

颜玲, 周玉淑, 刘宣飞. 2017. 1410 号台风 Matmo 登陆前后的动热力结构演变和水汽输送特征分析 [J]. 大气科学, 41 (2): 289–301. Yan Ling, Zhou Yushu, Liu Xuanfei. 2017. Dynamic and thermodynamic structure analysis of typhoon Matmo (1410) and associated moisture characteristics before and after its landfall [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (2): 289–301, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1607.15329.

1410 号台风 Matmo 登陆前后的动热力结构 演变和水汽输送特征分析

颜玲^{1,2,3} 周玉淑² 刘宣飞¹

¹ 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

² 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴重点实验室 (LACS), 北京 100029

³ 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049

摘 要 利用 NCEP/NCAR (美国国家环境预报中心/国家大气研究中心) 的全球预报系统 (GFS) 再分析资料、欧洲气象中心 (ERA-interim) 资料以及中国气象局观测站点的实况降水观测结合 CMORPH 卫星反演降水资料, 对 2014 年第 10 号台风 Matmo 生成后西北行并登陆台湾及福建过程中的特征进行了分析, 揭示出 Matmo 移动路径主要受西太平洋副热带高压 (简称西太副高) 外围引导气流影响。动、热力物理量场分析表明, Matmo 在登陆福建前后, 福建上空一直维持深厚的涡旋结构, 福建东南部上空的上升区与台湾海峡及福建西部附近的下沉运动区形成明显的垂直环流圈。同时, 南海上空有明显的西南急流 (风速大于 16 m s^{-1}), Matmo 的水汽来源主要有两条, 分别为孟加拉湾和南海以及西太副高南侧。充足的水汽输送及低层水汽辐合抬升有利于 Matmo 登陆后的强降水发生和维持。Matmo 登陆福建后仍然保持低层辐合、高层辐散, 有利于持续暴雨的发生。Matmo 登陆福建期间始终处于风速垂直切变小值区 (小于 9 m s^{-1}) 中, 环境风速的弱垂直切变有利于 Matmo 暖心结构及高空辐散形势的维持, 是 Matmo 在登陆后依然能维持自身强度不衰减的原因之一。

关键词 Matmo 台风 结构演变 水汽输送

文章编号 1006-9895(2017)02-0289-13

中图分类号 P445

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1607.15329

Dynamic and Thermodynamic Structure Analysis of Typhoon Matmo (1410) and Associated Moisture Characteristics Before and After Its Landfall

YAN Ling^{1,2,3}, ZHOU Yushu², and LIU Xuanfei¹

¹ Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

² Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms (LACS), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

³ College of Earth Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

收稿日期 2015-12-22; **网络预出版日期** 2016-07-19

作者简介 颜玲, 女, 1994 年出生, 硕士研究生, 主要从事台风精细化降水与大风研究。E-mail: 13522169142@163.com

通讯作者 周玉淑, E-mail: zys@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2015CB452804, 国家自然科学基金项目 41661144024、41475054、41275065、41475097, 高原大气与环境四川省重点实验室开放课题

Funded by National Basic Research Program of China (973 Program, Grant 2015CB452804), National Natural Science Foundation of China (Grants 41661144024, 41475054, 41275065, and 41475097), Open Research Fund Program of Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province

Abstract The characteristics of typhoon Matmo (1410) are analyzed before and after its landfall on Taiwan and Fujian based on the analysis data from NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) Global Forecast System (GFS), the reanalysis data from ECMWF ERA-Interim and rainfall observations derived from station observations and satellite retrievals of precipitation from 18 to 26 July 2014. The results indicate that the trajectory of Matmo was mostly influenced by the steering flow of subtropical high. The deep vortex structure of Matmo still maintained around the time of its landing at Fujian, cooperating well with the vertical circulation formed by the ascending motion over southeastern Fujian and the descending motion near Taiwan Strait and western Fujian. Besides, the water vapor originated from the Bay of Bengal and South China Sea were continuously transported into Matmo by the southwesterly jet (wind speed greater than 16 m s^{-1} at 850 hPa), which provided the necessary energy required for maintaining the typhoon circulation around landing time. The southwesterly jet transported energy and momentum from the South China Sea to the coastal region of southeastern China. Meanwhile, sufficient water vapor transport and convergence of moisture at the low levels were conducive to the occurrence and maintenance of heavy rain caused by Matmo. The result also shows that the weak vertical wind shear, which was favorable for the maintenance of warm core structure and divergence at upper levels, was another reason for the slow weakening of Matmo after its landfall.

Keywords Typhoon Matmo, Evolution of structure, Transport of water vapor

1 引言

中国是一个自然灾害频发的国家,其中,台风灾害更因为它的发生频次高、危害程度重、影响范围广和灾害链条长而特别受到气象工作者的关注。而台风暴雨又是台风灾害的主要表现形式之一,影响范围深远,性质复杂多变,经常导致洪涝、滑坡和泥石流等次生灾害,给人类社会造成巨大冲击,经济损失动辄数以亿元计。尤其我国东部沿海一带的城市经济发展很快且人口稠密,而西北太平洋面又是生成台风频率最高的地方,台风经常登陆我国东南及华南沿海城市造成大风、暴雨等恶劣天气,有时甚至影响到华北和东北(如2015年15号台风天鹅,在东北地区造成强风暴雨),给人民生活带来困扰甚至危及公众生命财产安全。因此,登陆台风暴雨的研究是关系到国计民生的重大课题,是科学研究的重中之重。但是,由于涉及复杂的大气物理过程以及不同纬度、不同尺度天气系统的相互作用,台风的机理分析和预测非常困难(陈联寿和丁一汇,1979)。尽管困难,随着近几十年来国内外监测手段的发展、各种外场试验的集中实施以及数值模式和资料同化理论和技术的发展,台风的研究也取得了长足进步,已有研究内容已涉及诸多方面,包括环境的影响、风速的垂直切变(吴国雄和蔡雅萍,1997;陈国民等,2010)、中纬度长波槽(王志烈,1981)、以及热带气旋与中纬度环流系统的相互作用(朱洪岩等,2000;雷小途和陈联寿,2001)、强对流系统的作用和海气边界层交换对台风的影响及台风登陆过程的数值模拟等(邓国等,2005; Nuissier et al.,

