

余晖,罗哲贤,朱雪松,等.热带风暴形成过程中的涡旋自组织及其复杂性:一个典型个例的红外云图分析[J].海洋气象学报,2017,37(2):22-30.

Yu Hui, Luo Zhexian, Zhu Xuesong, et al. Vortex self-organization and its complexity during the development of a tropical storm: A case analysis based on the infrared satellite cloud images [J]. Journal of Marine Meteorology, 2017, 37(2): 22-30. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.02.003. (in Chinese)

热带风暴形成过程中的涡旋自组织及其复杂性: 一个典型个例的红外云图分析

余晖¹, 罗哲贤², 朱雪松³, 陈佩燕¹

(1. 上海台风研究所, 上海 200030; 2. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044; 3. 上海市气象科学研究所, 上海 200030)

摘要:应用高分辨率的红外卫星云图资料,对台风8807从热带低压发展成热带风暴的过程进行了分析,给出了热带风暴形成过程伴随着复杂涡旋自组织现象的观测证据。结果发现,涡旋自组织可在从数十到十万 km²的各种尺度扰动云团之间发生,发生合并的云团除了理想数值试验中的两类前景之外,还存在第三类前景,即较大尺度的云团会发生分裂,部分与其他云团合并。合并形成的新云团可能发展也有可能减弱,这应取决于新云团所处的环境以及是否有其他云团补充并入。用二维 Fourier 分析可以清楚地看到8807发展成热带风暴的过程可分为两个阶段,一是多涡共存,不同方向、不同尺度系统能量转换频繁阶段,另一是单涡发展阶段,谱密度等值线形态稳定少变。分维计算结果表明,热带风暴形成过程中的相关云团较已有研究分析的云团略显规则,分维略小于已有结果。此外,临界温度取值不同,分维是有差异的,边界温度越低,分维越小。

关键词: 涡旋自组织; 热带风暴; 形成

中图分类号: P444 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2017)02-0022-09

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.02.003

Vortex self-organization and its complexity during the development of a tropical storm: A case analysis based on the infrared satellite cloud images

YU Hui¹, LUO Zhexian², ZHU Xuesong³, CHEN Peiyan¹

(1. Shanghai Typhoon Institute, CMA, Shanghai 200030, China; 2. Nanjing University of Information Sciences and Technology, Nanjing 210044, China; 3. Shanghai Institute of Meteorological Sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract Based on the high resolution infrared satellite data, this study focuses on the evolution of Typhoon Bill (8807) from tropical depression to tropical storm and shows the complicated vortices self-organizations during the development of the tropical storm. It is indicated that the self-organized cloud clusters could range from 10 to 100 000 km². Besides of the two scenarios from the ideal numerical experiments, there exists another scenario for the behavior of the self-organized cloud clusters. The larger cloud cluster could be divided into small clusters which partially merge with other cloud clusters. The new-merged cloud cluster may either strengthen or weaken, which depends on the embedding environment or the supplements of other cloud clusters. By using two-dimensional Fourier analysis, it is evident that the development of the tropical storm (8807) experiences two stages. The first is the multi-

收稿日期:2017-05-07; 修订日期:2017-06-01

基金项目:国家自然科学基金项目(41405046,41475082)

作者简介:余晖(1972—),女,博士,研究员,主要从事热带气旋动力学理论和预报技术研究工作, yuh@mail.typhoon.gov.cn。

vortices coexistence, during which the energy transitions occur frequently between systems with various directions and scales. The other is the single vortex development stage, during which the pattern of the spectral density contours maintain stable. Fractal dimension calculations demonstrate that the cloud clusters related to the development of the tropical storm are more regular than those of previous studies, and the fractal dimension is smaller. Furthermore, fractal dimension varies considerably when the critical temperature is different. Specifically, the fractal dimension is smaller as the critical temperature is lower.

Key words vortex self-organization; tropical storm; genesis

引言

多尺度涡旋的相互作用在热带气旋形成过程中起着至关重要的作用。Ritchie 等^[1]指出,气旋式环流背景下的中尺度涡合并可导致一个强度更强、尺度更大涡旋的形成^[2],一系列此类过程的发生能够使原本位于对流层中层的气旋性涡旋向下伸展至地面,触发暖心结构热带气旋的形成。Montgomery 和 Enagonio^[3]以及 Enagonio 和 Montgomery^[4]认为,中尺度对流涡与孕育其中的深对流扰动之间的相互作用可导致低层涡度显著增强。Hendricks 等^[5]提出了高速旋转热塔的概念,认为 10~20 km 尺度的高速旋转热塔可通过彼此间的相互作用增强低层辐合和加热强迫,最终触发更大尺度系统的增强过程。张文龙等^[6]指出,台风生成过程伴随着涡旋对流热塔、与带状对流云系伴随的涡度带合并成长为中尺度对流涡旋(MCV)以及大尺度条件的复杂相互作用。魏娜^[7]的研究表明深对流爆发现象出现在热带气旋生成前 12~18 h。

自 2000s 年代起,罗哲贤和他的合作者们^[8-18]引入了涡旋自组织的概念来分析多尺度系统中的热带气旋形成和发展过程,为认识热带气旋形成机制提供了一个新视角,提出了一系列对理论认识和业务预报有启发性的观点:中尺度地形或中 γ 涡的存在,可显著改变涡自组织的终态,使分离的中 β 涡合并成类台风涡^[9,13];初始中 γ 涡的个数和位置不同,会影响中 β 涡的涡作用结果,进而影响到新生台风尺度涡的强度和路径,即非线性相互作用的结果可在不同尺度层次之间传递^[8,14];多涡共存条件下的双涡作用是多涡自组织的基本物理过程,初始场上的每一个涡块可能成为一个新涡内区的涡量来源,也可能成为新涡螺旋带的涡量来源^[10];中尺度对流涡对热带风暴强度与结构的影响具有随机性,风暴初始强度、中尺度涡的数量、强度、结构、尺度等均会显著影响涡自组织的过程和终态特征^[11];当有更大尺度系统(如副热带高压)存在时,

