超强台风“桑美”(2006)近海急剧增强特征及机理分析

于玉斌[1] 陈联寿[2] 杨昌贤[3]

1 中国气象局培训中心，北京 100081
2 中国气象科学研究院，北京 100081
3 海南省气象台，海口 570203

摘 要 应用 NCEP/NCAR 再分析资料，对超强台风“桑美”(2006) 在中国近海急剧增强的特征及机理进行分析。结果表明，“桑美”台风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；介于－4～4 m/s 弱的 200 hPa 和 850 hPa 高低层环境风垂直切变是“桑美”台风急剧增强的必要条件；台风中心附近对流层高层辐散的增强、中心附近正涡度的增大和正涡度柱向对流层中上层伸展导致“桑美”台风急剧增强，对流层中层辐散和涡度的增大与台风的减弱密切相关；“桑美”台风急剧增强过程中，对流层高层动能的下传是对流层低层动能补充的重要途径之一；“桑美”台风近海急剧增强具有前兆性，急剧增强对风垂直切变、850 hPa 角动量和动能区域平均值变化的响应时间大约为 18 h，这些可为提前预测我国近海台风的强度急剧变化提供参考。

关键词 台风 近海 强度 变化

文章编号 1006－9895 (2008) 02－0405－12 **中图分类号** P444 **文献标识码** A

The Features and Mechanism Analysis on Rapid Intensity Change of Super Typhoon Saomai (2006) over the Offshore of China

YU Yu-Bin[1], CHEN Lian-Shou[2], and YANG Chang-Xian[3]

1 *China Meteorological Administration Training Center, Beijing* 100081
2 *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing* 100081
3 *Meteorological Observatory of Hainan Province, Haikou* 570203

Abstract Most tropical cyclones weaken or their intensity remains unchanged over the offshore of China, while some tropical cyclones intensify rapidly. The extreme weather events would arise from those rapid intensification tropical cyclones, even much more serious damage would happen. Super typhoon Saomai (2006), which struck China in August 2006 as the most intense typhoon that China had experienced in 50 years, is a typical rapid intensification tropical cyclone over the offshore of China, whose intensity is even stronger than hurricane Katrina (2005) which is the costliest and one of the deadliest hurricanes in the history of the United States. Saomai is estimated to have been responsible for nearly RMB 10 billion yuan in damage. Saomai can be traced back to a tropical storm on 5 August. The system strengthened into typhoon 2 days later and rapidly intensified into super typhoon over the offshore of China on 9 August as the central pressure fell to 920 hPa. It then maintained its peak intensity for about 18 h before beginning to weaken. Saomai tracked into Zhejiang Province on the afternoon of 10 August, making landfall in Cangnan county and then rapidly weakened. Taking super typhoon Saomai as an example, detailed analyses are

收稿日期 2006－11－06，2007－03－23 收修定稿
资助项目 国家自然科学基金资助项目 40575018、40205008，中国气象局气候变化专项 CCSF2007-13
作者简介 于玉斌，男，1968 年出生，博士，研究员。主要从事热带气旋研究。E-mail：yuyb@cma.gov.cn

made on the dynamic and kinetic features and mechanisms of the typhoon for different developing stages in terms of quantitative and temporal evolution, including structures of vorticity, divergence, vertical motion, angular momentum, kinetic energy, etc. by the use of NCEP－NCAR reanalysis data with horizontal resolution of $1°\times1°$ and vertical resolution of 11 layers. The study shows that the intensity change of Saomai is in inverse proportion to that of the South Asia high and the subtropical high, the South Asia high and the subtropical high decay in the typhoon rapid intensification stage. The intensity changes of Saomai in environmental vertical wind shear are investigated in this study using the NCEP－NCAR reanalysis data. The shear values averaged over the 6°, 10°, 20° and 40° latitude－longitude squares, centered at the location of typhoon center, are calculated to analyse the impact of wind shear on the typhoon intensity change. Typically a critical vertical shear, 850－200 hPa shear with magnitude of 1－4 m/s, favors typhoon rapid intensification over the offshore of China. There appears to be a time lag between the change of vertical wind shear and the typhoon intensity rapid change, typically about 18 h. There is a favorable environment for typhoon intensification, such as strong divergence at the upper level and remarkable vorticity near the center of Saomai. And the addition of divergence or vorticity at the middle layer is associated with typhoon weakening. Saomai is also investigated by means of energy and angular momentum analysis. The losses of kinetic energy are compensated by the downward transport of the kinetic energy from the upper troposphere. Typhoon intensification is mainly caused by the enhancement of the kinetic energy and angular momentum in the lower troposphere. And there also appears to be an 18 h time lag between the change of the kinetic energy and angular momentum and the typhoon intensity rapid change. Some interesting results in this paper are useful for the operational forecasting and some of them are valuable for the theoretical study. The authors hope to extend the study to numerical simulations of intensity change based on idealized and real data initial conditions.

Key words typhoon, offshore, intensity, change

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[1]表明，平均有 16％的 TC 移到中国沿海急剧增强。中国近海是一个自然地理的概念，总面积约 $472.7\times10^4\ km^2$，包括中国大陆濒临的渤海、黄海、东海、南海及台湾省以东的太平洋一隅，为西太平洋边缘海的一部分[2]。在我国近海地区，特别是距离海岸线 300～400 km 的区域，突然加强的热带气旋对我国影响大而又难以预报，往往造成十分严重的灾害。最近，于玉斌等[3, 4]给出了 TC 急剧增强的标准，分析了西北太平洋急剧增强 TC 的气候特征，对我国近海急剧增强和急剧减弱的两组 TC 进行了合成分析和对比分析。寿绍文等[5]对爆发性发展台风的合成环境场诊断分析认为，台风爆发性发展时刻低空辐合和高层辐散均增强。夏友龙等[6]和郑祖光等[7]指出，非绝热加热是影响 TC 强度突变的重要因子。梁建茵等[8]对近海加强的 TC“黄蜂”作了诊断分析，胡春梅等[9]利用 NCEP/NCAR 再分析资料对华南地区登陆前急剧减弱和急剧增强的 TC 进行了大尺度分析，研究表明，急剧增强的 TC 位于副热带高压（简称副高）的南侧，低空辐合和高空辐散较强。余晖等[10, 11]认为对流层上部环境流场与 TC 外流之间的相互作用在我国近海 TC 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 TC 急剧增强的原因。徐亚梅和伍荣生[12]通过数值分析发现，非对称流在低层发展并通过涡动通量项向对称流转换，使得热带弱低压快速发展达到热带风暴强度。徐祥德[13]的研究表明，台风系统扰动异变现象不仅与对流加热、耗散因子相关，而且还与系统外界热量、动量的非线性平流，下垫面的潜热、感热输送结构相关。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，定性分析了大尺度环境场的影响。端义宏等[15]最近总结了 TC 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，但仍然存在许多问题没有解决，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[15, 16]。本文选取 2006 年我国东海近海急剧增强的超强台风“桑美”，分析其强度急剧变化过程中的结构特征，为准确预报我国近海 TC 强度提供参考。