2005; Lowag et al., 2008; 吴立广和梁佳, 2009; 徐文慧和倪允琪, 2009; 于玉斌等, 2015)。另外,很多学者提出利用湿 Q 矢量(张兴旺, 1998; 刘汉华等, 2007)、等熵位涡(李耀辉和寿绍文, 2000; 于玉斌和姚秀萍, 2000; 吴蓁等, 2008)、Eartel-Rossby 变量等物理量(Li and Fu, 2006)以及相关的能量分析方法(Shukla and Saha, 1974; Koch et al., 1988)等,在研究台风暴雨方面得到了很多结果,也提出了很多新的理论,并对多个台风进行了高分辨的数值模拟,进一步加强对台风结构的认知(周冠博等, 2012; Djath et al., 2014; Srinivas et al., 2010)。我国2002年启动的“登陆台风灾害的监测及预报技术研究”项目更进一步推动了关于台风的防灾减灾研究,研究结果也成功应用到预报业务中(施望芝等, 2006; 赵付竹等, 2013),但是,在台风风雨的防灾减灾方面还远远不能满足社会需求(陈佩燕等, 2009)。科技部2009年启动的国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(台风登陆前后异常变化及机理研究)经过5年的科技攻关,在浅水区的海气拖曳系数、边界层高度变化等方面获得了新的观测结果,发展了针对登陆台风的多源资料融合方法,揭示了不同尺度系统活动导致台风路径突变、登陆台风复苏等的物理机理,提出新的云辐射参数化方案,建立了台风海—陆—气耦合模式,台风数值预报关键技术研发也取得明显进展等(端义宏等, 2014),这一系列研究成果的获得,提高了对我国登陆台风结构和强度变化及台风防灾减灾的认识。但是,在登陆台风精细结构及其对台风风雨影响的研究和预报方面,也仍然是国际国内多年来台风研究面临的难题,

目前关于这方面的研究进展也不大。当前对台风路径的预报已经比较准确, 相对地, 国内外对于台风的结构和强度变化尤其是登陆时的变化的预报准确率还很低, 进展也很慢(程正泉等, 2005)。因此, 对台风系统结构和降水影响因子的研究非常重要且需要进行长期的艰苦工作。由于台风登陆时造成的暴雨的强度和分布与台风自身结构有很大关联, 而登陆台风的风雨分布取决于台风内部环流结构和水汽循环过程, 台风内部结构变化往往由台风环流内中尺度系统的发生、发展和消亡导致, 台风环流中的中尺度系统的发生、发展和消亡过程又受天气尺度环流结构的影响。所以, 加强对登陆台风天气尺度结构及水汽条件等的分析仍然是台风研究和预报中不可或缺的一环。2014 年 10 号台风 Matmo 登陆后对人民生命和财产造成了极大损失, 福建、江苏、浙江等 7 省 211.6 万人受灾, 农作物受灾面积 149.2 千公顷, 直接经济损失 26.6 亿元。由于 Matmo 造成的降水强度大, 登陆后持续时间长, 影响范围广, 是研究登陆台风造成暴雨洪涝灾害的一个很好的个例, 但是相关的研究并不多, 且都是从天气学角度来分析台风期间的环流背景(黄明凤等, 2014; 郑秀云等, 2015), 还缺乏相关的台风结构、水汽输送特征等的分析。

本文将对 1410 号台风 Matmo 生成后西北行并登陆台湾及福建过程中(尤其是登陆前后)的常规气象场进行分析, 辅以涡度、散度等动力变量的分布特点和天气尺度水汽输送和辐合特点分析, 揭示 Matmo 在发展及登陆减弱期间的动热力结构变化及其水汽输送特征和降水特点。阐明天气背景、不同系统配置及水汽输送对 Matmo 台风系统的结构以及对降水强度和落区的影响, 以期对登陆台风风雨分布的分析和预报提供一定的依据。

2 资料方法介绍

本文中, 图 1 所用台风路径、中心气压以及最大风速资料取自 CMA 热带气旋最佳路径数据集; 计算环境垂直风切变的资料以及图 3 所用资料来自 NCEP/NCAR 的 GFS 全球分析资料, 空间分辨率 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 时间分辨率为 6 h; 图 2 所用资料来自中国气象局自动站与 CMORPH 卫星融合的逐时降水量 0.1° 网格数据集 (1.0 版); 其他图中所用资料均为空间分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 、时间分辨率为 6 h 的欧洲气象资料中心 (ERA-interim) 的再分析资料。

本文中的物理量计算公式(丁一汇, 1989)为水平散度:

$$D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}, \quad (1)$$

水汽通量:

$$F = \frac{1}{g} q \mathbf{V}, \quad (2)$$

水汽通量散度:

$$\nabla \cdot \mathbf{F} = \frac{1}{g} \nabla \cdot q \mathbf{V}, \quad (3)$$

风速垂直切变的大小:

$$v_{ws} = \sqrt{(u_{200} - u_{850})^2 + (v_{200} - v_{850})^2}, \quad (4)$$

其中, u , v 为风速的纬向、经向分量, g 为重力加速度, q 为比湿, 比湿可由 GFS 的 0.5° 资料里的温度、相对湿度、气压直接计算出来; 对于环境垂直风切变的计算, 目前普遍采用的是利用 200 hPa 某区域内平均水平风矢量与 850 hPa 相同区域内平均水平风矢量的差来表示, 本文中, 以热带气旋所在位置为中心, 在 $10^\circ \times 10^\circ$ 正方形网格区域内, 分别计算在 200 hPa 和 850 hPa 的纬向和经向风场的风速平均值 (u_{200} 、 u_{850} 、 v_{200} 、 v_{850}), 进而求出。

