

基于 FY-2 卫星云垂直运动解析 近海突然增强台风内动力演变机制

王新^{1,2}, 郭强^{1*}, 文锐¹

(1. 国家卫星气象中心, 北京 10086;

2. 夏威夷大学马诺阿分校国际太平洋研究中心, 美国檀香山 96822)

摘要:近海台风突然增强监测预报是业务和科研的重点和难点,利用风云二号(FY-2)静止气象卫星高时空分辨率资料,选取近 20 年内南海登陆台风中最具备突然增强特征的两个台风 2017 年天鸽(Hato)和 2012 年韦森特(Vicente),综合考虑风垂直切变影响和辐射变化,形成用于表征台风内云垂直运动信号的计算方法,并应用于两台风近海快速增强的内动力演变机制解析.结果表明,两台风快速增强过程表现跷跷板式的热动力过程,云垂直上升运动的最大值向台风最核心区收拢,促进台风组织结构调整;最核心区 0~50 km 内的云上升运动的持续增强,对台风发生突然增强贡献最显著,并伴有 1~2 h 内的突变;FY-2 卫星分钟级观测资料发挥了重要作用,结果可作为对台风结构和强度演变的高频次监测新手段为台风监测预报业务和科研工作提供参考.

关键词:台风强度突然增强;云垂直运动;内动力演变机制

中图分类号:P405 文献标识码:A

Inner dynamic mechanism analysis for tropical cyclone rapid intensification based on FY-2 cloud motion

WANG Xin^{1,2}, GUO Qiang^{1*}, WEN Rui

(1. National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China;

2. International Pacific Research Center, University of Hawaii at Manoa, Honolulu 96822, Hawaii US)

Abstract: Tropical cyclone (TCs) rapid intensification (RI) often results in large forecast errors and it is among the most significant challenges facing operational TCs forecasting centers. In this study, Hato (2017) and Vicente (2012) were selected that have the most significant features happened in the South China Sea in the past 20 years. Based on Fengyun-2 (FY-2) geostationary meteorological satellite high-temporal resolution data, an algorithm for characterizing the cloud in TCs vertical motion signal was developed, which was combined with vertical wind shear and inner dynamic information. And the authors investigate the interaction between the cloud vertical motion and RI. The results show that the process of RI like the seesaw, with the convection intensity increased and decreased, better organized TCs internal structure was proved TC intensity change with the maximum value of the cloud vertical motion gathered in the core area of the typhoon. The continuous increase of cloud ascending motion within 0~50 km was the most significant contribution to RI, and sudden changes had happened within 1~2 h. The findings corroborate previous RI study results while providing additional insights into internal structure in TC, also it provides references for TC monitoring and future study work.

Key words: rapid intensification, cloud motion, inner dynamic mechanism

PACS: 92.60.Wc, 92.60.Ox

收稿日期:2018-09-04,修回日期:2018-11-15

Received date: 2018-09-04, revised date: 2018-11-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0504100),国家自然科学基金项目(41875037)

Foundation items: Supported by National Basic Research Program of China (2017YFB0504100), National Natural Science Foundation of China (41875037)

作者简介 (Biography): 王新(1980-),女,正研级高级工程师,博士,主要研究领域为多源卫星资料在天气中的应用. E-mail: xinwang@cma.gov.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: guoqiang@cma.gov.cn

引言

台风(Tropical Cyclone: TC)近海强度快速增强(Rapid Intensification: RI)常常给沿海带来防灾减灾的压力,RI 的发生仍然是 TC 强度预报中最大的误差来源^[1-4],对我国近海突然增强台风年变化和分布情况统计可知,发生 RI 的 TC 占近海台风总数约 10%,主要发生在 7-9 月,南海北部发生频率约占总数的 75%^[5]. 多年来科学家们致力于强度突变机制方面的研究,从海温、风垂直切变、湿度等环境场,以及自身结构等多方面找到与 RI 相关联的预报因子或关键前兆信号发现 RI 的过程与内动力过程更密切相关^[6-9]关键的因子包括眼墙稳定度、内核混合过程、眼墙替换以及冲顶对流(Overshooting: OS)等. 在这些因子中,对于 RI 是否发生的研究热点和重点之一是 TC 内对流系统(MCS)发展变化情况,其中,OS 的分布和强度变化对于 RI 的影响是具有争议的方面,多项利用数值模拟和观测资料的研究结果表明:OS 是伴随着 RI 过程发生的,且与 RI 的爆发有一定的相关性^[10-14],出现 OS 的 TC 中发生 RI 的趋势增强,这种相关程度在西北太平洋 TC 为 18.52%,对于 RI 的预报技巧评分达到 0.35^[15]. 另外有研究指出 OS 虽然是 RI 的伴生品,但不是 RI 促发的充分必要条件^[16]. 基于上述研究结果发现:RI 发生发展,伴随着 TC 自身及内部不同尺度之间复杂的相互作用,目前对于 TC 内部热力动力演变特征与 RI 的关系研究尚不足. 而这些演变过程,需要时空分辨率高并能够对 TC 内部多尺度进行实时且连续的观测资料,进一步监视解析 TC 演变特征从而促进对其中涉及的机理机制有更深入的认识.

TC 内部的中小尺度对流系统以及更小尺度的冲顶对流,均是非常短暂的演变过程,有些仅仅是小时内的变化^[17],精细化结构的探测是近年来迫切需要的信息,飞机飞行观测和下投式仪器探测均不能得到全面的 TC 结构,无法形成连续的观测数据. 近年来随着观测资料特别是卫星资料的增多,例如:CloudSat、TRMM 卫星观测能够获得 TC 的内部三维的降水、云粒子含量等分布情况^[13,16,18-19]. 搭载在 FY-3、NOAA、MeTop 等卫星的被动微波探测能够部分穿透云探测到 TC 暖心的结构,为预报员获取 TC 内部结构提供了众多宝贵信息. 然后,由于极轨气象卫星受到卫星重访周期和轨道覆盖范围的限制,缺乏高时空分辨率准实时地跟踪 TC 内中小尺度系统

的变化^[15],对 TC 内部细节变化的缺失往往也会导致忽略 RI 可能发生的先兆信号,且 TC 的 RI 过程往往发生在十几小时、几小时甚至更短时段,上述提到的卫星遥感资料对 TC 内部结构探测的时空分辨率仍无法满足在小时内的演变需求,迫切需要高时空分辨率资料对于 TC 内部结构演变信息的获取,以满足 TC 监测预报业务和 TC 内部热动力演变机制研究的需求.

