

近海热带气旋强度突变的垂直结构特征分析

于玉斌¹ 杨昌贤² 姚秀萍¹

1 中国气象局培训中心, 北京 100081

2 海南省气象台, 海口 570203

摘 要 应用 1949~2003 年共 55 年的《台风年鉴》和《热带气旋年鉴》资料以及 NCEP/NCAR 再分析资料, 给出热带气旋强度突变标准, 对中国近海突然增强和突然减弱的两组热带气旋进行合成分析和对比分析。结果表明, 近海热带气旋强度变化与南亚高压、副热带高压的强度变化呈反相变化关系; 环境风垂直切变小于 5 m/s 是南海近海热带气旋突然增强的必要条件, 热带气旋强度突变对环境风垂直切变变化的响应时间为 18~36 h; 热带气旋中心附近存在数值在 $-6\sim 6$ m/s 之间纬向分布的环境风垂直切变密集带, 在热带气旋突然增强时刻, 中心附近环境风垂直切变经向梯度最大; 风垂直切变在热带气旋突然增强过程中逐渐减弱, 而在热带气旋突然减弱过程中逐渐增强; 热带气旋中心附近是高低层相对涡度垂直切变的强负值区, 在热带气旋突然增强过程中相对涡度垂直切变逐渐减小, 在突然增强时刻最小。

关键词 热带气旋 强度突变 合成分析

文章编号 1006-9895 (2007) 05-0876-11

中图分类号 P444

文献标识码 A

The Vertical Structure Characteristics Analysis on Abrupt Intensity Change of Tropical Cyclone over the Offshore of China

YU Yu-Bin¹, YANG Chang-Xian², and YAO Xiu-Ping¹

1 China Meteorological Administration Training Center, Beijing 100081

2 Meteorological Observatory of Hainan Province, Haikou 570203

Abstract Most tropical cyclones weaken over the offshore of China, while a few tropical cyclones intensify rapidly. The extreme weather events would arise from those rapidly intensified tropical cyclones, even much more serious damage would happen. In order to investigate the differential physical mechanism of two categories of tropical cyclones, the 55-year data sets, the Typhoon Year Books and the Tropical Cyclone Year Books (1949~2003) published by China Meteorological Press have been used to give the abrupt intensity change standard of the tropical cyclone and NCEP/NCAR reanalyses with horizontal resolution of $1^\circ\times 1^\circ$ and vertical resolution of 11 layers have been used to investigate the environmental flows of two sets of composite tropical cyclone (TC) composed of 5 tropical cyclones respectively, whose intensity changes rapidly over the offshore of China. According to the mathematical meaning of average value and standard deviation, the rapid intensification, slow intensification, stable, slow decaying and rapid decaying of tropical cyclone intensity are defined. If 12 h variation of the maximum wind velocity around TC center (ΔV) is greater than 7.91 m/s, the TC sample is called a rapid intensification case and if ΔV is less than -12.97 m/s, it is called a rapid decaying case. The study shows that the intensity change of TC is inversely proportional to that of the South Asia high and the subtropical high, the South Asia high and the subtropical high decay in the TC rapid intensification stage. The intensity changes of TC in environmental vertical wind shear are in-

vestigated in this study using the NCEP/NCAR reanalyses. Typically a critical wind shear value (absolute value) less than 10 m/s favors TC rapid intensification over the offshore of the South China Sea. Shear value greater than 12 m/s is associated with TC rapid weakening. There appears to be a time lag between the change of vertical wind shear and the TC intensity rapid change, typically between 18 and 36 h. There exists a vertical wind shear band, whose value between -6 m/s and 6 m/s. In the rapid intensification time, the largest longitudinal gradient of the vertical wind shear band is in the vicinity of the TC center. Furthermore, the shear values averaged over the $6^\circ \times 6^\circ$, $10^\circ \times 10^\circ$, $20^\circ \times 20^\circ$ and $40^\circ \times 40^\circ$ (latitude $\times$ longitude) square regions, centered at the TC center, are also calculated to analyse the impact of wind shear on the TC intensity change. It shows that the absolute shear value less than 5 m/s in the vicinity of the TC center is the necessary condition of TC rapid intensification over the offshore of the South China Sea. Similar to the vertical wind shear analysis, the relative vorticity difference between 200 and 850 hPa is calculated to reveal TC intensity change characteristics. The vertical relative vorticity difference becomes smaller and smaller while TC intensifies and in the rapid intensification time, the largest negative area of the relative vorticity difference is in the vicinity of the TC center. Some interesting results of this paper are useful for the operational forecasting and some of them are valuable for the theoretical study.

Key words tropical cyclone, intensity rapid change, composite analysis

1 引言

我国是世界上受热带气旋(简称 TC)影响最为严重的国家之一,统计研究表明^[1],平均有 16% 的 TC 移到中国沿海突然增强。早在 1963 年, Ito^[2]在讨论西北太平洋台风的发展时,定义每小时降压 ≥ 2 hPa 为 TC 迅速加强。1979 年,陈联寿等^[3]提出台风“缓慢变化”和“迅速变化”的概念。阎俊岳等^[1, 4]提出西北太平洋和我国近海 TC 迅速加强的标准,分析了近海 TC 迅速加强的气候特征。吴达铭^[5]根据我国“八·五”科技攻关项目的规定标准:12 h TC 近中心最大风速变化绝对值 ≥ 10 m/s 为 TC 强度突变标准,分析了西北太平洋 TC 强度突变的分布特征。最近,于玉斌等^[6]利用 TC 中心最低气压来度量 TC 强度,给出了 TC 突然增强的标准,分析了西北太平洋突然增强 TC 的气候特征。寿绍文等^[7]对爆发性发展台风的合成环境场进行诊断分析,认为台风爆发性发展时刻副热带高压(简称副高)、低空辐合和高层辐散均增强。夏友龙等^[8]和郑祖光等^[9]指出非绝热加热是影响热带气旋强度突变的重要因子。梁建茵等^[10]分析了北方小股干冷空气对 TC “黄峰”近海加强的作用。胡春梅等^[11]利用 NCEP/NCAR 再分析资料对华南地区登陆前突然减弱和突然增强的 TC 进行了大尺度分析,研究表明突然增强的 TC 位于副高的南侧,低空辐合和高空辐散较强。余晖等^[12, 13]认为对流层上部环境流场与热带气旋外流之间的相互作

用在我国近海热带气旋强度突变过程中可能起着至关重要的作用,倾斜位涡发展是热带气旋突然增强的原因。雷小途等^[14]通过建立有无大尺度环境场作用的热带气旋强度变化的方程式,定性地分析了大尺度环境场的影响。