3 台风 Matmo 的路径、强度和降水概况

2014 年 10 号台风 Matmo 于 2014 年 7 月 18 日凌晨 02 时(北京时, 下同)在菲律宾以东的西北太平洋洋面上生成并向西北方向移动(图略), 并在 19 日凌晨加强为强热带风暴, 23 日 00 时 15 分前后在台湾省台东县长滨乡沿海登陆, 登陆时中心附近最大风力有 14 级 (42 m s^{-1}), 中心最低气压为 955 hPa。Matmo 在穿过台湾海峡后于 23 日 15 时 30 分前后在福建省福清市高山镇沿海登陆, 登陆时减弱为强热带风暴, 中心附近最大风力有 11 级 (30 m s^{-1}), 中心最低气压为 980 hPa。之后经过江西、安徽、江苏, 然后移入黄海西部海面, 于 25 日下午 05 时 10 分在山东省荣成市虎山镇沿海再次登陆, 登陆时最大风力 8 级 (20 m s^{-1}), 中心最低气压 993 hPa。当天晚上 11 时 Matmo 在黄海北部海面变性为温带气旋, 中央气象台对其停止编号。

图 1a、1b 分别是 Matmo 的移动路径和强度变化。从图中可以看出, Matmo 在发展登陆过程中, 在 22 日早上 06 时到中午 12 时最低气压降低到 955 hPa, 最大风速达 42 m s^{-1} 。在登陆福建(23 日 15

时 30 分左右)之后, 由于地形摩擦使得台风强度迅速减弱, 但还是给周边地区带来很强的降水, 例如福建省在 23 日和 24 日两天(即台风登陆福建期间)降水最强(图 2)。尤其是 23 日 14 时至 24 日

02 时(图 2b-d)的 6 小时降水量都比较大, 而这段时间水平风的垂直切变一直保持在 9 m s^{-1} 以下(图 1b 中点线所示), 关于垂直风切变对台风结构、强度以及降水的影响将在下文讨论。

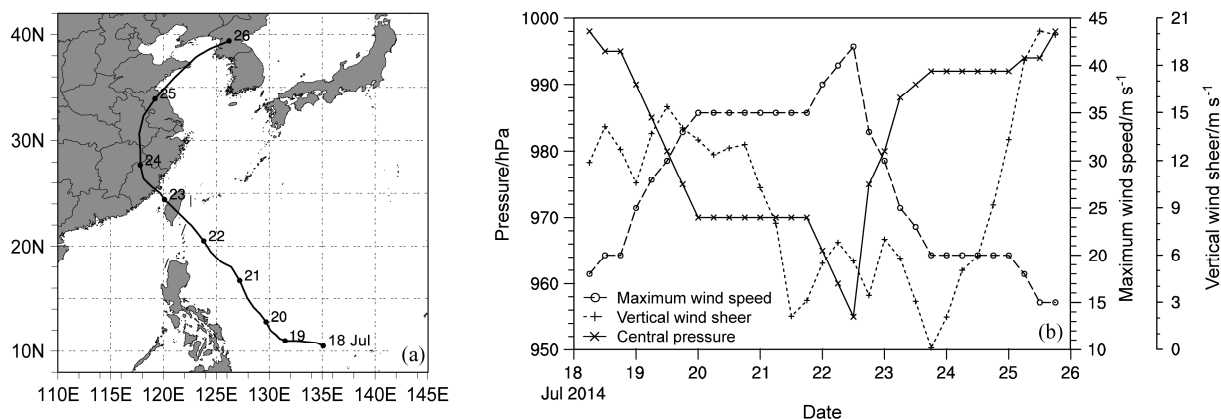


图 1 台风 Matmo (a) 移动路径和 (b) 最大风速 (单位: m s^{-1})、最低气压 (单位: hPa) 以及垂直风切变 (单位: m s^{-1})

Fig. 1 The track and intensity of typhoon Matmo (a) cyclone track; (b) time series of maximum wind speed (units: m s^{-1}), central pressure (units: hPa), and vertical wind shear (units: m s^{-1})