2 超强台风“桑美”简介

2006 年第 8 号热带风暴“桑美”(Saomai) 于 8 月 5 日 20 时（北京时，下同）在关岛东南方的西北太平洋洋面上生成，7 日 5 时加强为强热带风暴，下午加强为台风，9 日上午急剧增强为强台风，傍晚在我国近海加强为超强台风。10 日 17 时 25 分，超强台风“桑美”的中心在浙江省苍南县沿海登陆。登陆时，中心附近最大风力有 17 级（60 m/s)，中心附近最低气压为 920 hPa。登陆后，“桑美”台风移入福建省境内，强度迅速减弱，11 日上午在江西省弋阳县境内减弱为热带低气压，晚上在湖北境内逐渐填塞减弱。

“桑美”台风生命史中最低中心气压曾达 915 hPa，且一直维持到离海岸线 80 km 左右距离。台风“桑美”是建国以来登陆我国大陆最强的台风，比 2005 年登陆美国的卡特里娜（Katrina）飓风还要强，具有近海急剧增强、中心气压特别低、风速特别大、降雨特别集中、发展迅速、移动快等特点。因此，分析“桑美”台风在近海强度的变化具有重要的意义。

3 资料及方法

台风（热带气旋）年鉴基本资料为每日 4 个时次，分别为 02 时、08 时、14 时和 20 时。TC 强度变化用每一时次 6 小时变压 Δp 表示，如 08 时的 Δp 为 08 时与其前 6 小时（即 02 时）中心海平面最低气压的差值。若用 $V(I)$ 表示 I 时刻 TC 近中心的地面最大风速，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 $\Delta V(I+1)=V(I+2)-V(I)$。若 $\Delta p<0$ hPa/6 h 则为增强样本，反之为减弱样本；$\Delta V(I+1)>0$ 为增强样本，表示（$I+1$）时刻 TC 增强，反之为减弱样本。关于 TC 强度急剧变化，我国“八·五”科技攻关项目的标准为：对于中国近海 12 h 热带气旋近中心最大风速变化绝对值≥10 m/s，其中变化正值为急剧增强，变化负值为急剧减弱[17]。当时研究所用资料为 1949～1990 年共 42 年的台风年鉴资料。为了更全面系统地分析西北太平洋 TC 强度变化特征，于玉斌等[3]应用 1949～2003 年共 55 年的资料，利用 TC 中心海平面最低气压来度量 TC 强度，用每一时次 6 h 变压 Δp 表示强度变化，给出了 TC 急剧增强的标准：$\Delta p<-7.78$ hPa 的时刻为 TC 急剧增强时刻，$\Delta p>8.30$ hPa 的时刻为 TC 急剧减弱时刻。于玉斌等[4]用 $V(I)$ 表示 I 时刻 TC 近中心地面最大风速，用每一时次 12 h 风速变化 ΔV 表示强度变化，急剧增强标准为：$\Delta V>7.90864$ m/s，急剧减弱标准为 $\Delta V<-12.974109$ m/s。本文综合考虑以上两种标准，“桑美”台风进入我国东海近海海域后经历了急剧增强和登陆后急剧减弱过程（表 1），对应于表 1 的台风路径图见图 1a(“桑美”台风中心位置资料来源于中国台风网)。

表 1 超强台风“桑美”在其强度急剧变化前后基本情况一览表

Table 1 The basic information of typhoon Saomai (2006) when its intensity changed rapidly

时间	中心位置	中心气压/hPa	最大风速/$m\cdot s^{-1}$	6 h 变压/hPa	12 h 风速变化/$m\cdot s^{-1}$	备注
8 月 7 日 20 时	(19.6°N, 136.7°E)	975	33	/	/	
8 月 8 日 02 时	(20.3°N, 135.4°E)	970	35	0	2	
8 月 8 日 08 时	(20.9°N, 134.1°E)	970	35	0	0	
8 月 8 日 14 时	(21.6°N, 133.0°E)	970	35	0	0	
8 月 8 日 20 时	(22.4°N, 131.4°E)	970	35	0	3	
8 月 9 日 02 时	(23.1°N, 130.2°E)	960	38	−10	5	
8 月 9 日 08 时	(23.9°N, 128.5°E)	955	40	−5	12	急剧增强时刻
8 月 9 日 14 时	(24.7°N, 127.0°E)	945	50	−10	20	急剧增强时刻
8 月 9 日 20 时	(25.4°N, 125.3°E)	920	60	−25	10	急剧增强时刻
8 月 10 日 02 时	(26.0°N, 123.7°E)	920	60	0	0	
8 月 10 日 08 时	(26.5°N, 122.4°E)	915	60	−5	0	
8 月 10 日 14 时	(27.0°N, 121.2°E)	920	60	5	−10	
8 月 10 日 20 时	(27.2°N, 120.0°E)	940	50	20	−37	急剧减弱时刻
8 月 11 日 02 时	(27.7°N, 118.7°E)	990	23	50	−32	急剧减弱时刻
8 月 11 日 08 时	(28.2°N, 117.6°E)	996	18	6	−9	
8 月 11 日 14 时	(28.7°N, 116.4°E)	998	14	2	−5	

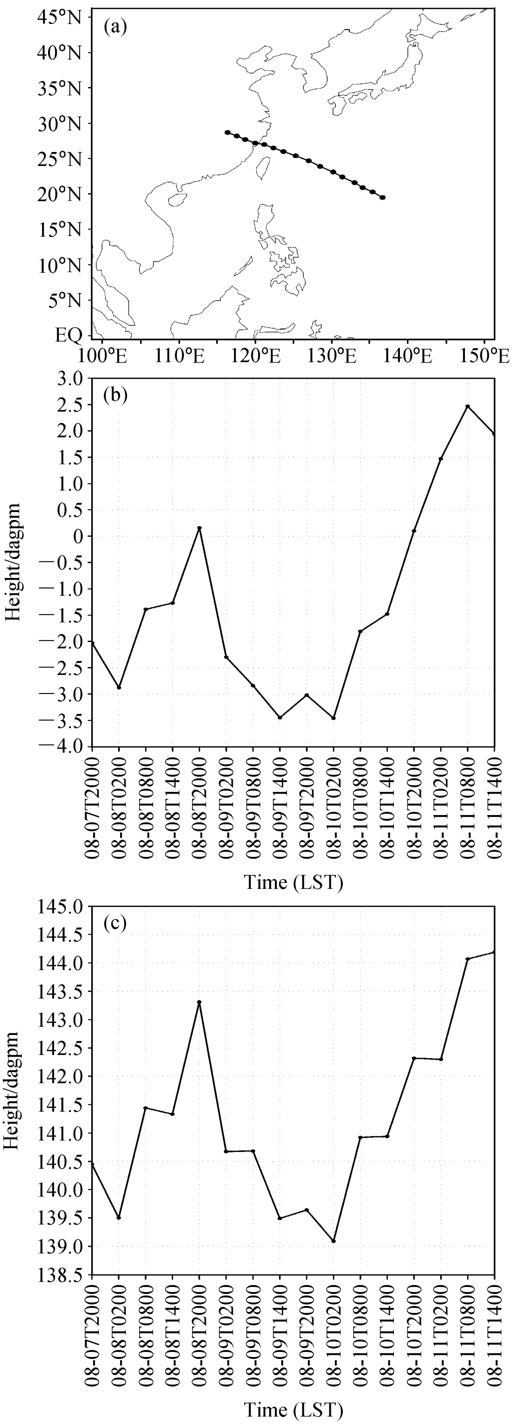

图 1　台风路径及中心高度随时间的变化：(a) 台风路径；(b) 1000 hPa 高度；(c) 850 hPa 高度。8 月 9 日 08 时～20 时台风急剧增强，8 月 10 日 20 时～11 日 02 时台风急剧减弱