陈联寿等^[15]和王斌等^[16]分别总结了 20 世纪 90 年代热带气旋研究进展和热带气旋动力学研究进展,端义宏等^[17]最近总结了近年来热带气旋强度变化的主要研究成果。尽管近年来国内外在 TC 强度变化研究方面取得了一定的进展,仍然存在许多问题没有解决。近年来,登陆 TC 研究已经成为 TC 研究中一个新的领域^[18-23],取得了一些新的认识和进展,而近海 TC 发展的研究相对较少。TC 发生在海洋上,由于观测资料不足以及对 TC 强度变化的物理机制缺乏认识,TC 强度变化是大气科学领域至今尚未解决的重要科学问题之一^[24]。TC 强度预报技巧提高缓慢,国内尚未有一种客观预报方法用于业务预报。本文将在我国近海选取突然增强和突然减弱两组 TC,采用合成分析方法将一些不同时间出现的突然增强和突然减弱 TC 的大量资料综合在一起,得出这些系统发展过程中要素的空间分布,揭示这类系统的主要特征,避免由个例分析所引起的特殊性,更好地揭示某些普遍性,为这类 TC 的强度预测提供依据。

2 资料及分析方法

鉴于目前国际上对 TC 强度的分级采用中心最

大风速, 本文根据中国气象局整编的 1949~2003 年共 55 年的《台风年鉴》^[25]和《热带气旋年鉴》^[26]资料, 分析 TC 近中心最大风速变化的统计规律, 揭示 TC 强度变化特征。在分析过程中, 不考虑 TC 副中心的强度变化。台风(热带气旋)年鉴基本资料为每日 4 个时次, 分别为 02、08、14 和 20 时(北京时, 下同)。在研究近海 TC 强度变化时, 用 $V(I)$ 表示 I 时刻 TC 近中心的最大风速, 某一时次 12 h 风速变化用 ΔV 表示。定义 $(I+1)$ 时刻 12 h 近中心最大风速变化 $\Delta V(I+1)=V(I+2)-V(I)$, 如 $\Delta V(I+1)>0$, 则为增强样本, 表示 $(I+1)$ 时刻 TC 增强, 反之为减弱样本。

本文依据平均值和标准差的数学含义, 以 TC 12 h 风速变化 ΔV 来定义近海 TC 突然增强和突然减弱。在 1949~2003 年 55 年间, 西北太平洋 125°E 以西的中国近海共 3322 个增强样本, 12 h 近中心最大风速变化平均值 $\overline{\Delta V_I}=5.198676$ m/s, 标准差 $s_I=2.709964$ m/s, 突然增强标准为 $\Delta V>\overline{\Delta V_I}+s_I=7.90864$ m/s。依此标准, 突然增强样本共 482 个, 占总样本的 3.2495%, 占增强样本的 14.509%。对 5158 个减弱样本, 12 h 近中心最大风速平均值 $\overline{\Delta V_w}=-7.646375$ m/s, 标准差 $s_w=5.327734$ m/s, 突然减弱标准为 $\Delta V<\overline{\Delta V_w}-s_w=-12.974109$ m/s。依此标准, 突然减弱样本共 775 个, 占总样本的 5.2248%, 占减弱样本的 15.0252%。

根据以上所描述的近海 TC 突然增强和突然减弱的标准, 由于资料所限, 只对 2000 年以后的 TC

个例进行合成分析, 而且由于 2000~2005 年东海突然增强的个例少, 无法合成, 暂不做研究。所以, 本文选取南海近海突然增强和突然减弱各 5 个 TC, 利用 2000~2005 年的 1 日 4 次的 NCEP/NCAR 再分析资料(水平分辨率为 $1^\circ\times 1^\circ$, 垂直方向为 1000 hPa 到 100 hPa 共 11 层)做合成分析和对比分析。合成时 TC 合成场区域为以 TC 中心为中心的 $40^\circ\times 40^\circ$ 的范围, 合成 TC 中心为坐标原点, x 和 y 轴分别为纬向和经向。表 1 为所选取的南海突然增强和突然减弱的个例。

3 合成高度场特征

从 200 hPa 高度等高线图上可以看出, 南海合成 TC (以下如无特别说明, TC 即指合成 TC) 在突然增强过程中, 其中心西北侧始终由南亚高压控制(图略), 突然增强时刻(图 1a), 南亚高压 1250 dagpm 等高线的最东端位于 TC 中心以西 14 个经距处; 在突然减弱过程中, TC 中心北侧存在南亚高压和副高两个中心, 南亚高压、副高的面积和强度均较强, TC 位于两个高压中间的低值区中, 在突然减弱时刻(图 1b) TC 中心东侧的南亚高压增强, 位置较突然增强时偏东, 其东侧副高的强度也增强, 副高的 1252 dagpm 等高线为闭合块状分布特征, 1250 dagpm 等高线位于 TC 中心以北, 为带状分布。

比较图 1a 和 b 可以发现, 当南亚高压较弱、副高较弱时对应于 TC 的突然增强, 当南亚高压较强、副高较强时对应于 TC 的突然减弱, 也就是说,

表 1 参与合成的热带气旋在其强度突变时刻基本情况一览表

Table 1 The basic information of TCs concerned with composite analysis when their intensity varies rapidly

分类	TC 编号	时间	中心位置	中心气压/hPa	最大风速/ $m\cdot s^{-1}$	12 h 风速变化/ $m\cdot s^{-1}$
突然增强	0016	2000-09-07T08	(18.9°N, 115.9°E)	980	30	8
	0107	2001-07-24T14	(20.6°N, 117.0°E)	980	30	10
	0116	2001-09-20T02	(22.6°N, 117.9°E)	985	20	10
	0220	2002-09-25T08	(17.7°N, 109.6°E)	998	18	8
	0518	2005-09-25T14	(19.0°N, 112.4°E)	940	50	15
突然减弱	0107	2001-07-26T08	(21.7°N, 110.2°E)	985	25	-13
	0214	2002-08-20T02	(22.8°N, 110.0°E)	990	23	-15
	0307	2003-07-24T14	(21.9°N, 110.1°E)	975	30	-22
	0313	2003-09-03T02	(22.4°N, 112.8°E)	988	25	-20
	0518	2005-09-26T08	(18.9°N, 109.9°E)	970	35	-22

