后“圣帕”向西穿过台湾中部,于 18 日 04 时前后进入台湾海峡继续向西北方向移动,07 时减弱为台风,18 时在福建省惠安县沿海再次登陆。登陆时中心附近最大风速 33 m/s,并迅速减弱为强热带风暴向西北方向移动,19 日 00 时在福建减弱为热带风暴,12 时继续减弱为热带低压。19 时进入江西后逐渐消失(图 1)。

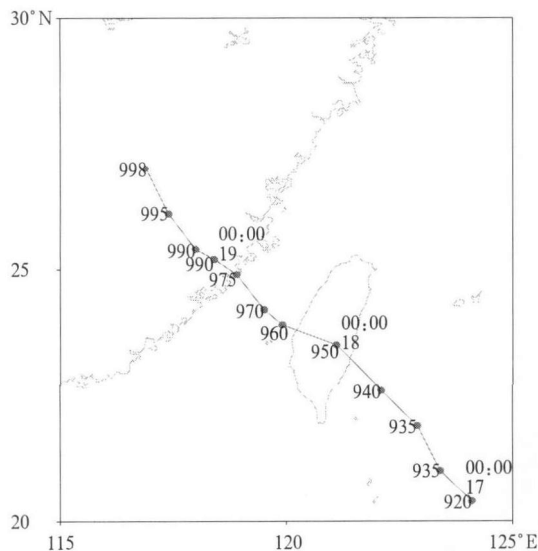


图 1 Sepat 台风 6 h 一次的登陆路径及中心最低海平面气压

(路径左侧, hPa, 路径右侧标示日期 00 时)

Fig. 1 Sepat's track with 6-h intervals
Numbers on the right denote 00:00 UTC 17, 18, and 19 August 2007, respectively
Central minimum sea level pressure (hPa) is marked on the left

2.2 台风眼区云系变化特征

台风眼的平均直径为 45 km, 最小的 10—20 km, 大的可达 100—150 km。大多数情况下台风眼的大小有随台风增强而逐渐缩小的趋势。台风登陆时或进入西风带减弱或变性时眼区直径也会增大(陈联寿等, 1979)。如台风 Winnie(1997)在北上过程中眼直径达到 370 km, 是有观测以来发现的最大台风眼之一(Zhang, et al, 2005)。

用 FY-Ⅱ 卫星半小时一次的红外遥感图像分析 Sepat 登陆过程中眼区云系的变化可见, 2007 年 8 月 17 日 13 时(图 2a), Sepat 移近台湾岛, 原先清晰的台风眼已变得模糊, 但仍可分辨出对流发展最强的环状眼墙。登陆台湾后台风强度急剧减弱, 12 h

内中心海平面气压上升了 15 hPa。此时台风眼区表现为单一的整块准圆形强对流云团, 眼墙、眼以及外围螺旋云系混在一起不能分辨, 这里称为眼墙塌陷(图 2b)。随着 Sepat 进入台湾海峡, 首先在这一强对流云团块中部出现弱云区(图略), 后对流云团块破碎分裂。8 月 18 日 04 时(图 2c), 台风眼区的对流云团块已分裂为 3 块, 其中两块位于台湾海峡内, 一块位于台湾岛东南部, 并均有所发展。前两块云团的发展与其下垫面水汽供应增大以及海峡两岸地形辐合抬升有关, 后一块云团的发展主要与水汽输送云系的活动有关。随后在几块云团中间位置出现晴空或少云区。8 月 18 日 08 时(图 2d), 分散的云团与卷入的台风螺旋云系一起组织成环形云墙, 中间的台风眼清晰可见。但此时眼直径(指晴空区直径)不足 100 km, 而眼墙水平尺度较宽。8 月 18 日 12 时(图 2e), 眼区进一步扩大, 围绕晴空少云区可见强对流云团组成的连续性环状云墙。此间 Sepat 强度进一步减弱, 中心海平面气压 12 h 增加了 20 hPa。8 月 18 日 18 时登陆时刻(图 2f), 眼直径扩大为 300 km 左右。登陆后台风强度再次迅速减弱, 6 h 内(8 月 19 日 00 时)台风中心海平面气压增加了 15 hPa, 之后减弱缓慢, 12 h 内(8 月 19 日 12 时)中心气压 6 h 仅增加 5 hPa。同时台风眼墙区云带强度明显减弱变窄, 并出现断裂, 但其环状及其扩大的特征仍然维持(图 2g—2i)。至 8 月 19 日 12 时(图 2i), 台风眼直径扩张至 600 km 左右。此后, 台风眼墙北部云团首先消散, 眼墙的环形特征逐渐丧失, 台风趋向消亡。此过程中如果以眼墙完整时计算眼大小, 则 Sepat 眼的直径可达 300—400 km。

FY-Ⅱ 卫星红外云图清楚显示了 Sepat 台风登陆台湾后眼墙塌陷, 进入台湾海峡西行过程中眼再现以及眼墙逐渐扩大的结构变化特征。

从台湾雷达逐时合成回波图来看(图略)^①, 台风登陆台湾前的 17 日 19 时, 卫星云图分辨不出台风晴空眼区, 但雷达仍能探测到无回波的 Sepat 眼区, 这可能与两者观测的角度差异有关。之后随着 Sepat 向西登陆, 雷达探测到眼区有 15 dBz 左右强度的弱回波, 台风眼变得模糊不清。18 日 00 时, 虽然卫星云图上台风眼区表现为一整块强对流云团, 但雷达仍能从这一云团的中部位置观测到 15 dBz 左右的弱回波区。说明这一云团的结构并不紧密,