利用国内外静止气象卫星判识 TC 内部对流并追踪其演变方面的研究,在高时空分辨率观测方面能够切合上述需求,通过云图动画分析捕获到的云系特征快速演变,提升对于 TC 内部中小尺度系统的分布和演变规律的认识^[20]. 我国 FY-2 系列静止气象卫星一直秉承双星观测互为备份的观测目标,自 2012 年以来,形成了对我国及周边区域同一区域的三星同时观测(2012 年至 2015 年自西向东为:FY-2D、FY-2E、FY-2F 三星,目前自西向东为:FY-2E、FY-2G、FY-2F 三星),其中, FY-2F 卫星突破了以往常规化的 FY-2 双星固定时间频次的扫描模式,实现了分钟级区域快速扫描技术^[21],三颗卫星对于同一目标的同时观测,以及机动灵活的观测方式适应灾害天气突发和多变特性^[22]. 在云图主观分析的基础上,根据 FY-2 三星对同一目标不同角度的观测特性形成了三星云顶高度卫星反演产品,增加的定量化云顶变化信息能够满足上述 TC 内部不同尺度结构的观测需求,在近 5 年多个登陆我国的高影响台风分析预报,以及与历史相似个例的对比研究中取得了显著的应用效果.

本研究基于 FY-2 静止卫星高时空分辨率观测资料,定义并计算的云的垂直运动相关参数,在考虑风垂直切变动力因子的同时,采用了 TC 云高变化、云发展(云顶变化)的垂直运动速度和加速度等因素讨论解译分析遥感资料体现的 RI 机制,建立一种利用国产卫星监测 TC 内部热动力结构变化的新方法手段,结合台风突然增强的热动力学机制,解析出卫星资料中所反映出的热动力学机制的演变特征,也为卫星资料定量化应用提供了新的思路. 主要分为以下四个部分:第一部分数据和方法,分别介绍了文中所使用的各类数据及物理量,并对文中定义云垂直运动参数计算方法进行了方法介绍;第二部分简述研究中选取的近海快速增强 TC 的特点和异同点;第三部分,重点阐述了 FY-2 云的垂直运动参数在 TC 强度突变过程中的表现和解析内动力演变

机制;第四部分,总结研究结论并对研究结果应用前景和进一步工作进行说明。

1 数据和方法

本研究,主要用到了三类数据,第一类数据是 FY-2 卫星反演的三星云顶高度产品(源自国家卫星气象中心),时间分辨率为 6 分钟,星下点空间分辨率为 5 公里;第二类数据是台风最佳路径数据(源自中国气象局上海台风所),本研究中使用了其间隔 6 h 一次的台风中心经纬度、中心最低气压信息,与卫星资料相匹配时在 6 h 内做了线性插值;第三类数据是全球再分析数据(源自: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets>),在研究中使用了分辨率为 1° 的格点化的各垂直气压层的风速矢量。

定义基于 FY-2 卫星立体云高计算的云垂直运动速度 V_c ,及云垂直运动加速度 A_c . 其中云垂直运动速度 V_c 的大小代表云垂直运动的大小,正值代表云上升,负值代表云下沉. 云垂直运动加速度 A_c 的大小代表云垂直运动的快慢,正值代表云上升或下沉趋势的加速,负值代表减速. 两参数的物理意义为:基于时间动态化的云顶高度的升高或降低,指示云垂直运动的相对大小、方向和快慢,是能够反映 TC 内部上升和下沉运动的动力学指标. 如式(1-2)所示,式(1)中 $V_c(j)$ 代表在 j 时刻的云垂直运动速度, $H_T(i+1)$ 和 $H_T(i)$ 为前后两个相邻时次的云顶高度, ΔT 是 i 时次距离 $i+1$ 时次的时间间隔. 式(2)中 $A_c(k)$ 代表在 K 时刻的云垂直运动加速度,其由前后两个相邻时次的云垂直运动速度 $V_c(j+1)$ 和 $V_c(j)$ 变化计算得到. 式(1-2)中 T_E 表示研究时段的总时间点个数.

$$V_c(j) = \frac{H_T(i+1) - H_T(i)}{\Delta T},$$

$$(i = 1, 2, \dots, T_E; j = 1, 2, \dots, T_E - 1), \quad (1)$$

$$A_c(k) = \frac{V_c(i+1) - V_c(i)}{\Delta T},$$

$$(k = 1, 2, \dots, T_E - 2), \quad (2)$$

风垂直切变计算方法:采用 1 000 ~ 300 hPa 为高层垂直切变,定义为 $VWS_{1000 \sim 300 \text{ hPa}}$, 1 000 ~ 850 hPa 为低层切变,定义为 $VWS_{1000 \sim 850 \text{ hPa}}$, 两层风垂直切变的计算一定程度上可以避免高层台风流出层对切变计算的影响. 风垂直切变是计算不同气压层之间风的大小和方向的矢量差,并规定风垂直切变下风方向的左侧为 Downshear Left (DL),风垂直切变下风方向的右侧为 Downshear Right (DR),风垂直

切变上风方向的左侧为 Upshear Left (UL),风垂直切变下风方向的右侧为 Upshear Right (UR),在计算分象限的云高时序变化时,采用了随风垂直切变 (Vertical Wind Shear: VWS) 方向动态变化的分布 (如图 1 所示).