TC 强度变化与南亚高压、副高的强度变化呈反相变化关系。可见，南海 TC 强度突变与南亚高压和副高的强弱有关。

在 500 hPa 高度上，南海 TC 在突然增强过程中，副高呈孤立纬向块状分布，TC 位于副高的西南侧，突然增强前（图略）和突然增强时刻不存在 588 dagpm 等高线（图 2a），突然增强后 6 h 588 dagpm 等高线比较明显，这说明随着突然增强 TC 的逐渐减弱，副高加强。这与寿绍文等^[7]的结论有所不同。原因可能在于本文的研究对象是南海近海突然增强的合成 TC，文献^[7]中合成 TC 选取的个例也在南海海域附近，但在突然增强时刻 TC 中心位置偏西 10 个经距以上，不在近海海域。

在 500 hPa 高度上，南海 TC 在突然减弱过程中，TC 位于副高的西侧，副高呈经向分布，而且很

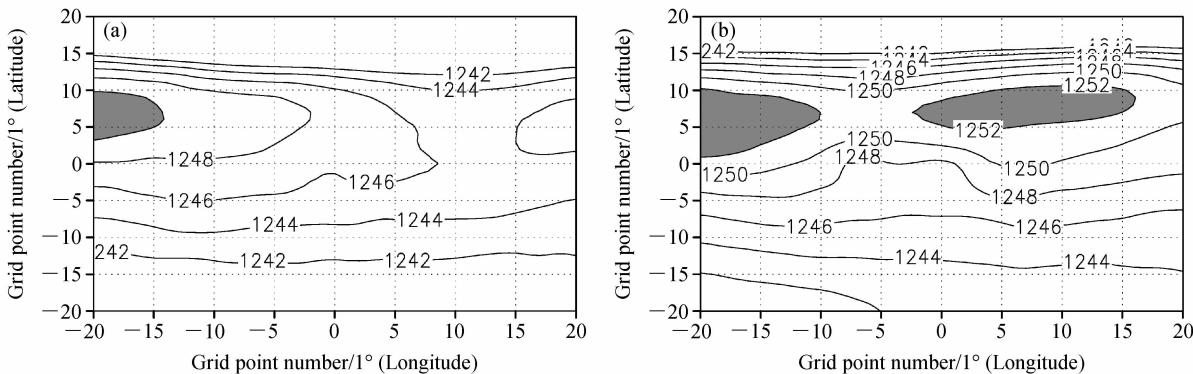
强。在突然减弱时刻（图 2b）以及前后各 24 h（图略），500 hPa 高度场上 588 dagpm 和 590 dagpm 等高线非常明显，伴随着副高不断加强，TC 不断减弱。

以上分析进一步说明，TC 强度变化与副高的强度变化呈反相变化关系。

综合不同高度上高度场的分析表明，南海近海 TC 强度变化与南亚高压、副高的强度变化呈反相变化关系，当南亚高压和副高减弱时，南海近海 TC 突然增强。

4 环境风场垂直切变场特征

研究环境流场对 TC 强度的影响，大都通过数值模拟和简化的理论进行，研究的重点是环境流场的垂直切变对 TC 强度的影响。而对于环境垂直切变导致 TC 强度变化的物理机制，不同的研究方案



有不同的见解,主要有通风流理论 (Ventilation)^[27]、二级环流效应 (Second circulation effect)^[28, 29]、倾斜和稳定性作用 (Tilting and stabilization)^[30]、Rossby 渗透理论 (Penetration)^[31] 等。一般认为,环境风垂直切变 (VWS) 对 TC 强度具有抑制作用。2005 年, Linda 等^[32] 在研究影响澳大利亚的 TC 时发现, VWS 介于 2~4 m/s 之间是 TC 突然增强的必要条件。

4.1 风垂直切变分布及其随时间演变特征

用 200 hPa、850 hPa 分别代表高、低层,用高低层的纬向风速 u 之差表示高低层的环境风垂直切变 $\partial u / \partial z$, 计算了突然增强和突然减弱 TC 200 hPa 与 850 hPa 之间的环境风垂直切变。对于南海突然增强的 TC (图 3), 在 TC 中心北侧为大范围的风垂直切变正值区, 南侧为大范围的风垂直切变负值区。TC 中心东北侧存在一个非常明显的风垂直切变高值区, 形成大于 8 m/s 的闭合等值线, TC 突然增强前 42 h (图 3b), 风垂直切变高值区中心强度大于 12 m/s; 突然增强前 36 h (图 3c), 高值区中心位于 TC 中心北侧约 4 个纬度处, 风垂直切变强度减小到 10 m/s; 中心强度保持到突然增强前 6 h (图 3h), 此时, 该风垂直切变强中心被南北两侧的小值风垂直切变所包围; 在突然增强时刻 (图 3i) 风垂直切变中心强度增大到 12 m/s, 随后范围扩大, 强度保持不变, 闭合中心也在突然增强前 6 h 向 TC 中心靠拢, 位于 TC 中心北侧 1~2 个纬度处。这说明 TC 突然增强对 TC 中心北侧风垂直切变变化的响应时间约为 36 h。TC 中心附近为 $-6 \text{ m/s} \leq \partial u / \partial z \leq 6 \text{ m/s}$ 呈纬向分布的风垂直切变密集带, 在 TC 突然增强前 42 h (图 3b), 该风垂直切变密集带在 TC 中心附近跨度达 5 个纬度, 突然增强前 36 h (图 3c) 为 4 个纬度, 在 TC 突然增强过程中逐渐由北向南移动并变得越来越窄, 在突然增强时刻 (图 3i) 该风垂直切变密集带在 TC 中心附近跨度为 1.5 个纬度, 而在突然增强 6 h 后此跨度逐渐变大 (图略)。可以说在 TC 突然增强过程中风垂直切变经向梯度越来越大, 突然增强时刻风垂直切变等值线最密集, 经向梯度 $\partial(\partial u / \partial z) / \partial y$ 最大。

对于南海突然减弱的 TC (图 4), 在 TC 中心附近为风垂直切变负值区。在 TC 突然减弱前 24 h (图 4e) 中心东北侧也存在一个非常明显的风垂直

切变高值区, 形成大于 12 m/s 的闭合等值线, 在突然减弱过程中该高值区强度不断减小, 到突然减弱前 6 h (图 4h) 消失, 突然减弱时刻 (图 4i) 该风垂直切变高值区为 8 m/s 的闭合等值线。这说明 TC 突然减弱对 TC 中心北侧风垂直切变变化的响应时间约 24 h。TC 中心附近也存在一个 $-6 \text{ m/s} \leq \partial u / \partial z \leq 6 \text{ m/s}$ 呈纬向分布的风垂直切变密集带, 风垂直切变经向梯度比增强 TC 的小。