① <http://61.56.13.28/index.php>

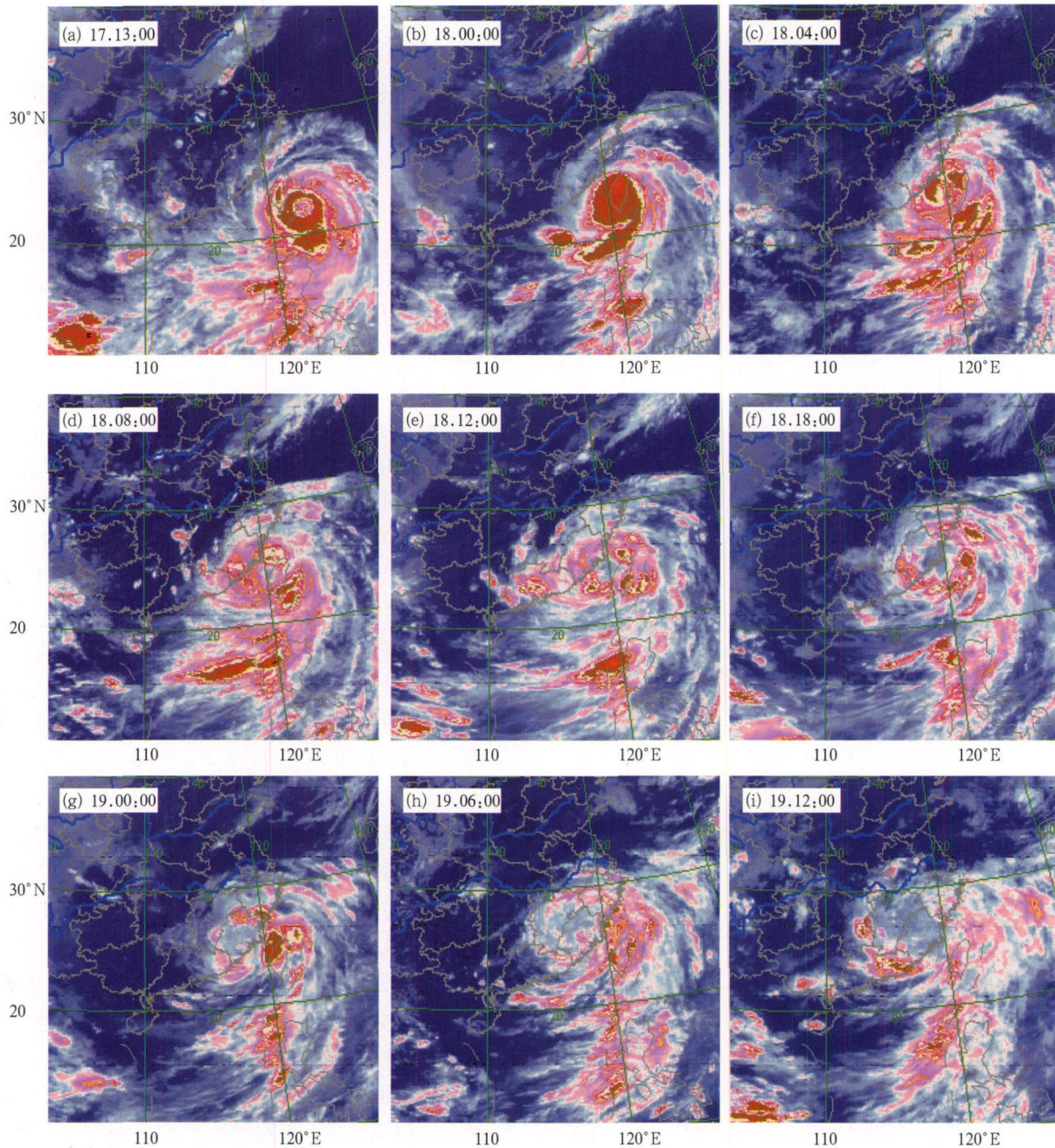


图2 2007年8月17日13时—19日12时Sepat台风登陆过程中FY-Ⅱ卫星红外云图

Fig. 2 FY-Ⅱ satellite infrared images during Sepat landfall from 13:00 UTC 17 to 12:00 UTC 19 August 2007

(numbers on each panel indicate day and hour, the same below)

只是由于弱对流云发展后与眼墙云系混在一起不易分辨。研究表明(王鹏云等, 1998), 9608号台风登陆台湾后台风眼变得模糊不清与其中心低层云的发展有关。此后Sepat台风眼区的对流云团分散, 中部出现无回波眼区, 而周围强对流区逐步向外扩展, 发展出环状眼墙。至18日12时, 无回波区直径约为台湾海峡宽度, 与卫星观测的一致。雷达观测进一步证实了Sepat登陆台湾时眼墙塌陷、眼区堵塞以及进入海峡后眼重现并放大的现象。

有关研究把类似Sepat这种眼放大的台风称为空心台风。陈瑞闪(1987)指出, 登陆台湾岛的台风由于地形等不利因素影响, 常出现“空心”现象, 空心台风的特点是外围风雨大, 中心风雨小。张长安等(2008)研究了Sepat台风的空心现象, 认为与台湾中央山脉作用、干舌卷入以及较低海温的共同影响有关。但未见关于Sepat台风眼墙放大特征及其成因的相关分析, 因此本文重点对这一现象的成因进行探讨。

3 Sepat 台风眼放大的影响因素

上述分析表明, Sepat 在登陆过程中先后经历了台风眼墙塌陷、眼重现及其放大的结构变化过程。这种眼重现和放大现象可能与台风眼区云团的分裂、扩张有关,也可能与对流云团的新生和重新分布有关。但由于对流单体生消非常迅速,从几十分钟到几小时不等,要追踪台风中对流云团活动还比较困难。本文从台风眼区对流活动的生消机制入手,分析影响 Sepat 台风眼结构变化的原因。

3.1 Sepat 活动的大尺度环流背景

2007年8月17日12时500 hPa高度场上(图略),西太平洋副热带高压(简称副高)十分强盛,5880 gpm等高线与中国大陆上空的高压连为一体,脊线位于35°N附近。中高纬度地区有一西风槽位于中国东北,低纬度地区 Sepat 向西靠近台湾岛。台风登陆台湾后,副高与大陆高压5880 gpm等高线断开,形成南北低,东西高的鞍形场。从2007年8月18日18时 Sepat 登陆福建沿海时500 hPa高度场和风矢量场可见(图3a), Sepat 位于鞍形场南部两高压之间,北部中高纬度西风槽被副高阻隔,对台风影响不明显。Sepat 登陆中国大陆后,两高压加强,8月19日06时,它们的5880 gpm等高线再次

连为一体(图略)。Sepat 处于强盛的高压带南侧,先移向西北再折向西南后减弱消失。在 Sepat 登陆期间,有一来自低纬度洋面(15°N附近)的较强西南气流与台风环流联结。从2007年8月19日12时(登陆后18 h,图3b)低层700 hPa风场和相对湿度场可以看出,这是一条水汽通道,其相对湿度达80%以上。这使得台风登陆后仍能获得潜热能量,有利于减缓台风的登陆衰减,维持其低压环流。我们注意到,由于登陆台湾前台风在副高南侧活动,副高干燥气流(相对湿度小于60%)已侵入台风北部(图略)。随着 Sepat 西移靠近大陆高压,大陆高压的干空气也在其东部的偏北气流引导下并入副高干气流,并沿台风气旋性环流向南卷入,在 Sepat 西半部形成包围台风高湿气团的半圆状干空气带。由图3b可见,在2007年8月19日12时700 hPa上,这股干空气已卷至台风环流南侧强西南气流的入口处,距台风中心约500 km。受干空气带影响,台风西部云墙以外区域为无云区(图2)。在对流层高层这种干空气半包围台风的现象仍存在,并比低层发生得更早更明显,而700 hPa以下低层不明显。这与大陆高压在高层气流更强有关。8月19日12时300 hPa的环流图上(图略),大陆高压东南部的东北气流很强,已南下侵入到台风中心附近。