台风尺度涡与中尺度涡的相互作用结果会发生一定程度的改变,轴对称化现象主要出现在台风尺度涡的内区^[15]。

然而,上述工作基本都是在正压或斜压模式框架下的理想数值试验研究,关于热带气旋形成过程中的涡旋自组织现象及其复杂性尚未见到系统性的观测研究。基于实际大气中云块往往和涡块相对应的事实^[15],本文将应用高分辨率的红外卫星云图给出一个典型个例的初步结果。第二节将简要介绍所用资料和个例,第三节分析增强红外云图显示的涡旋自组织过程。第四节给出该个例从低压扰动发展到热带风暴,再至增强为台风的亮温谱特征,第五节对相关云团的特征进行定量讨论,包括尺度、强度、分维和径向廓线等。最后进行小结和讨论。

1 个例和资料概述

所选个例为 1988 年第 7 号台风(英文名 Bill,以下简称 8807)。根据中国气象局(CMA)上海台风研究所整编的热带气旋年鉴,1988 年 8 月 4 日 18 时(世界时,下同),该系统中心位于 21°N、128.2°E,近中心最大风速 10 m/s(图 1)。其后 42 h 持续向近正北方向移动,之后折向西北,直至登陆中国大陆减弱消失。近中心最大风速于 5 日 06 时增强到 15 m/s,6 日 18 时增强到 20 m/s,即达热带风暴强度。在 7 日 00—12 时,该热带气旋经历了一个迅速增强过程,达台风强度,也就是其生命史最大强度 35 m/s。

分析所用红外卫星云图资料取自美国国家气候数据中心(NCDC)提供的全球热带气旋卫星资料数据集 HURSAT-B1^[19],时间分辨率 3 h,空间分辨率 0.07 经纬度。该数据集中,8807 的资料起始时间是 8 月 5 日 03 时,因此本文研究时段取为 5 日 03 时—7 日 00 时,基本包含了 8807 的全部热带低压阶段及其增强为热带风暴的过程。研究区域为 21°×21°,区域中心为相应时次 8807 中心所在位置。

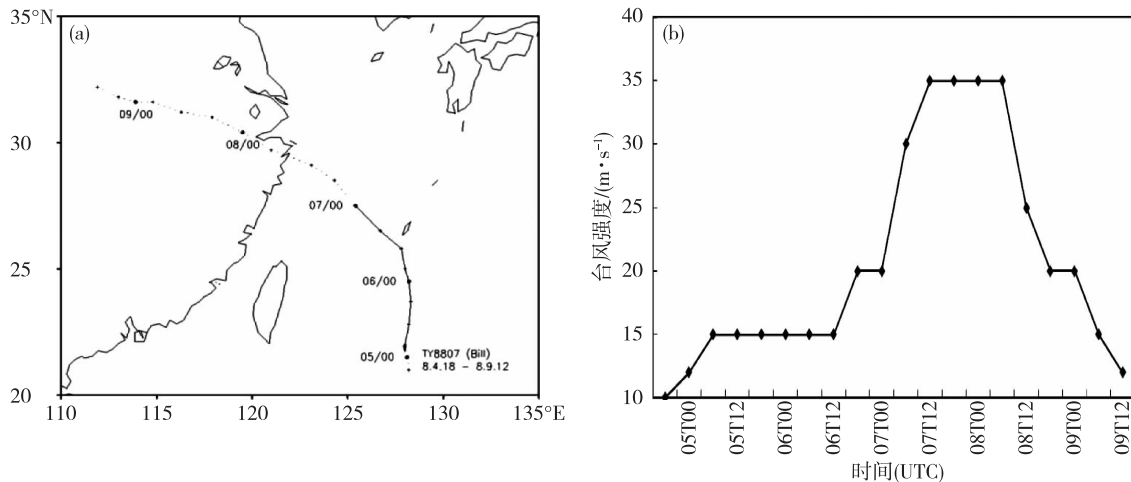


图1 8807 台风路径(a)和强度(b)(a 图中数据为时间,05/00 表示 5 日 00 时,依此类推;实线示出的是云图分析时段,从 05/03 至 07/00。b 图中强度单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig.1 Track (a) and intensities (b) of Typhoon Bill (8807) (The observation times are given in panel a, where the 05/00 means DD/HH. The satellite observation times are from 05/03 to 07/00, which are shown with solid lines; Panel b shows the maximum wind speeds ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$))

2 增强红外云图分析

2.1 纬向扰动带(5 日 03 时) 向经向扰动带(6 日 00 时)的演变

8 月 5 日 03 时,研究区内对流活动活跃(图 2), 30.3%由云顶亮温低于 -32°C 的冷云覆盖, -54°C 冷云盖面积占研究区总面积的 12.5%。如以 -54°C 作为特征温度(下同),该时次共计 167 个独立云团,主要呈纬向排列,云团面积从 36 km^2 到 $98\ 640 \text{ km}^2$ 不等,平均云顶亮温 -63°C 。

其后 12 h,独立云团数量显著减少至 69(图 3,5 日 15 时),与之伴随的是平均云顶亮温在短暂升高之后的下降(-64.4°C),扰动带仍基本维持纬向分布。在增强红外云图上可以看到,这一过程中有不少云团合并现象发生,意味着能量的聚集和扰动强度的增强。在本研究中,云团合并是指 2 个或数个云团彼此相连接为一体的过程,云团分裂则是指 1 个云团破裂为 2 个或数个云团的过程。最为突出的云团合并现象发生在 8807 中心附近。从图 2 可以看到,5 日 03 时,8807 中心附近活跃着 5 个面积相对较大的独立云团和若干零散小云团,云区外围廓线呈气旋式弯曲。这 5 个独立云团面积最小 $12\ 024 \text{ km}^2$,最大 $55\ 332 \text{ km}^2$,平均亮温 -61.3°C 。3 h 后,这些云团合并为 1 个,因其位于低压中心,称之为中心云团,面积 $55\ 908 \text{ km}^2$,平均亮温 -62.9°C ,其南侧(主要是西南侧)有若干零星小云团。至 5 日 09