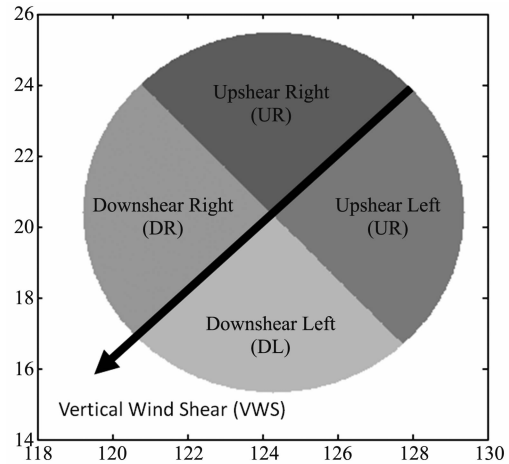


图 1 台风区域风垂直切变及四个象限分割示意图
Fig. 1 sketch map of vertical wind shear and four quadrant divisions in TC range

2 2012 年 Vicente 和 2017 年 Hato 典型突然增强台风异同点

利用台风最佳路径数据,采用国际认可的近海加强算法^[23](该定义为 24 h 超过 15.4 m/s(30 kt))统计分析可知,2000 年以后为南海台风近海加强集中发生期,2017 年 Hato (Hato) 和 2012 年 Vicente (Vicente) 为 RI 程度最显著,两台风登陆点非常接近,登陆前最强分别为 52 m/s 和 45 m/s 均达到强台风强度,共同且突出的特点是在登陆前强度持续增强,相关信息详见表 1 和图 2,表 1 列出台风 RI 阶段经纬度信息、强度及强度变化、发生时段等信息. 图 2(a-b)分别为 Vicente 和 Hato 台风的路径图,两台风均在广东南部沿海即将登陆时发生了强度快速增强,图 2(c-d)所示为 24 h 内(蓝色实线)和 6 h 内(绿色实线)中心附近最大风速变化的峰值,蓝色五角星代表强度突然增强的地点. 综合表 1 和图 2 比较分析可见:Hato 和 Vicente 台风,RI 均发生在登陆前 24 h 内,24 h 最大增强率为 20 m/s,且均在登陆前 6 h 内 RI 增强率达到最强,两台风相比较 Hato 台风 6 h 最大增强率比 Vicente 台风更强,分别为 10 m/s 和 7 m/s, Hato 成为自 1949 年以来登陆广东珠海最强台风.

表 1 2012 年 Vicente 台风和 2017 年 Hato 台风突然增强发生发展过程的相关信息

Table 1 TC RI and some related information of Vicente and Hato happened in 2012 and 2017

台风名称	登陆地点	RI 发生地点	RI 阶段与 登陆点距离	RI 发生时间 (UTC)	24 h 最大增强率 /(m/s)	6 h 最大增强率 /(m/s)	RI 前 24 h 强度	台风登陆时间 (UTC)
2012Vicente	中国广东省 台山市赤溪沿海	113.3°E,21.7°N	约 43 km	7 月 23 日 18:00	20 m/s	7 m/s	强热带风暴 —强台风	7 月 23 日 22:00
2017Hato	中国广东省 珠海市南部沿海	114.5°E,21.5°N	约 128 km	8 月 23 日 00:00	20 m/s	10 m/s	强热带风暴 —强台风	8 月 23 日 04:35

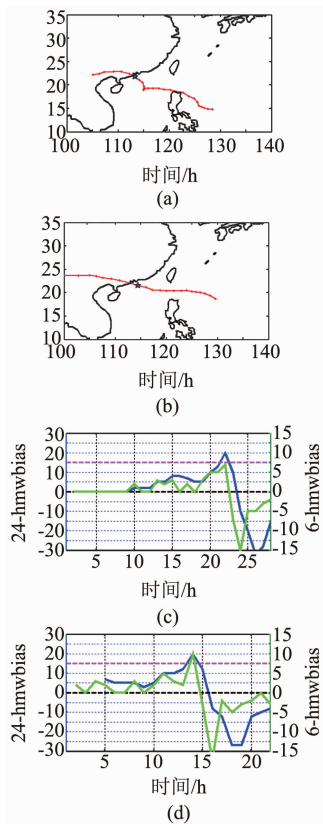


图 2 2012 年 Vicente 台风和 2017 年 Hato 台风路径 (a、b) 及 24 h (c、d 蓝色实线)、6 h (c、d 绿色实线) 强度变化图

Fig. 2 Intensity change diagram of 2012 Vicente and 2017 Hato 24 hours (blue solid line), 6 hours (green solid line)

进一步,比较分析两台风的动力学参数垂直风切变在主要生命史阶段的演变过程,如图 3 所示,两台风的高低层垂直风切变具有明显的不同:Vicente 台风的 $VWS_{1000 \sim 300 \text{ hPa}}$ 偏小,随着强度增强略有减小但整体变化幅度不大,而 $VWS_{1000 \sim 850 \text{ hPa}}$ 在 RI 爆发前的 48 h 内有明显增强,随着台风强度进一步增强明显减弱,在 RI 发生之后减弱. Hato 台风的 $VWS_{1000 \sim 300 \text{ hPa}}$ 偏大,随着强度增强持续增大登陆后减小, $VWS_{1000 \sim 850 \text{ hPa}}$ 相对变化不显著,但随着台风强度增强而略有增强,RI 发生之后减弱. 在不同的垂直风切变演变过程的情况下,如何利用静止卫星

遥感高时空分辨率的云顶高度相关信息,获得与相对垂直运动相关的动力参数,通过动力和云系结构演变解译和揭示两台风在 RI 过程中演变卫星资料表现背后的动力过程,是本研究中进一步探讨的问题.

