

胡姝, 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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11115. 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 Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (1): 81–90.

台风 Nari (0116) 登陆台湾过程中结构强度变化的诊断分析

胡姝¹ 李英² 魏娜²

¹ 海军海洋水文气象中心, 北京 100161

² 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

摘 要 利用中国气象局上海台风研究所整编的 2001 年《热带气旋年鉴》、美国 NCEP 最后分析 FNL $1^\circ \times 1^\circ$ 全球格点资料以及日本气象厅云顶亮温 (TBB) 资料等, 对 0116 号台风 Nari 自北向南穿越台湾岛过程中的结构强度变化进行诊断分析, 结果表明: (1) 登陆过程中 Nari 云系结构从圆形变为半圆形, 其环流西部对流云团旺盛, 而东部为无云或少云区。Nari 在岛上期间一直维持这种非对称结构特征。(2) 在穿越台湾岛过程中, Nari 西部环流内低空急流轴从其北侧逆时针延伸至南侧。一方面, 切向风角动量的增加和传播有利于台风涡旋环流的加强, 另一方面, 低空急流附近的水汽通量辐合及急流轴左侧较强的正涡度区, 有利于气旋性环流的长久维持。(3) Nari 的结构强度变化与台湾岛地形及海峡效应有密切关系。Nari 环流西部位于台湾岛迎风一侧上升运动加强, 而 Nari 环流东部位于背风一侧上升运动则受抑制, 对 Nari 形成半圆形非对称对流分布起积极作用; 而台湾海峡的狭管效应加速台风通过气流, 有利于 Nari 环流西部低空急流的形成和增强。(4) 动能收支诊断表明, Nari 登陆过程中动能的主要来源是动能制造项, 水平辐合运动也对其提供动能。

关键词 热带气旋 台湾地形 海峡效应 结构强度变化

文章编号 1006-9895(2013)01-0081-10

中图分类号 P444

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11115

Diagnostic Analysis on Nari (0116) Structure and Intensity Changes during Its Landfall Process on Taiwan Island

HU Shu¹, LI Ying², and WEI Na²

¹ Oceanic Hydrologic Center of Navy, Beijing 100161

² State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract Diagnostic analysis was performed on Typhoon Nari (2001), which exhibited abnormal structural and intensity changes when crossing Taiwan Island, on the basis of the 2001 Tropical Cyclone Yearbook compiled by the Chinese Meteorological Administration, the United States National Center for Environmental Prediction (NCEP) final (FNL) $1^\circ \times 1^\circ$ global grid data, and temperature of black body (TBB) data from the Japan Meteorological Agency. The following results are reported: (1) Nari's cloud structure changed from circular to semicircular with convective clouds developing in the western area and dissipating in the eastern area of typhoon circulation during its landfall process and maintained such an asymmetric structure over the island. (2) When crossing the island, a lower-layer jet (LLJ) stream in Nari's western circulation strengthened and extended counterclockwise from north to south. The increase in angular

收稿日期 2011-06-18, 2012-07-17 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2009CB421504, 国家自然科学基金项目 40975032、41275066, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY200706020

作者简介 胡姝, 女, 1982 年出生, 硕士研究生, 主要从事热带气旋研究。E-mail: hushuchina@gmail.com

通讯作者 李英, E-mail: liying@cma.gov.cn

momentum of the tangential wind was favorable for strengthening vortex circulation. In addition, the water vapor flux convergence near the LLJ and the strong positive vorticity on the left of the LLJ axis helped to maintain the cyclonic vortex. (3) Taiwan topography, including the Taiwan Strait, had a pronounced effect on the structure and intensity of Nari. The windward slope-forced lifting intensified ascending air flow in Nari's western circulation; however, the sinking on the leeward side restrained the convection in its eastern circulation. These factors were primarily responsible for the formation of Nari's semicircular asymmetric structure. Moreover, the channel effect of Taiwan Strait benefited the strengthening and stretching of the LLJ stream in Nari's western periphery. (4) A diagnosis of kinetic energy budgets revealed that the kinetic energy of Nari was generated from the solenoid effect. In addition, horizontal convergence movement provided kinetic energy for Typhoon Nari during its landfall process.

Keywords Tropical cyclone, Taiwan terrain, Channel effect, Intensity and structure change

1 引言

影响热带气旋 (TC) 强度变化的原因主要包括大气环流条件、TC 结构变化及下垫面影响等。通常 TC 在登陆过程中强度迅速衰减,但也有 TC 在有利条件下,如与水汽通道连接或者获得斜压能量 (李英等, 2005), 仍能长久维持甚至加强。同时 TC 结构也会受陆面影响而发生变化, 从而改变其强度。有分析认为 (Powell et al., 1998), 地形粗糙度的增加可导致岸上风速比海上增加 50%, 陡峭海岸能使风速增加 20%~80%。此外, 陆上山脉地形增强辐合作用会产生中尺度对流系统, 地形作用在一定条件下会改变 TC 的局部结构而使其强度变化 (陈联寿等, 2001, 2004), 而饱和湿地产生的潜热通量输送会影响 TC 的维持和降水。可见登陆 TC 的强度、结构变化与下垫面地形和陆表状况有密切联系 (李英等, 2005)。

台湾岛处于我国东南沿海前沿, 频受 TC 袭击, 同时对 TC 的活动有明显影响。据统计, TC 登陆台湾年均 2 个, 一般在岛上维持 6 h 左右, 同时其结构和强度发生明显改变, 如对流结构松散, 强度迅速衰减 (胡姝等, 2012)。统计 1951~2004 年西北太平洋 TC 得出, 登陆台湾 TC 中 68.2% 会继续穿越台湾海峡登陆大陆, 在强度变化上表现出明显的减弱, 其余的向东北移入东海 (任福民等, 2008)。另有统计表明, TC 从东侧登陆台湾岛损失的强度是西侧登陆的 2 倍以上 (董林等, 2008)。在结构变化上, 气象工作者早就发现穿越台湾 TC 会出现中心强度迅速减弱的“空心”现象 (陈瑞闪, 1987)。也有学者对过台湾岛 TC 的空心现象进一步开展了研究 (张长安等, 2008; 李英等, 2009)。有数值试验表明, 台湾岛周围产生的诱生低压会改变 TC 的结构 (孟智勇等, 1998)。另有数值研究也指出, 台

湾岛地形有使 0505 号台风“海棠”东北—西南向非对称增大趋势 (余贞寿等, 2007)。此外, 模拟分析也发现, 台湾岛地形是台风“泰利”形成迎风坡诱生低压和背风坡诱生高压的主要因子 (朱会芸等, 2008)。还有不少研究表明 (王鹏云, 1998; Wu et al., 2002; Yang et al., 2008), 台湾山区地形对 TC 降雨具有明显的增幅效应, 是形成台湾大暴雨的重要因子。台湾岛对登陆 TC 的结构、强度和降水都有显著影响。

