

薛霖, 李英. 2016. 台湾地形诱生中尺度系统对台风 Meranti (1010) 迅速加强影响的数值研究 [J]. 大气科学, 40 (6): 1107–1116. Xue Lin, Li Ying. 2016. The effect of mesoscale systems induced by the topography of Taiwan on the rapid intensification of typhoon Meranti (1010) [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (6): 1107–1116, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1504.15177.

台湾地形诱生中尺度系统对台风 Meranti(1010) 迅速加强影响的数值研究

薛霖^{1,2} 李英¹

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 南京信息工程大学, 南京 210044

摘 要 台风 Meranti (1010) 北上进入台湾海峡过程中迅速加强, 登陆时达到其最大强度。利用中国气象局上海台风研究所最佳路径资料、NCEP GFS $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 资料及中尺度数值模式 WRF, 诊断分析台湾地形诱生的中尺度系统对台风 Meranti 迅速加强的影响。研究发现, Meranti 在进入海峡过程中, 台湾地形在台湾海峡内诱生出中尺度涡旋, 激发中尺度扰动波列, 加强台风环流内的垂直运动。台风水汽、热量的收支诊断表明, 强烈的上升运动使热量和水汽向上输送, 加强台风内的积云对流和潜热释放, 使其强度增强。计算台湾地形诱生中尺度系统与台风间的动能交换发现, 中尺度系统通过加强垂直运动向台风中高层输送涡动动能, 使中尺度系统动能向台风动能转换, 为 Meranti 的迅速加强提供能源。敏感性试验表明, 如果台湾地形不存在, 中尺度系统消失, 台风的水汽、热量的向上输送和积云对流明显减弱, Meranti 则不能达到迅速加强标准。

关键词 热带气旋 中尺度系统 台湾地形 迅速加强

文章编号 1006-9895(2016)06-1107-10

中图分类号 P444

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1504.15177

The Effect of Mesoscale Systems Induced by the Topography of Taiwan on the Rapid Intensification of Typhoon Meranti (1010)

XUE Lin^{1,2} and LI Ying¹

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

2 Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract Typhoon Meranti (1010) intensified rapidly after entering Taiwan Strait, and reached its peak just before landfall. Based on the best track data provided by Shanghai Typhoon Institute, China Meteorological Administration, the National Centers for Environmental Prediction Global Forecast System reanalysis data on $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ grids and numerical experiments, we investigate the effect of the mesoscale systems induced by the topography of Taiwan on the rapid intensification of typhoon Meranti (1010). Results indicated that the topography of Taiwan induced a couple of mesoscale

收稿日期 2015-04-05; 网络预出版日期 2016-01-06

作者简介 薛霖, 女, 1990 年出生, 博士研究生, 主要从事热带气旋研究。E-mail: linxue.icy@gmail.com

通讯作者 李英, E-mail: liying@camscma.cn

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2015CB452804, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201406010、GYHY201406014, 国家自然科学基金项目 41475055、41275066, 中国清洁发展机制基金赠款项目 1212014, 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目

Funded by National Basic Research Program of China (973 Program) (Grant 2015CB452804), Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grants GYHY201406010, GYHY201406014), National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Grants 41475055, 41275066), Clean Development Mechanism in China (Grant 1212014), Scientific Research Innovation Program for Regular Postgraduates in Jiangsu Province

vortexes and disturbance wave trains, which helped intensify the vertical motion in the circulation system of typhoon after it entered Taiwan Strait. A diagnostic analysis of moisture and heat budgets demonstrates that the strong vertical motion is favorable for upward transport of heat and moisture, which promotes the development of cumulus convection. The latent heat release in deep cumulus convective clouds plays an important role for the intensification of Meranti. In addition, the kinetic energy exchange between Meranti and the mesoscale systems are calculated. The results indicate that the conversion from mesoscale kinetic energy to TC kinetic energy provides the main energy source for the rapid intensification of Meranti. The meso-scale systems induced by the topography of Taiwan intensify the vertical transport of eddy kinetic energy, leading to significant increases in TC kinetic energy and eventually the TC intensification. However, numerical sensitivity experiments show that the mesoscale systems will disappear if the topography of Taiwan is removed. In this situation, upward transport of moisture and heat and cumulus convection all distinctly decrease and TC Meranti cannot intensify rapidly.

Keywords Tropical cyclone, Mesoscale system, Topography of Taiwan, Rapid intensification

1 引言

热带气旋 (TC) 在趋近大陆过程中强度通常减弱, 但仍有少数 TC 在近海加强甚至是迅速加强。此类台风对沿海影响甚大, 但预报困难。研究表明, 近海台风强度变化与下垫面 (如海洋、地形) 关系密切 (陈联寿等, 1979, 2004; 端义宏等, 2005; 胡姝等, 2014)。地形摩擦效应及对表面潜热输送的阻断会使 TC 强度迅速衰减 (Brand and Jack, 1974; Powell et al., 1991)。而地形的动力抬升及降水增幅效应, 一定程度上又可减缓 TC 的减弱。地形对 TC 强度的最终影响取决于以上两种效应的综合 (闫敬华等, 2005)。TC 登陆前后受海岸或山脉地形影响, 其结构也将发生改变。陈联寿等 (2004) 指出大型岛屿可诱生低压、产生地形辐合线、中尺度涡线和雷暴等, 从而改变 TC 结构和强度。沈树勤等 (1990) 研究发现, 地形辐合可在 TC 的右前方生成一系列龙卷, 或在其前部生成涡线或雷暴, 这类中小尺度强对流系统的生成往往会对 TC 的能量平衡产生影响, 使 TC 的强度增大。中小尺度对流系统不仅在其某一象限或前进方向的前方产生, 还能在螺旋雨带中产生中尺度小涡, 这种结构变化可对 TC 的强度、风雨分布和路径偏折产生影响 (Dodge et al., 2004)。罗哲贤 (2003) 研究发现, 位于 TC 外区中尺度涡旋可激发一个从外区伸展到内区的较小尺度的涡旋对, 将涡量内传, 与涡量集中化共同导致 TC 增强。此外, TC 与中尺度涡旋的合并也会使其强度加强 (Wang and Wang, 2013)。

我国台湾岛频受台风影响, 接近台湾岛的 TC

结构和强度常常发生明显变化。研究发现, 当台风自东向西移动登陆台湾岛时, 在台湾岛另一侧常诱生中尺度涡旋。适当条件下, 台风高层中心移过岛屿会与低层的诱生涡旋耦合, 发展并代替原来的 TC (Meng et al., 1996; Wu and Kuo, 1999)。Wang (1991) 指出, 台湾海峡底层出现的偏北急流与台湾地形阻挡造成的“角流”及海峡的“开通道流”有关。胡姝等 (2013) 研究也发现, 台湾岛地形及台湾海峡的狭管效应可在台湾岛西侧形成低空急流, 并影响 TC 强度。