Fig. 1　Typhoon track and time variation of the height of typhoon center: (a) Typhoon track; (b) height at 1000 hPa; (c) height at 850 hPa. Typhoon Saomai intensifies rapidly from 0800 LST to 2000 LST 9 Aug 2006 and weakens rapidly from 2000 LST 10 Aug to 0200 LST 11 Aug 2006

由表 1 可见，8 月 10 日 14 时台风开始减弱，9 日 08 时、14 时、20 时为台风急剧增强时刻，10 日 20 时、11 日 02 时为登陆以后急剧减弱时刻。本文利用 1 日 4 次的 NCEP/NCAR 再分析资料（水平分辨率为 1°×1°，垂直方向为 1000 hPa 到 100 hPa 共 11 层），分析超强台风“桑美”的强度急剧变化。图 1b、c 为 NCEP/NCAR 再分析资料计算的“桑美”台风中心高度随时间的变化，台风急剧增强过程中对流层低层（1000 hPa 和 850 hPa ）台风中心高度随时间线性减小，减弱过程相反。急剧增强前 12 h（8 月 8 日 20 时）台风中心高度发生突变，由线性增大趋势转变为线性减小趋势，对应于台风强度不变转变为强度增强（表 1）；急剧减弱前 18 h（8 月 10 日 02 时）台风中心高度再次发生突变，又转变为随时间线性增大。所以说，对流层低层（1000 hPa 和 850 hPa）“桑美”台风中心高度随时间变化的突变现象与 12～18 h 之后台风强度急剧变化密切相关。

4　台风强度急剧变化与高压演变关系

4.1　南亚高压与台风强度急剧变化

从 100 hPa 等高线图（图 2）上可以看出，“桑美”台风在强度变化过程中，其中心西北侧始终由南亚高压控制。在台风急剧增强过程中，南亚高压的面积和强度均越来越小，在急剧增强时刻最弱（图 2c）；随后在台风强度稳定和急剧减弱过程中，南亚高压的面积和强度变得越来越大，在急剧减弱时刻最强（图 2h）。所以，当南亚高压较弱时对应于“桑美”台风的急剧增强，也就是说，“桑美”台风强度变化与南亚高压的强度变化呈反相变化关系。可见，“桑美”台风强度急剧变化与 100 hPa 高度上南亚高压的强弱关系密切。

4.2　副热带高压与台风强度急剧变化

在 500 hPa 高度上，“桑美”台风位于副高的西南侧（图 3）。总体上，在台风急剧增强过程中，副高的面积和强度越来越小，副高越来越弱，在急剧增强前 18 h，副高出现断裂现象（图略），而在台风逐渐减弱过程中副高越来越强，588 dagpm 等高线覆盖区域非常广。所以说，“桑美”台风强度变化与副高的强度变化呈反相变化关系，台风强度急剧变化与副高的强弱有关。

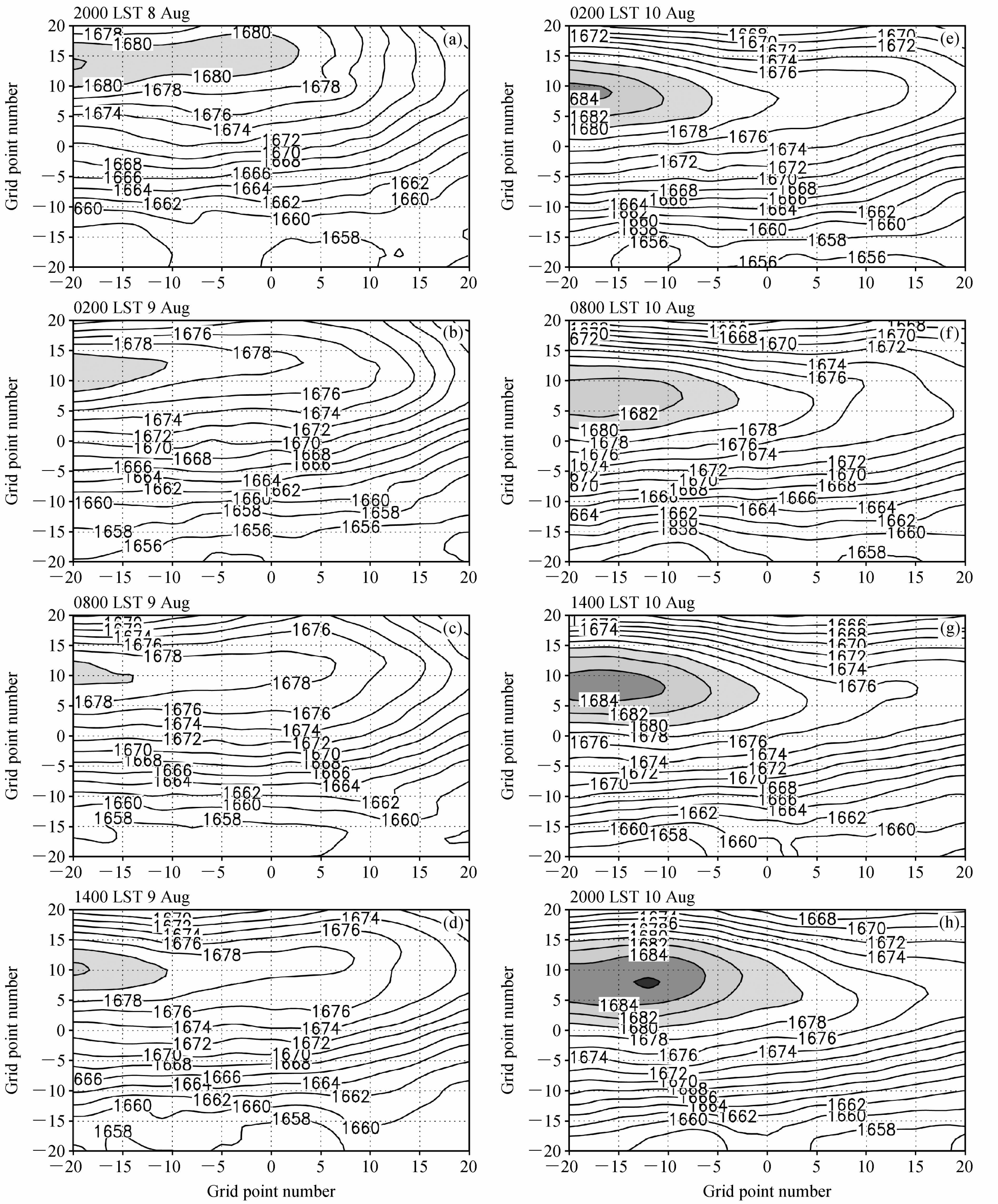

图 2　100 hPa 高度场（单位：dagpm）：(a)～(d)为急剧增强过程，其中（c）和（d）为急剧增强时刻；(e)～(h)为急剧减弱过程，其中（h）为急剧减弱时刻。阴影：大于 1680 dagpm 区域；台风中心位于坐标原点，坐标为格点序号，向北、向东为正，向南、向西为负，格距为 1 经纬距，下同