0116 号台风 Nari 在台湾北侧登陆, 之后沿着中央山脉向南贯穿台湾岛, 却在岛上以热带风暴强度滞留约 36 h, 造成了严重水患。同时, 其云系保持半圆形的非对称结构特征。Nari 的长久维持以及此类非对称结构是比较少见的, 其成因机制尚不清楚。本文拟采用中国气象局上海台风研究所整编的 2001 年《热带气旋年鉴》, 美国国家环境预报中心 NCEP 全球预报系统 6 h 一次 $1^\circ \times 1^\circ$ 最后分析 FNL 资料, 以及日本气象厅云顶亮温 (TBB) 资料, 对 Nari 穿越台湾过程中的结构和强度变化进行诊断分析。

2 Nari 的活动及其结构变化特征

0116 号台风 Nari (图 1) 于 2001 年 9 月 5 日 12 时 (协调世界时 UTC, 下同) 在台北以东约 120 公里处 (24.5°N , 123°E) 生成, 在东南南部及冲绳岛附近海域打转盘旋近 9 天, 于 14 日向西南方向移动, 16 日 13 时 40 分在台湾东北部登陆。登陆后强度由台风降至热带风暴, 之后维持热带风暴强度缓慢向西南移动, 在台湾岛上滞留了约 36 小时。18 日 00 时后从台南安平进入台湾海峡。20 日 00 时在南海东北部海面再次加强为强热带风暴, 随后在广东省汕头到陆丰之间的沿海登陆, 20 日 12 时减弱为低气压后消散。

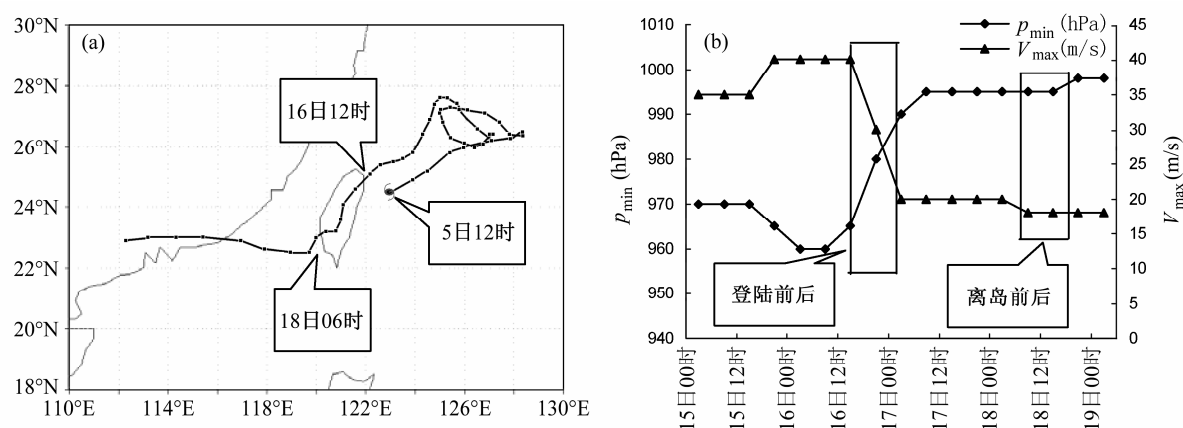


图1 (a) 0116号台风Nari路径(5日12时至21日00时, 间隔6h)和(b)强度($p_{\min}$: 最低海平面气压, 单位: hPa; $V_{\max}$: 近中心地面最大风速, 单位: m/s)时间演变(15日00时至19日00时)

Fig. 1 (a) Track of Nari with 6 h interval from 1200 UTC 5 Sep to 0000 UTC 21 Sep in 2001; (b) temporal evolution of the storm intensity during 0000 UTC 15 Sep–0000 UTC 19 Sep 2001. In (b), $p_{\min}$ is the minimum sea level pressure (units: hPa) and $V_{\max}$ is the maximum surface wind speed (units: m/s)

从卫星 TBB 分布观察 Nari 登陆过程中的结构变化(图 2)。这里将 $TBB = -52^{\circ}\text{C}$ 作为判断中尺度对流复合(MCC)的阈值(Robert et al., 1980), 将 $TBB \leq -52^{\circ}\text{C}$ 的区域看成 TC 强对流的发展区域。登陆台湾前 6 h(图 2a), Nari 环流中的强对流分布比较对称, 眼区完整清晰, 尺度较小, 气旋性环流半径大约 300 km; 登陆后至 17 日 00 时(图 2b), 其云系逐渐减弱松散, 对流云团主要集中在环流西部, 东部的强对流云团大部分已消失; 17 日 12 时(图 2c), 环流的西北部(台湾海峡北部)对流云团明显发展, 且逐渐向环流南部扩展。18 日 00 时(图 2d) Nari 的对流结构仍维持西环流部(海峡内)对流旺盛而东部少云的非对称特征。Nari 在岛上停留阶段一直维持这种结构特征约 36 个小时。

从 Nari 活动的环流背景来看, 500 hPa 上 Nari 位于西北太平洋副热带高压和大陆高压之间的南侧, 受北方和南方系统的影响小(图略)。从 850 hPa 的位势高度场和风矢量场也可看出(图 3), Nari 没有外来低空急流的卷入, 环流相对独立, 但环流内的风场分布很不均匀。Nari 登陆台湾岛前(图 3a), 风速大于 20 m/s 的低空急流带主要分布在环流的西北侧, 登陆后(图 3b), 低空急流轴顺环流逆时针向南延伸, 17 日 12 时(图 3c), 在环流的西南部形成一条弧状的急流带。低空急流带内的强风速核已从环流的西北部转到西南部。Nari 岛上停滞时期其低空急流基本维持在台湾海峡内, 最大风速达到 24 m/s 以上。18 日 00 时(图 3d), Nari 离

岛, 低空急流区主要出现在环流南部。Nari 进入台湾海峡后, 狭管效应可加速进入的偏北气流, 从而引起 Nari 环流西部内弧状低空急流的形成和加强, 即台风切向风角动量增长, 这有利于涡旋环流的维持和加强。

分析表明, Nari 自北向南缓慢穿越台湾, 长时间维持热带风暴强度和半圆状非对称对流结构, 其结构、强度变化是比较独特的。

3 Nari 登陆台湾过程中结构强度变化的主要影响因子

3.1 环境风垂直切变

关于环境风垂直切变对 TC 结构强度的影响引起了广泛关注。研究表明, 环境垂直风切变对于 TC 内核区结构分布具有较大影响(Frank et al., 1999; Braun et al., 2007)。另有统计表明(Chen et al., 2006), 对于北半球 TC, 当垂直切变较强时(>7.5 m/s), 将对 TC 降水的分布起着决定性作用, 强降水主要位于顺切变方向的左侧。学者在研究台风 Bonnie(1998)后指出, 在强切变风暴中, 顺切变方向上靠近地面和流入层内的平均入流比逆风切变方向的高出 4 倍, 当环境风切变小于 10 m/s 时, 逆风—顺风切变之间的差异变得很小(Molinari et al., 2010)。另有学者在统计分析北大西洋 TC 强度与垂直风切变的关系后指出, TC 强度变化一般与垂直风切变呈负相关。强度较大、移速较慢、纬度较低的 TC 受高层垂直风切变的影响较大, 而强度较弱、移速较快、纬度较高的 TC 受中低层垂直风