可见台湾岛对趋近我国台风的结构强度有重要影响。台风 Meranti (1010) 在北上进入台湾海峡过程中发生迅速加强。我们的研究发现 (薛霖等, 2015), 台湾地形激发出中尺度扰动波列和积云对流增强了次网格尺度系统与台风间能量的交换, 为 Meranti 迅速加强提供了主要动能源。本文利用中尺度数值模式进一步开展数值研究, 探讨台湾地形诱生的中尺度系统^①对台风 Meranti 迅速加强的影响。

2 台湾地形诱生的中尺度系统及模拟

根据中国气象局上海台风研究所最佳路径资料, 台风 Meranti (1010) 于 2010 年 9 月 7 日 21 时 (协调世界时, 下同) 在台湾岛南部附近海域生成, 之后向偏西方向移动, 12 时移速减慢并转向偏北方向进入台湾海峡, 9 日 19~20 时在福建石狮市沿海登陆 (图 1a)。其在北上进入台湾海峡过程中强度持续加强且于登陆时达到最强 (图 1b 实线), 海平面中心最低气压 24 小时降低 25 hPa, 根据于玉斌和姚秀萍 (2006)、黄荣成和雷小途 (2010) 定义的迅速加强标准, 该 TC 是一个典型的近海迅

^① 本文中台湾地形诱生的中尺度系统主要为前文中台湾地形激发的扰动波列, 其中也可能包括地形重力波系统等。

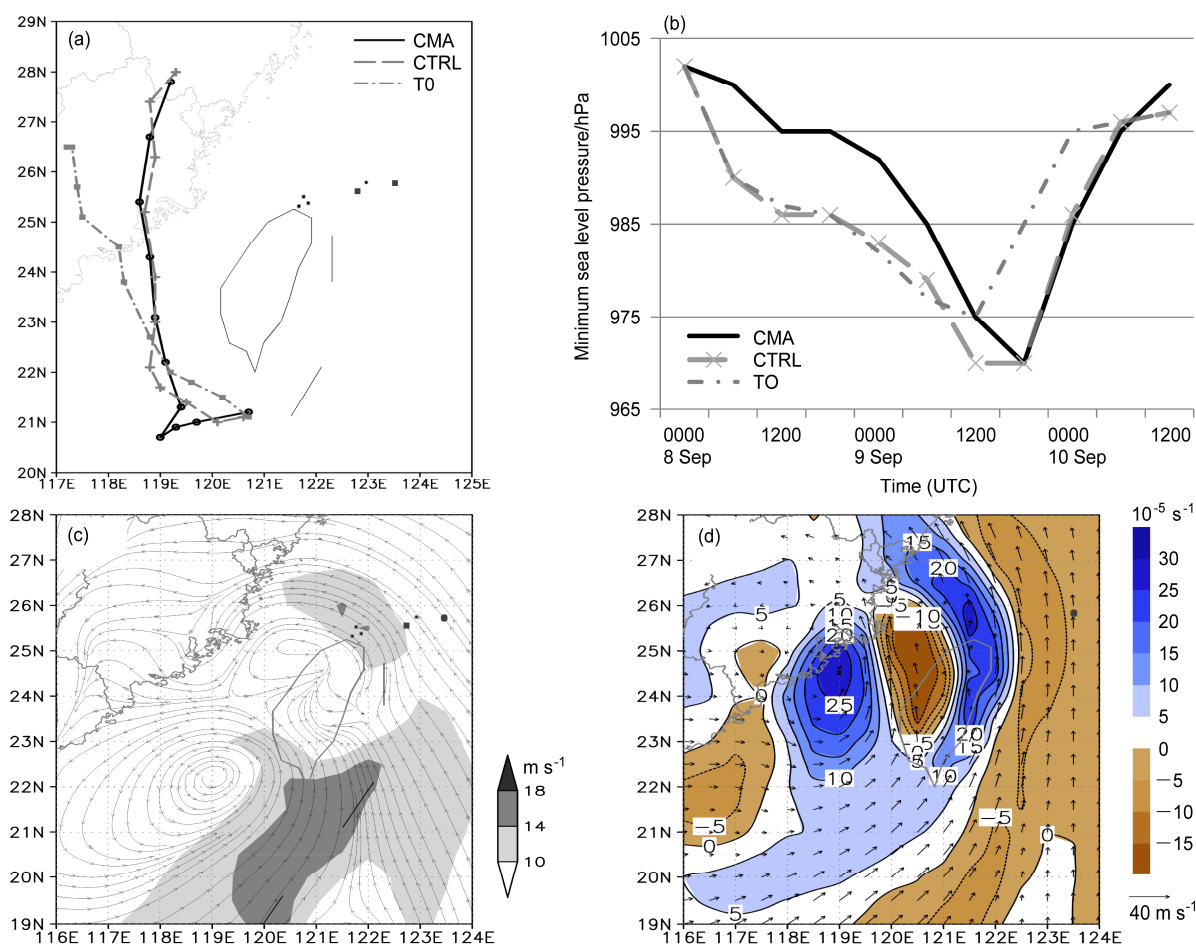


图1 2010年9月8日00时(协调世界时,下同)至10日12时(a) Meranti移动路径与(b)台风中心海平面气压(单位:hPa)变化(实线为中国气象局CMA最佳路径,虚线为数值模拟CTRL,点虚线为T0试验);(c)2010年9月9日06时10m流场和风速(阴影,单位: m s^{-1})分布与(d)2010年9月9日18时850hPa涡度场(等值线,单位: 10^{-5} s^{-1})和风矢量场(箭头,单位: m s^{-1})

Fig. 1 (a) The track of typhoon Meranti and (b) the time series of minimum sea level pressure at 6-h interval during the period of 0000 UTC 8–1200 UTC 10 Sept 2010 [solid lines indicate results from CMA (China Meteorological Administration) best track data; dashed lines represent results from the control experiment (CTRL); dash-dotted lines show results from the T0 experiment]; (c) wind speed (shaded, units: m s^{-1}) and streamlines at 10-m height at 0600 UTC 9 Sept 2010; (d) vertical vorticity (shaded, units: 10^{-5} s^{-1}) and wind vectors (units: m s^{-1}) at 850 hPa at 1800 UTC 9 Sept 2010

速加强台风。

利用 NCEP GFS $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 再分析资料分析 Meranti 在进入海峡过程中低层结构(图 1c, d), 可见台风(TC)环流内及其附近区域出现一系列中尺度系统。在进入海峡前(图 1c), 台风环流东部偏南气流受台湾地形影响产生分流, 台湾岛南北两侧出现两支偏东风急流。而位于中央山脉背风坡一侧的台湾海峡内风速较小, 故在北支急流南侧出现中尺度气旋式切变, 南支急流北侧出现反气旋式切变, 形成与台风涡旋相关的正、负相间的涡度带(图略)。随着 Meranti 北上进入海峡内(图 1d), 台湾岛南北两支东风急流逐渐转为淮南—北向, 正、负相间的涡度带也随之由经向趋向纬向分布(中央山