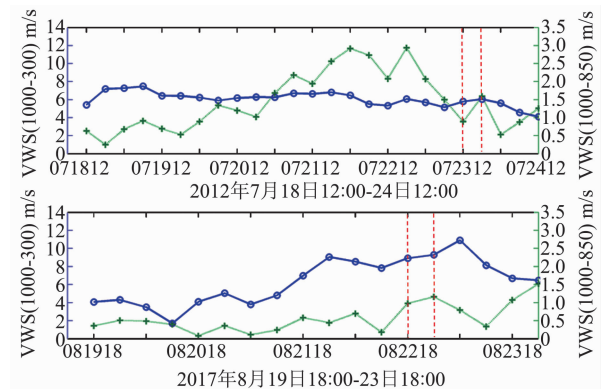


图 3 2012 年 Vicente (a) 和 2017 年 Hato (b) 台风风垂直切变图 (蓝线和绿线分别为高层和低层垂直切变,红色虚线为 RI 继续阶段)

Fig. 3 Vertical wind shear evolution of 2012 Vicente (a) and 2017 Hato (b), Blue and green line are separately standing for high levels and low levels, the range between the two red dotted lines is continuous RI phase

3 基于 FY-2 云的垂直运动的台风动力结构演变及对强度突变影响机制解析

3.1 Vicente 和 Hato 台风的云垂直运动演变过程分析

首先,基于 FY-2 云高分析 Vicente 和 Hato 两个台风在近海强度前后的对流结构演变过程.

Vicente 台风近海快速增强发生之前 (PreRI), 经历了云高增强-减弱-再快速增强的三个阶段: Pre-RI-I 阶段: 2012 年 7 月 22 日 06:00 (UTC, 下同) 至 12:00 (图 4 (a-b)), 云高显示的台风整体云系结构呈现弯曲云带型, 中心南侧主要核心区是一个较大范围冷云盖, 深对流强烈发展, 最核心区域云高超过 17 km; Pre-RI-II 阶段: 7 月 22 日 18:00 (图 4 (c)) 以后, Vicente 中心南侧的云顶高度整体下降, 对流发

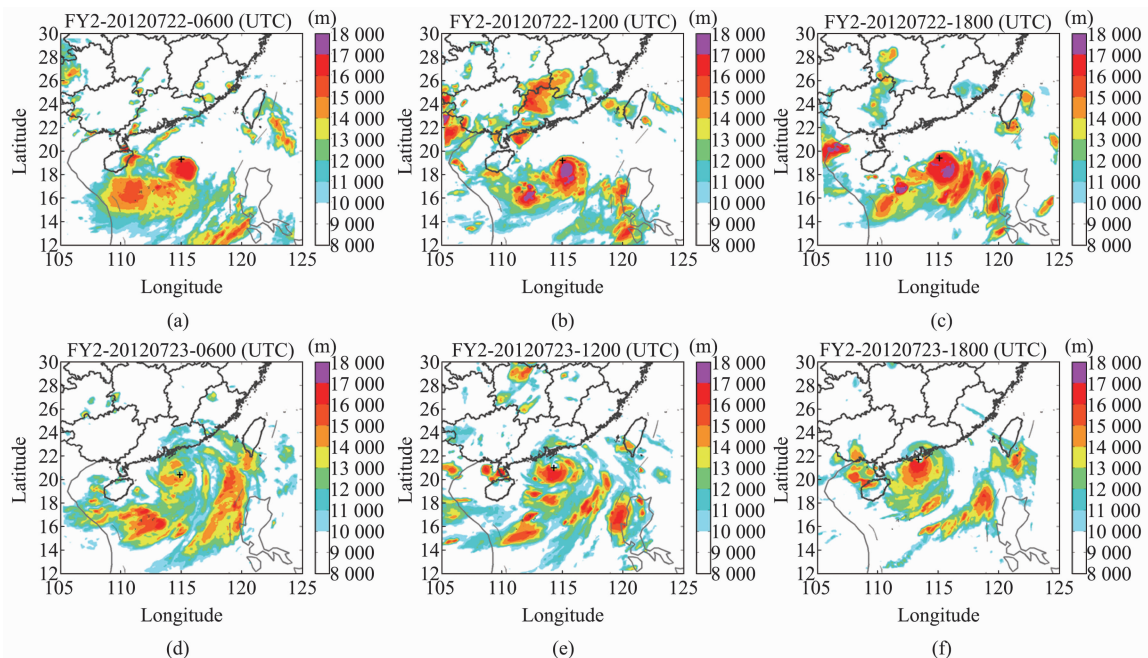


图4 2012Vicente 台风的 FY-2 卫星云高图像
Fig. 4 FY-2 cloud top height image of 2012 Typhoon Vicente

展旺盛程度整体减弱,至7月23日06:00(图4(d)),Vicente眼墙内对流云最大云高由16~17 km降至14~15 km,但北侧云顶高度有所发展,整体云系结构对称;PreRI-III阶段:7月23日12:00及随后(图4e、f),Vicente的对流云重新发展增强,台风中心眼墙内15~17 km云高面积明显增大,整体结构非常对称.根据上述分析,对流云增强-减弱-再快速增强的过程,对应着Vicente整体台风结构调整过程,在对流减弱阶段,结构对称化更加显著,出现眼区,眼墙内对流云集中发展,这个过程与风垂直切变的演变过程相关性较好.