4.2 风垂直切变区域平均值随时间演变特征

为讨论方便, 用 850 hPa 和 200 hPa 分别代表低层和高层, 用低层和高层的纬向风速 u 之差表示低层和高层环境风垂直切变 $\partial u / \partial z \mid_{850-200 \text{ hPa}}$, 以 TC 中心为中心点分别选取 $6^\circ \times 6^\circ$ 、 $10^\circ \times 10^\circ$ 、 $20^\circ \times 20^\circ$ 、 $40^\circ \times 40^\circ$ 的正方形区域, 计算突然增强和突然减弱 TC 从强度突然变化前 42 h~后 24 h 的 850 hPa 与 200 hPa 之间的环境风垂直切变的区域平均值。

比较南海突然增强的 TC 和突然减弱的 TC 低层和高层垂直风切变区域平均值随时间的变化 ($20^\circ \times 20^\circ$ 、 $40^\circ \times 40^\circ$ 区域平均值随时间的演变图略), 可见突然增强 TC 风垂直切变 (图 5a、b) 小于突然减弱 TC 的风垂直切变 (图 5c、d)。也就是说弱的风垂直切变有利于 TC 增强, 强的风垂直切变使得 TC 突然减弱。南海突然增强的 TC, 对于不同的选取求平均值的区域, 风垂直切变区域平均值都小于 5 m/s, 所以说南海近海海域低层和高层风垂直切变小于 5 m/s 是 TC 突然增强的必要条件。

总的看来, 在 TC 突然增强过程中, 风垂直切变逐渐减弱; 而在 TC 突然减弱过程中, 风垂直切变逐渐增强。对于南海突然增强的 TC, 在 TC 突然增强前 30~36 h 风垂直切变有所减弱, 在 TC 突然增强前 18 h 风垂直切变突然减弱。可见, 南海突然增强的 TC 对风垂直切变变化的响应时间为 18~36 h。同样, 南海突然减弱的 TC 对风垂直切变变化的响应时间为 18~30 h。综合 4.1 节的分析可见, 南海 TC 强度的突然变化对风垂直切变变化的响应时间为 18~36 h。

以上分析表明, 在南海近海海域 TC 中心东北侧, 绝对值小于 10 m/s 的风垂直切变有利于南海 TC 突然增强, 大于 12 m/s 的风垂直切变使南海 TC 突然减弱。TC 中心附近 $-6 \text{ m/s} \leq \partial u / \partial z \leq$

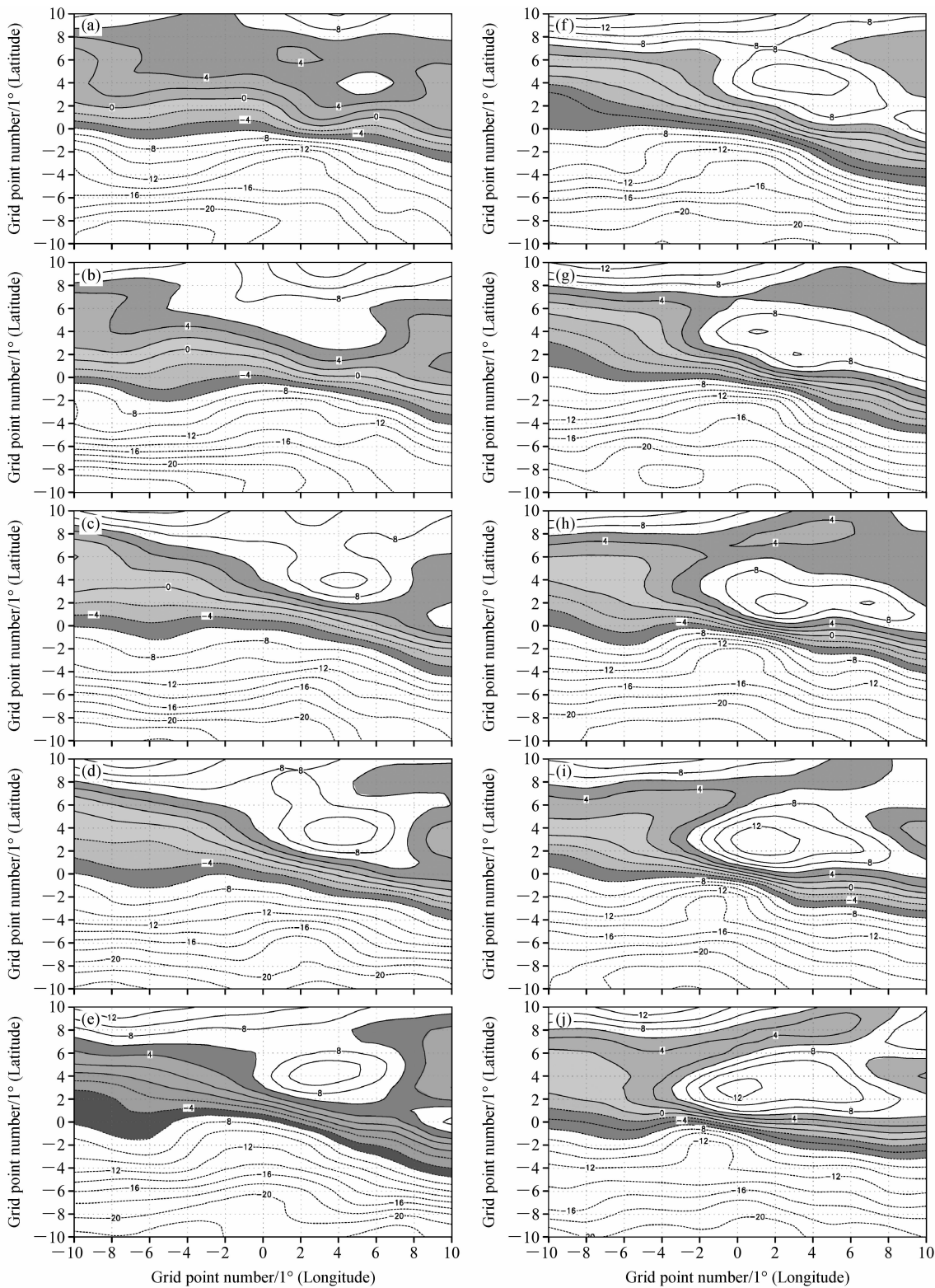


图3 南海突然增强 TC 合成纬向风高低层垂直切变的连续演变 (单位: m/s): (a)~(j) 突然增强前 48 h~后 6 h (间隔 6 h), (i) 为突然增强时刻。虚线为负值, 阴影区为 $-6\sim 6$ m/s