时,这些小云团进一步并入,但是中心云团面积缩小($24\ 768 \text{ km}^2$),平均亮温升高(-61.3°C)。说明并不是任何合并过程都会导致扰动发展。

另一值得关注的区域是中心云团的东侧。该区域在 5 日 03 时有一近南北走向的带状云区 A,几乎贯穿整个研究区。此后 6 h,该云区的中段和南段显著发展,北段主体被中段并入,发展后的中段头部呈气旋式弯曲状向中心云团卷入,一些从该云区北段和中段分离出去的小扰动在东侧形成一条细长云线。至 5 日 12 时,云区 A 中段向中心云团的螺旋卷入带状更为清晰,同时有小扰动从其东侧分离出去,并入东北侧云线南端。中心云团较前期显著增强,平均亮温达 -68.2°C ,面积略有增大($25\ 308 \text{ km}^2$),轮廓更为分明,接近圆形。

5 日 15 时,环绕中心云团的螺旋卷入状云带消失,应已完成了向中心区域的能量和涡度输送。此时的中心云团面积显著增大至 $55\ 872 \text{ km}^2$,呈扁椭圆形,长轴近南北走向,亮温低于 -70°C 的强对流核(增强云图中的红色区域)由 1 个增加为 6 个,平均亮温 -66.5°C 。该云团的南段应是由前期位于西南侧的弱扰动云团发展并入而来。同时还可以看到,中心云团西侧有一近东西走向的云线,贯穿研究区的西半部,其头部小扰动已与中心云团相接,另有一较强扰动云团与中心云团仅相距不到 100 km,近圆形,面积 $3\ 672 \text{ km}^2$,平均亮温 -62.4°C 。

该时次云图的一个显著特征是,前期活跃的纬

向扰动明显减弱,整个研究区进入了经向扰动发展期。为叙述方便起见,将该时次云图上的主要云区划分为中心区、北区、西南区和东南区四大部分。中心云区主要由前述中心云团及西侧云线组成。北区包含一个面积达 $49\,860\text{ km}^2$ 的主云团和 8 个零星分布在主云团北侧外围、面积在 $36\sim 2\,628\text{ km}^2$ 不等的小云团。北区主云团是由前期带状云区 A 北段残留的小扰动发展而来,位于中心云团的东北偏北方位约 4 个纬距处,二者之间有非常弱的扰动云带相连。西南云区对流活动一直较活跃,在该时次主要由三个面积在 $30\,000\sim 40\,000\text{ km}^2$ 的主云团和

十余个面积在几十至数千平方千米的小云团组成,其中两个主云团位于吕宋岛东北侧。东南云区是由前期带状云区 A 的南段与不断从西侧并入的小扰动共同发展而来,包含两个面积分别为 $55\,764\text{ km}^2$ 和 $95\,148\text{ km}^2$ 的主云团和十余个小云团。研究区东侧中部也有一些面积较大的云团,是由云区 A 中段分离出的扰动并入其东北侧细长云线南端发展而来,这些云团在此后 12 h 内减弱移出了研究区。