Hato台风近海快速增强发生之前(PreRI),整体发展过程与Vicente类似,但从云高的演变过程来看,还表现出与Vicente不同之处,其变化可分为四个阶段PreRI-I、PreRI-II、PreRI-III和PreRI-IV,即为增强-减弱-增强-减弱-快速增强. PreRI-I阶段:2017年8月22日04:00(图5(a)),云高显示的台风整体云系结构呈现弯曲云带或切变型,深对流强烈发展,云带最中心区域云高超过17 km,对流云呈现爆发式发展. PreRI-II阶段:8月22日09:00(图5(b))以后,云高所显示出的Hato结构已经与6 h前有了较大变化,台风中心南侧的云顶高度整体下降,北侧云顶高度发展,最旺盛区域向台风中心区域集中,台风云系平面轴对称结构更加对称,至22日15:00(图5(c-d))在这期间整体云系结构形态维持,局部

云高略有发展. PreRI-III阶段:图5(d-e)的22日15:00至21:00期间,Hato台风结构进一步调整,形成完整的眼墙并出现明显的眼区,该阶段云高整体下降但轴对称化程度显著增加. PreRI-IV阶段:在台风登陆前最后几小时内,台风中心眼墙内15~17 km云高面积明显增大,眼墙变宽整体结构区域完全对称(图5(e-f)),Hato台风在登陆前强度发生了快速增强且以最大强度登陆.根据上述过程分析,可见Hato的对称化结构调整,通过两次调整过程完成,在最后阶段的突然增强速率较Vicente更快更强.其整体演变趋势变化与风垂直切变对应,但在间隔六小时内,对流的发展发生了调整变化,是对6 h间隔的风垂直切变演变基础上,更细节的变化特征观测.

其次,在云高演变所指示的台风结构演变的基础上,利用基于云高计算的云垂直运动速度和加速度的不同距离半径下的时间序列演变.

Vicente和Hato的结果分别如图6-7所示,图中横坐标为时间,纵坐标为距离台风中心不同半径距离,图中四张分图由上至下分别为台风的DL、UL、UR和DR四个象限.可见,两台风在发生强度快速增强过程中,伴随着云上升速度的显著增强阶段,在距离台风中心200 km范围的内部核心区云的上升速度增大伴有逆时针传播的特征,有利于台风整体结构趋于对称,特别是对于南海近海台风靠近陆地时,随着云的抬升,台风中心偏北侧云系(主要为

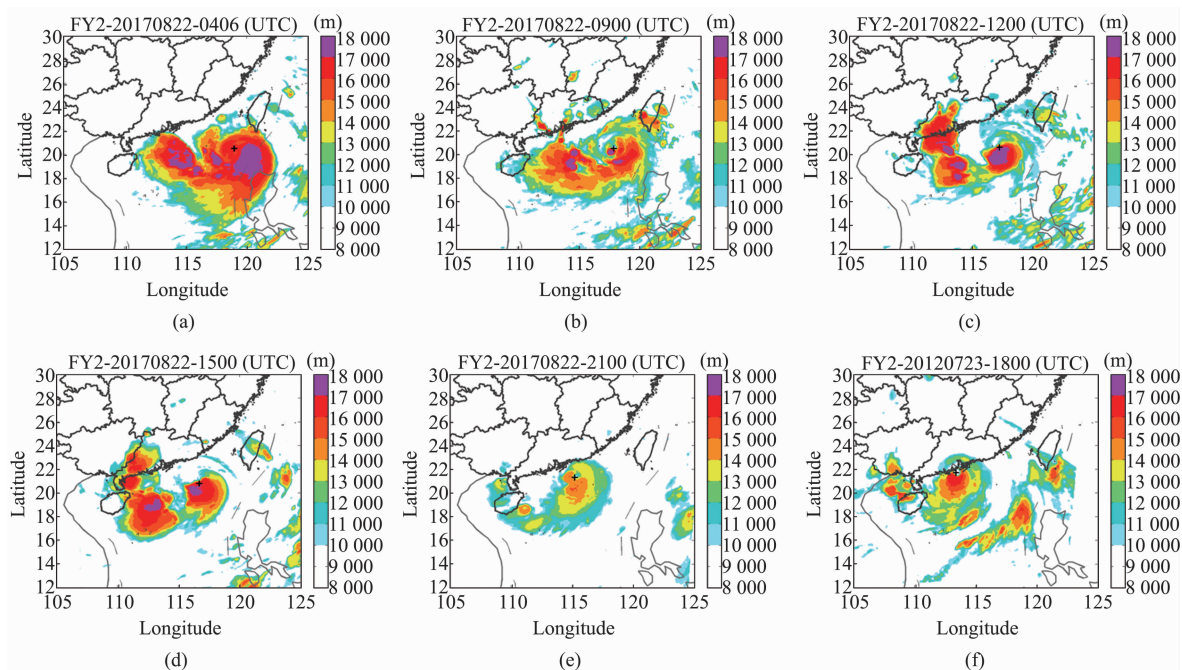


图5 2017年Hato台风的FY-2卫星云高图像
Fig. 5 FY-2 cloud top height image of 2017 Typhoon Hato

DR 和 UR 象限) 得到更有利的发展,促进了台风登陆前强度的继续增强,这与以往关于台风快速增强中对流爆发的研究结论一致。

将台风整体结构的演变综合分析发现,两个台风对流减弱阶段,均呈现台风四个象限结构发展更为对称,云型也由弯曲云带向眼型过渡,台风内部的中小尺度云团的发展高度受到抑制,台风内核区的云上升速度仍然持续增大,台风北侧的云上升加速度维持,进一步促进了云墙内云的发展增强。最核心区 0~50 km 内的云上升运动的持续增强,对最终促进发生 RI 贡献最显著,并在 TC 发生 RI 过程中也有突变的过程,这个过程在这两个 TC 中为 1~2 h,利用 FY-2 卫星分钟级观测资料观测到了突变过程(图 8 中红色虚线区域)。

综合图 4-8 分析可见:两台风在 RI 爆发前,从台风云顶高度最大冲顶高度发展演变显示均出现了一个加强-减弱-重新加强的过程,这个过程与风垂直切变随时间的演变有较好的对应关系,特别地,在 6 h 内,台风云顶高度的发展仍有调整过程,伴随着台风整体云系结构的调整,对台风增强并最终发生快速增强密切相关,因此在传统监测风垂直切变的同时,利用静止卫星快速扫描观测资料,综合监测 TC 内对流云发展变化、垂直运动、水平运动等情况,对于 TC 短时内结构快速调整,强