脉东侧为正涡度, 西侧为负涡度)。这与台风气流和台湾地形的相对位置变化有关。可见, 受台湾地形影响, Meranti 在进入海峡过程中风场结构发生明显变化。

利用中尺度数值天气预报模式 WRF (The Weather Research and Forecasting Model, WRF3.4 版本) 对 Meranti 进入台湾海峡过程进行模拟。模拟采用三重嵌套网格 ($18 \text{ km}/6 \text{ km}/2 \text{ km}$), 模拟区域及具体方案设置参见前期研究(薛霖等, 2015)。对比模式结果与实况发现, 模拟结果较好地描述了 Meranti 的移动路径和强度变化(图 1)。将此模拟作为对照试验(CTRL), 设计完全去除台湾高度的敏感性试验 T0。模式参数设置均与 CTRL 一致, 仅

将台湾地形高度设为 0 m。T0 试验登陆前路径和移速与 CTRL 试验相似, 登陆后路径较 CTRL 试验偏西最大约 1 个纬距 (图 1a)。此外 T0 试验中 TC 强度较 CTRL 明显减弱, 24 h 气压降低 12 hPa, 最强时刻气压为 975 hPa, 不能达到迅速加强标准 (图 1b)。

图 2 显示进入海峡前后 CTRL 和 T0 试验的 850 hPa 涡度场及流场变化。可见 CTRL 试验在台风进入台湾海峡之前 (图 2a), 台湾岛南北两侧有偏东风急流出现, 台湾岛附近可见明显扰动。海峡内风速较小, 有中尺度涡旋产生, 涡度场上台湾海峡内可见正 (负) 涡度区相间排列。随着 Meranti 北上进入海峡内 (图 2b), TC 与台湾地形的相对位置发生改变, 急流随之转为南—北向, 台湾岛东西两侧分别有正负涡度带分布 (东侧为正, 西侧为负)。该分布与观测一致, 可见 CTRL 试验较好模拟出台湾岛附近中尺度系统的活动特征 (参见图 1)。而移

除台湾地形的 T0 试验中 (图 2c, d), 台风进入海峡前及进入后, 原在台湾岛附近的急流与扰动消失, 台风的切向气流变得较为均匀。海峡内风速增强, 中尺度扰动以及相关的涡度对消失。可见 Meranti 北上进入台风海峡过程中出现的中尺度扰动涡旋是台湾岛地形诱生的。Meng et al. (1996) 指出, 岛屿诱生中尺度涡旋的产生与台湾岛中央山脉的背风坡降压作用有关, 本文的诱生涡旋还与台湾岛地形绕流产生的水平风场切变有关。下文进一步分析台湾地形诱生的中尺度系统在 Meranti 迅速加强过程中的作用。

3 结果分析

3.1 热量与水汽收支对比

3.1.1 计算方法

计算 TC 区域平均热量和水汽的收支方程为 (Nitta, 1983; 李英等, 2005)

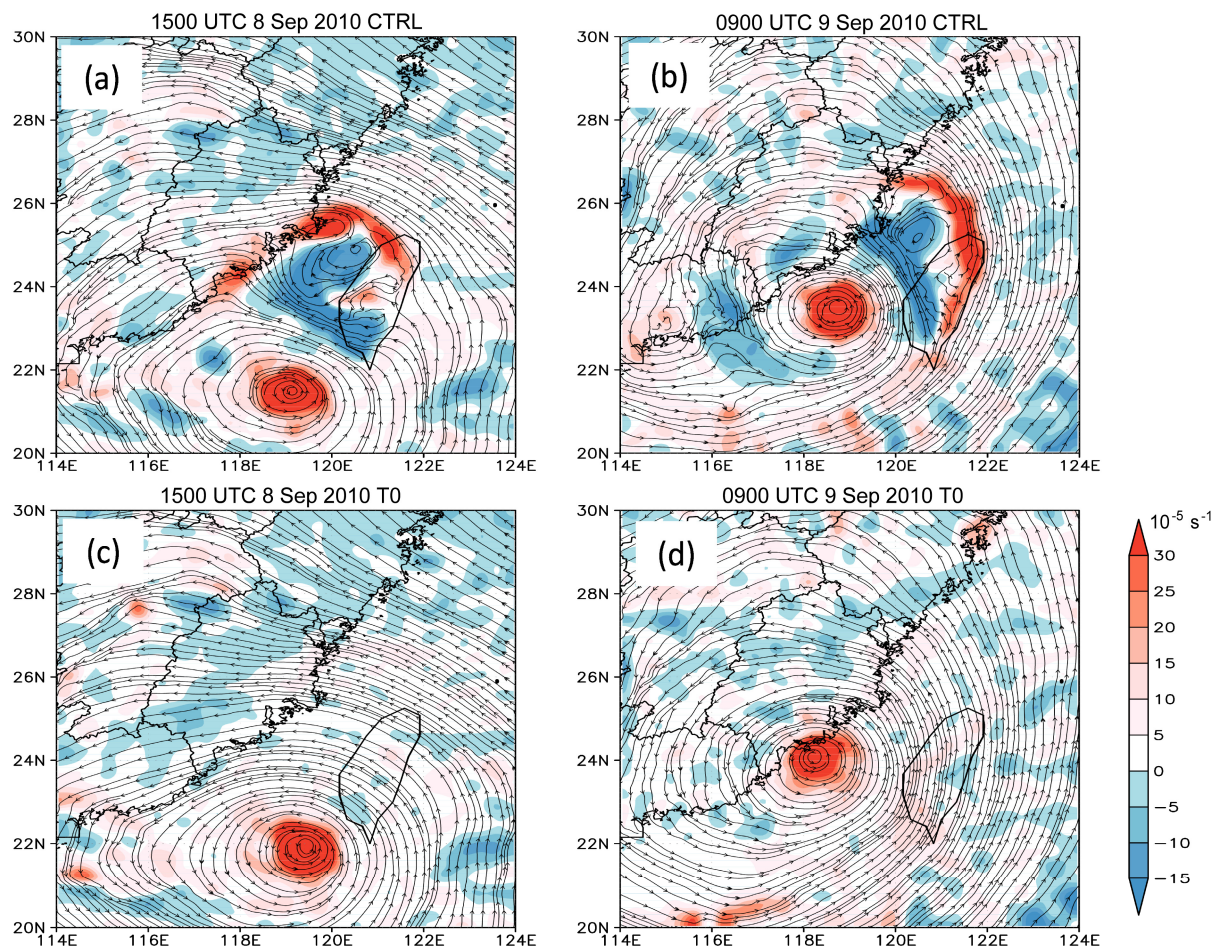


图 2 (a-d) 850 hPa 涡度场 (阴影, 单位: 10^{-5} s^{-1}) 与流场 (左列为 2010 年 9 月 8 日 15 时台风进入海峡前, 右列为 2010 年 9 月 9 日 09 时台风位于海峡中): (a, b) CTRL; (c, d) T0