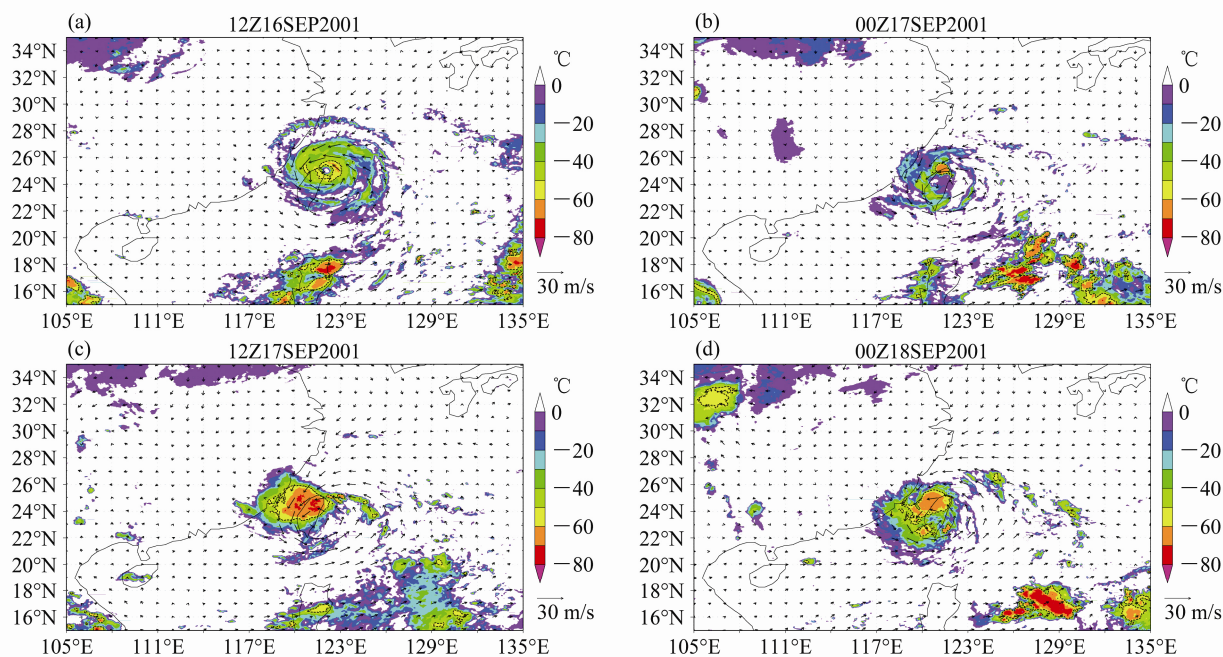


图2 TBB与风场分布(黑等值线为 $TBB = -52^{\circ}\text{C}$): (a) 16日12时; (b) 17日00时; (c) 17日12时; (d) 18日00时

Fig. 2 Distributions of TBB (temperature of brightness blackbody) and wind vectors at (a) 1200 UTC 16 Sep, (b) 0000 UTC 17 Sep, (c) 1200 UTC 17 Sep, and (d) 0000 UTC 18 Sep, 2001. Black isoline: $TBB = -52^{\circ}\text{C}$

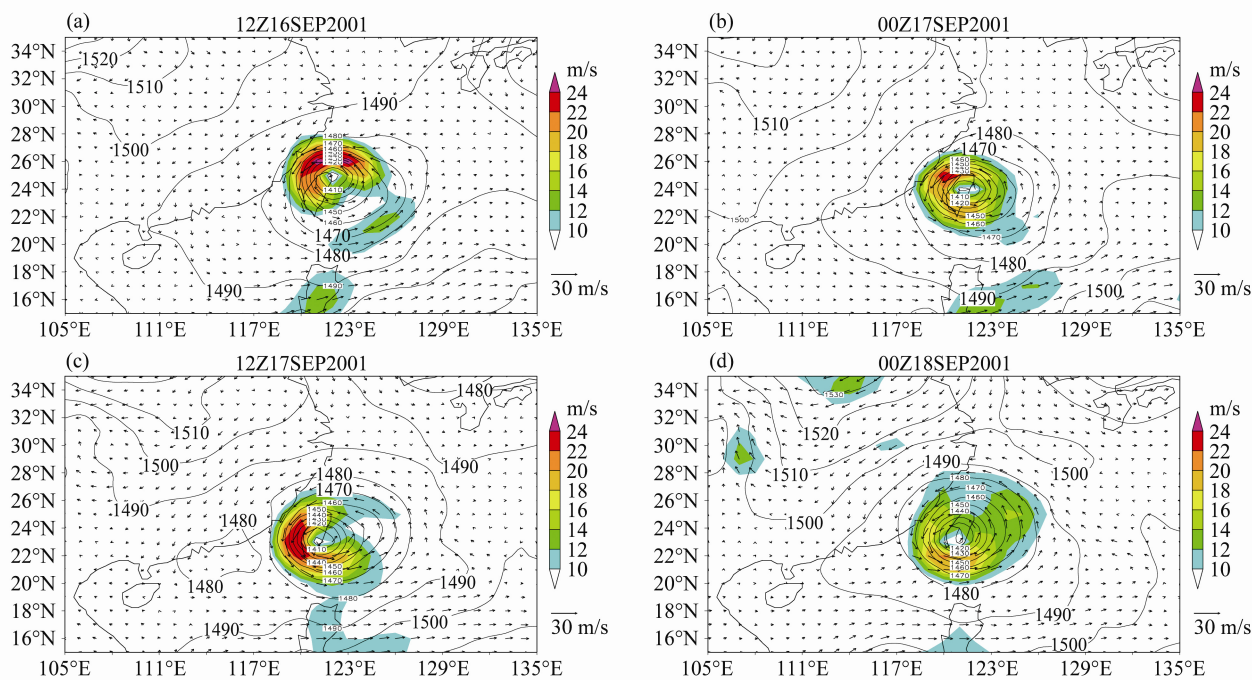


图3 同图2, 但为850 hPa位势高度(等值线, 单位: gpm)和风矢量。阴影部分为风速 ≥ 10 m/s区域

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for 850-hPa geopotential height (gpm) and wind vectors (shaded: ≥ 10 m/s)

切变的影响较大(Zeng et al., 2010)。

以Nari中心为中心选取 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 经、纬距区域进行平均, 用200 hPa和850 hPa平均风矢量差表示环境风垂直切变。图4a显示Nari环境风垂直切变大小和方向(角度)随时间的演变。图中显示,