度快速增强有关键作用。对流发展变化与 TC 结构调整两者相互促进强度发展的演变可以归纳为“跷跷板式”热动力因素:“通风消耗”和“聚集弥补”,即:较大风垂直切变产生的“通风消耗效应”使得积云对流释放的凝结潜热迅速离开扰动区域上空向四周平流,热量和水汽将会被吹散,使得热量无法在上层集中,从而破坏了 TC 的暖心结构,发展加强过程将被阻碍。而风垂直切变减小使得台风核心区集中发展的强对流释放能量,使得台风耗散的能量获得补偿,在这两个互为跷跷板的因素的影响下,有利于 TC 强度的快速发展,上述这个过程在一定时段内集中发生,最终促使台风强度发生了迅速增强。该研究结果说明 TC 内中小尺度对流系统对于 TC 强度变化具有重要作用,特别是 0~6 h 内的结构的捕获和演变监测, FY-2 卫星分钟级观测资料发挥了重要作用。

3.2 云的垂直运动所解释的台风内动力结构演变及对强度突变的影响机制

根据 3.1 中基于 FY-2 卫星云高及由云高计算的云上升速度和加速度,对 2017 年 Hato 和 2012 年 Vicente 两个在近 20 年最典型的近海快速加强台风的分析,结合运动信息剖析其演变对 RI 发生的影响,解析如下:

(1) 内动力表现:风的垂直切变的增大和减小,

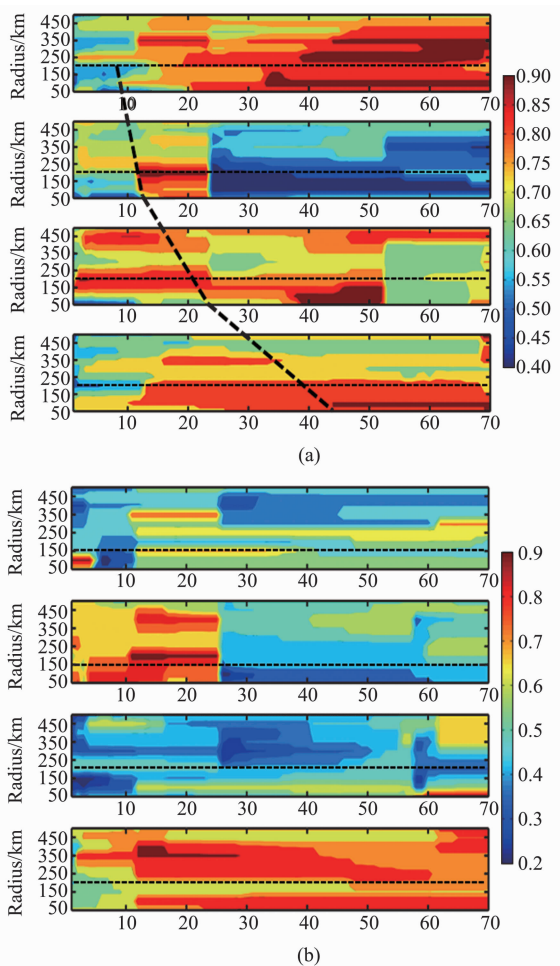


图6 2012年Vicente台风(a)云垂直速度时间序列,(b)云垂直加速度时间序列(由上至下分别为TC的DL、UL、UR和DR四个象限)
Fig.6 2012 Vicente (a) Time series of cloud vertical velocity, (b) time series of cloud vertical acceleration

从动力学的表现上是代表着高低层通风效应的强弱,以及低层能量辐合、高层能量累积的多少,动力因子的表现伴随着对流云爆发、对流云减弱的过程,对流云爆发阶段,在风垂直切变下风方向,云顶高度增加显著,在整条云带内部,核心区云高均出现较大范围中小尺度的超过17 km高度的云系发展,有利于能量的累计和结构对称化发展.随后风垂直切变减小,高低层通风效应减弱,深对流增强阶段所释放的能量更多地保留在TC中高层,促发了台风强度的增强,在这个过程的持续或者反复过程中,短时间内促进了强度的突变.

(2)结构演变:台风云系整体结构非对称阶段,台风风垂直切变较大,伴随着云带内深对流云的爆发,持续出现云高在16~17 km甚至大范围超过17 km的深对流;当整体云系云高有所下降,但风垂

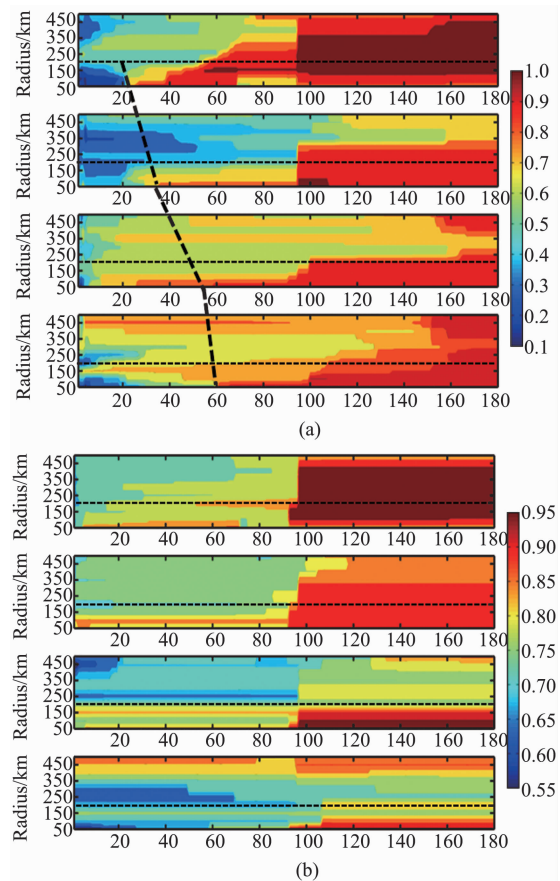


图7 2017年Hato台风(a)云垂直速度时间序列,(b)云垂直加速度时间序列(由上至下分别为TC的DL、UL、UR和DR四个象限)
Fig.7 2017 Hato (a) Time series of cloud vertical velocity, (b) time series of cloud vertical acceleration