Fig. 2 Vertical vorticity (shaded, units: 10^{-5} s^{-1}) and streamlines at 850 hPa at (a, c) 1500 UTC 8 Sept 2010 and (b, d) 0900 UTC 9 Sept 2010: (a-b) The control experiment (CTRL); (c-d) T0 experiment

$$Q_1 = \frac{\partial \bar{s}}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{s} \mathbf{V} + \frac{\partial \bar{s} \omega}{\partial p} = Q_R + L(c - e) - \frac{\partial \bar{s}' \omega'}{\partial p}, \quad (1)$$

$$Q_2 = -L \left(\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{q} \mathbf{V} + \frac{\partial \bar{q} \omega}{\partial p} \right) = L(c - e) + L \frac{\partial \bar{q}' \omega'}{\partial p}, \quad (2)$$

其中, Q_1 是视热源, Q_2 是视水汽汇, q 为比湿, $\mathbf{V}$ 为水平风速, ω 垂直速度, $s = C_p t + gz$ 是干静力能, L 是凝结潜热, Q_R 是辐射加热率, c 是凝结率, e 是液态水的蒸发率。“—”表示区域平均。考虑到 Meranti 尺度较小, 直径约为 3 个经、纬距, 故以台风中心为中心点, 选取 6×6 个经、纬度范围为台风区域求取平均。“'”表示对水平平均的偏差。视热源由辐射冷却、净的水汽凝结释放和感热垂直涡动输送的垂直辐合三项组成。视水汽汇包括水汽的净凝结和水汽垂直涡动输送的垂直辐散。由(1)、(2)式可得:

$$Q_1 - Q_2 - Q_R = -\frac{\partial (\bar{s}' + L\bar{q}') \omega'}{\partial p} = -\frac{\partial \bar{h}' \omega'}{\partial p}, \quad (3)$$

其中, $\bar{h}' \omega'$ 是湿静力能垂直涡动输送的度量。

从 Q_1 、 Q_2 的方程可知, 积云对流对大尺度环境场的反馈作用, 是通过凝结潜热释放以及热量和水汽的垂直输送完成的。辐射加热率 Q_R 常取其气候平均值, 中纬度地区一般为 -2°C (孙建华与赵思雄, 2000)。根据(3)式, $(Q_1 - Q_2)$ 的分布可度量涡动垂直输送, 反应积云对流在总能量变化中的作用。

3.1.2 结果对比

图 3 为 CTRL 试验 (左列) 与 T0 试验 (右列) 台风区域平均视热源和视水汽汇的高度—时间剖面, 显示了 TC 在进入台湾海峡迅速加强发展 (2010 年 9 月 9 日 00~10 时) 并登陆福建 (2010 年 9 月 9 日 10~21 时) 过程中, 热量和水汽的收支状况。

台风区域平均视热源在低层为负, 中高层为正, 即低层热量减少而中高层热量增加 (图 3a)。在 TC 迅速加强并登陆我国过程中, CTRL 试验视热源 (Q_1) 有两个负值中心向上延伸。第一个负值中心出现在 TC 迅速加强过程中 (2010 年 9 月 9 日 00~10 时), 随时间可向上发展到中高层 400 hPa 附近, 中心强度为 $-4 \text{ J kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 。第二个负值中心出现临近登陆时段 (2010 年 9 月 9 日 10~18 时) 垂直方向可发展至 600 hPa。而在去除台湾地形的 T0 试验中 (图 3b), Q_1 的高度—时间剖面虽在中高层

亦存在与 CTRL 类似的负值区域, 但第一个负值中心较 CTRL 弱, 中心强度仅为 $-2 \text{ J kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$, 且持续时间较短仅维持到 9 日 08 时。而第二个负值区发展高度仅可达到 800 hPa。可见在 TC 迅速加强过程中, 台湾地形诱生出的中尺度系统增强了热量的向上输送。

视水汽汇的分布与视热源分布相反。CTRL 试验中 (图 3c), 主要呈现低层为正, 高层为负值的分布特征, 且低层正值中心随时间向上发展。第一个中心 (TC 迅速加强阶段 2010 年 9 月 9 日 00~10 时) 可达 500 hPa 附近强度为 $2 \text{ J kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$, 中低层强度可达 $5 \text{ J kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$, 第二个正值区 (TC 临近登陆阶段 2010 年 9 月 9 日 10~18 时) 可达 700 hPa。可见在 TC 迅速发展过程中, 低层有较深厚的水汽源, 高层有水汽汇。而移除台湾地形之后, 2010 年 9 月 9 日 09~19 时期间, 低层正值区主要集中在 800 hPa 以下, 水汽源层较为浅薄且不能被输送至中高层 (图 3d)。台湾地形诱生出的中尺度系统增强了水汽向上输送。

而由(3)式可知, $(Q_1 - Q_2)$ 的分布可度量涡动的垂直输送, 反应积云对流在总能量变化中的作用。CTRL 试验中 (图 3e), $(Q_1 - Q_2)$ 的分布与 Q_1 相似, 但其数值比 Q_1 大 [Q_1 中心强度为 $-4 \text{ J kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$, $(Q_1 - Q_2)$ 为 $-5 \text{ J kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$]。台风进入海峡迅速加强过程至登陆前, 正值区域主要出现在中高层, 负值区从低层向高层扩展, 持续时间较长 (2010 年 9 月 9 日 00~18 时基本为负值)。可见在 TC 增强过程中, 潜热释放作用较强, TC 环流中的积云对流活跃, 从低层向高层输送大量湿静力能。去除台湾地形后 (图 3f), 负值区域减小, 即持续时间减短, 仅维持到 9 日 06 时; 且负值中心强度减弱, 仅为 $-3 \text{ J kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 。

可见, 台湾地形诱生的中尺度系统可增强低层的热量和水汽向上输送, 使涡动的垂直输送增强, 积云对流发展, 并释放大量的潜热, 从而有利于台风加强发展。

3.2 中尺度系统与台风间的动能转换

热带气旋的加强需要大量的动能供应。我们诊断了 Meranti 的动能收支发现 (薛霖等, 2015), Meranti 登陆前迅速加强的主要动能源来自于积云对流等次天气尺度系统活动。而台湾地形激发的中尺度扰动波列是 Meranti 环流内活跃的中尺度扰动, 对台风加强过程中的能量获取应有重要作用。下面诊断台湾地形产生的中尺度系统与台风间的动能