Fig. 2　100-hPa height (dagpm): (a)-(d) are the rapid intensification process, in which (c) and (d) are at rapid intensification time; (e)-(h) are rapid decaying process, in which (h) is at rapid decaying time. Areas with height larger than 1680 dagpm are shaded. Coordinates represent grid point number with grid spacing of 1-degree longitude (latitude), the positive (negative) denotes northward and eastward (southward and westward), and the origin denotes the typhoon center (the same below)

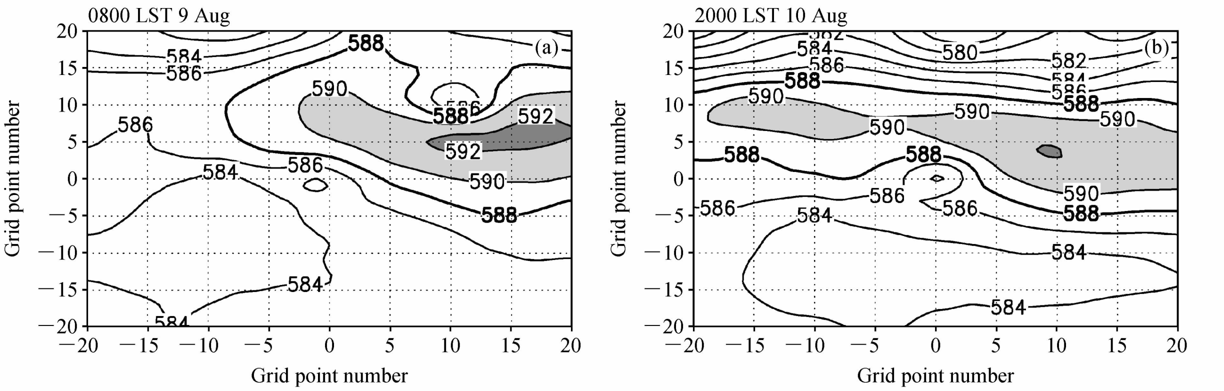

图3 500 hPa高度场（单位：dagpm）：(a) 急剧增强时刻；(b) 急剧减弱时刻。阴影：大于590 dagpm区域

Fig. 3 500-hPa height (dagpm): (a) At the rapid intensification time; (b) at the rapid decaying time. Areas with height larger than 590 dagpm are shaded

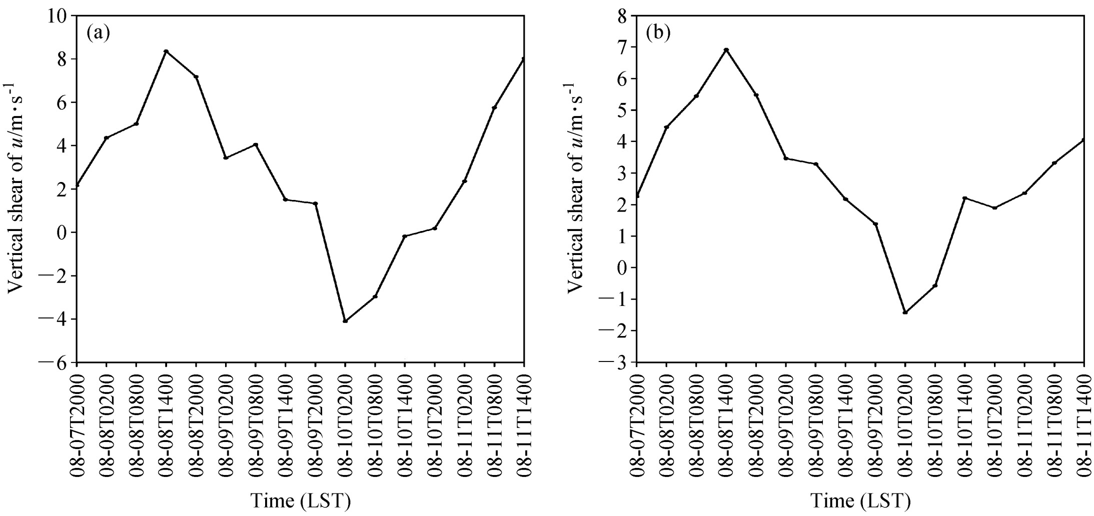

图4 风垂直切变区域平均值随时间的变化：(a) 10°×10°经纬距区域平均；(b) 20°×20°经纬距区域平均

Fig. 4 Time variation of the vertical shear of zonal wind averaged over (a) 10°×10° latitude－longitude square area and (b) 20°×20° latitude－longitude square area

5 强度急剧变化的动力和能量特征

5.1 环境风场垂直切变对台风强度急剧变化的影响

环境风垂直切变（VWS）反映了台风扰动周围的“通风”条件。一般认为垂直切变对台风强度具有抑制作用，但弱的垂直切变有利于台风暖心结构的生成和维持，从而有利于台风的维持和发展。2005年，Linda等[18]在研究影响澳大利亚的TC时发现，200 hPa和850 hPa高低层垂直切变介于2～4 m/s之间是TC急剧增强的必要条件。最近，美国国家航空和航天局（NASA）实施的科学试验项目CAMEX（Convection and Moisture Experiment）分析研究表明[19, 20]，弱的垂直切变有利于TC的发展，垂直切变介于8～15 m/s之间对TC强度具有重要的抑制作用。

本文用850 hPa和200 hPa分别代表对流层低层和高层，用低层和高层的纬向风速u之差表示环境风垂直切变$\partial u/\partial z$，以台风中心为中心点分别选取6°×6°、10°×10°、20°×20°（经纬距）正方形区域，计算台风强度变化过程中850 hPa与200 hPa之间的环境风垂直切变的区域平均值，分析了风垂直切变区域平均值随时间演变特征。

图4中8月9日08时～8月9日20时为“桑美”台风急剧增强时刻，8月10日14时开始减弱，8月10日20时为急剧减弱时刻。总体上，在“桑美”台风增强过程中，风垂直切变逐渐减弱；而在