Nari登陆前的16日00时至16日12时, 切变值较弱且少变, 此时Nari维持台风强度; 登陆后16日18时至17日06时, 垂直切变增大为5 m/s左右, 随后至18日00时台风离岛, 其值在5 m/s附近波动。可以看出Nari在岛上滞留期间环境风垂直切变

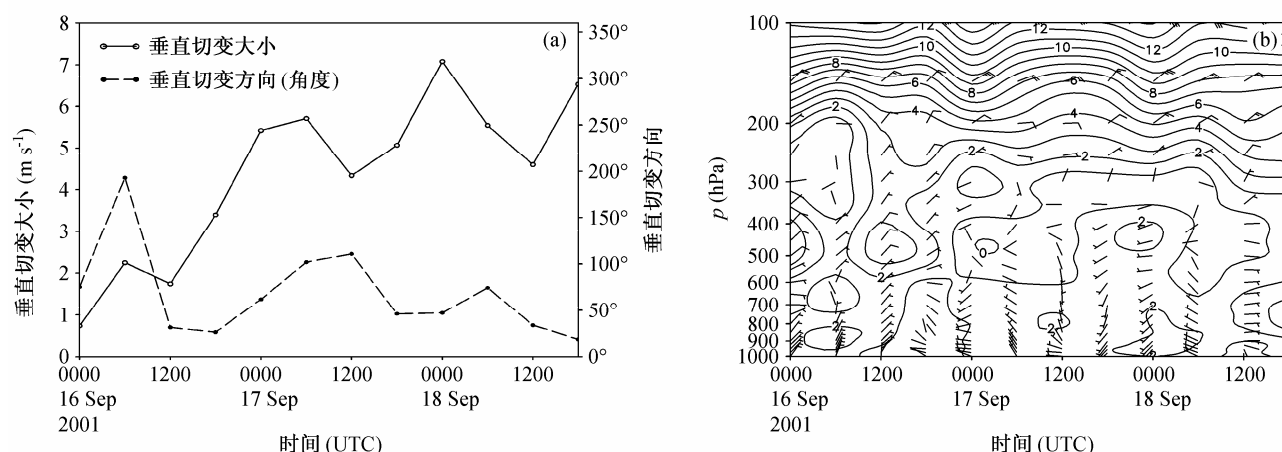


图4 (a) 台风环境风垂直切变; (b) 台风区域平均水平风矢量及风速(单位: m/s) 的高度—时间剖面。(16日00时~18日18时)

Fig. 4 (a) The vertical wind shear between 200 hPa and 850 hPa and (b) height-time cross section of mean horizontal wind vectors and wind speed (isoline, m/s) during 0000 UTC 16 Sep–1800 UTC 18 Sep 2001

并不强, 未达到 $>7.5 \text{ m/s}$ 的强切变值 (Chen et al., 2006), 这对其强度维持是有利的。

从垂直切变方向变化来看, Nari 登陆后基本维持 $110^\circ \sim 40^\circ$ 方向角, 顺切变方向指向西偏北—西南, 这有利于强对流在台风环流西部和西南部发展, 对 Nari 非对称结构的形成有一定作用。

图 4b 给出平均水平风矢量及风速的垂直—时间变化, 也可看出, Nari 登陆前高低层表现为一致的东北风, 且风速大小差别不大, 故垂直切变很弱。16 日 12~18 时, 中低层由东北风转为西南风或西北风, 这使高低层水平风垂直切变增大, 高层东北风与低层西北风或西南风之间形成的顺切变方向指向西南 (图略), 有利于强对流在 Nari 环流西部发展。

3.2 水汽

水汽的收支对对流活动有很大影响, 从水汽通量 (阴影) 以及水平风场分布看出, 登陆前 (16 日 12 时, 图 5a) Nari 环流相对独立, 没有外来低空急流的卷入, 因此没有明显的水汽水平流入, 其水汽主要来源于海洋下垫面。登陆台湾后 (17 日 12 时, 图 5b) 环流内的水汽通量明显减少, 但其西半部台湾海峡中水汽通量相对环流其它部分大, 说明海峡内维持着较为充沛的水汽输送。较强的水汽通量中心同样具有绕环流逆时针打转现象, 与上述分析的低空急流的分布和变化趋势一致, 这为 Nari 西半部对流活动提供很好的水汽条件。

而从相应的水汽通量散度图中也可看出, Nari 登陆前 (16 日 12 时, 图 5c), 较强水汽辐合区主

要出现在台湾岛东侧台风环流中心附近。登陆后 (17 日 12 时, 图 5d), 东部转为水汽通量散度弱的负值或正值区, 较强的水汽辐合主要出现在台湾岛及海峡内台风环流西部, 这与狭管效应造成的气流辐合使水汽在海峡内集中有关。Nari 环流内水汽条件的非对称分布对其半圆形对流结构的形成有较大影响。

3.3 涡度、散度场

从沿 Nari 中心垂直涡度的纬向垂直剖面来看, 登陆后在 17 日 12 时 (图 6a), $118^\circ\text{E} \sim 120^\circ\text{E}$ 台湾海峡北部上空高、低层均为负涡度区, 低层垂直延伸至 500 hPa 附近。Nari 正涡柱的维持与其西部环流内的低空急流有关, Nari 中心处于低空急流轴左侧, 水平风具有较强的气旋性水平切变, 有利于其低压环流的维持。而急流轴右侧水平风场为反气旋式切变, 对应台湾海峡内出现负涡柱。正、负涡度柱的成对出现有利于维持台风垂直环流。

过 Nari 中心散度的纬向垂直剖面图表明, 登陆前 (图略), 其低层负值区伸展高度较小, 而高层正值区从 300 hPa 至 100 hPa 伸展范围较广, 辐散中心在 200 hPa 附近。登陆后, 高层维持较强辐散场, 但偏于 Nari 中心西侧, 低层辐合强度略减弱但向西倾斜向高层伸展, 至 17 日 12 时 (图 6b), 伸展至 500 hPa 附近, 该处可见 $-4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的较强辐合区。高、低层辐散、辐合在 Nari 中心西侧配置说明上升运动在 Nari 西侧发展, 是其对流非对称分布的原因之一。