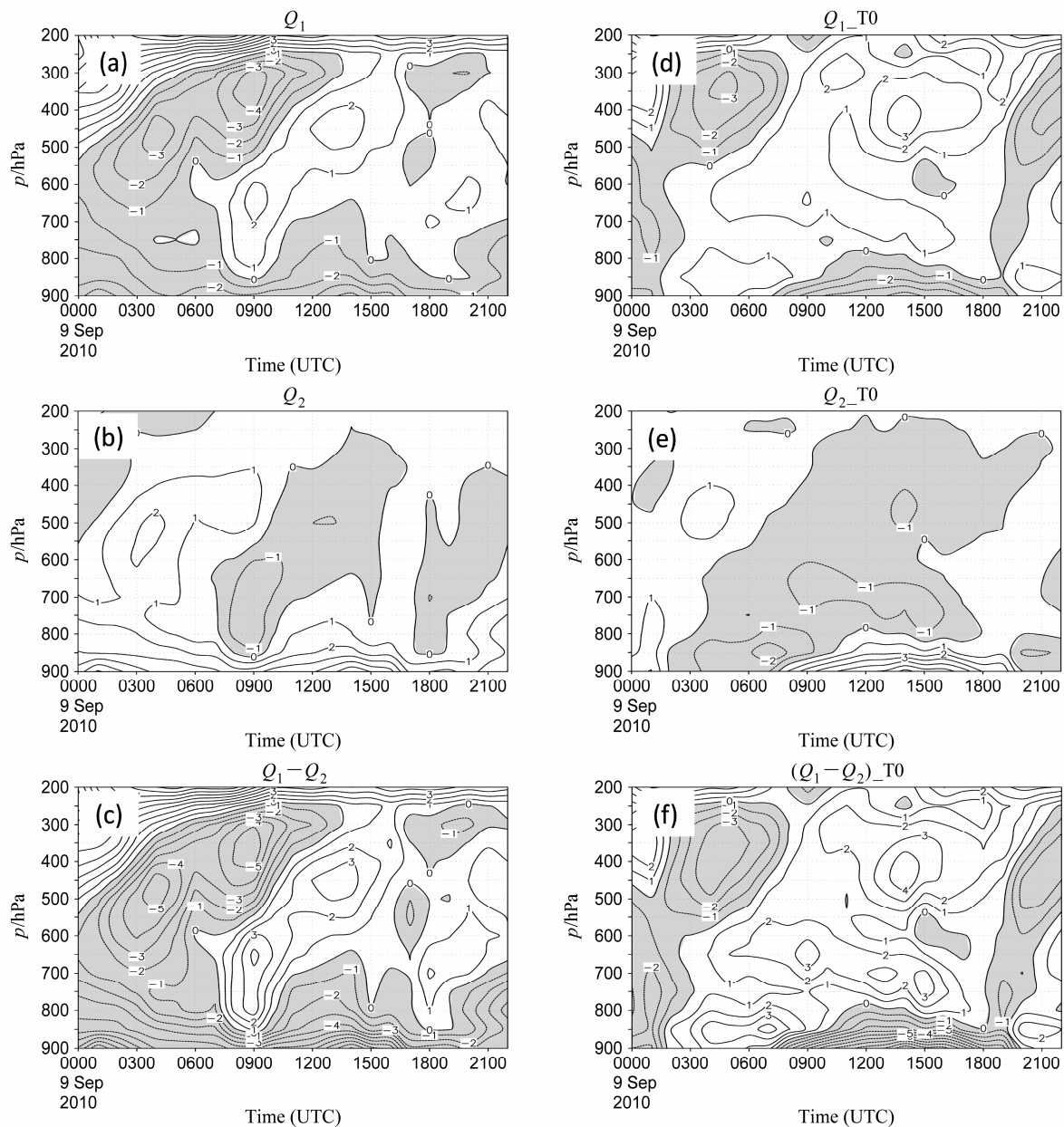


图3 区域平均 (a, d) 视热源 Q_1 、(b, e) 视水汽汇 Q_2 与 (c, f) $(Q_1 - Q_2)$ 的高度—时间剖面 (左列为 CTRL, 右列为 T0; 负值用阴影标记, 单位: $\text{J kg}^{-1} \text{s}^{-1}$)

Fig. 3 The vertical cross sections of regionally averaged (a, d) apparent heat source (Q_1), (b, e) apparent moist sink (Q_2), (c, f) their differences ($Q_1 - Q_2$) between 0900 and 2200 UTC 9 Sept (the negatives are shaded, units: $\text{J kg}^{-1} \text{s}^{-1}$). (a, b, c) are results for the control experiment (CTRL); (d, e, f) for T0 experiment

转换。

3.2.1 计算方法

对任一物理量 F 可做尺度分离, 分解为背景场部分 F^* 和叠加在其上的扰动 F' , 即

$$F = F^* + F'. \quad (4)$$

本文中认为 F^* 为天气尺度部分, F' 为中尺度部分。根据连续方程, 物理量 F 的收支方程为 (Holopainen and Nurmi, 1979; 陈受钧和谢安, 1981; 丁一汇, 1989; 李英等, 2004)

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot (F\mathbf{V}) + \frac{\partial}{\partial p}(F\omega) = S, \quad (5)$$

S 是这个物理量的源项, $\mathbf{V}$ 为水平风矢量。带入得

$$\frac{\partial (F^* + F')}{\partial t} + \nabla \cdot (F^* + F')(\mathbf{V}^* + \mathbf{V}') + \frac{\partial}{\partial p}(F^* + F')(\omega^* + \omega') = S^* + S', \quad (6)$$

$$\frac{\partial F^*}{\partial t} + \frac{\partial F'}{\partial t} + \nabla \cdot (F^*\mathbf{V}^* + F^*\mathbf{V}' + F'\mathbf{V}^* + F'\mathbf{V}') +$$

$$\frac{\partial}{\partial p}(F^* \omega^* + F^* \omega' + F' \omega^* + F' \omega') = S^* + S', \quad (7)$$

假设对于中尺度部分存在

$$\frac{\partial F'}{\partial t} + \nabla \cdot (F' \mathbf{V}') + \frac{\partial}{\partial p}(F' \omega') = S', \quad (8)$$

则有天气尺度物理量 F^* 的收支方程:

$$\frac{\partial F^*}{\partial t} + \nabla \cdot F^* \mathbf{V}^* + \frac{\partial}{\partial p} F^* \omega^* = S^* - \nabla \cdot (F^* \mathbf{V}' + F' \mathbf{V}^*) - \frac{\partial}{\partial p}(F^* \omega' + F' \omega'), \quad (9)$$

(8)、(9) 两式形式相似, 仅相差

$$-\nabla \cdot (F^* \mathbf{V}' + F' \mathbf{V}^*) - \frac{\partial}{\partial p}(F^* \omega' + F' \omega') \text{ 项}$$

$$\text{令 } A^* = -\nabla \cdot (F^* \mathbf{V}' + F' \mathbf{V}^*) - \frac{\partial}{\partial p}(F^* \omega' + F' \omega')$$

则(9)式写为

$$\frac{\partial F^*}{\partial t} + \nabla \cdot F^* \mathbf{V}^* + \frac{\partial}{\partial p} F^* \omega^* = S^* + A^*, \quad (10)$$