Fig. 3 Variation of zonal wind vertical shear (m/s) of the composite TC before and after the rapid intensification over the offshore of the South China Sea: (a)~(j) From 48 h before to 6 h after the rapid intensification time (6 h interval); (i) at the rapid intensification time. Dashed lines indicate negative values and shadings represent the areas with the vertical shear between -6 m/s and 6 m/s

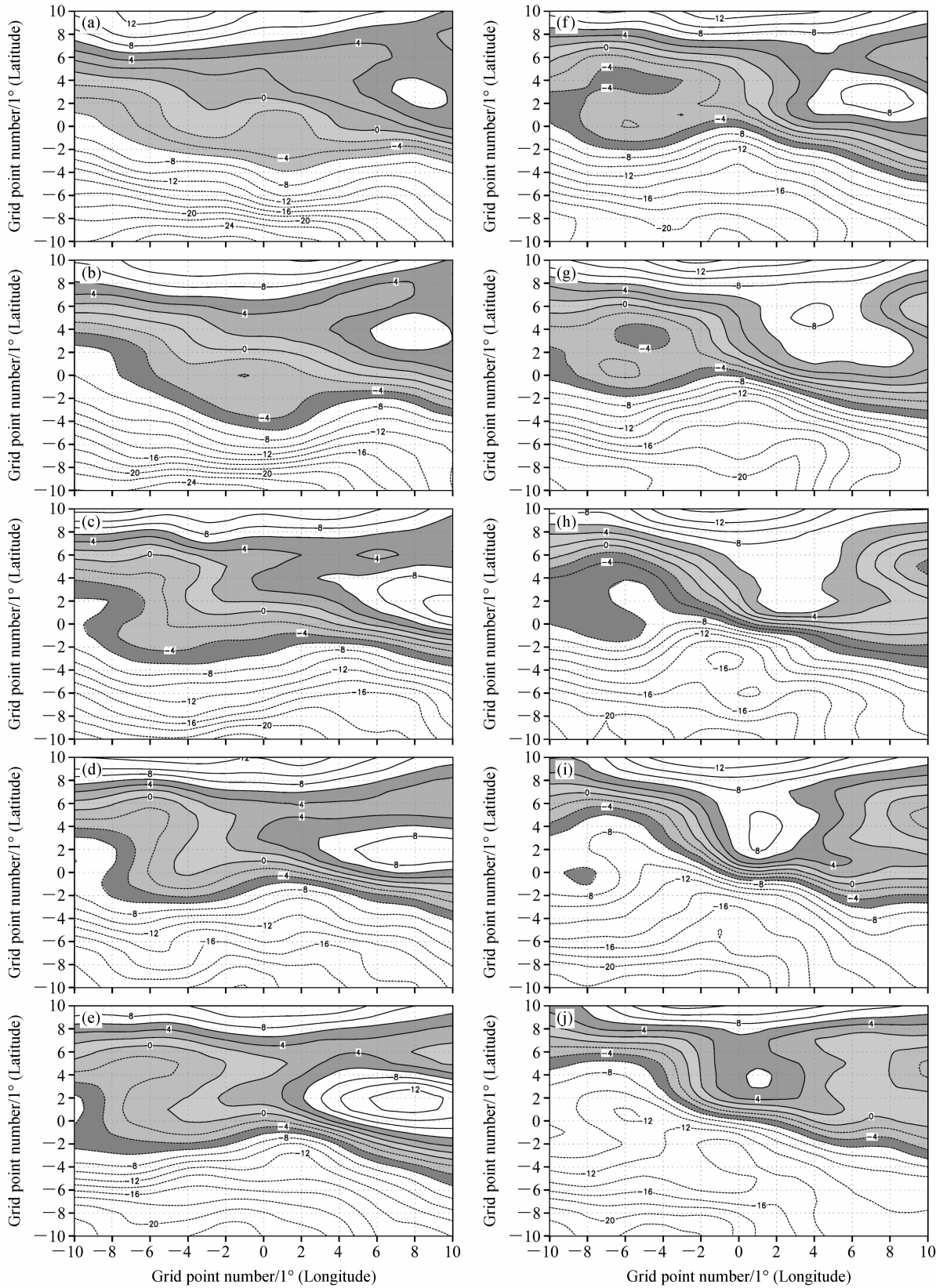


图 4 同图 3, 但为南海突然减弱 TC: (a)~(j) 分别为突然减弱前 48 h~后 6 h, (i) 为突然减弱时刻
Fig. 4 As in Fig. 3, but for the rapid decaying TC

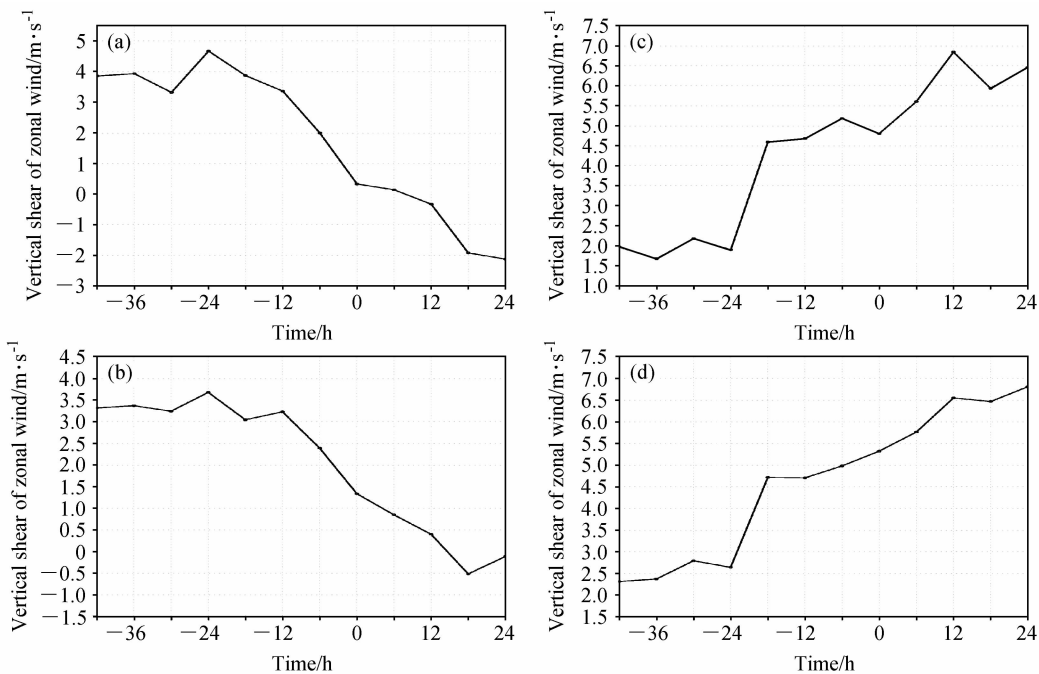


图5 南海 TC 合成纬向风低层和高层风垂直切变区域 $6^{\circ} \times 6^{\circ}$ (a、c) 和 $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ (b、d) 平均值随时间的变化: (a、b) 突然增强 TC; (c、d) 突然减弱 TC。横坐标为时间, 0 时刻表示 TC 强度突变时刻, -6 和 6 分别表示突变前后 6 h, 依此类推; 纵坐标为风垂直切变区域平均值