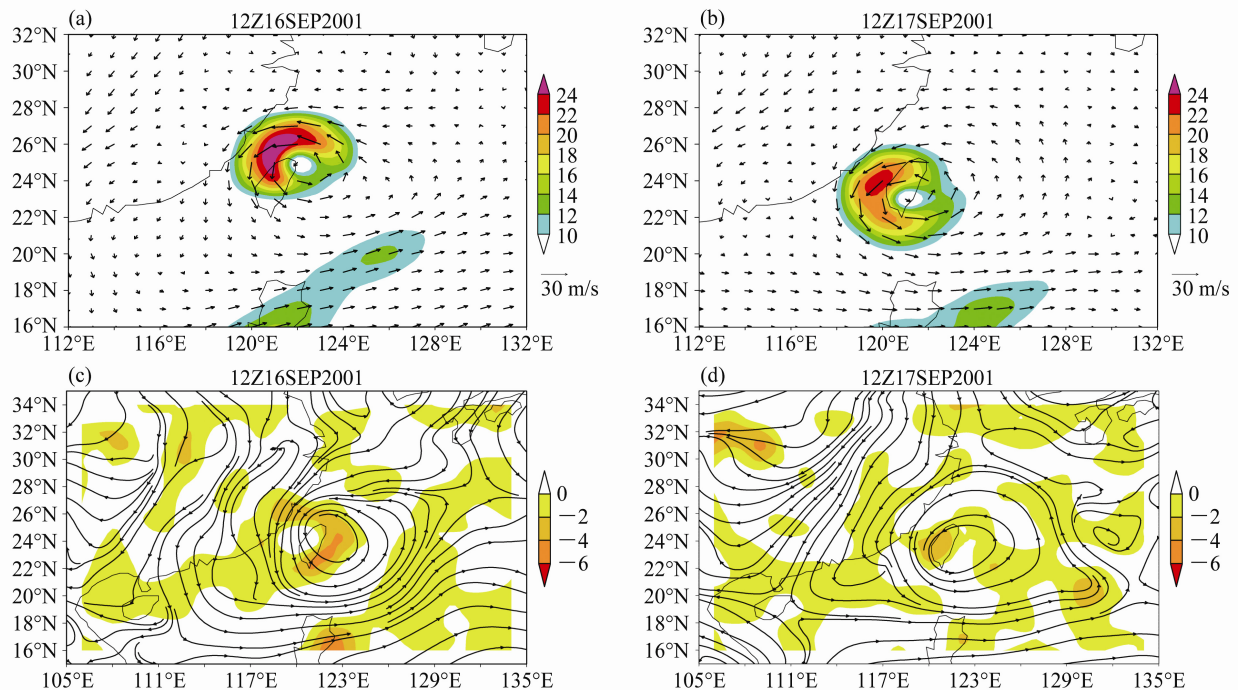


图5 (a, b) 700 hPa 水汽通量 (单位: $\text{g cm}^{-1} \text{hPa}^{-1} \text{s}^{-1}$) 与风矢场分布和 (c, d) 850 hPa 水汽通量散度 (单位: $10^{-7} \text{g cm}^{-2} \text{hPa}^{-1} \text{s}^{-1}$) 与流场分布: (a, c) 16 日 12 时; (b, d) 17 日 12 时

Fig. 5 (a, b) 700-hPa water vapor flux ($\text{g cm}^{-1} \text{hPa}^{-1} \text{s}^{-1}$) and wind vectors, and (c, d) 850-hPa water vapor flux divergence ($10^{-7} \text{g cm}^{-2} \text{hPa}^{-1} \text{s}^{-1}$) and streamline (m/s): (a, c) 1200 UTC 16 Sep; (b, d) 1200 UTC 17 Sep

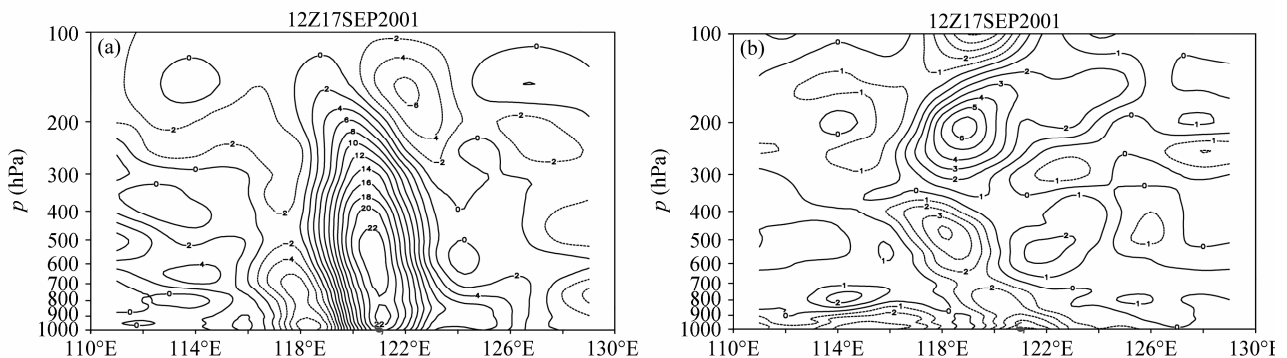


图6 17 日 12 时沿 Nari 中心的 (a) 涡度及 (b) 散度纬向—垂直剖面 (单位: 10^{-5}s^{-1})

Fig. 6 Zonal-vertical profiles of (a) vorticity and (b) divergence at 1200 UTC 17 Sep 2001 (units: 10^{-5}s^{-1})

3.4 Nari 涡动能收支诊断

将台风环流当作大尺度环流背景下的一个扰动, 利用区域平均涡动能方程, 对 Nari 登陆台湾过程中的动能收支进行诊断。以 Nari 中心为中心, 取 $5^\circ \times 5^\circ$ 经、纬距范围进行区域平均。

变量 X 可分解为区域平均部分和对于此区域平均的扰动部分, 即:

$$X = [\overline{X}] + X^*, \quad (1)$$

$[\overline{\quad}]$ 代表区域平均, $*$ 号代表对此区域平均的扰动。涡动能为:

$$k_e = (u^{*2} + v^{*2})/2, \quad (2)$$

台风区域平均涡动能方程为:

$$\left[\frac{\partial k_e}{\partial t} \right] = -[\nabla \cdot (k_e \mathbf{V})] - \left[\frac{\partial}{\partial p} (k_e \omega) \right] -$$

$$\begin{matrix} \text{pk} & \text{k1} & \text{k2} \\ \left[u^* \omega^* \right] \frac{\partial [u]}{\partial p} + \left[v^* \omega^* \right] \frac{\partial [v]}{\partial p} - [\mathbf{V}^* \cdot \nabla \Phi^*] - [D^*], \\ \text{k3} & \text{k4} & \text{k5} \end{matrix} \quad (3)$$

式中等号左边项为涡动能的局地变化项, 等号右边第一项为涡动能的水平通量散度项 (k1), 第二项为垂直通量散度项 (k2), 第三项为区域平均动能

与涡动动能之间的转换项 (k_3), 第四项为动能制造项 (k_4), 代表非地转运动引起的绝热动能制造, 第五项是摩擦耗散项 (k_5), 作为动能方程的余项计算。

图 7 显示涡动动能方程各项的时间演变。图 7a 显示涡动动能的局地变化项, 可见 Nari 登陆前后 (16 日 12 时~16 日 18 时) 从高层到低层动能均减小, 其中在近地面层及 400 hPa 附近出现负值区, 说明其动能在高低层都在迅速消耗。Nari 在台