A^* 即为天气尺度与中尺度系统间物理量 F 的交换项。

将(10)式运用到运动方程, 即令 F 为水平速度 $\mathbf{V}$, 则(10)式为变为天气尺度运动方程:

$$\frac{\partial \mathbf{V}^*}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} u^* \mathbf{V}^* + \frac{\partial}{\partial y} v^* \mathbf{V}^* + \frac{\partial}{\partial p} \omega^* \mathbf{V}^* = S^* + I^*, \quad (11)$$

$$I^* = -\left[\frac{\partial}{\partial x}(u' \mathbf{V}^* + u^* \mathbf{V}') + \frac{\partial}{\partial y}(v' \mathbf{V}^* + v^* \mathbf{V}') \right] - \frac{\partial}{\partial p}(\omega' \mathbf{V}^* + \omega^* \mathbf{V}'),$$

I^* 表示中尺度系统对天气尺度运动的作用。

以 $\mathbf{V}^*$ 点乘(11)式, 得到天气尺度运动的动能平衡方程:

$$\frac{\partial K^*}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{V}^* K^* + \frac{\partial}{\partial p} \omega^* K^* = S^* \mathbf{V}^* + \mathbf{V}^* I^*, \quad (12)$$

其中, $K^* = [(u^*)^2 + (v^*)^2]/2$ 为天气尺度运动动能; $\mathbf{V}^* I^*$ 为中尺度系统与天气尺度系统间的动能转换项, 表示中尺度系统对天气尺度动能的贡献, 包含水平运动项 $(\mathbf{V}^* I^*)_H$ 和垂直运动项 $(\mathbf{V}^* I^*)_V$ 的贡献, 分别为

$$(\mathbf{V}^* I^*)_H = -u^* \left[\frac{\partial}{\partial x}(u' u^* + u^* u') + \frac{\partial}{\partial y}(u' v^* + u^* v') \right] - v^* \left[\frac{\partial}{\partial x}(u' v^* + u^* v') + \frac{\partial}{\partial y}(v' v^* + v^* v') \right], \quad (13)$$

$$(\mathbf{V}^* I^*)_V = -u^* \frac{\partial}{\partial p}(u' \omega^* + u^* \omega') - v^* \frac{\partial}{\partial p}(v' \omega^* + v^* \omega'). \quad (14)$$

选取以台风中心为中心点, 6×6 个经、纬度可包含台风及地形诱生中尺度系统的正方形区域为研究区域, 以研究二者的相互作用。CTRL 试验中, 该区域主要包含了台风及地形诱生的中尺度系统, 将其视作包含了各种尺度系统的原场 F (图 2a、b)。T0 试验中消去台湾地形后研究区域内主要剩下台风 (一般被认为是天气尺度系统), 试验结果被视作天气尺度场 F^* (图 2c、d)。考虑到 CTRL 与 T0 试验在登陆前移动路径和速度相近, 二者的差场主要包含地形诱生的中尺度系统 (图略), 被视作中尺度场 F' 。需要说明的是, 本文提取的中尺度扰动部分 F' 的方法可较好地获得地形诱生的中尺度扰动, 但两个试验中台风中心有一定偏差, 研究时段内偏差在 0.7° 以下, 这使中尺度扰动隐含一些小误差。此外 T0 中台风登陆较 CTRL 试验早 3 小时, TC 强度会在陆地的摩擦作用下受到一定减弱。前文中诊断台风系统的动能收支发现, Meranti 北上进入台湾海峡动能增强主要与动能局地变化的余差项有关。该项主要体现摩擦耗散对动能的消耗及次网格和网格尺度系统间的动能转换。对比无台湾地形的 T0 试验及 CTRL 试验发现, CTRL 试验中台风在进入海峡直至登陆后 3 小时内余差项均为强正值且大于 T0, 即在此期间, 余差项中不同尺度网格系统动能交换强于台湾及大陆的地形摩擦对动能的耗散, 成为台风发展的重要动能源 (薛霖等, 2015)。因此我们认为, T0 试验中 TC 虽较 CTRL 试验早 3 小时登陆, 一定程度上造成了 T0 试验中台风强度的减弱, 但这并非是 T0 试验未能达到迅速增强的主要原因。在本文研究的主要时段内, 即台风进入台湾海峡至登陆前, T0 试验仅登陆 3 小时。虽提前登陆会对其强度有一定影响, 但总体上影响较小, 在此不作考虑。

3.2.2 动能转换结果

图 4a 给出了 Meranti 在进入海峡过程中, TC 与中尺度之间区域平均动能转换的垂直平均随时间演变。中尺度与台风之间的总动能转换 $\mathbf{V}^* I^*$ 于 9 日 09 时之后转为正值且逐渐增大, 并于 9 日 18 时达到峰值 ($3.7 \times 10^{-3} \text{ W kg}^{-1} \text{ m}^{-2}$; 与 TC 最强时刻相对应)。可见地形诱生的中尺度系统持续向 TC 系统输送动能。具体分析水平动能转换项 $(\mathbf{V}^* I^*)_H$ 及垂直动能转换项 $(\mathbf{V}^* I^*)_V$, 二者属同一量级。水平项动能交换项 $(\mathbf{V}^* I^*)_H$ 在 15 时前主要为负贡献, 之后转为弱的正贡献。垂直动能交换项 $(\mathbf{V}^* I^*)_V$ 是动能转化