台风减弱过程中，风垂直切变逐渐增强。综合分析不同区域风垂直切变平均值随时间演变规律发现，台风急剧增强过程中，垂直切变介于－4～4 m/s 之间。所以说，高低层风垂直切变介于－4～4 m/s 之间是超强台风“桑美”急剧增强的必要条件，这与 2005 年 Linda 等[18]在研究澳大利亚 TC 时的结果基本一致。在台风急剧增强前 18 h（8 月 8 日 14 时）风垂直切变在逐渐增大过程中突然减弱，而在台风急剧减弱前 18 h（8 月 10 日 02 时）风垂直切变在逐渐减小过程中突然增强。可见，“桑美”台风强度急剧变化对风垂直切变变化的响应时间大约为 18 h。鉴于环境风垂直切变对台风强度影响的复杂性，将另文定量分析并通过数值模式进一步加以研究。

5.2 散度特征

图 5 为通过“桑美”台风中心散度的纬向垂直剖面。“桑美”台风在急剧增强过程中，台风中心附近高层维持一个辐散中心、低层维持一个辐合中心（图 5a、b）；而在台风减弱时，台风中心附近高层辐散减弱（图 5c），在急剧减弱时刻出现了辐合中心（图 5d）。在对流层中层，急剧增强前 18 h（图 5a），台风强度稳定期间，在 650 hPa 附近，台风中心附近为较强辐散区域，辐散中心强度为 $1.0\times10^{-5}\,s^{-1}$；急剧增强时刻，对流层中层台风中心附近为弱的辐合和辐散相间分布（图 5b）；在急剧减弱时刻，700 hPa 附近，台风中心附近为强辐散区域，辐散中心强度为$1.0\times10^{-5}\,s^{-1}$，台风中心西侧的 850～900 hPa 高度上，辐散区域更大，辐散更强，台风中心西侧 3 个经距处辐散中心强度为 $1.8\times10^{-5}\,s^{-1}$。所以说，“桑美”台风中心附近对流层高层辐散的增强导致台风急剧增强，对流层中层辐散的增强与台风的减弱密切相关。

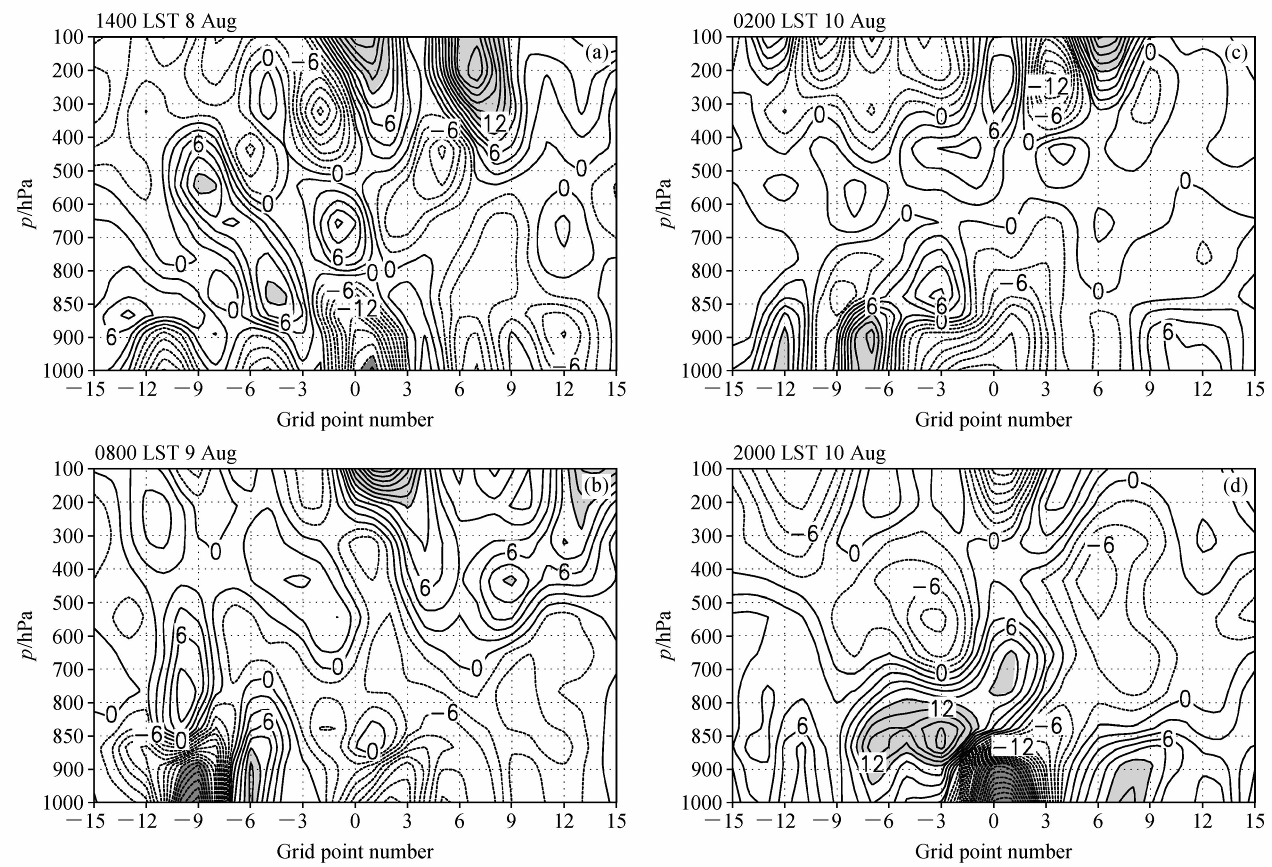

图 5　过台风中心散度纬向垂直剖面（单位：$10^{-6}\,s^{-1}$）：(a) 急剧增强前 18 h；(b) 急剧增强时刻；(c) 开始减弱时刻；(d) 急剧减弱时刻。辐散阴影区为散度≥$1.0\times10^{-5}\,s^{-1}$区域，辐合阴影区为散度≤$-2.0\times10^{-5}\,s^{-1}$区域

Fig. 5　The zonal vertical cross section of divergence ($10^{-6}\,s^{-1}$) through the typhoon center: (a) At 18 h before the rapid intensification time; (b) at the rapid intensification time; (c) at the beginning of decaying time; (d) at the rapid decaying time. Areas with divergence greater than $1.0\times10^{-5}\,s^{-1}$ and less than $-2.0\times10^{-5}\,s^{-1}$ are shaded

5.3　涡度特征

图 6 为通过“桑美”台风中心相对涡度的纬向垂直剖面。在台风中心附近存在一个明显的正涡度柱，柱状正涡区大致为垂直分布，台风为相当正压结构。“桑美”台风最强的正涡度区只集中在距中心 200 km 范围内，以外的地方出现负涡度区或正负涡度区交错分布的情况。“桑美”台风急剧增强过程中，中、低层涡度均有显著的增长，急剧增强前 18 h（图 6a），涡度柱中心值为 $1.0\times10^{-4}\ \mathrm{s}^{-1}$，最大正涡度中心位于 850 hPa 以下的对流层低层，正涡度柱阴影区位于 800 hPa 以下；急剧增强时刻（图 6b），涡度柱中心值增大至 $1.4\times10^{-4}\ \mathrm{s}^{-1}$，正涡度柱阴影区向上伸展到 400 hPa 以上；而在台风开始减弱时（图 6c），对流层低层和中层都出现了正涡度中心；“桑美”台风减弱过程中，正涡度柱阴影区向对流层中层收缩，中心附近对流层低层涡度减弱，急剧减弱时刻对流层中层 500～600 hPa 附近为最大正涡度中心（图 6d）。