湾岛维持期间 (16 日 18 时~18 日 00 时), 整层的动能又逐渐增加, 其中在 800 hPa 附近的增加最为明显。18 日 00 时 Nari 临近离岛时, 高、低层的涡动动能的局地变化又转为负值。

水平通量散度项 (图 7b) 从低层到 300 hPa 主要为正值, 300 hPa 以上才为负值, 且最强值出现在离岛前后的时刻。说明 Nari 的岛上维持期间水平辐合运动主要为其提供动能。

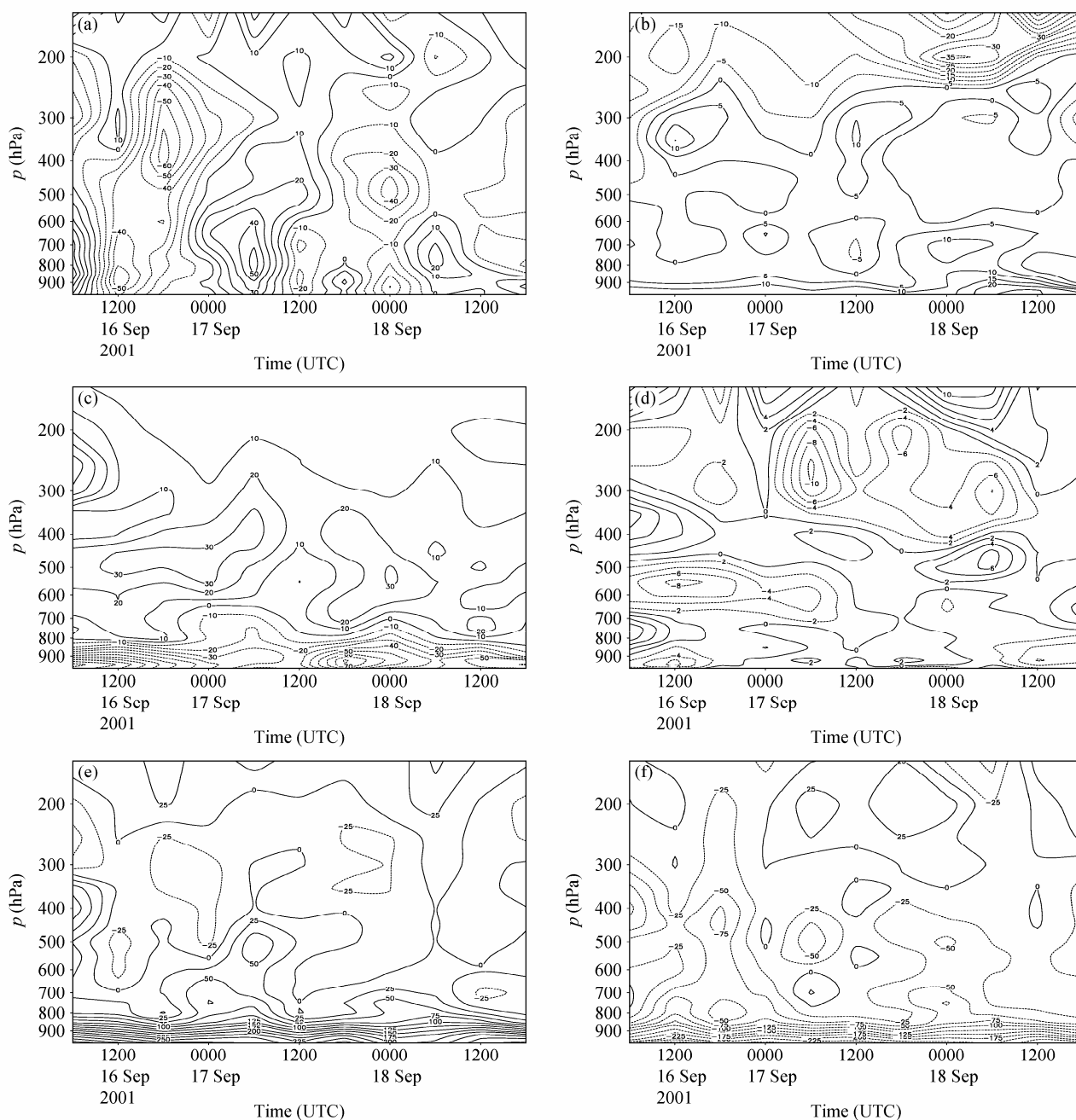


图 7 Nari 区域内平均涡动动能各项 (单位: $10^{-5} \text{ W kg}^{-1} \text{ m}^{-2}$) 的高度—时间剖面: (a) 涡动动能局地变化项 p_k ; (b) 水平通量散度项 k_1 ; (c) 垂直通量散度项 k_2 ; (d) 转换项 k_3 ; (e) 动能制造项 k_4 ; (f) 摩擦耗散项 k_5 。(16 日 06 时至 18 日 18 时)

Fig. 7 Height-time cross section of eddy kinetic energy (units: $10^{-5} \text{ W kg}^{-1} \text{ m}^{-2}$) averaged over Nari's region during 0600 UTC 16 Sep–0000 UTC 18 Sep 2001: (a) p_k ; (b) k_1 ; (c) k_2 ; (d) k_3 ; (e) k_4 ; (f) k_5

垂直通量散度项(图 7c)在低层为负值,中高层均为正值,动能由低层向中高层输送,有利于中高层动能的维持。登陆前一刻(16 日 12 时)至离岛前一刻(18 日 00 时),900 hPa 附近的动能耗散和 500 hPa 附近的动能获得最为明显。说明 Nari 在岛上期间垂直运动活跃,对其中层动能的维持起积极作用。

图 7d 显示区域平均动能与涡动动能转换项的时间演变。Nari 登陆后在近地面和 400 hPa 附近为正值,获得了环境动能,但其主要在 200 hPa~300 hPa 高度和 500 hPa 附近向外输出。总体而言,Nari 主要向背景环流输出动能。

涡动动能制造项是 Nari 动能的主要来源(图 7e)。Nari 登陆期间,在对流层低层和 200 hPa 高层一直为大值区,中层为相对弱的负值区,而在岛上维持期间,各层基本上是动能制造区,说明风穿越等压线做功产生的动能是 Nari 维持的主要能源。

摩擦耗散项(图 7f)在中低层对 Nari 动能的耗散非常明显,但在岛上维持阶段,高层出现正值区,说明大气摩擦效应等有利于其高层动能增加。

比较不同时刻涡动动能各项的垂直剖面图(图

略),登陆时台风动能明显减小,主要由于低层摩擦耗散作用迅速增大;登陆后至登陆 12 h,动能从低层到高层均转为正值,这与中低层动能制造项的增强有关,垂直通量散度项对其中高层动能也有一定贡献。登陆 24 h 后,Nari 动能收支接近平衡。比较各项贡献,Nari 涡动动能的主要来源是动能制造项。