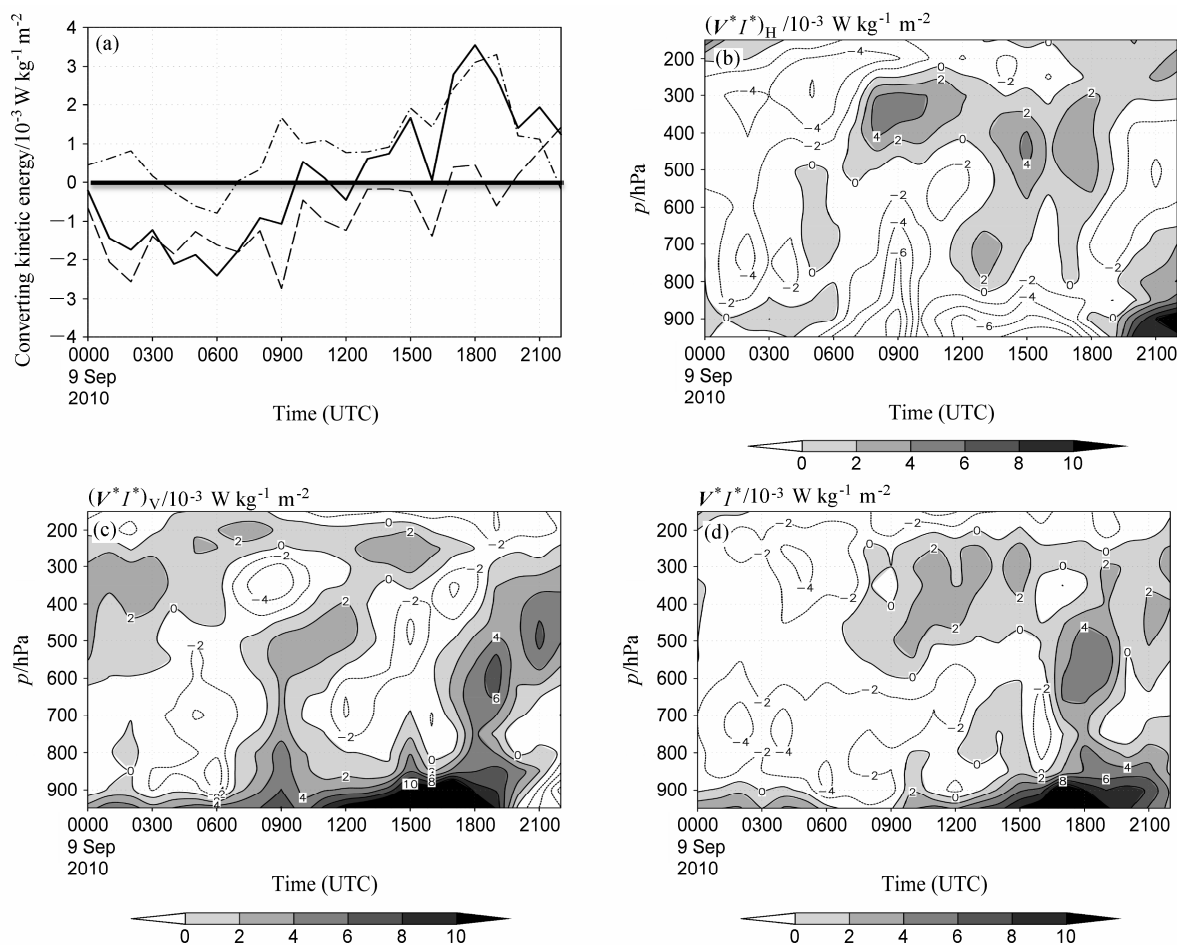


图4 (a) 台风区域(以台风中心为中心,选取 $6^\circ \times 6^\circ$ 个经、纬度正方形区域)平均动能转换的垂直平均(950~150 hPa平均)随时间演变(实线为 V^*I^* ,长虚线为 $(V^*I^*)_H$,点虚线为 $(V^*I^*)_V$,单位: $10^{-3} \text{ W kg}^{-1} \text{ m}^{-2}$)。 (b-d) 台风区域平均动能转换项垂直分布随时间演变(单位: $10^{-3} \text{ W kg}^{-1} \text{ m}^{-2}$): (b) $(V^*I^*)_H$; (c) $(V^*I^*)_V$; (d) V^*I^*

Fig. 4 (a) Time series of regional and vertical (from 950 hPa to 150 hPa) averages of converting kinetic energy (V^*I^* , solid line, units: $10^{-3} \text{ W kg}^{-1} \text{ m}^{-2}$) and its horizontal [$(V^*I^*)_H$] and vertical [$(V^*I^*)_V$] components (dashed lines, units: $10^{-3} \text{ W kg}^{-1} \text{ m}^{-2}$) in the region of TC; (d) vertical distribution of regionally averaged converting kinetic energy and its (b) horizontal [$(V^*I^*)_H$] and (c) vertical [$(V^*I^*)_V$] components (units: $10^{-3} \text{ W kg}^{-1} \text{ m}^{-2}$) in the region of TC from 0900 to 2200 UTC 9 Sept 2010

的主要贡献项。尤其在 TC 进入海峡内部之后 (09 日 06 时之后), 垂直动能交换项均为正值。其持续增大至 9 日 19 时达到峰值 ($3.3 \times 10^{-3} \text{ W kg}^{-1} \text{ m}^{-2}$) 后开始减小, 但仍为正贡献。

分析 TC 与中尺度系统间动能转换的垂直分布可见, $(V^*I^*)_H$ 项呈现低层为负中高层为正的分布特点, 即通过水平平流作用及辐合辐散运动, TC 系统在低层向中尺度系统提供动能, 而在中高层则获得中尺度系统的动能 (图 4b)。而 $(V^*I^*)_V$ 在 TC 增强过程中正值大值中心主要出现在低层且向上延伸至高层。09~18 时, 低层有一大于 $10 \times 10^{-3} \text{ W kg}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 的大值中心出现, 对应 TC 强度增至最强 (图 4c)。两项的共同结果为高低层均有正值中心

出现, 且中低层中尺度动能输送更为显著, 台风增至最强前 6 小时内低层有一大值中心出现, 与垂直运动项的分布相似 (图 4d)。可见 $(V^*I^*)_V$ 是 Meranti 迅速加强过程中的主要正贡献项。台湾地形诱生的中尺度涡旋和激发中尺度扰动波列主要位于中低层, 可为 Meranti 提供动能并在强烈垂直运动的作用下, 将动能由低层输送至 TC 高层。可见台湾地形诱生的中尺度系统增强了中尺度动能向与 TC 动能转换, 为其迅速加强提供动能来源。

4 结论与讨论

台风 Meranti (1010) 在北上进入台湾海峡过程中迅速加强。观测研究发现这与台湾地形激发的中

尺度扰动系统活动有关, 本文利用中尺度数值模式进一步分析了台湾地形诱生的中尺度系统对台风 Meranti 迅速加强的影响, 获得以下认识:

敏感性试验结果表明, 台湾海峡附近的中尺度涡旋及扰动波列与台湾地形有关, 去掉台湾地形, 相关中尺度系统消失。台风的热量与水汽收支计算表明, 台湾地形诱生的中尺度系统可增强对流层低层的热量和水汽向高层输送及潜热释放, 使 TC 环流中的积云对流更加活跃, 有利于台风增强发展。进一步诊断地形诱生中尺度系统与台风间的动能交换发现, Meranti 进入台湾海峡过程中, 中尺度系统在低层产生动能并通过垂直运动向上输送, 为 TC 的迅速加强提供动能源。

本文通过台风 Meranti 研究了由台湾地形产生的中尺度系统对台风强度的影响, 发现地形诱生中尺度系统是台风强度的一个重要影响因子。但地形的作用较为复杂, 一方面激发中尺度系统为台风提供动能, 另一方面又通过摩擦耗散台风动能。另外, 本文研究对象为北上进入台湾海峡的台风, 地形对台风结构强度的影响机制与纬向登陆台湾岛的有一定差异, 故台湾地形对台风强度的影响仍需进行深入广泛探讨。

参考文献 (References)