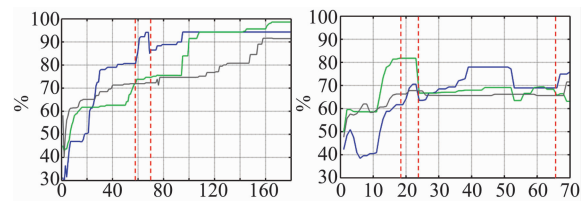


图8 2017年Hato(左)和2012年Vicente(右)距离台风不同半径云垂直上升所占总体云系比例随时间变化.横坐标:FY-2F卫星数据参与统计的全部时次;纵坐标:百分比(蓝色:0~50 km;绿色:150~200 km;灰色:400 km)
Fig.8 2017 Hato(left) and 2012 Vicente(right); Time series of the cloud vertical motion ratio in different radius from TC centers

直切变上风方向一侧云高有所增加时,风垂直切变减小,台风整体云系趋于对称,台风中心附近或至眼墙若出现对流集中再次爆发,台风核心区域云高再次达到16 km及以上,有利于台风后期的强度继续增强,并出现短时间内强度突增即近海强度增强的

概率增加.此外,若台风自身结构对称度相对较好,同时在台风中心附近至眼墙的核心区一直有云高超过 16 km 的对流云此消彼长或范围稳定增加,此时也有利于台风后期的强度继续增强.

(3)内动力与结构综合效应与 RI 发生发展:根据 3.1 中第二部分的分析,并结合本节中 1) 和 2) 关于内动力和结构演变的总结,影响 TC 强度的变化两个“跷跷板式”热动力因素可以归纳为“通风消耗效应”和“聚集弥补效应”,上述演变过程可以归纳为如图 9 所示的概念模型图:图 9 上半部分左右两图分别为 TC 内部垂直结构在强度增强前后的对比,随着风垂直切的变化,TC 内外对流云发展局部会发生旺盛或衰减的变化,并整体向 TC 中心靠拢,图 9 下半部分左右两图为 TC 内部水平结构在强度增强前后的变化,TC 在强度增强过程中,对流云由分布较为散乱和不对称的独立对流云团,逐渐成为有组织的并向 TC 内核区靠近的 TC 云墙.同时,在“跷跷板式”动力因素的作用基础上, $VWS_{1000 \sim 300 \text{ hPa}}$ 和 $VWS_{1000 \sim 850 \text{ hPa}}$ 两个垂直切变相对大小不同的情况下,本研究的两个个例在演变过程中也出现了在整个过程趋势相同的情况下,台风内部结构演变也表现出不同的演变过程,这样的云系结构演变对于台风三维暖心结构变化的影响,将在未来工作中通过能量计算或模拟进行专门深入的讨论研究.

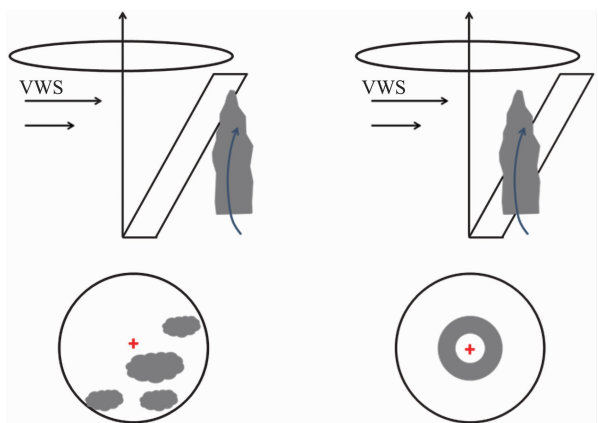


图 9 云的垂直运动所解释的台风热动力结构演变及对强度突变的影响机制示意图

Fig. 9 Schematic diagram of TC thermodynamic structure evolution and its influence on RI explained by the vertical movement of clouds

4 结论

利用我国 FY-2 静止气象卫星分钟级高时空分辨率资料,将与台风强度密切相关的要素风垂直切

变与卫星资料所能够反映的动力信息相结合,研究选取 2 个典型近海增强台风个例:2017 年 Hato 和 2012 年 Vicente 台风,基于 FY-2 卫星云高及云垂直运动相关参数,计算分析了两台风内动力结构的演变过程,并对演变过程如何促发了台风在一定时段内强度集中加强,并最终发生了近海快速增强的可能机制进行了解析.结果表明:

(1)卫星立体云高及计算的云垂直运动参数能够解译出台风结构演变的动力信息,云的垂直发展强弱与风垂直切变大小以及整体云对称程度具有较好对应关系;

(2)Hato 和 Vicente 的 RI 过程所反映出的“跷跷板式”内动力过程表现为:“通风消耗效应”和“聚集弥补效应”,在这两个互为跷跷板的因素的交替影响下,有利于 TC 强度的快速发展;

(3)最核心区 0 ~ 50 km 内的云上升运动的持续增强,对最终促进发生 RI 贡献最显著,并在 TC 发生 RI 过程中 OS 发生 1 ~ 2 h 的突变过程,利用 FY-2 卫星分钟级云垂直运动相关观测资料捕获到了突变过程.