上述分析表明,Nari 登陆后的动能主要来源于涡动动能制造项,水平辐合运动也对其提供动能,垂直通量散度项以及大气摩擦效应对其中高层动能的增加有一定贡献。

3.5 台湾岛地形及台湾海峡作用

台湾海峡位于祖国大陆与台湾岛之间,其东西两侧的台湾、福建均有东北—西南走向的山脉,海拔均在千米以上,而贯穿台湾岛南北的中央山脉平均海拔为 3000 m 以上,形成南宽北窄的喇叭形“管道”,这对通过气流会产生一定狭管效应。有学者指出,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(Wang, 1991)。

当气流由开阔地带进入狭管时,通过速度增强,气流汇聚被迫上升。图 8a 是 16 日 00 时 850

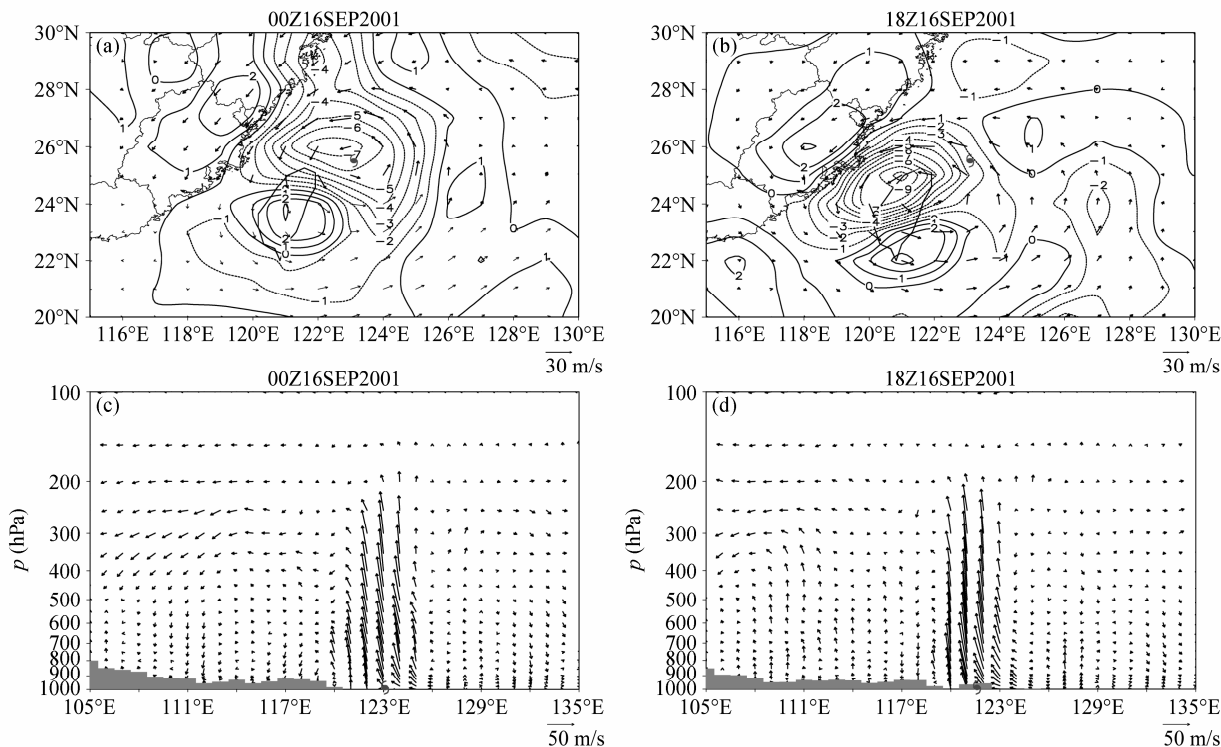


图 8 (a, b) 850 hPa 垂直速度(单位: $10^{-1} \text{ Pa s}^{-1}$)与风场(单位: m/s)分布图, (c, d) 沿 Nari 环流中心并叠加地形(阴影)的纬向垂直环流(u , -100 w , 单位: m/s)剖面: (a, c) 16 日 06 时; (b, d) 16 日 18 时

Fig. 8 (a, b) Vertical velocity at 850 hPa ($10^{-1} \text{ Pa s}^{-1}$) and wind vectors (m/s), (c, d) profile of vertical circulation (u , -100 w , m/s) superimposed topography along the circulation center of Nari: (a, c) 0600 UTC 16 Sep; (b, d) 1800 UTC 16 Sep

hPa 水平风场和垂直速度的分布图。可见当 Nari 气流未进入台湾海峡前, 上升运动位于台风中心附近, 台湾海峡北部为垂直上升区。16 日 18 时 (图 8b) Nari 气流进入台湾海峡后, 海峡北部为垂直上升区, 上升运动明显加强, 海峡北部的上升运动从 $6 \times 10^{-3} \text{ hPa s}^{-1}$ 加强至 $10 \times 10^{-3} \text{ hPa s}^{-1}$ 。而海峡两侧的福建及台湾岛东南侧均为下沉运动的大值区。台风东北部海洋虽为上升运动, 但强度较弱。这使其云系相对独立。相应时次沿 Nari 中心的纬向垂直剖面图 (图 8c, d) 也能看出, 随着 Nari 登陆靠近台湾, 台湾海峡内上升运动旺盛, 水平范围变窄, 其两侧的大陆上和台湾以东上升运动减弱, 这与大陆海岸和台湾山脉阻挡形成的背风坡效应有一定关系。

可以认为, Nari 登陆台湾岛过程中, 虽然陆面摩擦耗损其强度, 但当气流进入台湾海峡, 由于地形强迫, 海峡内气流加速, 上升运动发展, 对流活动主要出现在台湾岛上和台湾海峡内, 形成 Nari 非对称结构。

4 小结

通过对 0116 号台风 Nari 北向南穿越台湾岛过程中结构强度变化的诊断分析, 得到以下认识:

(1) Nari 登陆后, 其云系从登陆前的对称结构演变为东半部明显缺失的半圆状非对称结构, 这种结构特征维持至 Nari 离岛。在此过程中, 较弱的环境水平风垂直切变有利其强度维持, 而环境风垂直切变指向西偏北或西南, 有利于对流在其环流西部发展。

(2) Nari 穿越台湾岛过程中, 其西侧环流内有低空急流轴由其北侧逆时针伸展至南侧现象, 说明其切向风角动量的增加, 有利于涡旋环流的维持和加强。同时, 低空急流左侧较强的正涡度区和水汽通量辐合, 也有利于台风环流的长久维持。

(3) Nari 的结构强度变化与台湾岛地形及台湾海峡的狭管效应密切相关。狭管效应是西部环流内低空急流形成与加强伸展的原因之一, 从而对其强度变化产生影响。而 Nari 环流西部上升运动的加强与海峡对气流的汇合以及台湾岛上地形迎风坡的强迫抬升有关, 环流东部则处于背风一侧, 上升运动被抑制, 这是 Nari 非对称结构的原因之一。