- Brand S, Jack B W. 1974. Changes in the characteristics of typhoons crossing the island of Taiwan [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 102 (10): 708–713, doi:10.1175/1520-0493(1974)102<0708:CITCOT>2.0.CO;2.
- 陈联寿, 丁一汇. 1979. 西太平洋台风概论 [M]. 北京: 科学出版社.
- Chen Lianshou, Ding Yihui. 1979. Introduction of the Western Pacific Typhoon (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press.
- 陈联寿, 罗哲贤, 李英. 2004. 登陆热带气旋研究的进展 [J]. *气象学报*, 62 (5): 541–549. Chen Lianshou, Luo Zhexion, Li Ying. 2004. Research advances on tropical cyclone landfall process [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 62 (5): 541–549, doi:10.11676/qxxb2004.055.
- 陈受钧, 谢安. 1981. 次天气尺度与天气尺度系统间动能交换的诊断分析 [J]. *气象学报*, 39 (4): 408–415. Chen Shoujun, Xie An. 1981. The exchange of kinetic energy between synoptic and subsynoptic-scale motion [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 39 (4): 408–415, doi:10.11676/qxxb1981.044.
- 丁一汇. 1989. 天气动力学中的诊断分析方法 [M]. 北京: 科学出版社, 293pp. Ding Yihui. 1989. The Diagnostic and Analysis Method in Synoptic Dynamics (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 293pp.
- Dodge P, Spratt S, Marks Jr F D, et al. 2004. Dual-Doppler analysis of mesovortices in a hurricane rainband [C]//Proceedings of the 24 the Conference on Tropical Cyclones, Storm Surges and Floods. Brisbane Australia, 17–18.
- 端义宏, 余晖, 伍荣生. 2005. 热带气旋强度变化研究进展 [J]. *气象学报*, 63 (5): 636–645. Duan Yihong, Yu Hui, Wu Rongsheng. 2005. Review of the research in the intensity change of tropical cyclone [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 63 (5): 636–645, doi:10.11676/qxxb2005.062.
- Holopainen E, Nurmi P. 1979. Acceleration of a diffluent jet stream by horizontal sub-grid scale processes—An example of a scale interaction study employing a horizontal filtering technique [J]. *Tellus*, 31 (3): 246–253, doi:10.1111/j.2153-3490.1979.tb00903.x.
- 胡妹, 李英, 魏娜. 2013. 台风 Nari (0116) 登陆台湾过程中结构强度变化的诊断分析 [J]. *大气科学*, 37 (1): 81–90. Hu Shu, Li Ying, Wei Na. 2013. Diagnostic analysis on Nari (0116) structure and intensity changes during its landfall process on Taiwan Island [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 37 (1): 81–90, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11115.
- 胡妹, 孙立尹, 李英. 2014. 热带气旋结构和强度变化研究进展 [J]. *气象与环境学报*, 30 (4): 91–98. Hu Shu, Sun Liyin, Li Ying. 2014. Progress in tropical cyclone intensity and structure change [J]. *J. Meteor. Environ.* (in Chinese), 30 (4): 91–98, doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2014.04.013.
- 黄荣成, 雷小途. 2010. 环境场对近海热带气旋突然增强与突然减弱影响的对比分析 [J]. *热带气象学报*, 26 (2): 129–137. Huang Rongcheng, Lei Xiaotu. 2010. Comparative analysis of the influence of environment field on rapid intensifying and weakening of tropical cyclones over offshore waters of China [J]. *J. Trop. Meteor.* (in Chinese), 26 (2): 129–137, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2010.02.001.
- 李英, 陈联寿, 徐祥德. 2004. 登陆热带气旋维持的次天气尺度环流特征 [J]. *气象学报*, 62 (3): 257–268. Li Ying, Chen Lianshou, Xu Xiangde. 2004. The characteristics of sub-synoptic scale circulation of tropical cyclones sustaining over land [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 62 (3): 257–268, doi:10.11676/qxxb2004.027.
- 李英, 陈联寿, 王继志. 2005. 热带气旋登陆维持和迅速消亡的诊断研究 [J]. *大气科学*, 29 (3): 482–490. Li Ying, Chen Lianshou, Wang Jizhi. 2005. Diagnostic study of the sustaining and decaying of tropical cyclones after landfall [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 29 (3): 482–490, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.03.16.
- 罗哲贤. 2003. 台风环流区域内中尺度涡量传播特征的研究 [J]. *气象学报*, 61 (4): 396–405. Luo Zhexion. 2003. A study on mesoscale vorticity propagations in a typhoon like vortex [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 61 (4): 396–405, doi:10.11676/qxxb2003.039.
- Meng Z Y, Nagata M, Chen L S. 1996. A numerical study on the formation and development of island-induced cyclone and its impact on typhoon structure change and motion [J]. *Acta Meteor. Sinica*, 10 (4): 430–433.
- Nitta T. 1983. Observational study of heat sources over the eastern Tibetan Plateau during the summer monsoon [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 61 (4): 590–605.
- Powell M D, Dodge P P, Black M L. 1991. The landfall of hurricane Hugo in the Carolinas: Surface wind distribution [J]. *Wea. Forecasting*, 6 (3): 379–399, doi:10.1175/1520-0434(1991)006<0379:TLOHHI>2.0.CO;2.
- 沈树勤. 1990. 热带气旋科学讨论会文集 (1990) [C]. 北京: 气象出版社, 109–111. Shen Shuqin. 1990. Corpus of the Tropical Cyclones Scientific Symposium (1990) (in Chinese) [C]. Beijing: China Meteorological Press.
- 孙建华, 赵思雄. 2000. 登陆台风引发的暴雨过程之诊断研究 [J]. *大气科学*, 24 (2): 223–237. Sun Jianhua, Zhao Sixiong. 2000. Diagnoses

- and simulations of typhoon (Tim) landing and producing heavy rainfall in China [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 24 (2): 223–237, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.02.11.
- Wang S T. 1991. Observational study on the mesoscale flow structures of typhoons encountering the Taiwan Terrain [C]//Proceedings of International Conference on Mesoscale Meteorology and TAMEX. Taipei, Taiwan: American Meteor Society, 3–6.
- Wang, Y Q, Wang H. 2013. The inner-core size increase of typhoon Megi (2010) during its rapid intensification phase [J]. Trop. Cyclone Res. Rev., 2 (2): 65–80, doi:10.6057/2013TCRR02.01.
- Wu C C, Kuo Y H. 1999. Typhoons affecting Taiwan: Current understanding and future challenges [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 80 (1): 67–80, doi:10.1175/1520-0477(1999)080<0067:TATCUA>2.0.CO;2.
- 薛霖, 李英, 许映龙, 等. 2015. 台湾地形对台风Meranti (1010)经过海峡地区时迅速增强的影响研究 [J]. 大气科学, 39 (4): 789–801. Xue Lin, Li Ying, Xu Yinglong, et al. 2015. Effect of Taiwan topography on the rapid intensification of typhoon Meranti (1010) passing by the Taiwan Strait [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 39 (4): 789–801, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1409.14204.
- 闫敬华, 徐建平, 丁伟钰, 等. 2005. 地形对登陆台风“黄蜂”(2002)强度影响的模拟研究 [J]. 大气科学, 29 (2): 205–212. Yan J H, Xu J P, Ding W Y, et al. 2005. A modeling study of the impact of terrain on the intensity of landfalling tropical cyclone Vongfong (0214) [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 29 (2): 205–212, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.02.05.
- 于玉斌, 姚秀萍. 2006. 西北太平洋热带气旋强度变化的统计特征 [J]. 热带气象学报, 22 (6): 521–526. Yu Yubin, Yao Xiuping. 2006. A statistical analysis on intensity change of tropical cyclone over the western North Pacific [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 22 (6): 521–526, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2006.06.001.