中心云团在随后的 6 h 里分裂成了南北两块 B 和 C,并各自有显著发展。其中,C的发展伴随着其

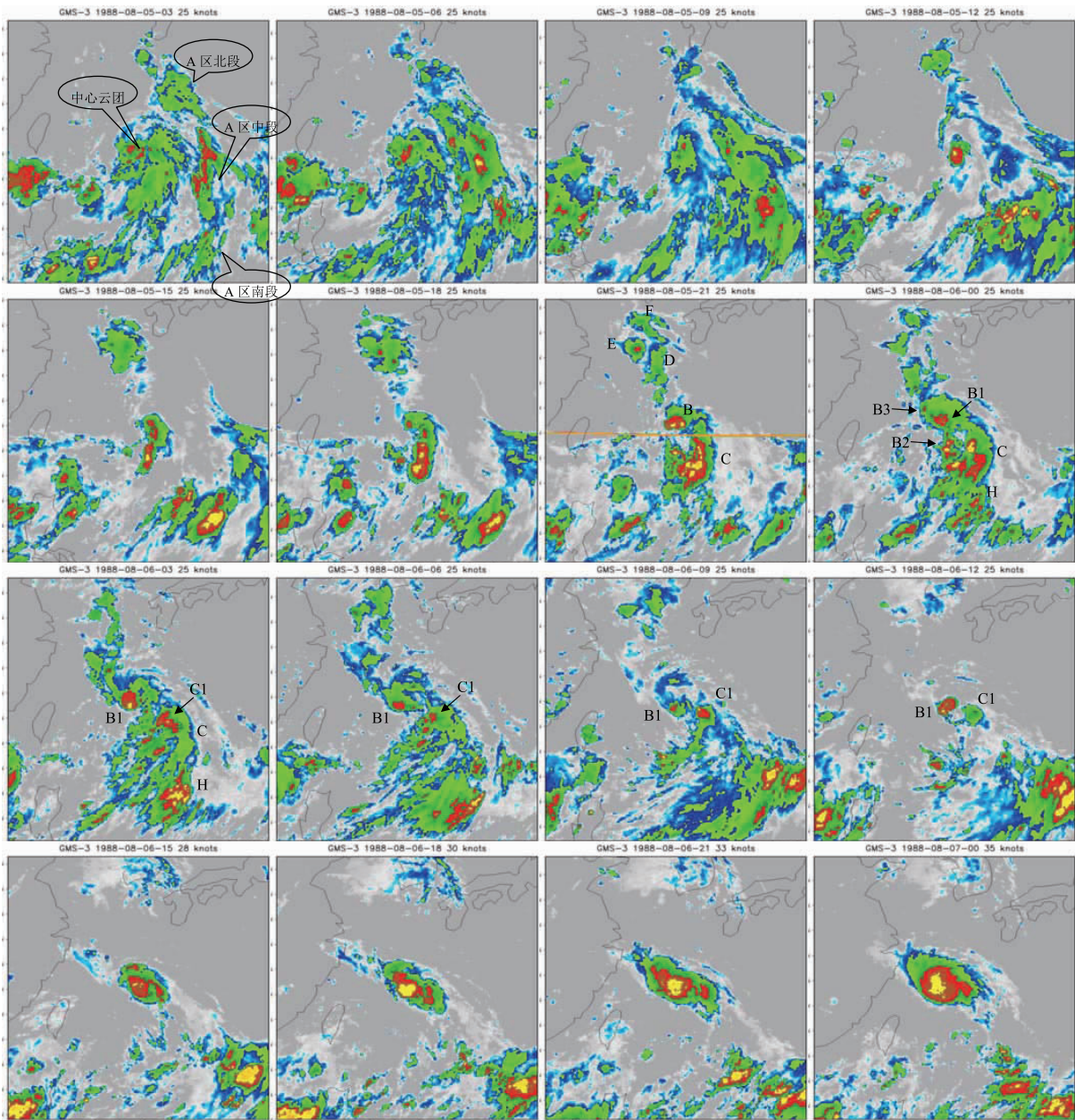


图 2 1988 年 8 月 5 日 03 时—7 日 00 时红外增强云图(3 h 间隔)

Fig.2 Enhanced infrared satellite images with 3 h interval from 03:00 UTC 5 to 00:00 UTC 7 August 1988

西和西南侧小云团的不断并入,在5日21时面积超过14万 km^2 ,平均亮温 $-68.2\text{ }^\circ\text{C}$ 。而B的发展则伴随着其与北云区之间扰动云团的发展和并入,5日21时面积达35 928 km^2 ,平均亮温 $-67.7\text{ }^\circ\text{C}$ 。同时,北云区的主云团也在发展过程中分裂成南北两块D和E,分裂后的南部云团D正南北走向,长约300 km,宽约100 km,与中心云团B仅相距不到2个纬距,平均亮温 $-60\text{ }^\circ\text{C}$ 。其与B之间还有另一小云团,是由原本就位于二者之间的小扰动发展而来。北部云团E近圆形,面积12 528 km^2 ,平均亮温 $-64\text{ }^\circ\text{C}$ 。同时,北云区最北侧的若干零星小云团也合并发展成云团F,位于云团E的东北侧,二者边界最短距离不超过100 km。西南云区位于吕宋岛东北侧的两个主云团在这一过程中东移,向中心云团C靠近,其中一个在距离C约两个纬距处减弱消失,另一云团则通过弱云线与C相连。东南云区的两个主云团中,东侧云团逐渐减弱并移出研究区,西侧云团位置无显著变化,但略有减弱,面积缩小(30 996 km^2),平均亮温 $-65.3\text{ }^\circ\text{C}$ 。值得注意的是,在该云团和中心云团C之间有十余个小扰动发展。这一阶段的云图演变说明经向扰动得到显著发展,伴随着能量不断从北侧和南侧向中心区域汇集,中心云区范围增大,强度增强。

至6日00时,扰动云带基本完成了从纬向向经向的演变,云团F、E、D、B、C和H自北向南排列成一云带,几乎贯穿整个研究区。东南和西南云区的主云团要么减弱消失或移出研究区,要么成为中心云团C南端的补充云团,通过弱的扰动云带与C相连(如H),而北云区最南端呈螺旋卷入状与中心云团B相连。同时,C和B较前一时次均有显著发展,B不仅仅有北云区小云团的螺旋卷入,还有南侧云团的并入发展,C的发展则主要和南端扰动云团的并入有关。两云团总面积超过30万 km^2 ,平均亮温 $-64.9\text{ }^\circ\text{C}$ 。这两个云团是后期演变发展的核心云团。

从图3和图4可以看到,在经向扰动发展的过程中(5日15时—6日00时),云区所占总面积变化不大,独立云区个数从69增加到85,平均亮温无显著变化,前期略有降低,后期有所升高。

2.2 经向扰动带的能量聚集

随后的阶段是经向扰动能量向8807中心区域聚集(6日00—12时),亦即向云团B和C的核心区汇聚的过程。

6日00时,云团B的南北跨度近6个经纬度,

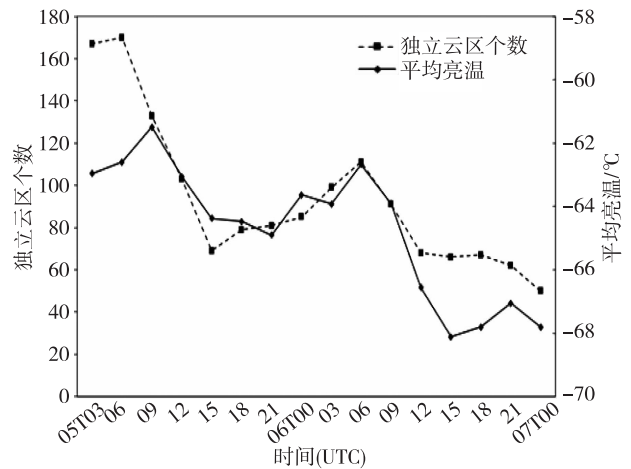


图3 云顶亮温低于 $-54\text{ }^\circ\text{C}$ 独立云区个数(虚线)和平均亮温(实线)