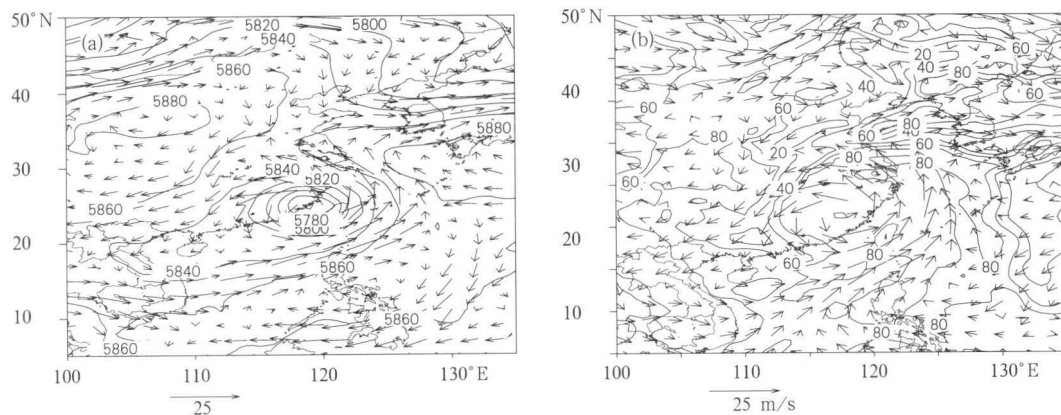


图3 2007年8月18日18时500 hPa高度场(实线,gpm)和风矢量场(m/s)(a)以及2007年8月19日12时700 hPa相对湿度场(实线,%)和风矢量场(m/s)(b)
Fig. 3 Distributions of (a) height (solid line, unit: gpm) and wind vectors (unit: m/s) on 500 hPa at 18:00 UTC 18 August 2007 and (b) relative humidity (unit: %) and wind vectors (unit: m/s) on 700 hPa at 12:00 UTC 19 August 2007

环流形势分析表明, Sepat 登陆期间主要在副热带高压南侧活动,中高纬度低值系统对其影响不大,同时还能从低纬洋面继续获得水汽补充。这使台风不至于很快变性或衰亡,有利于其低压环流和云系

结构维持。另一方面,来自副热带高压和大陆高压的干空气侵入台风西部环流并半包围台风中心的湿空气,这限制了台风中心云团向外扩散,而高层侵入台风中心附近的干空气下沉又抑制对流发展。

Kimball(2006)研究了干空气侵入对模拟登陆飓风的影响,发现小湿度半径的气旋形成小范围雨带,大湿度半径的气旋发展出大范围雨带。雨带作为飓风湿核与干空气环境之间的障碍可以阻止干空气侵入台风内核。

3.2 湿度锋与台风眼区对流活动

Sepat 登陆过程中,由于干空气卷入并半包围台风湿空气,在台风西侧外围形成了一条干、湿空气的界面。从登陆过程 700 hPa 比湿的分布(图 4a—4c)(台风中心位于图形的几何中心,圆圈标示距台风中心的经纬度数)可以看出,由于台风与副高的湿度差异,它们之间在台风环流外围形成了比湿等值线的密集区,即湿度锋区。8月18日00时,锋区位于台风北侧距台风中心6个纬距处,随着干带(浅色阴影区)向南卷进台风环流,8月18日18时,锋区出现在台风西部。至19日12时,干空气前锋到达台风南部,形成了半包围台风的弧状锋区,距台风中心约500 km。由此可见,随着干空气带包围台风湿气团,台风西半部出现了湿度锋锋生。

锋区附近的动力和热力条件必然对台风环流内

的对流活动产生影响。图 4d—4f 显示卫星遥感黑体亮度温度 TBB(阴影,仅给出 $\leq -15^\circ\text{C}$ 区域)以及垂直速度(10^{-3} hPa/s)的分布。8月18日00时(图 4d),Sepat 已在台湾岛登陆,强上升运动(虚线所示的强负值区)相对集中,主要出现在距台风中心约200 km 范围内。台风眼区表现为一整块对流云团, TBB 值达到 -75°C ,说明云内对流强盛。但眼区对流云团与台风中心位置有一定的偏离(偏于其南侧),这是因为卫星观测只是台风定位的参考之一。此时在台风中心及强对流云团中部位置出现较强下沉运动(实线),与雷达探测到的弱回波区对应。18日06时(图略),垂直速度强负值区向外分开,台风眼区的上升运动减弱而下沉运动加强,此时卫星云图上可见台风的晴空眼。8月18日18时(图 4e),强上升运动区离开台风中心区域主要出现在距台风中心200—400 km 范围内,并有强对流云带与之对应。距台风中心100 km 范围内的垂直运动很弱,无强对流云团出现。这样便形成了无云(或少云)的眼和环状对流云区。相应台风环流西部下沉干空气活动区域无对流云发展。登陆18 h后(图 4f),强上