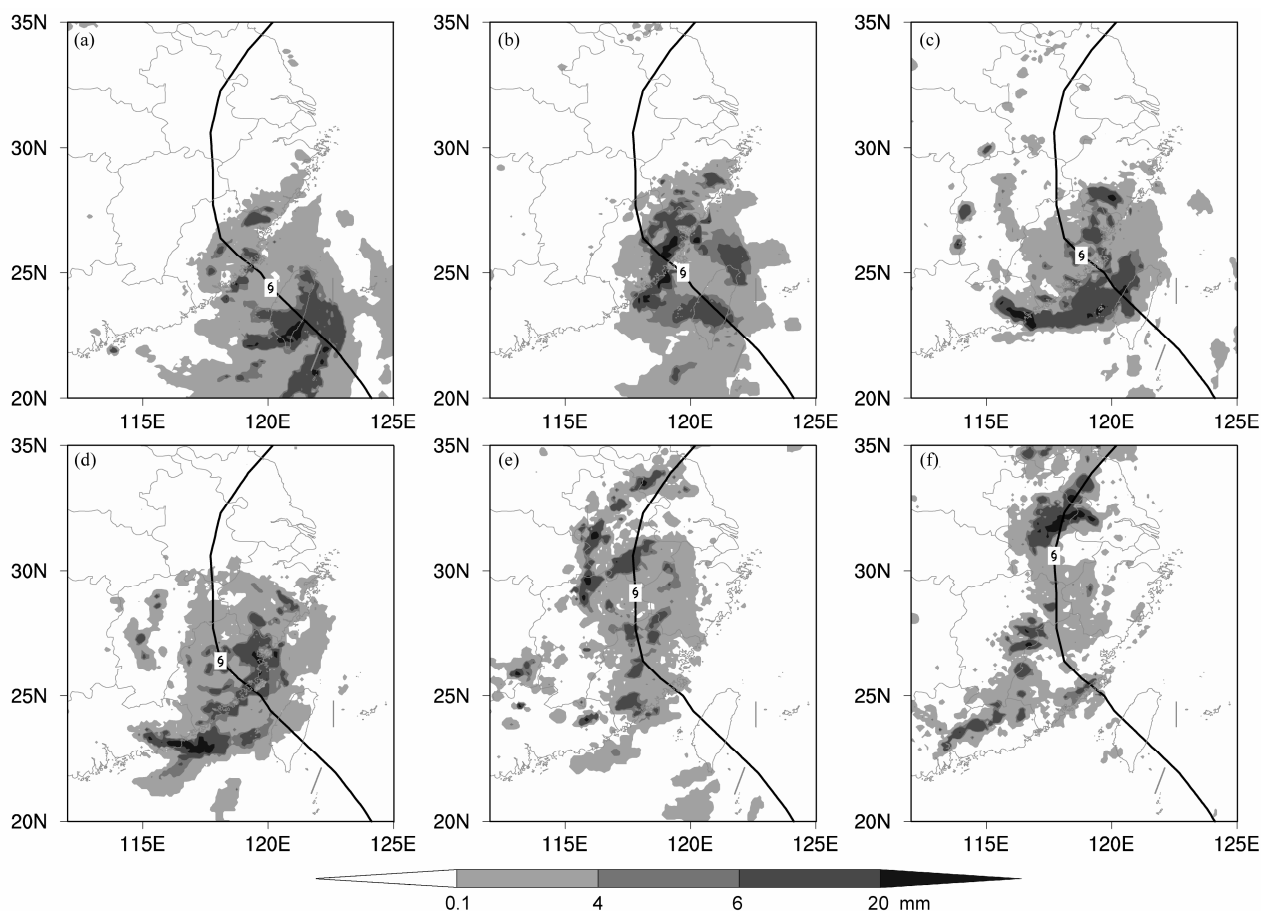


图 2 6 小时累积降水: (a) 23 日 08 时; (b) 23 日 14 时; (c) 23 日 20 时; (d) 24 日 02 时; (e) 24 日 14 时; (f) 24 日 20 时。阴影表示降水量, 单位: mm; 黑色实线为 Matmo 路径; 台风中心用台风符号表示

Fig. 2 Six-hour accumulated rainfall: (a) 0800 BJT (Beijing time) 23 July, (b) 1400 BJT 23 July, (c) 2000 BJT 23 July, (d) 0200 BJT 24 July, (e) 1400 BJT 24 July, (f) 2000 BJT 24 July. Shaded areas represent precipitation (units: mm), the solid line represents Matmo's track, the typhoon symbol represents Matmo's center

本文着重分析 Matmo 登陆台湾及福建期间的动热力结构变化及其水汽输送特征和降水特点: Matmo 于 23 日 15 时 30 分前后登陆福建, 后转向偏北方向移动, 从 6 小时降雨量也可以看到, 从 23 日开始江南东部地区降水逐渐增多, 随着 Matmo 登陆, 降水强度明显增加, 25 日之后台风行至黄海西部使得福建降水明显减少而江苏、山东等地仍有强降水(图 2)。从图 2 中也能看出降水中心基本沿着台风移动方向, 且当 Matmo 登陆后岸上降水主要在福建省东北部, 也即台风的东北侧, 路径的右侧, 但是在继续向北移动减弱的过程中由于受到台风环流西北方向中纬度槽(图 3e)的影响, 降水主要

发生在路径的左侧。

4 天气环流背景分析

从 500 hPa 图上看到, Matmo 登陆前福建省主要受副热带高压(简称副高)控制, 在 Matmo 形成初期, 西北侧为 1409 号台风 Rammasun, 虽然并没有直接影响到 Matmo, 但是它阻碍了副高西伸, 使得副高只能向西北方向延伸。西南季风给 Matmo 带来了大量水汽和动量输送, 使它在副高的引导气流作用下向北前进的过程中迅速发展加强, 而在台风逐渐登陆的过程中, 副高断裂但同时陆上的高压还控制着我国东部和中部大部分地区, 随后副高