所以说，台风中心附近正涡度的增大和正涡度柱向对流层中上层伸展导致“桑美”台风急剧增强，对流层中层涡度的增大、高低层均出现正涡度中心与台风的减弱密切相关。

5.4　角动量特征

涡度和角动量是反映台风强度变化的重要指标，两者保持着良好的一致性[21]。可以近似地把台风看作圆对称的涡旋[22]，本文以“桑美”台风中心为中心点，选取半径为 5 个经纬距的圆形区域，计算了角动量的区域平均值。

从对流层低层到高层（图 7a），“桑美”台风从强度急剧增强前 18 h（8 月 8 日 14 时）到急剧增强时刻（8 月 9 日 14 时），角动量随着时间的推移呈增加的趋势，越到低层，增加的趋势越明显，在 850 hPa 附近最明显，在急剧增强时刻（8 月 9 日 08 时～14 时）出现极大值。而在随后的减弱过程

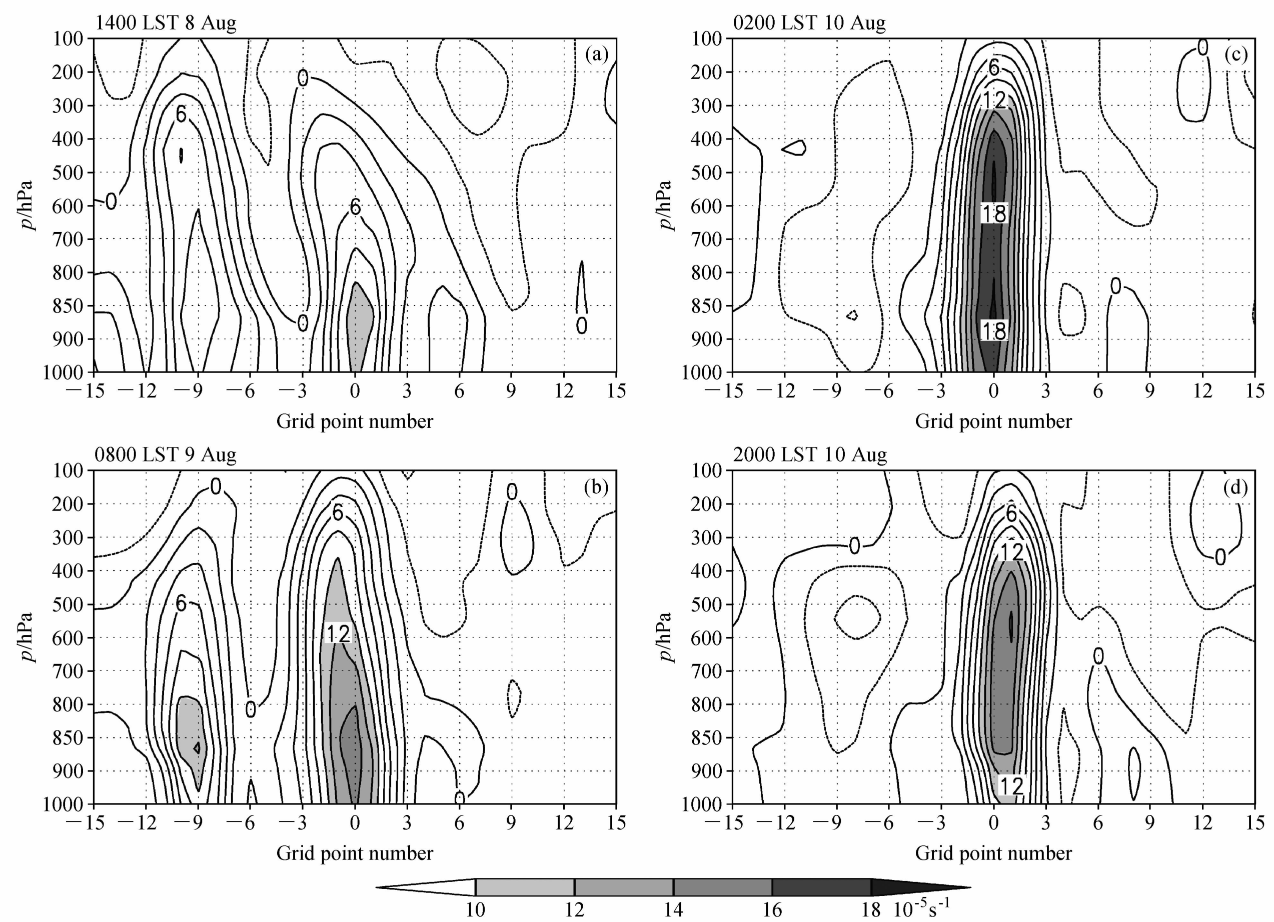

图 6　同图 5，但为过台风中心涡度纬向垂直剖面。阴影区为涡度≥$10\times10^{-5}\ \mathrm{s}^{-1}$区域

Fig. 6　Same as Fig. 5, but for vorticity. Areas with vorticity greater than $10\times10^{-5}\ \mathrm{s}^{-1}$ are shaded