上述研究结果表明:TC 内中小尺度对流系统对于 TC 强度变化具有关键影响,对于小时内结构的识别和演变监测,FY-2 卫星分钟级观测资料发挥了重要作用,研究结果可作为一种对台风结构和强度演变的高频次监测新手段,结合台风动力学原理解译结果,为台风监测预报业务和科研工作提供参考.基于该研究工作对于利用国产气象卫星资料对近海台风的演变过程的认识,在未来工作中将更多地结合理论推导计算和数值模拟方面的配合,结合卫星资料能够反映的台风内部结构变化因子(如中高层暖心特征、微物理含量等),加入更多的研究个例,围绕台风强度突变的机理机制方面开展更深入的研究工作.

References

- [1] XU Ying-Long, ZHANG Ling, GAO Shuan-Zhu. The advances and discussions on China operational typhoon forecasting [J]. *Meteorological Monthly*(许映龙,张玲,高栓柱.我国台风预报业务的现在及思考.气象), 2010, 36(7): 43-49.
- [2] DAI Gao-Ju, WEN Yong-Ren, LI Ying. Statistical characteristics of tropical cyclone motion and sharp turning over north western Pacific [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (戴高菊,文永仁,李英.西北太平洋热带气旋运动及其突变的若干统计特征.热带气象学报), 2014, 30(1): 23-33.
- [3] ZHANG Shou-Feng, YU Hui, XIANG Chun-Yi. Error anal-

- ysis on official typhoon intensity forecasts of CMO from 2001 to 2012 [J]. *Meteorological Monthly* (张守峰, 余晖, 向纯怡. 中央气象台台风强度综合预报误差分析. *气象*), 2015, **41**(10): 1278 - 1285.
- [4] Rappaport E N, Franklin J L, Avila L A, *et al.* Advances and challenges at the National Hurricane Center [J]. *Weather and Forecasting*, 2009, **24**(2): 395 - 419.
- [5] ZHENG Feng, ZENG Zhi-Hua, LEI Xiao-Tu, *et al.* A statistical study of rapid intensification of typhoons over coastal water of China [J]. *Plateau Meteorology* (郑峰, 曾智华, 雷小途, 等. 中国近海突然增强台风统计分析. *高原气象*), 2016, **35**(1): 198 - 210.
- [6] Wang Y Q. How do outer spiral rainbands affect tropical cyclone structure and intensity? [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2008, **66**: 1250 - 1273.
- [7] Hendricks E A, Peng M S, Fu B, *et al.* Quantifying environmental control on tropical cyclone intensity change [J]. *Monthly Weather Review*, 2010, **138**: 3243 - 3271.
- [8] Hendricks E A. Internal dynamical control on tropical cyclone intensity variability [J]. *Tropical Cyclone Research and Review*, 2012, **1**: 97 - 105.
- [9] Wang Y Q, Rao Y J. A statistical analysis of the effects of vertical wind shear on tropical cyclone intensity change over the Western North Pacific [J]. *Monthly Weather Review*, 2015, **143**: 3434 - 3453.
- [10] Rogers R. Convective-scale structure and evolution during a high-resolution simulation of tropical cyclone rapid intensification [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2010, **67**(1): 44 - 70.
- [11] YU Yu-Bin, YANG Chang-Xian, YAO Xiu-Ping. The vertical structure characteristics analysis on abrupt intensity change of tropical cyclone over the offshore of China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (于玉斌, 杨昌贤, 姚秀萍. 近海热带气旋强度突变的垂直结构特征分析. *大气科学*), 2007, **31**(5): 876 - 886.
- [12] HU Hao, DUAN Yi-Hong. Analysis of environmental variables of rapidly intensifying tropical cyclones in the south China sea [J]. *Journal of tropical meteorology* (胡皓, 端义宏. 南海热带气旋迅速加强环境场因子的影响分析. *热带气象学报*), 2016, **32**(3): 299 - 310.
- [13] Jiang H Y. The relationship between tropical cyclone intensity change and the strength of inner-core convection [J]. *Monthly Weather Review*, 2012, **140**: 1164 - 1176.
- [14] Jiang H Y, Ramirez E M. Necessary conditions for Tropical cyclone rapid intensification as derived from 11 years of TRMM data [J]. *Journal of Climate*, 2013, **26**: 6459 - 6470.
- [15] Zhuge X Y, Ming J, Wang Y. Reassessing the use of inner-core hot towers to predict tropical cyclone rapid intensification [J]. *Weather and Forecasting*, 2008, **30**(5): 1265 - 1279.
- [16] Tao C, Jiang H. Global distribution of hot towers in tropical cyclones based on 11-yr TRMM data [J]. *Journal of Climate*, 2013, **26**: 1371 - 1386.
- [17] Montgomery M T, Nicholls M E, Cram T A, *et al.* A vortical hot tower route to tropical cyclogenesis [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2006, **63**: 355 - 386.
- [18] Sarah M G, Kristopher M B, Christopher S V. A method for calculating the height of overshooting convective cloud tops using satellite-based IR imager and CloudSat cloud profiling radar observations [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2016, **55**: 479 - 491.
- [19] Shimada U, H Kubota, H Yamada, *et al.* Intensity and inner-core structure of typhoon Haiyan (2013) near landfall: Doppler radar analysis [J]. *Monthly Weather Review*, 2018, **146**(2), 583 - 597.
- [20] Sarah M G. Climatology of tropical overshooting tops in North Atlantic tropical cyclones [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2017, **56**(6): 1783 - 1796.
- [21] Guo Q, Wang X. Spatial-response matched filter and its application in radiometric accuracy improvement of FY-2 satellite thermal infrared band [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, **53**(5): 2397 - 2408.
- [22] Wang X, Guo Q. Performance evaluation of objective tropical cyclone intensity determination with FY-2E/CIBLE results [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2014, **33**(4): 442 - 449.
- [23] Kaplan J, DeMaria M. Large-scale characteristics of rapidly intensifying tropical cyclones in the North Atlantic basin [J]. *Weather and Forecasting*, 2003, **18**(6): 1093 - 1108.