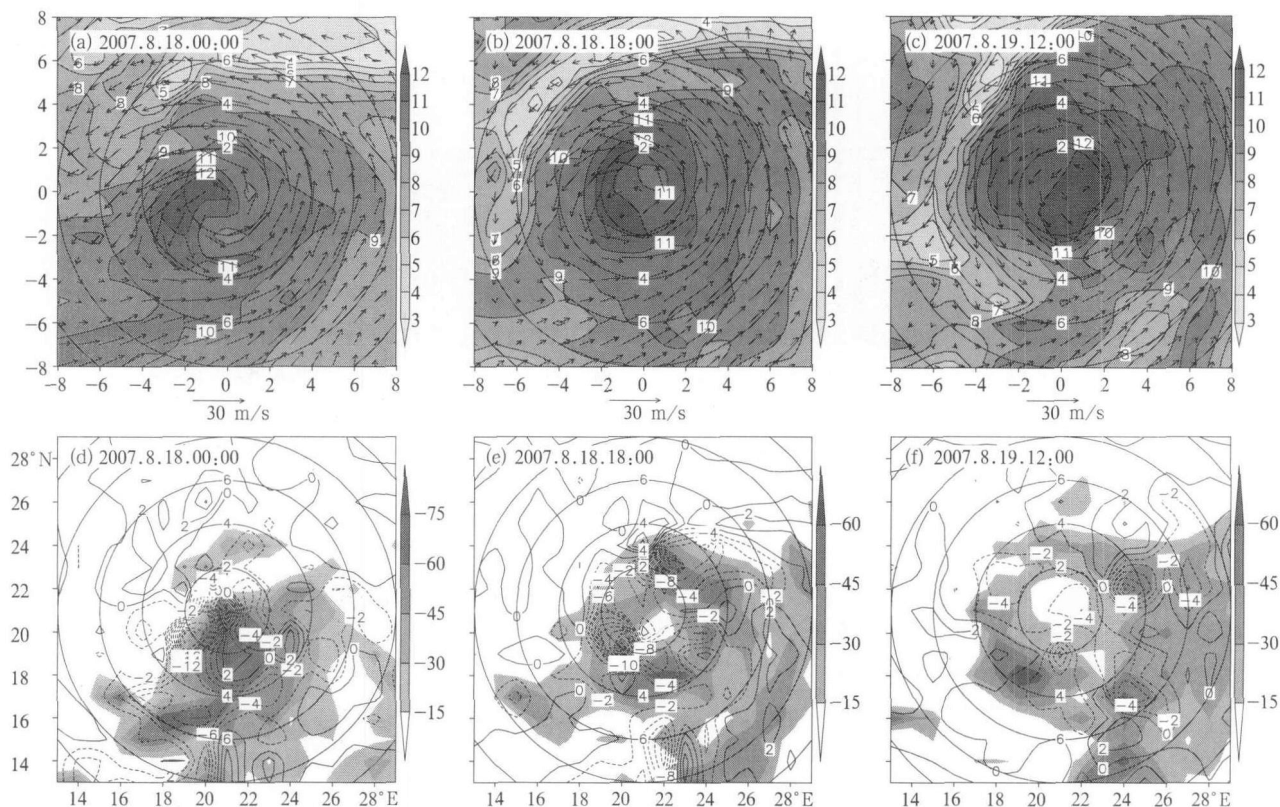


图 4 700 hPa 风场和比湿(等值线阴影区, g/kg)分布(a—c)和卫星黑体亮温 TBB(阴影,仅给出 $\leq -15^\circ\text{C}$ 区域)以及垂直速度(等值线, 10^{-3} hPa/s)分布(d—f)(图中圆圈标注距台风中心的经纬度数)

Fig. 4 Distributions of wind vectors and specific humidity (unit: g/kg) (a—c), TBB (shaded $\leq -15^\circ\text{C}$) and vertical speed (10^{-3} hPa/s) (d—f) on 700 hPa (circles indicate the distance in latitude or longitude away from the typhoon center)

升运动中心出现的位置以及环状对流云带均进一步向外扩大,距台风中心约 400 km。西边对流云带位于湿度锋前湿空气一侧,比湿约为 11 g/kg。东部对流云带主要出现在西南风水汽输送带与台风环流的汇合处。东、西云带在台风气旋性低压环流组织下,发展出环状对流云带,形成了所谓的台风眼墙。之后台风眼墙北部的对流云团减弱消失,环状结构被破坏,这与高层干空气的南侵有一定关系。可以看出台风眼区的扩大与对流活动的变化有关。可见,这里包围台风眼的环状云带是台风对流运动最强烈的地方,同时也是台风风速的大值区(图 4a—4c),具有典型台风眼墙的一些特征。

综上所述, Sepat 台风登陆过程中,由于干空气侵入,在其西部环流内产生了一条半圆弧状湿度锋。一方面,锋前湿区有利于对流运动发展,云团聚集;另一方面,锋后干冷空气下沉区不利于对流发展和台风内部对流云团的向外扩散。从而改变对流运动的分布。台风中部的对流云团一方面分裂扩展,一方面又受到限制,形成了一定形状。在台风环流西部,受湿度锋影响形成半圆弧状,东部是西南风低空急流的进入区,也是对流运动容易发生之处,两边对流云团在台风气旋性环流的组织下形成了 Sepat 台风的环状眼墙。

3.3 放大的台风眼结构特征

为了分析 Sepat 台风眼放大后的一些动、热力结构特征,图 5a 给出了 2007 年 8 月 19 日 06 时过台风中心比湿和切向风速的纬向垂直剖面,在台风中心以西 7°处可见一干舌自高空下伸至 700 hPa 高度附近,低于 700 hPa,下伸干舌位于台风中心以西 4°处,说明 Sepat 西边的干空气自对流层高层向东倾斜下伸至低层。而台风中心以西 2°处可见倾斜向西的上伸湿舌,与干舌之间形成比湿等值线的相对密集区,即湿度锋区。另在台风中心以东 2°处也有一湿舌向上伸展,两湿舌相距 4°左右,与台风眼墙区对应,眼墙的强对流上升运动可将水汽向上输送形成湿舌,而两湿舌之间可见下伸干区,反映了台风眼区内干空气的下沉活动。从台风切向风速的分布看(阴影),东、西侧强风速区出现在眼墙附近,中心位于 850 hPa 高度上,而眼内风速很小(小于 4 m/s)。

从相应的相当位温(等值线)和垂直速度(阴影)的垂直剖面看(图 5b),对应台风西部干舌区为一强干冷中心,台风中心以西 2°—4°湿度锋区附近等位温线陡立,自低层略向西倾斜至 250 hPa 附近。这一陡立区的形成与该处较强的比湿水平梯度有关,而等位温线陡立必然导致垂直涡度发展,有利于台

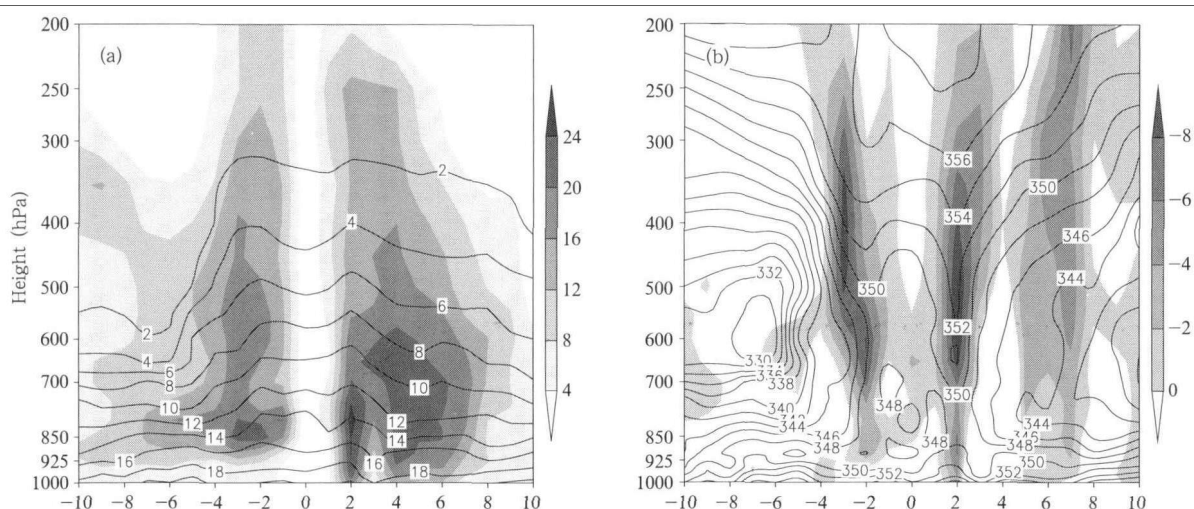


图 5 2007 年 8 月 19 日 00 时过台风中心的比湿(g/kg)和切向风速(阴影, ≥ 4 m/s)(a)以及相当位温(K)和垂直速度(10^{-3} hPa/s; 阴影, ≤ 0) (b)的纬向剖面
(横坐标 0 表示台风中心, 正(负)值表示向东(西)的经度数, 下同)