Fig. 5 Time variation of zonal wind vertical shear of the composite TC over the offshore of the South China Sea averaged over areas $6^{\circ} \times 6^{\circ}$ (a, c) and $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ (b, d); (a, b) Rapid intensification TC; (c, d) rapid decaying TC. For the abscissa, 0 denotes the rapid intensity change time, -6, 6 represent 6 h before and after the rapid intensity change, respectively, the rest may be deduced by analogy; the ordinate represents the area-averaged vertical shear of zonal wind

6 m/s 纬向分布的风垂直切变密集带在 TC 突然增强过程中越来越窄, 突然增强时刻风垂直切变经向梯度最大。在 TC 突然增强过程中, 风垂直切变逐渐减弱; 而在 TC 突然减弱过程中, 风垂直切变逐渐增强。南海近海海域风垂直切变小于 5 m/s 是 TC 突然增强的必要条件, TC 强度的突然变化对风垂直切变变化的响应时间为 18~36 h。鉴于环境风垂直切变对 TC 强度影响的复杂性, 作者将另文定量分析并通过数值模式进一步加以研究。

5 相对涡度垂直切变场特征

通常 TC 环流低层相对涡度为正, 高层为负。当高低层相对涡度垂直切变 $\Delta\zeta < 0$ (高层相对涡度与低层相对涡度之差), 表示 TC 维持或发展, $\Delta\zeta$ 越小, TC 发展越强^[33]。为进一步揭示突然增强 TC 的垂直结构特征, 类似于环境风场垂直切变场的分析, 本文用 200 hPa、850 hPa 分别代表高、低层, 计算了突然增强 TC 高低层相对涡度垂直切变。

从相对涡度垂直切变场的分布可以看出, TC 中心附近是相对涡度垂直切变的负值区 (图 6)。在

TC 突然增强过程中相对涡度垂直切变逐渐减小, 在突然增强时刻最小, 出现了最强的负值中心。

综合以上风垂直切变和相对涡度垂直切变的分析可以看出, 风垂直切变经向梯度 $\partial(\partial u / \partial z) / \partial y$ 大的正值区与相对涡度垂直切变 $\Delta\zeta_{200-850}$ 强负值区相对应。TC 高低层环境风垂直切变经向梯度 $\partial(\partial u / \partial z) / \partial y$ 正是高低层相对涡度垂直切变 $\Delta\zeta_{200-850}$ 的反映。

事实上, 垂直方向的相对涡度 ζ 可以表示为

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y},$$

相对涡度垂直切变 $\partial\zeta / \partial z$ 可以表示为

$$\frac{\partial\zeta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right).$$

在纬向气流 u 为主导的环境场中, 在 TC 中心附近相对涡度垂直切变 $\partial\zeta / \partial z$ 与风垂直切变经向梯度 $\partial(\partial u / \partial z) / \partial y$ 的符号相反, 相对涡度垂直切变强负值区对应于风垂直切变经向梯度强正值区。

另外, 从图 6 可以看出, 在突然增强前 24 h (图 6a) 和 12 h (图 6b) 相对涡度垂直切变强负值区

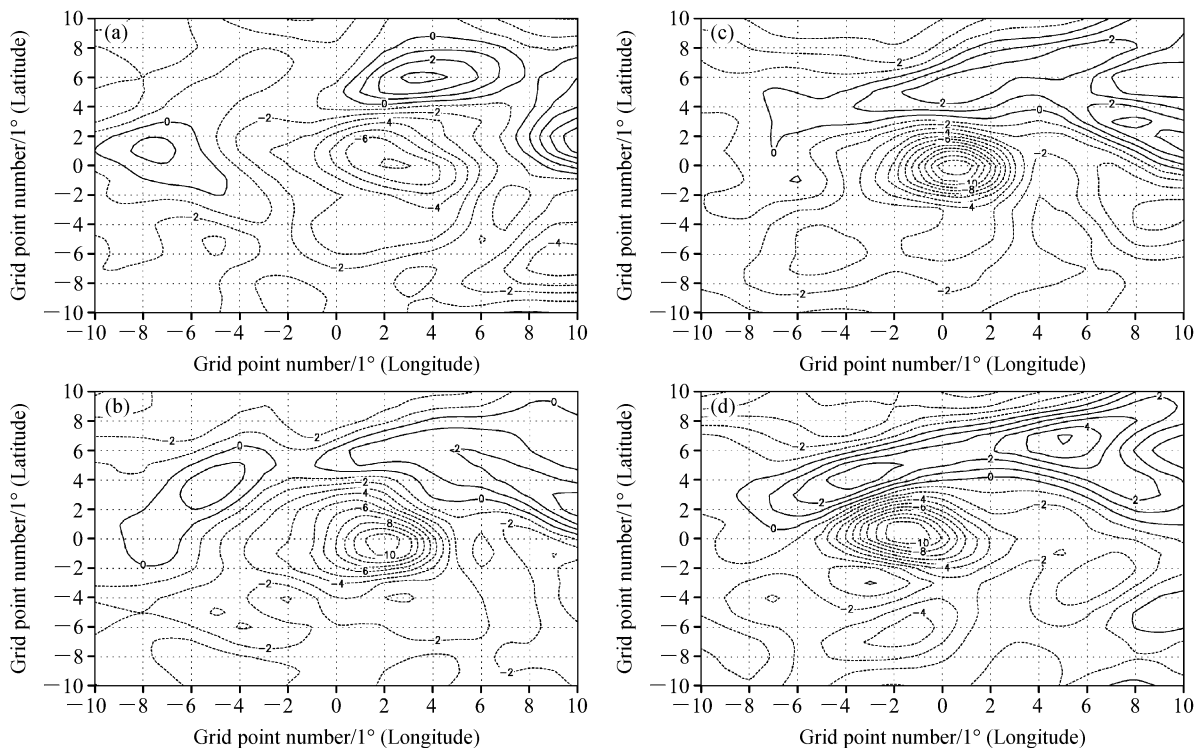


图6 南海突然增强 TC 合成高低层相对涡度垂直切变 (单位: 10^{-5}s^{-1}): (a) 突然增强前 24 h; (b) 突然增强前 12 h; (c) 突然增强时刻; (d) 突然增强后 12 h