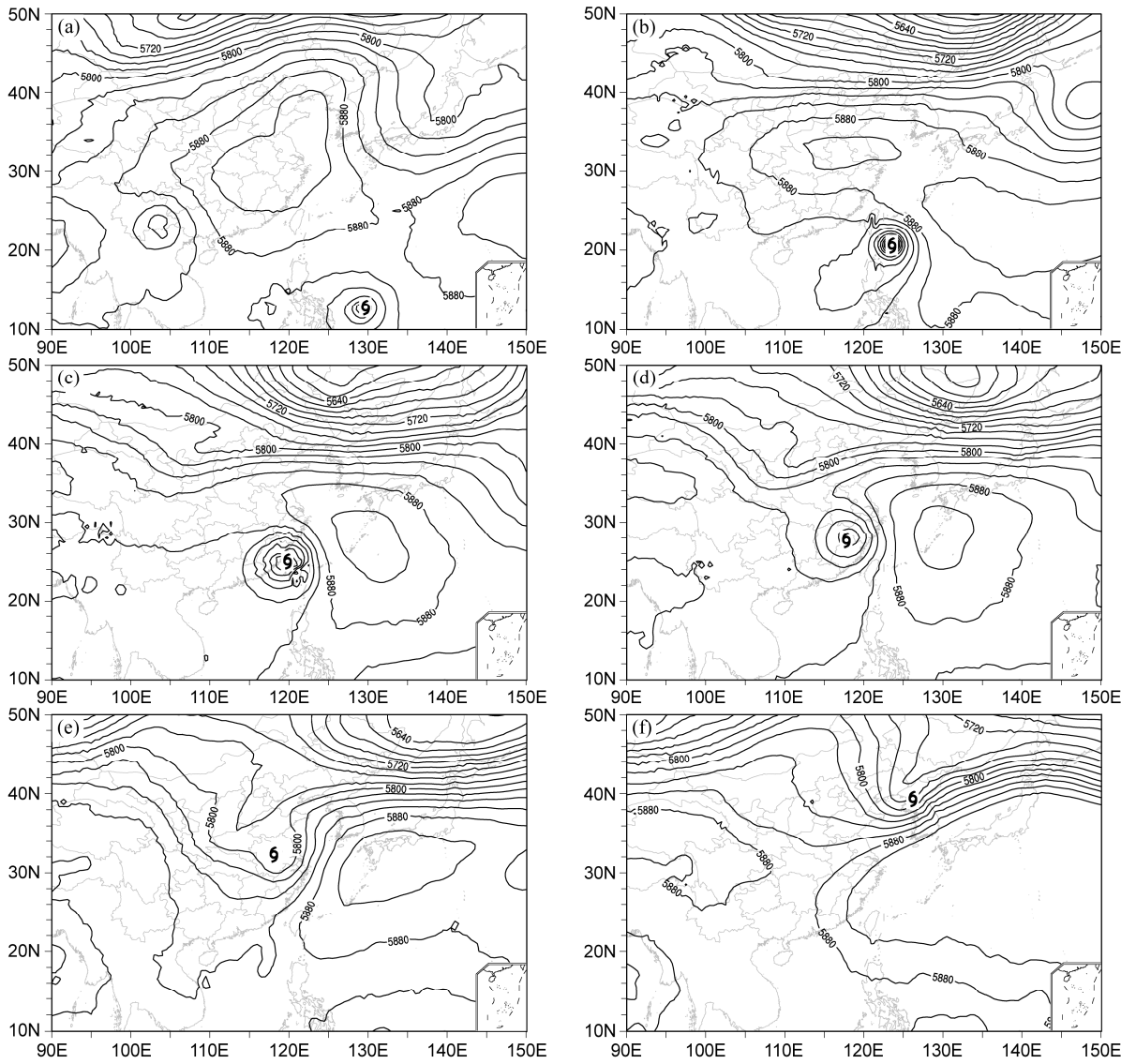


图 3 500 hPa 位势高度场(单位: gpm): (a) 7 月 18 日 08 时, (b) 7 月 22 日 08 时, (c) 7 月 23 日 08 时, (d) 7 月 24 日 08 时, (e) 7 月 25 日 02 时, (f) 7 月 26 日 08 时。台风符号为台风中心位置, 下同
Fig. 3 Distributions of geopotential height (units: gpm) at 500 hPa: (a) 0800 BJT 18 July, (b) 0800 BJT 22 July, (c) 0800 BJT 23 July, (d) 0800 BJT 24 July, (e) 0200 BJT 25 July, (f) 0800 BJT 26 July. The typhoon symbol represents Matmo's center, the same below

和大陆高压打通形成稳定的“高压坝”，并且还向西伸展，不利于 Matmo 向北移动。受副高西南侧引导气流影响，Matmo 缓慢地向西北方向移动，在 Matmo 登陆福建的过程中，原本位于我国广东省附近的 Rammasun 台风在登陆后逐渐减弱至衰亡，与青藏高原南部的低压合并（图 3a-b）。同时，Matmo 也沿着副高向西北方向行进并登陆福建，副高西南侧的偏南气流向台风不断输送暖空气，Matmo 逐渐加强（图 3c）。Matmo 登陆福建之后，副高减弱东退但仍停留在东海附近，副高中心强度依然为 5900 gpm，此时，Matmo 主要受副高西侧偏南气流影响，以北移为主（图 3d），大陆高压的东南侧的偏北冷空气使得 Matmo 移速减慢，这也是产生持续降水的一个重要原因。随着 Matmo 登陆后的北上，在下垫面摩擦的作用下其强度进一步减弱。此外，在 Matmo 登陆福建并向北移动的过程中，受内蒙古上空不断发展东移的中纬西风槽后西北气流的影响，在河北—山西—陕西一线有冷空气源源不断地输送到 Matmo 内（图 4a），Matmo 的暖心结构被破坏从而减弱（图 4b-c），可以看到在 23 日 08 时，Matmo 的暖心结构很明显，暖中心大概在 300~400 hPa 附近，而到了 25 日 08 时，Matmo 暖心结构变得不规则，强度明显减弱，暖中心位置也下降到 400~500 hPa 附近，从而说明 Matmo 强度随之减弱。到 26 日早上 08 时，副高中心已经退到日本海的东部，Matmo 也停止编号（图 3d-f）。

5 Matmo 登陆前后热力结构的变化

从风压场合成图（图 5a）上我们可以看到在 Matmo 登陆福建期间，南海上空 850 hPa 等压面上有明显的西南急流（风速大于 16 m s^{-1} ），使得孟加拉湾和南海的水汽被不断输送到 Matmo 内部，利于 Matmo 在陆上的维持，图 5a-c 可以明显看到，Matmo 在登陆福建前后给福建地区造成强降水期间，台风上空一直维持着深厚的垂直环流，从 850 hPa 到 300 hPa 有明显的涡旋结构。另一方面，台风东部一侧的风速总是比西侧大，且越在低层，风速的这种对比越明显，（图 5a-c）的三幅图很明显地反应出 Matmo 的风场不对称结构。可以看到，Matmo 登陆前虽然台风外围风场是不对称分布的，但台风中心附近还维持着弱的涡旋的对称结构，而当 Matmo 登陆之后风速大值区明显移动到台风中心的右侧，同时也是在 Matmo 路径右侧，这是由于

下垫面变化导致的非对称，所以可以看到靠海的一侧风速比深入内陆的一侧大，越靠近地面台风的不对称结构越明显。

此外，环境风垂直切变（以下，风垂直切变的风速全部默认为是环境的全风速）对台风强度的影响不容小觑，大量的观测资料分析发现强的风垂直切变会抑制台风的形成和加强（Mcbride and Zehr, 1981; Zehr, 2003），但同时也有研究认为在一定的垂直风切变场中比在没有风切变的环境中更有利于台风的发展（Corbosiero and Molinari, 2002），因为在这种“不通风的”条件下相对于移动扰动的温湿平流很小，对流层上下空气相对运动小，有利于低层的辐合和高层的暖核保持同位相，这样就使得凝结释放的潜热始终加热同一空气，从而有利于台风强度的维持。所以风垂直切变小是台风得以维持的必要条件之一（白莉娜等，2010），并且有很多研究认为风速垂直切变有一个阈值（Zehr, 1992; Chen et al., 2006），当低于这个阈值时有利于台风发生发展，高于这个阈值时则会抑制台风的发展，这点已经逐渐被大多数人所接受。但是不同区域、不同强度的台风所对应的这个阈值又有所不同。有相关统计研究（徐明等，2009）发现登陆台风很强时，其所处环境垂直风切变基本在 9 m s^{-1} 以下，但是也不会特别低。Matmo 在福建省维持的时间长达 20 h 左右，从图 1b 中可以看到 Matmo 登陆福建期间环境风垂直切变一直在 $3\sim 8 \text{ m s}^{-1}$ 范围之内，这样就使得 Matmo 的暖心结构不容易被破坏，高空维持辐散形势，有利于 Matmo 在登陆后依然能维持自身强度不衰减。