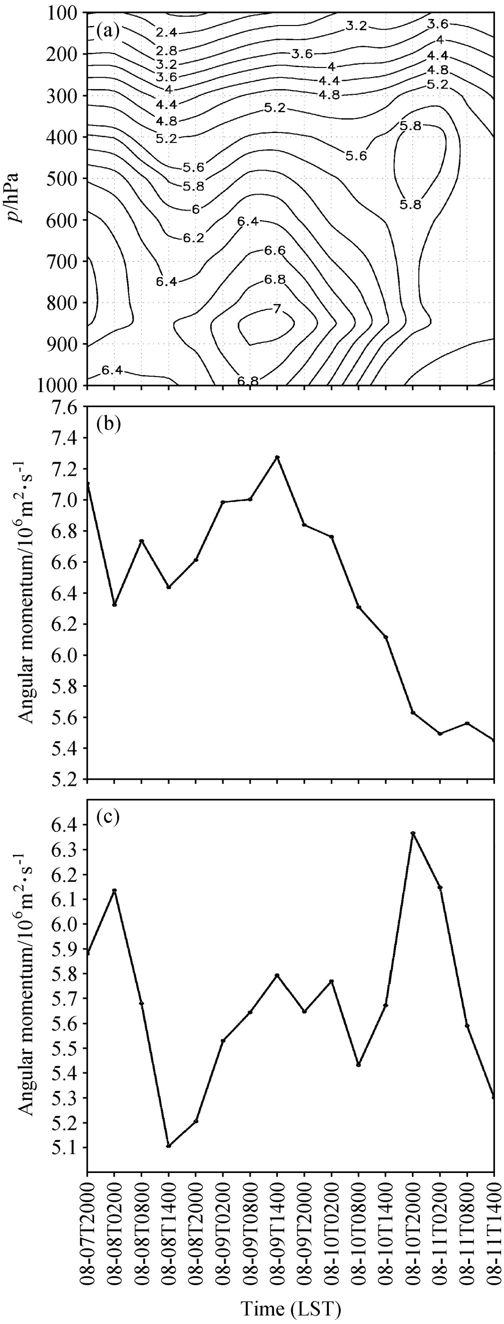

图 7　区域平均角动量演变图（单位：10^6 m^2/s）：(a) 高度-时间剖面；(b) 850 hPa 角动量演变；(c) 400 hPa 角动量演变

Fig. 7　Time variation of the angular momentum (10^6 m^2/s) averaged over a 5° longitude/latitude circle area centered at the typhoon center: (a) Height – time cross section; (b) angular momentum at 850 hPa; (c) angular momentum at 400 hPa

中，对流层中低层角动量随着时间的推移呈减小的趋势，在对流层低层较为明显。值得注意的是，在急剧减弱时刻（8 月 10 日 20 时），400～500 hPa 附近，出现了角动量的极大值中心。“桑美”台风急剧减弱与对流中层台风区域角动量的增加有关。

为了进一步揭示“桑美”台风强度急剧变化过程中对流层中低层角动量的变化规律，本文用 400 hPa 和 850 hPa 代表对流层中层和低层，分析了中、低层角动量区域平均值的变化规律。在 850 hPa 高度上（图 7b)，在台风急剧增强过程中，角动量逐渐增大；而在台风急剧减弱过程中，角动量逐渐减小。在台风急剧增强前 24 h（8 月 8 日 08 时）角动量突然减小，从急剧增强前 18 h（8 月 8 日 14 时）开始角动量随着时间的推移基本上呈线性增大趋势，在急剧增强时刻（8 月 9 日 14 时）达到最大值，随后又线性减小。在 400 hPa 高度上（图 7c)，在台风急剧增强过程中，角动量逐渐增大；而在台风急剧减弱前 18 h（8 月 10 日 02 时）角动量突然减小，从急剧减弱前 12 h（8 月 10 日 08 时）开始角动量随着时间的推移呈明显的线性增大趋势，在急剧减弱时刻（8 月 10 日 20 时）达到最大值，随后又线性减小。可见，“桑美”台风急剧增强对 850 hPa 角动量区域平均值变化的响应时间大约为 18 h，急剧减弱对 400 hPa 角动量区域平均值变化的响应时间大约为 12 h。

5.5　动能特征

在总能量的平衡中动能是个较小的量，但是动能对台风的发展具有重要的意义[22]。最近，张书平等[23]分析了一次北方台风暴雨的能量特征，认为动能在台风天气中的表现最有特点。本文以“桑美”台风中心为中心点，选取半径为 5 个经纬距的圆形区域，计算了动能的区域平均值。

在 500 hPa 以下对流层中下层（图 8a)，“桑美”台风从强度急剧增强前 18 h（8 月 8 日 14 时）到急剧增强时刻（8 月 9 日 14 时)，动能随着时间的推移呈增加的趋势，在对流层低层较为明显，在 850 hPa 附近最明显。850 hPa 附近，急剧增强前 36 h～18 h（8 月 7 日 20 时～8 月 8 日 14 时)，动能随着时间推移不断减小，存在动能的消耗；随后又由小变大，直至急剧增强后。这种现象表明，“桑美”台风从急剧增强前 18 h 开始，对流层低层存在其他能量的补充，弥补了动能的消耗，还使得动能不断增加。从图 8a 还可以发现，“桑美”台风急剧增强前，对流层高层动能最大，而且随着时间的推移，300～100 hPa 高度上高值动能向对流层低层下传的趋势较为明显，动能下传在台风急剧增强前

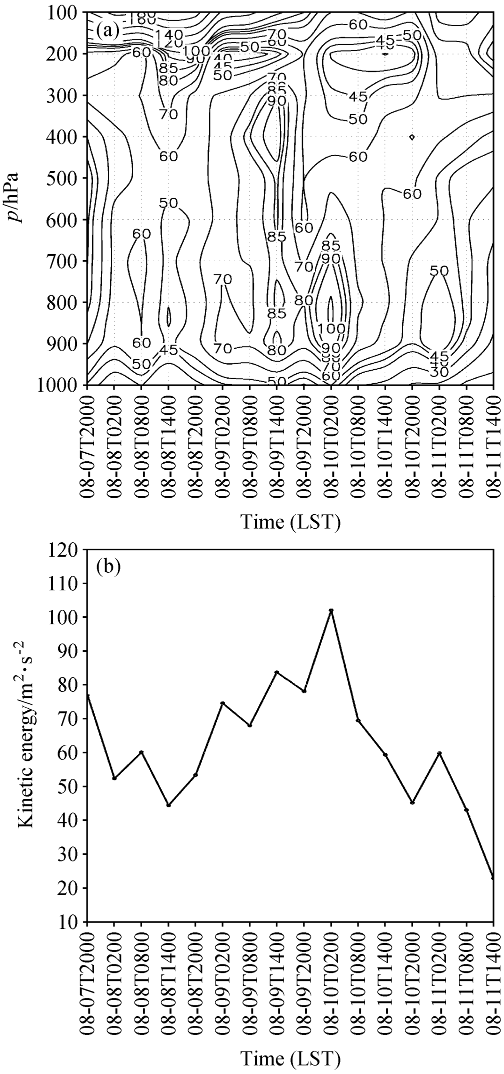

图 8 区域平均动能演变图（单位：m^2/s^2）：(a) 高度-时间剖面；(b) 850 hPa 动能演变

Fig. 8 Time variation of the kinetic energy (m^2/s^2) averaged over a 5° longitude/latitude circle area centered at the typhoon center: (a) Height - time cross section; (b) kinetic energy at 850 hPa

18 h（8 月 8 日 14 时）最明显，导致在急剧增强前 6 h 左右 200 hPa 附近的高层出现了动能极小值中心，而对流层低层动能不断增加。可以说，动能的增加，尤其是对流层低层动能的增加，导致“桑美”台风急剧增强，在“桑美”台风急剧增强过程中，对流层高层动能的下传是对流层低层动能补充的重要途径之一。