(4) Nari 登陆过程中的动能收支诊断表明, Nari

维持的主要动能来源为动能制造项, 水平辐合运动也有利于其动能的增加。

关于 Nari 的相关数值试验正在开展, 以进一步分析台湾地形及台湾海峡的影响。

参考文献 (References)

- Braun S A, Wu L G. 2007. A numerical study of hurricane Erin (2001). Part II: Shear and the organization of eyewall vertical motion [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 135: 1179–1194.
- 陈联寿, 孟智勇. 2001. 我国热带气旋研究十年进展 [J]. *大气科学*, 25 (3): 420–432. Chen Lianshou, Meng Zhiyong. 2001. An overview on tropical cyclone research progress in China during the past ten years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 25 (3): 420–432.
- 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 Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 62 (5): 541–549.
- 陈瑞凤. 1987. 试论台风的“空心”现象 [J]. *海洋预报*, 4 (1): 68–72. Chen Ruishan. 1987. On the phenomenon of “hollow centre” of typhoons [J]. *Marine Forecasts (in Chinese)*, 4 (1): 68–72.
- Chen S Y S, Knaff J A, Marks F D Jr. 2006. Effects of vertical wind shear and storm motion on tropical cyclone rainfall asymmetries deduced from TRMM [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134: 3190–3208.
- 董林, 端义宏. 2008. 热带气旋经过台湾岛强度变化特征 [J]. *气象*, 34 (7): 10–14. Dong Lin, Duan Yihong. 2008. A statistical analysis of intensity change of tropical cyclones landing Taiwan [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 34 (7): 10–14.
- Frank W M, Ritchie E A. 1999. Effects of environmental flow upon tropical cyclone structure [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 127: 2044–2061.
- 胡姝, 李英, 许映龙. 2012. 登陆台湾岛热带气旋强度和结构变化的统计分析 [J]. *热带气象学报*, 28 (3): 300–310. Hu Shu, Li Ying, Xu Yinglong. 2012. A statistical analysis on intensity and structure changes of tropical cyclones making landfall on Taiwan island [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 28 (3): 300–310.
- 李英, 陈联寿. 2005. 湿地边界层通量影响热带气旋登陆维持和降水的数值试验 [J]. *气象学报*, 63 (5): 683–693. Li Ying, Chen Lianshou. 2005. Numerical study on impacts of boundary layer fluxes over wetland on sustention and rainfall of landfalling tropical cyclone [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 63 (5): 683–693.
- 李英, 陈联寿, 徐样德. 2005. 水汽输送影响登陆热带气旋维持和降水的数值试验 [J]. *大气科学*, 29 (1): 91–98. Li Ying, Chen Lianshou, Xu Xiangde. 2005. Numerical experiments of the impact of moisture transportation on sustaining of the landfalling tropical cyclone and precipitation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 29 (1): 91–98.
- 李英, 钱传海, 陈联寿. 2009. Sepat 台风 (0709) 登陆过程中眼放大现象研究 [J]. *气象学报*, 67 (5): 799–810. Li Ying, Qian Chuanhai, Chen Lianshou. 2009. A study on the eyewall expansion of typhoon Sepat (2007) during its landfall process [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 67 (5): 799–810.

- 孟智勇, 徐祥德, 陈联寿. 1998. 台湾岛地形诱发次级环流系统对热带气旋异常运动的影响机制 [J]. 大气科学, 22 (2): 156–168. Meng Zhiyong, Xu Xiangde, Chen Lianshou. 1998. Mechanism of the impact of the cyclone system induced by the Taiwan island topography on tropical cyclone unusual motion [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 22 (2): 156–168.
- Molinari J, Vollaro D. 2010. Distribution of Helicity, CAPE, and Shear in tropical cyclones [J]. J. Atmos. Sci., 67: 274–284.
- Powell M D, Houston S H. 1998. Surface wind fields of 1995 hurricanes Erin, Opal, Luis, Marilyn, and Roxanne at landfall [J]. Mon. Wea. Rev., 126: 1259–1273.
- 任福民, 王小玲, 陈联寿, 等. 2008. 登陆中国大陆、海南和台湾的热带气旋及其相互关系 [J]. 气象学报, 66 (2): 224–335. Ren Fumin, Wang Xiaoling, Chen Lianshou, et al. 2008. Tropical cyclones landfalling in the mainland, Hainan and Taiwan of China and their interrelations [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66 (2): 224–335.
- Robert A. Maddox. 1980. Meso-scale convective complex [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 61: 1374–1387.
- Wu C C, Yen T H, Kuo Y H. 2002. Rainfall simulation associated with typhoon Herb (1996) near Taiwan. Part I: The topographic effect [J]. Wea. Forecasting, 17: 1001–1015.
- 王鹏云. 1998. 台湾岛地形对台风暴雨影响的数值研究 [J]. 气候与环境研究, 3 (3): 235–246. Wang Pengyun. 1998. A numerical study on the effects of orography of Taiwan island on typhoon induced heavy rainfall [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 3 (3): 235–246.
- Wang S T. 1991. Observational study on the mesoscale flow structures of typhoons encountering the Taiwan terrain [C]. Preprints, International Conference on Mesoscale Meteorology and TAMEX, Taipei, Amer. Meteor. Soc., 330–341.
- Yang Mingjen, Zhang Dalin, Huang Hsiaoing. 2008. A modeling study of typhoon Nari (2001) at Landfall. Part I: Topographic effects [J]. J. Atmos. Sci., 65: 3095–3115.
- 余贞寿, 郝增周, 谢海华, 等. 2007. 台湾岛地形对台风“海棠”(0505)移动路径影响的数值试验研究 [J]. 热带气象学报, 23 (6): 575–580. Yu Zhenshou, Hao Zengzhou, Xie Haihua, et al. 2007. A numerical study of the effect of Taiwan island terrain in typhoon Haitang (0505) track [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 23 (6): 575–580.
- Zeng Zhihua, Wang Yuqing, Duan Yihong. 2010. On sea surface roughness parameterization and its effect on tropical cyclone structure and intensity [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 27, 337–355.
- 张长安, 郑秀专, 潘娅婷. 2008. 台风圣帕的空心现象分析 [J]. 气象, 34 (4): 48–52. Zhang Chang'an, Zheng Xiuzhuan, Pan Yating. 2008. Analysis of hollow phenomenon about typhoon Sepat [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 34(4): 48–52.
- 朱会芸, 熊双全. 2008. 地形对台风影响的数值模拟研究—以台风“泰利”为例 [J]. 成都信息工程学院学报, 23 (4): 453–459. Zhu Huiyun, Xiong Shuangquan. 2008. Numerical simulation of topography influence on typhoon [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology (in Chinese), 23 (4): 453–459.