Fig. 5 Latitudinal sections of specific humidity (isoline, unit: g/kg) and tangential wind speed (shaded ≥ 4 m/s) (a) and equivalent potential temperature (unit: K) and vertical speed (shaded ≤ 0) (b) across the typhoon center at 00:00 UTC 19 August 2007

(origin indicates typhoon center, positive (negative) value denotes the eastward (westward) longitude, the same below)

风眼墙内垂直运动的维持和发展。从垂直速度(阴影)的分布来看,强上升运动区出现在这一陡立区东侧的湿舌区并随之向西倾斜。台风中心以东 2° 处也可见等位温线陡立区,也是台风眼墙垂直上升运动区。东、西两侧眼墙内分别有下伸的暖湿舌,这与该处对流凝结潜热释放有关。台风东部眼墙比西部眼墙更暖更湿,这与西南暖湿气流由台风东部切入有关。台风眼内为相对干冷区。眼内除850—600 hPa有弱上升运动外,其他层次均为下沉运动,进一步说明台风眼内具有下沉干冷空气活动。

Septat 台风扩大的眼结构分析表明,台风眼墙内对流运动发展强烈并有大量凝结潜热释放,最大切向风速亦出现在眼墙附近。眼内则风速微弱,有弱的干冷空气下沉运动。可以看出,与一般台风眼相比,Septat 放大后的台风眼仍具有某些典型的动、热力结构特征,故仍称其为台风眼。但其结构变化也有一些差异,如台风眼内干空气下沉范围加大和潜热加热

源外扩等,其中隐含了台风减弱的因子或特征。

3.4 台风眼区的热力条件

分析表明,Septat 台风眼放大过程不仅是对流运动区向外发展的过程,也是眼内对流条件发生改变的过程。下面着重考察台风中心区域的热力条件。从 Septat 登陆过程中过台风中心扰动温度(与距台风中心 10° 半径范围内平均温度的差值)的纬向剖面(图6a—6c)可见,8月18日00时(图6a),台风中心位于台湾上空,从地面至200 hPa均为正温度异常区,其强中心位于300 hPa高度附近,表明台风的暖心结构以及较温暖的下垫面特征。此时台风眼墙塌陷不能分辨。Wu等(2009)的数值试验表明,陆面的影响可导致眼墙塌陷。当台风从海洋移到陆上,陆面热量通量的减少将减弱眼墙区的对流并破坏其环状结构,陆面上摩擦加强又促进眼墙与眼的混合过程,使眼墙破碎或塌陷。图6a还显示,在台风中心以西 2° 之外的大陆上近地层有负的温度异

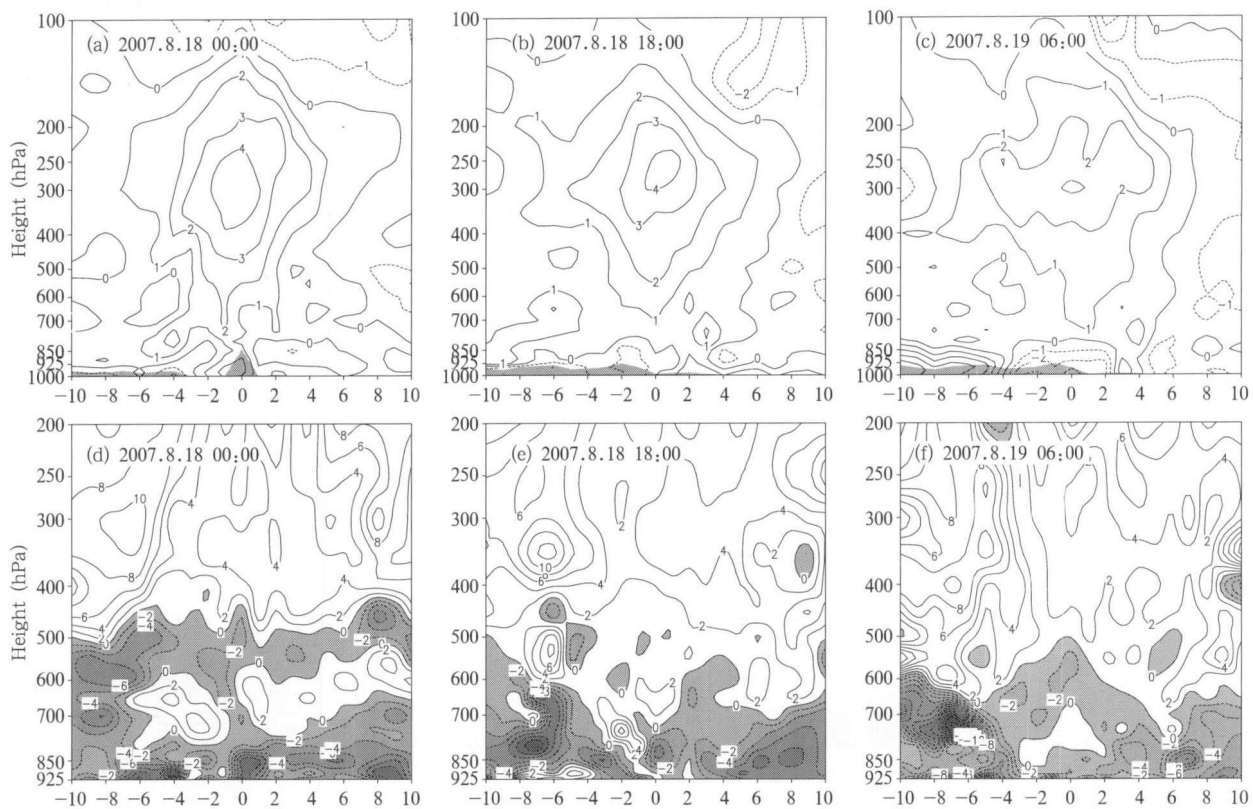


图6 过台风中心温度扰动(单位:K,阴影为地形)(a—c)和 $-\frac{\partial\theta_e}{\partial p}$

(单位: 10^{-2} K/hPa,阴影为负值区)(d—f)的纬向垂直剖面

Fig. 6 Latitudinal sections of temperature disturbance (unit:K) (a—c) and

$-\frac{\partial\theta_e}{\partial p}$ (unit: 10^{-2} K/hPa, shaded ≤ 0) (d—f) across the typhoon center