在“桑美”台风减弱过程中，从强度急剧减弱前 18 h（8 月 10 日 02 时）开始，从对流层低层到高层动能随着时间的推移呈减小的趋势，在对流层低层较为明显。

为了进一步揭示“桑美”台风强度急剧变化过程中高低层动能的变化规律，本文用 850 hPa 代表对流层低层，分析了低层动能区域平均值的变化规律。在 850 hPa 高度上（图 8b），在台风急剧增强过程中，动能逐渐增大；而在台风急剧减弱过程中，动能逐渐减小。在台风急剧增强前 24 h（8 月 8 日 08 时）动能突然减小，从急剧增强前 18 h（8 月 8 日 14 时）开始动能随着时间的推移基本上呈线性增大趋势，在急剧减弱前 18 h 动能又突然减小，随着时间的推移线性减小。可见，“桑美”台风强度急剧变化对 850 hPa 动能区域平均值变化的响应时间大约为 18 h，这对提前预测近海台风的强度急剧变化具有重要的指示意义。

6 结论和讨论

2006 年超强台风“桑美”在我国近海经历了急剧增强和减弱过程，通过对其强度变化的对比分析，主要结论如下：

（1）“桑美”台风强度变化与南亚高压、副高的强弱有关。台风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，台风急剧增强。

（2）在“桑美”台风急剧增强过程中，风垂直切变逐渐减弱，介于 -4～4 m/s 弱的 200 hPa 和 850 hPa 高低层垂直切变是超强台风“桑美”急剧增强的必要条件。

（3）台风中心附近对流层高层辐散的增强导致“桑美”台风急剧增强，对流层中层辐散的增大与“桑美”台风的减弱密切相关。台风中心附近正涡度的增大和正涡度柱向对流层中上层伸展导致“桑美”台风急剧增强，对流层中层涡度的增大、高低层均出现正涡度中心与台风的减弱密切相关。

（4）“桑美”台风在我国近海急剧增强具有前兆性。台风强度急剧变化对风垂直切变变化的响应时间大约为 18 h。对流层低层（1000 hPa 和 850 hPa）台风中心高度随时间变化的突变现象与 12～18 h 之后“桑美”台风强度急剧变化密切相关；“桑美”台风急剧增强对 850 hPa 角动量区域平均值变化的响应时间大约为 18 h。在“桑美”台风急剧增强过程中，对流层高层动能的下传是对流层低层动能补充的重要途径之一，“桑美”台风强度急剧变

化对 850 hPa 动能区域平均值变化的响应时间大约为 18 h。

本文对 2006 年我国近海急剧增强的超强台风“桑美”进行了特征及机理分析，得出了初步的结论。我国近海台风强度急剧变化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、热带对流层上部槽（TUTT）等外界条件有关，台风强度急剧变化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。不同的台风都有其特殊的内部结构及外部环境，急剧增强或急剧减弱的机理也不尽相同。对于不同的台风，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。对于台风强度急剧变化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，本文对“桑美”台风的强度急剧变化研究，将有助于数值模式的设计和理论上的处理。

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 Junyue. Climatological characteristics of rapidly intensifying tropical cyclones over the offshore of China. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*（in Chinese），1996，**7**（1）：28～35

[2] 沈文周（主编）. 中国近海空间地理. 北京：海洋出版社，2006. 1～2
Shen Wenzhou（Ed.）. *Offshore China Spatial Geography*（in Chinese）. Beijing：China Ocean Press，2006. 1～2

[3] 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 Yubin，Yao Xiuping. 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

[4] 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
Yu Yubin，Yang Changxian，Yao Xiuping. The vertical structure characteristics analysis on abrupt intensity change of tropical cyclone over the offshore of China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*（in Chinese），2007，**31**（5）：876～886

[5] 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 shaowen，Yao Xiuping. A diagnostic study 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

[6] 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 Youlong，Zheng Zuguang，Liu Shida. 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

[7] 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 Zuguang，Xia Youlong. The intensity abrupt change in the inner core and external part of typhoon. *Acta Meteorologica Sinica*（in Chinese），1996，**54**（3）：294～302

[8] 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 Jianyin，Chen Zitong，Wan Qilin，et al. Diagnostic analysis of the landfall process tropical cyclone “Vongfong”. *Journal of Tropical Meteorology*（in Chinese），2003，**19**（Suppl.）：45～55

[9] 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 Chunmei，Duan Yihong，Yu Hui，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

[10] 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 Hui，Wu Guoxiong. Moist baroclinity and abrupt intensity change of tropical cyclone. *Acta Meteorologica Sinica*（in Chinese），2001，**59**（4）：440～449

[11] 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 Hui，Fei Liang，Duan Yihong. 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

[12] 徐亚梅，伍荣生. 热带气旋碧丽斯（2000）发生的数值模拟：非对称流的发展及转换. 大气科学，2005，**29**（1）：79～90
Xu Yamei，Wu Rongsheng. The numerical simulation of the genesis of tropical cyclone Bilis（2000）：The evolution and transformation of asymmetric momentum. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*（in Chinese），2005，**29**（1）：79～90

[13] 徐祥德. 轴对称涡旋非线性运动平衡态、失稳和突变影响因子的研究. 大气科学，1991，**15**（2）：63～72
Xu Xiangde. Study on influence factors of equilibria，destablization and catastrophe of nonlinear movement of axisymmetric vortex. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*（*Scientia Atmospherica Sinica*）（in Chinese），1991，**15**（2）：63～72

[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 Xiaotu，Chen Lianshou. Dynamical studies on the effect of large-scale environmental flow on tropical cyclones. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese)，2001，**59** (4)：429～439

[15] 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 Yihong，Yu Hui，Wu Rongsheng. Review of the research in the intensity change of tropical cyclone. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese)，2005，**63** (5)：636～645

[16] Krishnamurtt T N，Pattnaik S，Stefanova L，et al. The hurricane intensity issue. *Mon. Wea. Rev.*，2005，**133**：1886～1912

[17] 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 Junyue，Zhang Xiuzhi，Chen Qianjin，et al. The standard of rapidly intensified tropical cyclones. *Meteorological Monthly* (in Chinese)，1995，**21** (5)：9～13

[18] 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

[19] Wu Liguang，Braun S A，Halverson J，et al. A numerical study of hurricane Erin (2001). Part I：Model verification and storm evolution. *J. Atmos. Sci.*，2006，**63** (1)：65～86

[20] Heymsfield G M，Halverson J，Ritchie E，et al. Structure of highly sheared tropical storm Chantal during CAMEX-4. *J. Atmos. Sci.*，2006，**63** (1)：268～287

[21] 谭锐志，梁必骐. 登陆台风变性过程的诊断研究. 大气科学，1990，**14** (4)：422～431
Tang Ruizhi，Liang Biqi. Diagnostic study for modifying process of landed typhoon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese)，1990，**14** (4)：422～431

[22] 陈联寿，丁一汇. 西太平洋台风概论. 北京：科学出版社，1979. 31，160～162
Chen Lianshou，Ding Yihui. *Introduction of the Western Pacific Typhoon* (in Chinese). Beijing：Science Press，1979. 31，160～162

[23] 张苏平，李春，白燕，等. 一次北方台风暴雨 (9406) 能量特征分析. 大气科学，2006，**30** (4)：645～659
Zhang Suping，Li Chun，Bai Yan，et al. Energy analysis on a heavy storm case in North China caused by typhoon No. 9406. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese)，2006，**30** (4)：645～659