当台风上空被很强的辐散流场控制时，二级环流的抽吸作用会使低空的垂直运动加强，同时加强低空辐合作用，有利于台风低压系统在陆上的维持，可加强登陆台风低压的垂直运动和低空辐合运动，有利于低压环流在陆上的维持（余贞寿等，2007; 于玉斌等，2008）。图 5c 是 24 日 08 时 300 hPa 的高空形势图，图中黄海上空有个高压中心，强度较强，在高压东南部大部气流向西南方流出，其余气流从高压的南部向西流去，与高原上空的低压北部的东风气流合并。Matmo 登陆福建时正处于高压东南部的东北风强辐散气流中，对应大片正散度区（图 6c），且可以看到台风上空的风场是明显的辐散风场，而到了 25 日，Matmo 移出日本岛附近的高压控制范围，台风上空的散度场（图 6d）也明显减弱，表明高空辐散是 Matmo 维持的一个重要

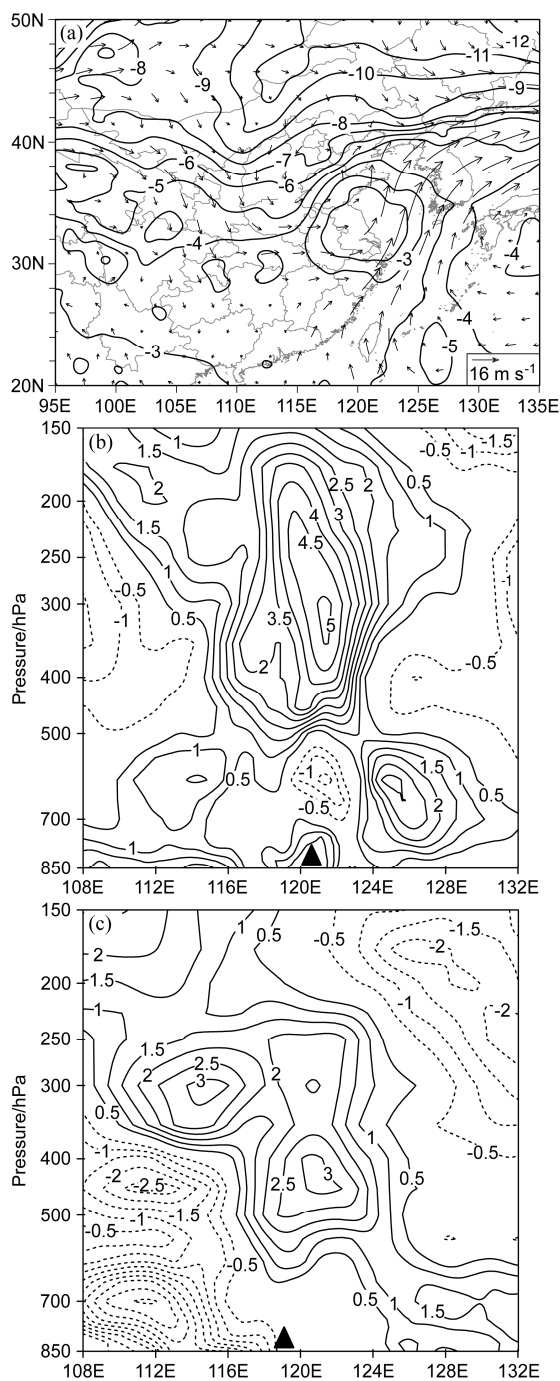


图4 (a) 25 日 08 时 500 hPa 上风场 (箭头, 单位: m s^{-1}) 和温度场 (等值线, 单位: $^{\circ}\text{C}$)。 (b) 23 日 08 时、(c) 25 日 08 时台风中心温度距平场 (单位: $^{\circ}\text{C}$) 剖面, 三角形标记为台风中心所在位置, 下同
Fig. 4 (a) Distributions of wind (vectors, units: m s^{-1}) and temperature (contours, units: $^{\circ}\text{C}$) at 500 hPa at 0800 BJT 25 July. Longitude–pressure cross sections of temperature anomalies (units: $^{\circ}\text{C}$) along the typhoon center at (b) 0800 BJT 23 July and (c) 0800 BJT 25 July. The triangles represent the position of Matmo's center, the same below