常,地面观测证实该处为低温区(图略)。随着台风西行再次登陆,这个冷区靠近台风中心。8月18日18时(图6b),台风中心上空850 hPa高度以下低层转为扰动温度负值区。登陆后8月19日06时(图6c),这个温度异常明显增强,在台风中心上空对流层低层形成长约6°的扰动温度负值区。扰动温度的变化说明, Sepat 登陆过程中遇到冷下垫面,使台风中心上空低层迅速变冷。这减弱了台风眼内大气层结的垂直对流不稳定性,不利于对流运动的维持和发展。台风中心上空300 hPa附近的暖心强度也随之减弱,但范围沿纬向扩大。Sepat 眼区对流凝结加热减弱以及加热源外扩,可使台风暖心强度减弱。

过台风中心 $-\frac{\partial\theta_c}{\partial p}$ 的纬向垂直剖面(阴影显示对流不稳定的负值区)(图6d—6f)表明,8月18日00时(图6d),台风中心上空有较强 $-\frac{\partial\theta_c}{\partial p}$ 的负值区,从近地面向上伸至400 hPa,说明台风中心上空有较深厚的对流不稳定气层。这个不稳定区在700 hPa附近比较狭窄,东、西两侧为对流稳定区,这时卫星云图上台风眼区为整块对流云团控制。8月18日18时(图6e),台风中心上空的对流不稳定性减弱,700—400 hPa的不稳定层结已转为稳定层结,而700 hPa向下至925 hPa出现宽约1°的对流稳定带,将低层的对流不稳定区分隔开。两侧的 $-\frac{\partial\theta_c}{\partial p}$ 负值中心位于850 hPa高度,相距约3°,此时台风眼已清晰可见。8月19日06时(图6f),台风中心上空的对流不稳定性继续减弱,大气呈稳定或弱不稳定层结,且范围较宽。而强不稳定区分别向东、西推至距中心3—4°附近,与对流圈的扩大相对应。说明 Sepat 眼放大与眼区垂直对流不稳定条件变化有密切关系。陆汉城等(2002)研究表明,台风内对流运动的发展还可能与对称不稳定有关。我们采用位涡理论分析了 Sepat 台风眼的条件性对称不稳定(CSI),发现CSI在 Sepat 台风眼放大过程中并不明显(图略)。这与 Sepat 主要在副高南侧活动,大气斜压性不强有关。

由此可见, Sepat 登陆台湾岛后向西运动过程中移到较冷下垫面上,使台风中心附近的大气对流不稳定性减弱,而较强的对流不稳定区远离台风中心。这促使眼区对流云团减弱消散,积云对流向外发展。由于对流凝结加热源随之扩散, Sepat 台风眼区暖心

强度亦随之衰减。此外,台风眼内下沉的干冷空气也是抑制对流发展的一个因素。因此,台风眼放大可能是其衰亡的一个因素。

3.5 台风眼区垂直运动条件

Sepat 台风眼内大气垂直对流稳定度的变化表明,台风中心对流运动减弱,而外围对流运动发展。但并不能完全解释台风中心下沉运动范围扩大的原因。下面对台风眼区的垂直运动条件作进一步分析。

旋转流场中单位质量空气质点在自由大气中的水平运动可认为是气压梯度力、科里奥里力和离心力三力平衡下的梯度风。不计大气的粘性和摩擦,圆柱坐标中三力平衡方程描写为

$$\frac{v^2}{r} + fv = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (1)$$

其中 v 为切向速度, r 为离台风中心的距离,指向外为正, f 为科氏参数。可以看出,台风切向速度分布不均匀将导致台风中气压梯度力、科氏力和离心力三力之间的不平衡,产生梯度不平衡力,即 $F_t = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{v^2}{r} + fv \neq 0$ 。Zhang 等(2001)研究表明,台风眼壁区的强倾斜上升气流与超梯度不平衡力($F_t > 0$)有密切关系。

从过台风中心用径向风与垂直速度(10^{-5} hPa/s)制作的风矢量以及梯度不平衡力(F_t)的纬向垂直剖面(图7)可以看出, Sepat 登陆过程中, F_t 的正值区中心,即科氏力与惯性离心力的合力超过气压梯度力产生的指向外的超梯度区,出现在台风中心东、西两侧2°附近。18日00时(图7a),台风中心位于台湾岛,其两侧400 hPa以下中低层可见较强的径向入流。这与陆面摩擦作用造成的气流辐合有一定关系。东、西来向的入流分别在距台风中心1°附近转为上升气流,在台风眼区形成一种“辐合式”上升运动(具有径向流入分量),造成整个台风眼区对流云混合发展,形成整块对流云团块。这种辐合式的上升运动直至对流层高层,而高层气流辐合必然产生下沉运动。图中可见台风中心上空狭窄的下沉气流,这是雷达仍能从整块对流云团中探测到弱回波区的一个原因。而下沉气流又促使低层气流辐散,加强径向外流。18日06时(图7b),台风中心移至台湾海峡,台风中心两侧的径向入流明显减弱。850 hPa以下低层已由6 h前的径向流入转为流出,而较高层次在台风中心东、西两侧2°处转为径向流

出。由原先的“辐合式”上升运动转为“辐散式”上升运动(具有径向流出分量)。这主要与该处超梯度不平衡力的增强有关。强超梯度不平衡力不仅产生指向外的径向加速度,还可阻碍径向入流并与其辐合产生向上加速度,从而加强眼墙内的上升运动。250 hPa 以上高层超梯度不平衡力减弱,径向入流有所加强。在台风西侧可见径向入流到达台风中心附近。低层的气流辐散必然又造成眼内补偿性下沉运动,使眼区干空气下沉加强。图中可见此时距台风中心 2° 范围内的上升运动已明显减弱,而下沉运动区域变宽,对应台风眼区的强对流云团已分裂。18 日 12

时(图 7c),随着台风强度衰减,台风中心两侧的上升气流均明显减弱。在台风眼区,尤其是东部的径向流出更明显。此时台风眼已清晰可见。18 日 18 时(图 7d),Sepat 登陆中国大陆,西半部已移到陆面上,由于陆面摩擦作用,径向入流略加大,上升运动也略有加强。但东半部的下沉外流区域更宽,尤其在中低层更明显。19 日 00—06 时(图 7e—7f),台风中心两侧维持辐散式上升运动。台风东半部仍具有较强的超梯度力,眼区的径向外流以及高层下沉气流均较明显。故台风中心两侧上升运动中心之间的距离加大,对应晴空少云的眼区也进一步扩大。