Fig.3 Time series of cloud cluster number (dashed line) with cloud top bright temperature $< -54\text{ }^\circ\text{C}$ and the averaged bright temperature (solid line) of the cloud clusters

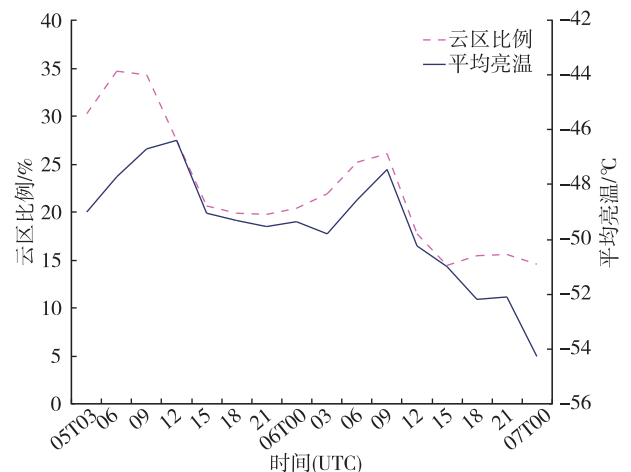


图4 云顶亮温低于 $-32\text{ }^\circ\text{C}$ 云区占研究区比例(虚线)和平均亮温(实线)

Fig.4 Time series of percentage (left vertical coordinate; dashed line) of area with brightness temperature $< -32\text{ }^\circ\text{C}$ to the analysis region and its averaged brightness temperature (right vertical coordinate; solid line)

北宽南窄,北部最宽处东西跨度达4个经纬度。其内部有11个亮温超过 $-70\text{ }^\circ\text{C}$ 的云核,有两个面积较大,分别为9 288和7 380 km^2 ,标记为云核B1和B2。其余云核面积最大不超过1 000 km^2 。从前3小时增强云图的演变可以看出,云核B2是从C云团西部分离并入B云团的,并在这一过程中显著增强。另有一云核B3的出现则与B云团北侧扰动的并入有关。云团C位于B的东南偏南方位,强度和面积

均较 B 大,南北跨度与 B 接近,但宽度较均匀,面积超过 $1\ 000\text{ km}^2$ 的强云核有 4 个,最大达 $19\ 800\text{ km}^2$ 。此时的云团 H 紧挨在 C 的南端略偏东处,其内部有 5 个面积超过 $1\ 000\text{ km}^2$ 的强云核,最大 $4\ 212\text{ km}^2$,基本呈西南—东北走向排列。

6 日 03 时,云团 B 的形态发生了十分显著的变化,强云核个数减少,云核 B1 显著发展,面积增大至 $15\ 768\text{ km}^2$,形状从不规则变为更接近圆形。有两条清晰的螺旋云带与该云核相连,一条从其西南偏南约 5 个纬距处延伸至其东南侧约 2 个纬距处,然后再环绕至东北方位与之相连,共由十余个面积从数十平方千米至数万平方千米大小不等的云团组成,最宽处约 2 个经纬度。另一条螺旋带状云位于云核 B1 东北侧,向北伸展接近研究区的最北端,该云带的北段由云团 E、F 和若干发展的小扰动组成,南段包含两条近乎平行的带状云区,左侧带状云区由南落的云团 D 及另一新生云团组成,右侧带状云区由原本即呈螺旋卷入状与云团 B 相连的小扰动发展而来。此时,云团 C 的南段分裂成东西两部分,东部在后期与云团 H 合并、发展并东移,西部则与北段一起构成该时刻云团 C 的主体,强度较前一时次有所减弱,面积超过 $1\ 000\text{ km}^2$ 的强云核减少至 2 个,较大的一个位于北段(C1),面积 $16\ 056\text{ km}^2$ 。

此后 9 h 内,云团 B 西北侧的螺旋云带南段逐渐减弱消失,北段则与南段分离,在向东北偏东方向缓慢移动过程中也趋于减弱、消失。环绕云团 B 东北—东—东南—南—西南侧的螺旋云带在 3 h 后也只剩下与 B 相连的一小段,位于 B 的东北侧,由一南—北两个近乎平行排列的两个云团组成,均呈气旋式卷入状与 B 相连,再过 3 h 则进一步减弱为仅剩 1 个云团,面积仅 576 km^2 ,但仍然通过弱云带与 B 螺旋式相连。云核 B1 在这一过程中有所减弱,至 6 日 09 时,面积仅 $2\ 376\text{ km}^2$ 。云团 C 北段的云核 C1 在经历了一个短暂减弱过程后再次显著发展,6 日 09 时面积达 $7\ 272\text{ km}^2$,其南段宽度较前期显著变窄,呈气旋式弯曲的狭长带状。该时次红外增强云图显示,云团 B 和 C 呈双逗点互旋式,头部边缘距离约 0.5 经纬度。

6 日 12 时,云团 B 和 C 的螺旋状云尾均已减弱消失,二者剩余部分的面积相近,分别为 $18\ 396\text{ km}^2$ 和 $14\ 364\text{ km}^2$,但是强度差异较大,云核 B1 得到显著发展,面积增大至 $13\ 356\text{ km}^2$,云核 C1 则减弱至仅约 100 km^2 。两云团边界的最短距离较 3 h 前进

一步减小,仅约 40 km 。

至此,经向扰动能量向 8807 中心区域汇集的过程基本完成,与之伴随的是云区面积、独立云区个数以及平均云顶亮温在前期的略有增加和后期的急剧下降(图 3 和图 4)。其中,云区面积比例在 6 日 00 时为 20.4%,12 时为 17.8%,独立云区个数在这两个时次分别为 85 和 68,平均云顶亮温为 $-63.6\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $-66.6\text{ }^\circ\text{C}$,总体趋势是云区面积减小,但是强度在增强。