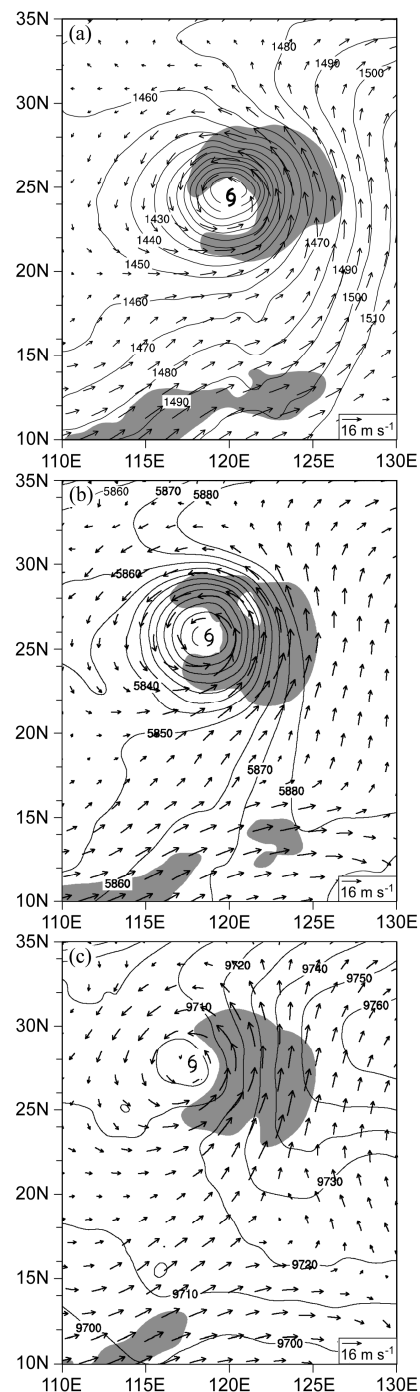


图5 (a) 23 日 08 时 850 hPa 高度场 (等值线, 单位: gpm) 和风场 (箭头, 单位: m s^{-1})、(b) 23 日 20 时 500 hPa 高度场和 850 hPa 风场、(c) 24 日 08 时 300 hPa 的高度场和 850 hPa 风场。阴影区表示风速大于 16 m s^{-1} 的区域
Fig. 5 (a) Geopotential height (contours, units: gpm) and wind (vectors, units: m s^{-1}) at 850 hPa at 0800 BJT 23 July, (b) geopotential height at 500 hPa and wind at 850 hPa at 2000 BJT 23 July, (c) geopotential height at 300 hPa and wind at 850 hPa at 0800 BJT 24 July. Shaded areas indicate the wind speed is more than 16 m s^{-1}

条件。

进一步分析垂直速度垂直剖面图, 23 日 08 时即台风登陆之前 (图 6a), 在台风中心西侧中低层是明显的上升运动区。但是从图 1 可以看到, 虽然此时 Matmo 还未登陆福建, 但是福建省却已经出现降水, 这应该是台风外围环流及地形影响, 迎风坡

暖湿气流被迫抬升, 低层有上升运动出现 (浙闽一带的丘陵山地使台风北部的东风气流被迫抬升), 福建上空以大范围上升运动为主, 而在台湾海峡及福建西部存在明显的下沉区, 有明显的垂直环流圈形成, 且上升运动速度明显大于两侧的下沉运动, 根据 Braun (2006) 的研究结果, 这种结构有利于

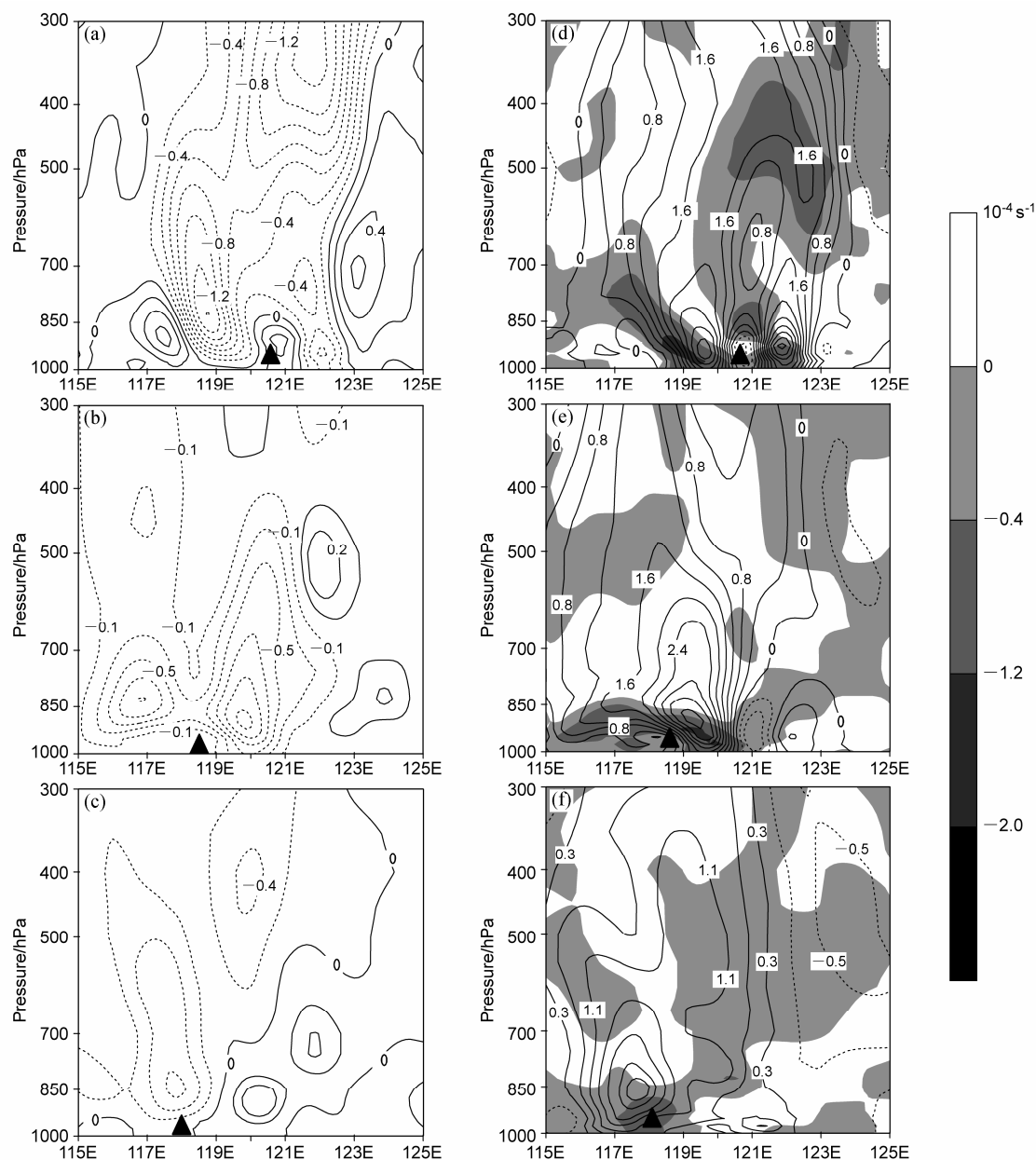


图 6 (a) 23 日 08 时、(b) 24 日 02 时、(c) 24 日 14 时的垂直速度 (单位: Pa s^{-1}) 沿台风中心的纬向剖面, 实 (虚) 线为下沉 (上升) 运动。
(d) 23 日 08 时、(e) 24 日 02 时、(f) 24 日 14 时的散度 (单位: 10^{-4} s^{-1}) 和涡度 (单位: 10^{-4} s^{-1}) 场沿台风中心的纬向剖面, 实 (虚) 线为正 (负) 涡度, 阴影部分为辐合区