Fig. 6 Vertical shear of relative vorticity (10^{-5}s^{-1}) of the composite rapid intensification TC over the offshore of the South China Sea: (a) 24 h before the rapid intensification time; (b) 12 h before the rapid intensification time; (c) at the rapid intensification time; (d) 12 h after the rapid intensification time

中心强度分别为 $-7 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 、 $-10 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$, 在突然增强时刻 (图 6c) 相对涡度垂直切变强负值区中心强度增大到 $-12 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$, 随后又逐渐变大到 $-10 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ (图 6d), 并且在突然增强后 24 h 内强度大小维持在 $-10 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 。以上风垂直切变场的变化特征分析已说明, 在 TC 突然增强过程中风垂直切变经向梯度越来越大, 突然增强时刻最大。也就是说, 相对涡度垂直切变强负值区中心强度随时间的变化对应于风垂直切变经向梯度随时间的变化。这再次验证了以上环境风垂直切变场特征分析的结果。

以上分析表明, TC 高低层相对涡度垂直切变的分布和演变对应于高低层环境风垂直切变经向梯度的分布和演变。TC 中心附近是高低层相对涡度垂直切变的负值区, 在 TC 突然增强过程中相对涡度垂直切变逐渐减小, 在突然增强时刻最小。

6 结论和讨论

本文根据中国气象局整编的 1949~2003 年共

55 年的《台风年鉴》^[25] 和《热带气旋年鉴》^[26] 资料确定 TC 强度突变的标准, 通过对我国南海近海突然增强和突然减弱的两组 TC 环境场和物理量场进行合成分析和对比分析, 主要结论如下:

(1) 近海 TC 强度变化与南亚高压、副高的强度变化呈反相变化关系, 当南亚高压和副高减弱时, TC 突然增强。

(2) 南海近海 TC 中心北侧绝对值小于 10 m/s 的风垂直切变有利于南海 TC 突然增强, 大于 12 m/s 的风垂直切变使南海 TC 突然减弱。TC 中心附近存在数值在 $-6 \sim 6 \text{ m/s}$ 之间纬向分布的风垂直切变密集带, 在 TC 突然增强时刻中心附近风垂直切变经向梯度最大。在 TC 突然增强过程中, 风垂直切变逐渐减弱; 而在 TC 突然减弱过程中, 风垂直切变逐渐增强。南海近海海域风垂直切变小于 5 m/s 是 TC 突然增强的必要条件, TC 强度的突然变化对风垂直切变变化的响应时间为 $18 \sim 36 \text{ h}$ 。

(3) TC 中心附近是高低层相对涡度垂直切变的负值区, 在 TC 突然增强过程中相对涡度垂直切

变逐渐减小, 在突然增强时刻最小。

本文对强度突变的 TC 进行了特征分析, 得出了初步的、具有共性的结论。另外, 还分析了东海近海突然减弱 TC 的基本特征, 可以进一步验证以上结论。本文没有具体论述。近海 TC 强度突变现象的发生除了与以上的条件有关外, 还与较高的水温场、西南季风潮爆发、适度冷空气侵入、高空 TUTT 等外界条件有关, TC 强度突变还与水汽凝结释放的潜热和能量转换有关。限于篇幅, 本文不再论述。不同的 TC 都有其特殊的内部结构及外部环境, 突然增强或突然减弱的机理也不尽相同。对于一个实际的 TC, 影响其强度变化各因子的相对作用是不确定的, 其强度变化可能是多个因子影响的综合结果, 对于 TC 强度突变的具体机理将在今后的数值试验中做进一步的分析和研究。

参考文献 (References)

- [1] 阎俊岳. 近海热带气旋迅速加强的气候特征. 应用气象学报, 1996, **7** (1): 28~35
Yan J Y. Climatological characteristics of rapidly intensifying tropical cyclones over the offshore of China. *Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1996, **7** (1): 28~35
- [2] Ito H. Aspects of typhoon development—As reviewed from observational data in the lower troposphere. Tokyo Tech. Report No. **21**, Meteor. Agency, Tokyo, 1963
- [3] 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论. 北京: 科学出版社, 1979. 399~403
Chen L S, Ding Y H. *Introduction of the Western Pacific Typhoon* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1979. 399~403
- [4] 阎俊岳, 张秀芝, 陈乾金, 等. 热带气旋迅速加强标准的研究. 气象, 1995, **21** (5): 9~13
Yan J Y, Zhang X Z, Chen Q J, et al. The standard of rapidly intensified tropical cyclones. *Meteorology* (in Chinese), 1995, **21** (5): 9~13
- [5] 吴达铭. 西北太平洋热带气旋强度突变的分布特征. 大气科学, 1997, **21** (2): 191~198
Wu D M. The climatological characteristics of rapid change of the intensity of the tropical cyclone of the western North Pacific Ocean. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1997, **21** (2): 191~198
- [6] 于玉斌, 姚秀萍. 西北太平洋热带气旋强度变化的统计特征. 热带气象学报, 2006, **22** (6): 521~526
Yu Y B, Yao X P. A statistical analysis on intensity change of tropical cyclones over the western North Pacific. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2006, **22** (6): 521~526
- [7] 寿绍文, 姚秀萍. 爆发性发展台风合成环境场的诊断分析.