2.3 核心云团的合并及轴对称化过程

8 月 6 日 12 时之后,8807 结束了在热带低压阶段的维持和酝酿而进入快速发展阶段,与之伴随的增强红外云图演变特征是云团 B 和 C 的合并、合并之后中心云团的轴对称化以及研究区内其他扰动云团活动的显著减弱。

6 日 12—15 时,从图 2 可以看到云团 B 和 C 合并成 1 个并强烈发展,面积较 12 时 B 和 C 的总面积还大,达 $78\ 228\text{ km}^2$,呈椭圆形,长轴呈近西北—东南走向,长短轴比例接近 2:1。从形态上看,该云团应是以 B 为主体发展起来的,是此后 8807 发展的中心云团。从图 2 还可以看到,该时次中心云团的東西两侧各有一低云扰动带呈气旋式卷入状与中心云区相连,其宽度和水平范围较前一时次均有所发展,说明有更多的弱扰动能量在低层向中心区域输送。与之相对应,此后中心云团继续发展,在 18 时和 21 时面积分别达 10 万 km^2 和 14 万 km^2 ,随着东西两个方向能量的不断输入,长轴显著增长,走向基本保持不变,短轴长度变化不大,长短轴比例接近 3:1。在 6 h 时间内,平均云顶亮温从 $-67.7\text{ }^\circ\text{C}$ 迅速增长至 $-68.8\text{ }^\circ\text{C}$ 。东西两侧低云扰动带显著减弱,意味着能量输送过程的基本完成,中心云团进入轴对称化发展过程,在 3 h 后,长短轴比例减小至 1.5:1,尤其是强云核呈近圆形位于云团中部偏西南侧,西南边界光滑。云团面积达 15 万 km^2 ,平均亮温 $-69.8\text{ }^\circ\text{C}$,8807 达热带风暴强度。

在这一过程中,研究区内其他区域的扰动云团活动均显著减弱,总云区面积在中心云团发展的同时有所减小,所占比例降至 14.5%,独立云团个数减至研究时段内的最低(50 个)。但是得益于中心云团的迅速发展,平均云顶亮温也是在持续降低,至 7 日 00 时为 $-67.8\text{ }^\circ\text{C}$ 。

3 多尺度能量转换的 Fourier 分析

以上分析表明,8807 从一个热带低压发展成为

热带风暴,经历了十分复杂的不同尺度、不同方向扰动云团的自组织,有些云团合并,有些云团破裂、减弱,有些云团部分合并,合并过程可导致云团活动增强,也可导致云团活动减弱,有些云团成为另一云团的能量输送带,有些云团则作为扰动的主体得到发展。扰动能量经历了纬向扰动发展—纬向能量汇聚—经向扰动发展—经向能量汇聚—热带风暴尺度能量急剧增长的过程。

周秀骥等^[9]根据理想数值试验结果指出,在波数域上进行谱密度分析,可清晰地看到中 β 涡旋通过自组织形成类台风涡过程中不同尺度能量的相

互转换。中 β 涡自组织过程中,谱密度随时间的演变大致可分为两个阶段:第一阶段双涡共存,不同尺度系统能量转换频繁发生;第二阶段是双涡合并后的单涡形态,分布型式相对稳定,比较激烈的不同尺度系统之间能量的转换不明显。

类似地,对以 8807 为中心的 1 500 km 水平范围内的红外云顶亮温作二维 Fourier 分解。计算时,将高于 $-54\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的亮温全部人为设定为等于 $-54\text{ }^{\circ}\text{C}$,并对每一时次的云顶亮温场进行标准化处理,得到无量纲数据,然后采用快速 Fourier 分解算法进行分析,结果见图 5。由图可见,谱密度场的演变确实非