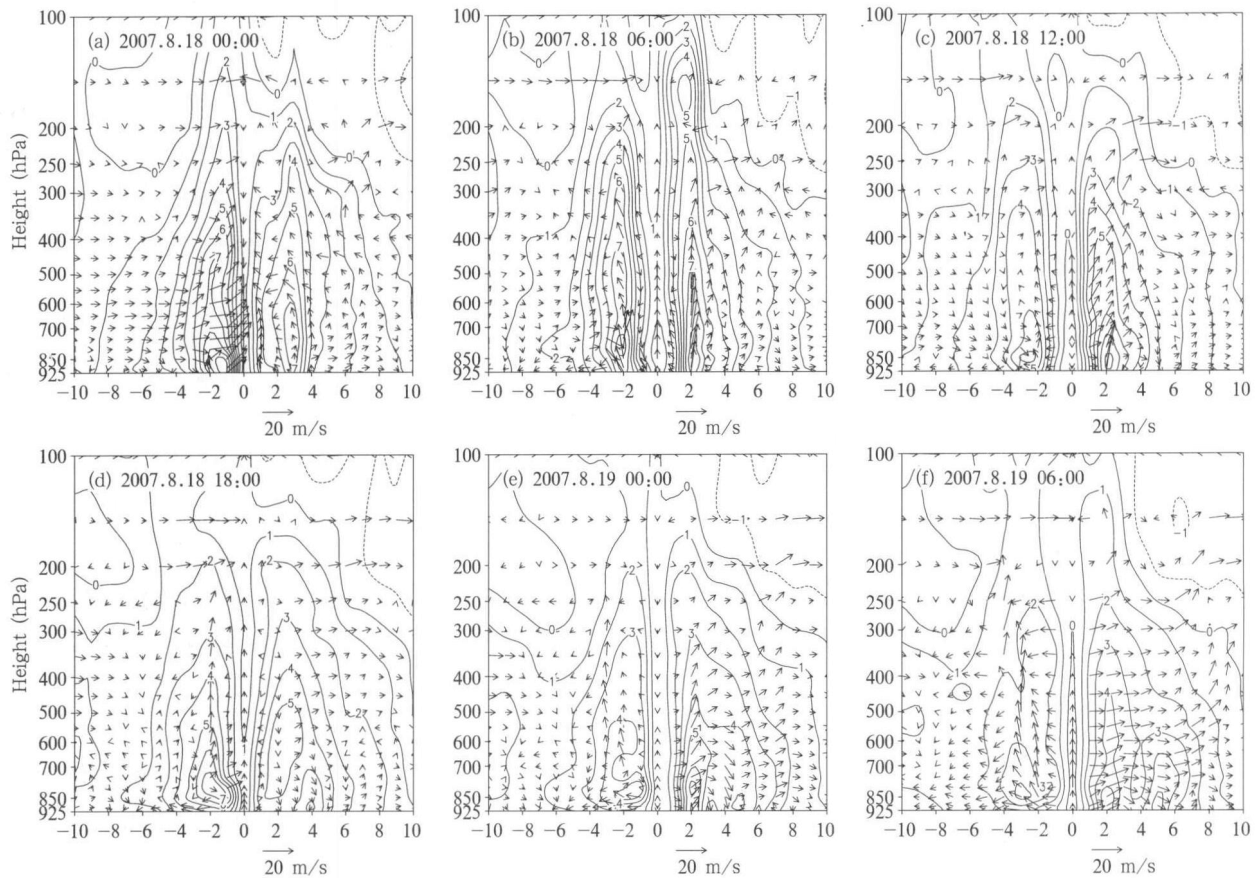


图 7 过台风中心径向风与垂直速度合成的风矢量和梯度风不平衡力 F_1 (等值线, 10^{-3} m/s^2) 的纬向垂直剖面

Fig. 7 Latitudinal sections of gradient wind unbalanced force (isoline, unit: 10^{-3} m/s^2) and wind vectors composed by radial wind and vertical wind across the typhoon center

关于台风眼内下沉气流的产生有多种解释,有研究认为是眼墙附近出现超梯度流的结果(Malkus, 1958),也有研究认为台风眼内的下沉运动与切向风随高度递减(Smith, 1980)、对流强迫(Shapiro, et al, 1982)等因素有关。上述研究表明,眼墙附近出现的超梯度力造成向外的径向加速度是 Sepat 台风

眼内下沉运动加强和范围扩大的一个原因。台风眼区径向流入向流出的转化促使眼区对流云团分裂,眼内必然出现下沉气流以补偿低层质量的辐散,而高空干冷空气下沉运动又促进晴空少云区产生。随着台风气旋性环流的衰减,径向外流和下沉气流加强,促使晴空少云区范围扩大,出现眼放大现象。台

风中低层的径向外流同时也减少了水汽能量向台风内核区的输入,这也促使台风眼对流运动减弱消亡。另外,台风中心东侧台湾地形在一定程度上阻挡了台风径向入流,从而削弱了外界水汽能量的向内输送,抑制了台风内部的对流活动。而台风西侧的湿度锋在削弱径向入流的同时,也在一定程度上阻挡了外围干空气对台风眼墙的进一步侵蚀。

4 结 论

本文从卫星、雷达遥感观测中,发现了 Sepat 台风登陆过程中的眼放大现象,并从对流运动的生消机制出发,进一步探讨了台风眼放大的可能机制,结果表明:

(1) Sepat 登陆台湾后,台风眼塌陷模糊,眼区表现为一整块对流云团。登陆过程中再出现的台风眼及其放大现象,实际上是这一对流云团在分散过程中与台风外围螺旋云系一起重新发展出的逐渐扩大的环状眼墙结构。放大的台风眼墙中上升运动激烈,对流发展旺盛,是切向风速大值区。同时台风眼内风速小、具有暖心和弱下沉运动等,仍表现出一般台风眼的部分典型特征。

(2) Sepat 台风的环状眼墙与大尺度环流条件密切联系。首先 Sepat 登陆过程中在副高南侧活动并能继续获得水汽补充,其环流相对稳定而不易变性消亡。在此过程中,外围干空气的侵入在台风西部环流中产生了半圆弧状湿度锋。锋区既有利于对流运动发展,同时也阻碍眼区对流云团继续外扩,从而改变了对流云团的分布。在台风气旋性环流组织下,锋区附近半圆弧状的对流云带与台风东部螺旋云带一起,构成了 Sepat 台风的环状眼墙。

(3) 台风眼的出现和放大与眼区对流运动条件的变化关系密切。一方面,台风从台湾岛移入台湾海峡过程中,眼区径向流入向流出的转化促使强对流云团分裂,眼区出现补偿性下沉气流,并随着气流的径向辐散加强,眼区下沉运动范围加大。此时眼墙附近的超梯度力对径向外流的产生和维持起重要作用。另一方面,由于台风移到一个较冷下垫面上,导致眼内低层温度降低,大气不稳定性减弱,抑制了台风中心区域的对流发展。另外,台风中心东侧台湾地形在一定程度上阻挡了台风径向入流和外界水汽能量的向内输送,这也削弱了台风内部的对流活动。