- 大气科学, 1995, **19** (4): 487~493
Shou S W, Yao X P. A diagnostic of the composite ambient fields of the explosively developing typhoons. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1995, **19** (4): 487~493
- [8] 夏友龙, 郑祖光, 刘式达. 台风内核与外围加热对其强度突变的影响. 气象学报, 1995, **53** (4): 424~430
Xia Y L, Zheng Z G, Liu S D. The effects of heating in the inner core and the external part of typhoon on their intensity abrupt changes. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1995, **53** (4): 424~430
- [9] 郑祖光, 夏友龙. 台风内核与外围的强度突变. 气象学报, 1996, **54** (3): 294~302
Zheng Z G, Xia Y L. The intensity abrupt change in the inner core and external part of typhoon. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1996, **54** (3): 294~302
- [10] 梁建茵, 陈子通, 万齐林, 等. 热带气旋“黄蜂”登陆过程诊断分析. 热带气象学报, 2003, **19** (增刊): 45~55
Liang J Y, Chen Z T, Wan Q L, et al. Diagnostic analysis of the landfall process tropical cyclone “Vongfong”. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2003, **19** (Suppl.): 45~55
- [11] 胡春梅, 端义宏, 余晖, 等. 华南地区热带气旋登陆前强度突变的大尺度环境诊断分析. 热带气象学报, 2005, **21** (4): 377~382
Hu C M, Duan Y H, Yu H, et al. The diagnostic analysis of the rapid change in tropical cyclones intensity before landfall in South China. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2005, **21** (4): 377~382
- [12] 余晖, 吴国雄. 湿斜压性与热带气旋强度突变. 气象学报, 2001, **59** (4): 440~449
Yu H, Wu G X. Moist baroclinity and abrupt intensity change of tropical cyclone. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2001, **59** (4): 440~449
- [13] 余晖, 费亮, 端义宏. 8807 和 0008 登陆前的大尺度环境特征与强度变化. 气象学报, 2002, **60** (增刊): 78~87
Yu H, Fei L, Duan Y H. Favorable large-scale conditions for rapid intensification of typhoon “Bill” and “Jelawat” before their landfall. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, **60** (Suppl.): 78~87
- [14] 雷小途, 陈联寿. 大尺度环境场对热带气旋影响的动力分析. 气象学报, 2001, **59** (4): 429~439
Lei X T, Chen L S. Dynamical studies on the effect of large-scale environmental flow on tropical cyclones. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2001, **59** (4): 429~439
- [15] 陈联寿, 孟智勇. 我国热带气旋研究十年进展. 大气科学, 2001, **25** (3): 420~432
Chen L S, Meng Z Y. An overview on tropical cyclone research progress in China during the past ten years. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25**

- (3): 420~432
- [16] 王斌, Elsberry R L, 王玉清, 等. 热带气旋运动的动力学研究进展. 大气科学, 1998, **22** (4): 535~547
Wang B, Elsberry R L, Wang Y Q, et al. Dynamics in tropical cyclone motion: A review. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1998, **22** (4): 535~547
- [17] 端义宏, 余晖, 伍荣生. 热带气旋强度变化研究进展. 气象学报, 2005, **63** (5): 636~645
Duan Y H, Yu H, Wu R S. Review of the research in the intensity change of tropical cyclone. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2005, **63** (5): 636~645
- [18] 陈联寿, 罗哲贤, 李英. 登陆热带气旋研究的进展. 气象学报, 2004, **62** (5): 541~549
Chen L S, Luo Z X, Li Y. Research advances on tropical cyclone landfall process. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **62** (5): 541~549
- [19] 李英, 陈联寿, 徐祥德. 水汽输送影响登陆热带气旋维持和降水的数值试验. 大气科学, 2005, **29** (1): 91~98
Li Y, Chen L S, Xu X D. Numerical experiments of the impact of moisture transportation on sustaining of the landfalling tropical cyclone and precipitation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (1): 91~98
- [20] 闫敬华, 徐建平, 丁伟钰, 等. 地形对登陆热带气旋“黄蜂”(2002)强度影响的模拟研究. 大气科学, 2005, **29** (2): 205~212
Yan J H, Xu J P, Ding W Y, et al. A modeling study of the impact of terrain on the intensity of landfalling tropical cyclone Vongfong (0214). *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (2): 205~212
- [21] 袁金南, 谷德军, 梁建茵. 地形和边界层摩擦对登陆热带气旋路径和强度影响的研究. 大气科学, 2005, **29** (3): 429~437
Yuan J N, Gu D J, Liang J Y. A study of the influence of topography and boundary layer friction on landfalling tropical cyclone track and intensity. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (3): 429~437
- [22] 李英, 陈联寿, 王继志. 热带气旋登陆维持和迅速消亡的诊断研究. 大气科学, 2005, **29** (3): 482~490
Li Y, Chen L S, Wang J Z. Diagnostic study of the sustaining and decaying of tropical cyclones after landfall. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (3): 482~490
- [23] 冀春晓, 薛根元, 赵放. 台风 Ranim 登陆期间地形对其降水和结构影响的数值模拟试验. 大气科学, 2007, **31** (2): 233~244
Ji C X, Xue G Y, Zhao F. The numerical simulation of orographic effect on the rain and structure of typhoon Ranim during landfall. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (2): 233~244
- [24] Krishnamurti T N, Pattnaik S, Stefanova L, et al. The hurricane intensity issue. *Mon. Wea. Rev.*, 2005, **133**: 1886~1911
- [25] 中国气象局. 台风年鉴(1949~1990). 北京: 气象出版社, 1950~1991
China Meteorological Administration. *Typhoon Yearbooks* (1949~1990) (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1950~1991
- [26] 中国气象局. 热带气旋年鉴(1991~2003). 北京: 气象出版社, 1992~2004
China Meteorological Administration. *Tropical Cyclone Yearbooks* (1991~2003) (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1992~2004
- [27] Gray W M. Global view of the origin of tropical disturbances and storms. *Mon. Wea. Rev.*, 1968, **96**: 669~700
- [28] Tuleya R E, Kurihara Y. A numerical study of the effect of environmental flow on tropical storm genesis. *Mon. Wea. Rev.*, 1981, **109**: 2487~2506
- [29] Bender M A. The effect of relative flow on the asymmetric structure in the interior of hurricanes. *J. Atmos. Sci.*, 1997, **54**: 703~724
- [30] DeMaria M. The effect of vertical shear on tropical cyclone intensity change. *J. Atmos. Sci.*, 1996, **53**: 2076~2088
- [31] Jones S C. The evolution of vortices in vertical shear. Part I: Initially barotropic vortices. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1995, **121**: 821~851
- [32] Paterson L A, Hanstrum B N, Davidson N E, et al. Influence of environmental vertical wind shear on the intensity of hurricane-strength tropical cyclones in the Australian region. *Mon. Wea. Rev.*, 2005, **133**: 3644~3660
- [33] 李永康, 陆渝蓉, 高国栋, 等. 8209 号和 8304 号台风影响期物理量场的对比分析. 见: 85-906-07 课题组编. 台风科学、业务试验和天气动力学理论的研究(第四分册). 北京: 气象出版社, 1996. 40~45
Li Y K, Lu Y R, Gao G D, et al. Contrastive analysis of the physical fields among Typhoon 8209 and 8304 effecting period. *Report on Typhoon Scientific Experiment and Synoptic/Dynamics Theoretical Study* Vol. 4 (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1996. 40~45