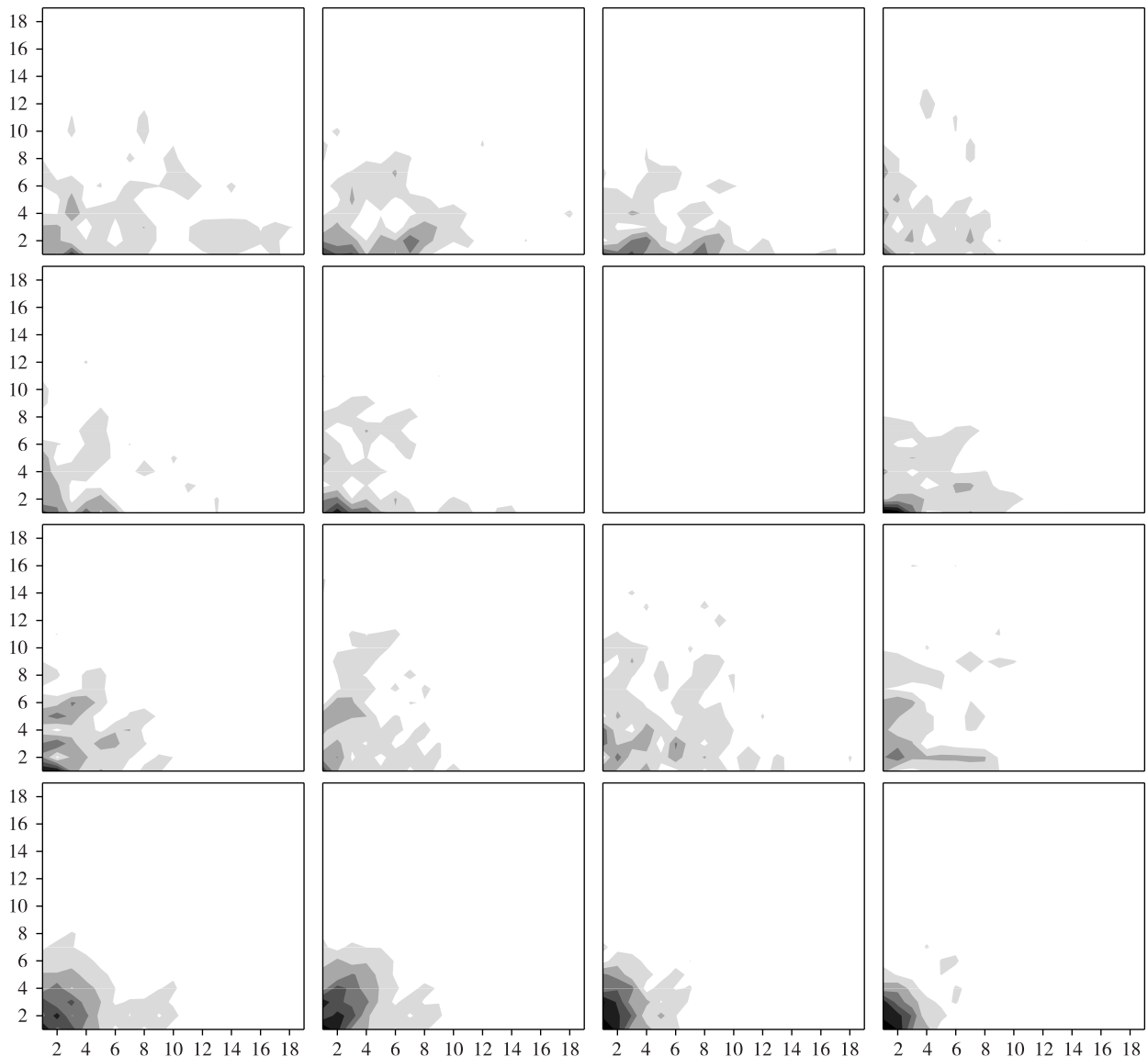


图 5 二维 Fourier 分解得到的波数域功率谱密度场(横坐标为纬向波数 k ,纵坐标为经向波数 l ;每幅图对应的时间同图 2;其中,5 日 21 时的云图中因有异常数据,未能进行 Fourier 分解,在此显示为空白)

Fig.5 Distribution of the power spectrum density in 2-dimensional wave number domain (The abscissa is the longitudinal wave number k and the ordinate is the latitudinal wave number l . The analysis times are as in Fig. 2. Note that the two-dimensional Fourier analyses cannot be performed at 21:00 UTC 5 August as there are some missing data in the satellite image, so the corresponding chart is blank)

清楚地体现出了不同空间尺度系统能量的转换特征,而且也可大致分为两个阶段。第一阶段,多涡共存,不同方向、不同尺度系统能量转换频繁,8807 一直维持低压强度。具体地说,在纬向扰动盛行时(5日03—09时),谱密度高值区脊线与纵坐标近乎平行。随后,纬向扰动开始减弱,与纵坐标平行的高值脊线强度减弱,且开始从高波数域向低波数域压缩,能量从较小尺度空间系统向较大尺度空间系统转移,同时, l 方向能量增强,逐渐出现与横坐标平行的高值脊线,意味着经向扰动发展。至6日03时,经向扰动发展至最强,出现了3条与横坐标平行的高值脊线。接着进入经向扰动衰减期,脊线强度减弱,且向低波数域靠近。值得注意的是,在经向扰动衰减的同时,纬向扰动再次有所发展,同时出现了更高波数域的扰动,说明能量散布于更广阔的波数域空间。随后,能量开始稳定地向低波数域集中,于6h后进入第二阶段,即单涡发展阶段,8807 增强为热带风暴。在这一阶段没有平行横坐标或纵坐标的高值脊线出现,能量在经、纬两个方向上的分布相对均匀,谱密度等值线形态稳定少变,能量持续不断地向低波数域转移,具体表现为等值线包围的面积不断向坐标原点压缩。

4 云团分维特征

分维是描述云团空间结构的一个有效参数。早期研究发现,卫星图像上的云具有统计上的自相似性,并具有大约 1.35 的分维数^[20]。Luo 和 Liu^[13]应用理想数值试验结果指出,准地转涡度方程模式和原始方程模式中的自组织随机涡旋也具有类似的分维特征,为应用二维涡旋动力学解释三维对流云活动规律提供了进一步的理论依据。

采用与 Luo 和 Liu^[13]类似的方法,对 8807 发展成为热带风暴过程中相关云团的分维进行了计算,以进一步定量认识这些云团的空间结构及其演变特征(图6)。具体计算步骤如下:在每一时次,计算每一独立云团的面积 A 和周长 P ,只有部分云体位于研究区内的云团不予考虑。然后求以 $\log_{10}\sqrt{A}$ 为自变量,以 $\log_{10}P$ 为因变量的线性回归,二者的回归系数即为分维。

分别以 $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-54\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为云团边界进行了计算,发现分维在 1.1 到 1.3 之间变化(图6),小于已有研究提出的 1.3~1.35。图6还表明,取不同临界温度作为云团边界得到的结果是有差异的,而且临界温度越低,得到的分维越小,说明对

流越强,云团边界越规则。

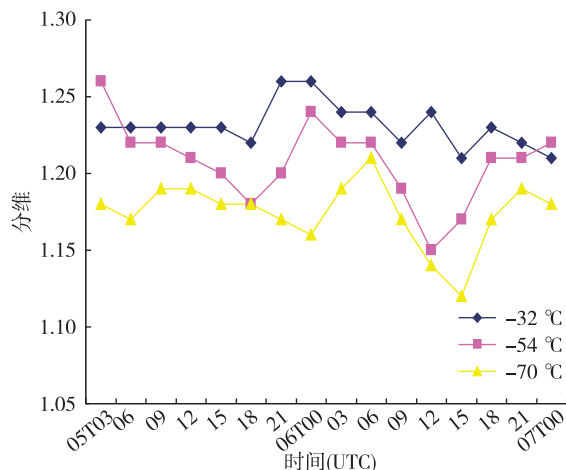


图6 云团分维(以 $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-54\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为云团边界的结果)