(4) 研究还发现,台风强度衰减与其眼放大现象密切相关。台风眼放大过程中,眼内干空气下沉区变宽、对流凝结加热减弱以及加热源外扩等因子使台风暖心结构减弱,强度衰减。同时,其增强的径向外流阻止了水汽能量向台风内核区输入,也促使台风眼的对流运动减弱消亡。

通常情况下,台风眼形成于台风发展过程中,眼墙是由卷入系统内部的雨带逐渐组织形成的连续环状强对流带,台风眼的直径随台风加强而减小。而本文注意到的这种台风眼放大现象发生在台风登陆衰减过程中,眼墙是台风残余云系分裂扩散后与台风螺旋云系一起重新发展出的环状对流云带,眼的直径随台风减弱而增大。两者发生的背景和物理过程是不同的。另外,本文所用资料较粗,尚不足以揭示台风眼区的细微结构及其变化,数值模拟工作正在开展,而地形的作用也需进一步探讨。

References

- Blackwell K G. 2000. The evolution of hurricane Danny (1997) at landfall: Doppler-observed eyewall replacement, vortex contraction/intensification, and low-level wind maxima. *Mon Wea Rev*, 128: 4002-4016
- Chen Lianshou, Ding Yihui. 1979. An Introduction to the Western Pacific Typhoon (in Chinese). Beijing: Science Press, 491pp
- Chen Ruishan. 1987. On the phenomenon of "hollow center" of typhoon. *Marine Forecasts (in Chinese)*, 4(1):68-72
- Chen Shanmin. 1986. Preliminary analysis of structure and intensity of concentric double typhoons (in Chinese). *Scientia Atmosphaerica Sinica*, 10(2):183-188
- Kang Jianwei, Lu Hancheng, Zhong Ke, et al. 2007. The mesoscale waves and the formation of polygonal eye wall in typhoon. *J Tropical Meteor (in Chinese)*, 23(1):21-26
- Kimball S K. 2006. A modeling study of hurricane landfall in a dry environment. *Mon Wea Rev*, 134:1901-1922
- Kuo H C, William R T, Chen J-H. 1999. A possible mechanism for the eye rotation of typhoon Herb. *J Atmos Sci*, 56:1659-1673
- Lewis B M, Hawkins H F. 1982. Polygonal eye-walls and rainbands in hurricane. *Bull Amer Meteor Soc*, 63:1294-1300
- Liu Y, Zhang D-L, Yau M K. 1999. A multiscale numerical study of Hurricane Andrew (1992). Part II: Kinematics and inner-core structures. *Mon Wea Rev*, 127, 2597-2616
- Lu Hancheng, Zhong Ke, Zhang D-L. 2002. A possible development mechanism of the slantwise updraft in the eyewall of the 1992 hurricane Andrew-nonlinear convective and symmetric instability. *Chinese J Atmos Sci (in Chinese)*, 26(1):83-90
- Malkus J S. On the structure and maintenance of mature hurricane eye.

- J Meteor Sci, 1958, 20:276-287
- Smith R K. 1980. Tropical cyclone eye dynamics. J Atmos Sci, 37: 1227-1232
- Shapiro L J, Willoughby H E. 1982. The response of the balanced hurricane to local source of heat and momentum. J Atmos Sci, 39: 378-394
- Wang Y. 2002. Vortex Rossby waves in a numerically simulated tropical cyclone. Part II: The role in tropical cyclone structure and intensity changes. J Atmos Sci, 59:1239-1262
- Wang Y, Wu C C. 2004. Current understanding of tropical cyclone structure and intensity changes-A review. Meteor Atmos Phys, 87, 257-278
- Willoughby H E, Clos J A, Shoreibah M G. 1982. Concentric Eye Walls, Secondary Wind Maxima, and The Evolution of the Hurricane vortex. J Atmos Sci, 39:395-411
- Willoughby H E. 1990. Temporal changes of the primary circulation in tropical cyclones. J Atmos Sci, 47:242-264
- Wang Pengyun, Liu Chuntao. 1998. Numerical study on the mesoscale structure of typhoon Herb 1996. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 56(3):296-311
- Wu C C, Kuo Y H. 1999. Typhoons affecting Taiwan: Current understanding and future challenges. Bull Amer Meteor Soc, 80: 67-80
- Wu C C, Chou K-H, Cheng H-J, et al. 2003. Eyewall contraction, breakdown and reformation in a landfalling typhoon. Geophys Res Lett, 30(17): 1887
- Wu C C, Cheng H J, Wang Y, et al. 2009. A numerical investigation of the eyewall evolution in a landfalling typhoon. Mon Wea Rev, 137:21-40
- Xu Yamei. The numerical study of landfalling typhoon Bill(1988): Inner core structure and budgets of energy and moisture. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 65(2):877-887
- Zhang Changan, Zheng Xiuzhuan, Pan Yating. 2008. Analysis of hollow phenomenon about typhoon Sepat. Meteor Mon (in Chinese), 34(4):48-52
- Zhang D-L, Liu Y, Yau M K. 2000. A multiscale numerical study of Hurricane Andrew (1992). Part III: Dynamically-induced vertical motion. Mon Wea Rev, 128: 3772-3788
- Zhang D-L, Liu Yubao, Yau M K. 2001. A multiscale numerical study of hurricane Andrew (1992), Part IV: Unbalance flows. Mon Wea Rev, 129:92-107
- Zhang Q H, Chen S J, Lau Y H, et al. 2005. Numerical study of a typhoon with large eye: Model simulation and verification. Mon Wea Rev, 133:725-742

附中文参考文献

- 陈联寿, 丁一汇. 1979. 西太平洋台风概论. 北京: 科学出版社, 491pp
- 陈瑞闪. 1987. 试论台风的“空心”现象. 海洋预报, 4(1):68-72
- 陈善敏. 1986. 同心双眼台风结构和强度的初步分析. 大气科学, 10(2):183-188
- 康建伟, 陆汉城, 钟科等. 2007. 台风内部的中尺度波动与多边形眼墙的形成. 热带气象学报, 23(1):21-26
- 陆汉城, 钟科, 张大林. 2002. 1992年 Andrew 飓风眼壁区倾斜上升运动发展的可能机制—非线性对流对称不稳定. 大气科学, 26(6):83-90
- 王鹏云, 刘春涛. 1998. 1996年第8号台风中尺度结构的数值研究. 气象学报, 56(3):296-311
- 徐亚梅. 2007. 8807号登陆台风的数值研究: 内核结构及能量水汽收支. 气象学报, 65(2):877-887
- 张长安, 郑秀专, 潘娅婷. 2008. 台风圣帕的空心现象分析. 气象, 34(4):48-52