Fig.6 Time series of fractal dimension of cloud clusters with their boundary brightness temperature equal to $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-54\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectively

5 结论与讨论

理想数值试验的结果表明,是否考虑地形、是否存在其他扰动涡旋、涡旋径向廓线、涡旋强度、涡旋尺度等均会显著影响涡旋自组织的结果,发生涡旋合并的涡则一般有两类“前景”,一是成为一个新涡内区涡量来源,一是成为新涡螺旋带的涡量来源。

本文通过分析 8807 从热带低压发展成热带风暴的过程,给出了热带风暴形成过程中存在复杂涡旋自组织现象的观测证据,发现涡旋自组织可在从数十到十万 km^2 的各种尺度扰动云团之间发生,发生合并的云团除了理想数值试验中的两类前景之外,还存在第三类前景,即较大尺度的云团会发生分裂,部分与其他云团合并。合并形成的新云团可能发展也有可能减弱,这应取决于新云团所处的环境以及是否有其他云团补充并入。

用二维 Fourier 分析可以清楚地看到 8807 发展成热带风暴的过程可分为两个阶段,一是多涡共存,不同方向、不同尺度系统能量转换频繁阶段,另一是单涡发展阶段,谱密度等值线形态稳定少变。分维计算结果表明,热带风暴形成过程中的相关云团较已有研究分析的云团略显规则,分维略小于已有结果。此外,临界温度取值不同,分维是有差异的,边界温度越低,分维越小。

涡旋自组织是一种十分复杂的自然现象,本文结论仅仅是根据一个实例的分析而得出,是否具有

普适性尚需开展更多的实例研究来予以论证。此外,本文所用红外云图资料的时间分辨率是3 h,所得结论也还需要使用更高分辨率的资料来加以进一步分析和论证。

致谢:感谢上海中心气象台姚祖庆、上海台风研究所鲁小琴为本文计算和分析提供的帮助,感谢美国国家气候数据中心(NCDC)K. R. Knapp 博士为红外云图资料读取提供的帮助。

参考文献:

- [1] Ritchie E A, Simpson J, Liu W T, et al. Present day satellite technology for hurricane research: A closer look at formation and intensification [M]//Hurricane Coping with Disaster. Washington DC: American Geophysical Union, 2013: 249-289.
- [2] Ritchie E A, Holland G J. Scale interactions during the formation of Typhoon Irving [J]. *Mon Wea Rev*, 1997, 125 (125): 1377-1396.
- [3] Montgomery M T, Enagonio J. Tropical cyclogenesis via convectively forced vortex Rossby waves in a three-dimensional quasigeostrophic model [J]. *J Atmos Sci*, 1998, 55(20): 3176-3207.
- [4] Enagonio J, Montgomery M T. Tropical cyclogenesis via convectively forced Rossby waves in a shallow water primitive equation model [J]. *J Atmos Sci*, 2001, 58(7): 685-705.
- [5] Hendricks E A, Montgomery M T, Davis C A. The role of "Vortical" hot towers in the formation of tropical Cyclone Diana (1984) [J]. *J Atmos Sci*, 2004, 61 (11): 1209-1232.
- [6] 张文龙, 张大林, 王昂生, 等. 台风榴莲(2001)在季风槽中生成的机制探讨 [J]. *气象学报*, 2009, 67(5): 811-827.
- [7] 魏娜. 东亚季风环流背景下热带气旋生成发展研究 [D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2016.
- [8] 罗哲贤. 多尺度系统中台风自组织的研究 [J]. *气象学报*, 2005, 63(5): 672-682.
- [9] 周秀骥, 罗哲贤, 高守亭. 涡旋自组织的两类可能机制 [J]. *中国科学 D 辑*, 2006, 36(2): 201-208.
- [10] 周嘉陵, 马镜娴, 陈联寿, 等. 初始涡的结构与尺度对涡旋自组织影响的研究 [J]. *气象学报*, 2006, 64(5): 537-551.
- [11] 周嘉陵, 马镜娴, 陈联寿, 等. 多涡自组织的初步研究 [J]. *气象学报*, 2006, 64(4): 464-473.
- [12] 沈武, 周嘉陵, 马镜娴, 等. 非轴对称双涡相互作用的研究 [J]. *气象学报*, 2006, 64(4): 453-463.
- [13] Luo Z, Liu C. A tropical storm: Self-organization and complexity [J]. *Geophys Res Lett*, 2007, 34 (5): 508-512. doi: 10.1029/2006GL028612.
- [14] Luo Z, Liu C. A validation of the fractal dimension of cloud boundaries [J]. *Geophys Res Lett*, 2007, 34 (3): L03808. doi: 10.1029/2006GL028472.
- [15] Luo Z, Liu C. An investigation into axisymmetrization of a vortex embedded in horizontal shearing currents [J]. *J Geophys Res*, 2007, 112: D06103. doi: 10.1029/2006JD007087.
- [16] 代刊, 罗哲贤, 滕代高. 小尺度系统对涡旋自组织的影响 [J]. *大气科学学报*, 2008, 31(2): 158-166.
- [17] 滕代高, 罗哲贤, 潘劲松. 斜压大气中双涡自组织与台风形成的初步研究 [J]. *热带气象学报*, 2009, 25(4): 394-400.
- [18] 马革兰, 罗哲贤. 地形对涡旋自组织影响的初步研究 [J]. *南京气象学院学报*, 2006, 29(6): 769-774.
- [19] Knapp K R, Kossin J P. New global tropical cyclone data from ISCCP B1 geostationary satellite observations [J]. *J Appl Remote Sens*, 2007, 1(1): 013505.
- [20] Lovejoy S. Area-perimeter relation for rain and cloud areas [J]. *Science*, 1982, 216(4542): 185-187.