Fig. 6 Longitude–pressure cross sections of vertical velocity (units: Pa s^{-1}) along the typhoon center at (a) 0800 BJT 23 July, (b) 0200 BJT 24 July, and (c) 1400 BJT 24 July, solid (dashed) lines represent descending (ascending) motion. Divergence (units: 10^{-4} s^{-1}) and vorticity (units: 10^{-4} s^{-1}) at (d) 0800 BJT 23 July, (e) 0200 BJT 24 July, and (f) 1400 BJT 24 July, solid (dashed) contour lines represent positive (negative) vorticity values, shaded areas represent convergence

Matmo 暖心结构的维持, 从而减缓 Matmo 的衰亡速度。Matmo 登陆福建之后, 台风倒槽随高度向偏西方向倾斜, 受台风倒槽影响, 福建附近基本都处于上升运动区, 强中心位于 850 hPa 附近, 此时台风东侧上升速度明显比西侧大, 表明登陆后 Matmo 的不对称结构的变化 (图 6b)。随着台风西北行, 福建上空由台风外围偏北气流逐渐转为西南急流控制, 上升运动区也逐渐向西扩展, Matmo 中心逐渐移入安徽, 福建上空开始转为弱下沉气流区, 台风中心上空的垂直速度明显减弱, 不对称结构和 Matmo 强度也减弱, 从而使得由 Matmo 造成的降水也明显减弱 (图 6c)。

而涡度和散度场的垂直结构基本与垂直速度剖面图一致, 台风登陆前在福建东部沿海地区低层有明显的辐合, 辐合区主要在 700 hPa 以下, 此时低层强上升运动区对应强辐合区 (图 6a、d), 有利于降水维持。Matmo 登陆福建之后的 24 日 02 时 (图 6e), 在低层台风中心附近上空基本都为辐合上升区, 虽然辐合高度变低, 只能达到 850 hPa, 但与垂直速度图的上升运动区间对应良好, 二级环流的“抽吸作用”使垂直上升运动加强, 正涡度的大值中心也对应区域, 说明在福建上空低层有很强的气旋性辐合, 这种结构使垂直上升运动加强的同时, 又加强了对流层中层凝结潜热的释放, 这种垂直结构为暴雨提供了有利的动力条件和重要能量来源, 也有利于 Matmo 在陆上的维持; 另外, 从涡度散度时空配置来看, 此时他们位相差为 $\pi/2$, 正涡度中心与强辐合中心重合, 对应有重力波发生发展, 意味着有强准地转不平衡出现, 是产生强暴雨的重要动力机制 (李麦村, 1978; Fillion, 2002; 汪汇洁等, 2009), 此时正涡度中心在 Matmo 中心右侧, 而暴雨中心也偏向 Matmo 中心右侧 (图 2d), 这正是重力波的一个表现。由图 6d-f 看到 Matmo 登陆福建前涡度散度同位相, 不利于重力波的发展, 登陆福建后对应有重力波发生发展, 触发暴雨, 而当 Matmo 继续北上减弱的过程中, 重力波结构也逐渐消失, 所以台风中心附近降水减弱。这充分说明了 Matmo 在登陆时候内部有重力波的产生, 从而引发暴雨。到 24 日 14 时 (图 6f), 低层辐合高度降低, 强度减弱, 不对称结构消失。虽然仍维持着低层辐合、高层辐散形势, 但是台风低层的辐合场明显减弱, 而高空的辐散场虽然还在但强度也明显减弱, 对应上升运动减弱, 所以之后福建降水趋于减少,

降水过程趋于结束。

6 水汽输送特征分析

从图 7a 可以看到, Matmo 登陆福建时, 主要的水汽来源有两条, 一条是来自孟加拉湾及南海的水汽, 另外一条是来自西太平副热带高压 (简称西太副高) 南侧的水汽。并且从图 5a 中可以看到, 在台湾海峡、东海及南海南部附近存在 16 m s^{-1} 的急流区, 南海至台湾海峡存在明显的西南季风水汽输送带, 据国家气候中心监测显示, Matmo 影响期间正值南海季风爆发 (<http://cmdp.ncc-cma.net/Monitoring/EastAsian/p8ciu2014082.gif> [2016-03-08]), 此时西南季风水汽输送明显, 为台风提供了充沛的水汽, 也减缓了台风登陆后强度的减弱, 有利于 Matmo 强度维持, 同时也有利于出现西南气流下的持续降水天气。另外从图 5a 上还可看出, Matmo 在登陆时的水汽输送也是呈明显的不对称结构, 水汽通量大值区主要集中在 Matmo 东北侧, 并且由于浙闽丘陵的阻拦, 在这里有水汽的辐合, 这也是福建降水增多的一个重要原因。从水汽通量散度垂直变化 (图 7b-d) 来看, 造成福建省附近强降水的水汽主要是来源于对流层中低层, 福建上空水汽输送明显的区域基本在低层, 集中在 500 hPa 以下, 强降水开始出现时, 也就是在 23 日 08 时, 在强降水区上空及东侧出现了水汽通量辐合中心, 所以福建地区上空的中低层有较强的水汽通量辐合抬升, 说明有大量水汽在福建附近集中, 随垂直上升气流抬升到中高层后冷却凝结释放潜热, 造成福建省本次持续性强降水。随高度增加辐合减弱, 到了 24 日 02 时 500 hPa 则出现了辐散中心, 且水汽辐合中心主要在 700 hPa 以下, 700~400 hPa 为明显的水汽辐散区, 到了 24 日 14 时水汽辐合区主要集中在 800 hPa 下, 中心强度开始减弱, 高层辐散也减弱, 并且辐合辐散中心直接处于台风中心正上方, 说明 Matmo 台风的不对称结构在减弱。此后, 随着 Matmo 向西北方向前行, 虽然中心移到安徽境内, 同时强度降为热带风暴级水平, 但仍维持低层水汽辐合、高层水汽辐散的形势, 仍然有利于台风环流影响下降水的发生。

7 小结与讨论

本文对 1410 号台风 Matmo 在登陆福建前后期间的动热力结构变化及其水汽输送特征和降水特

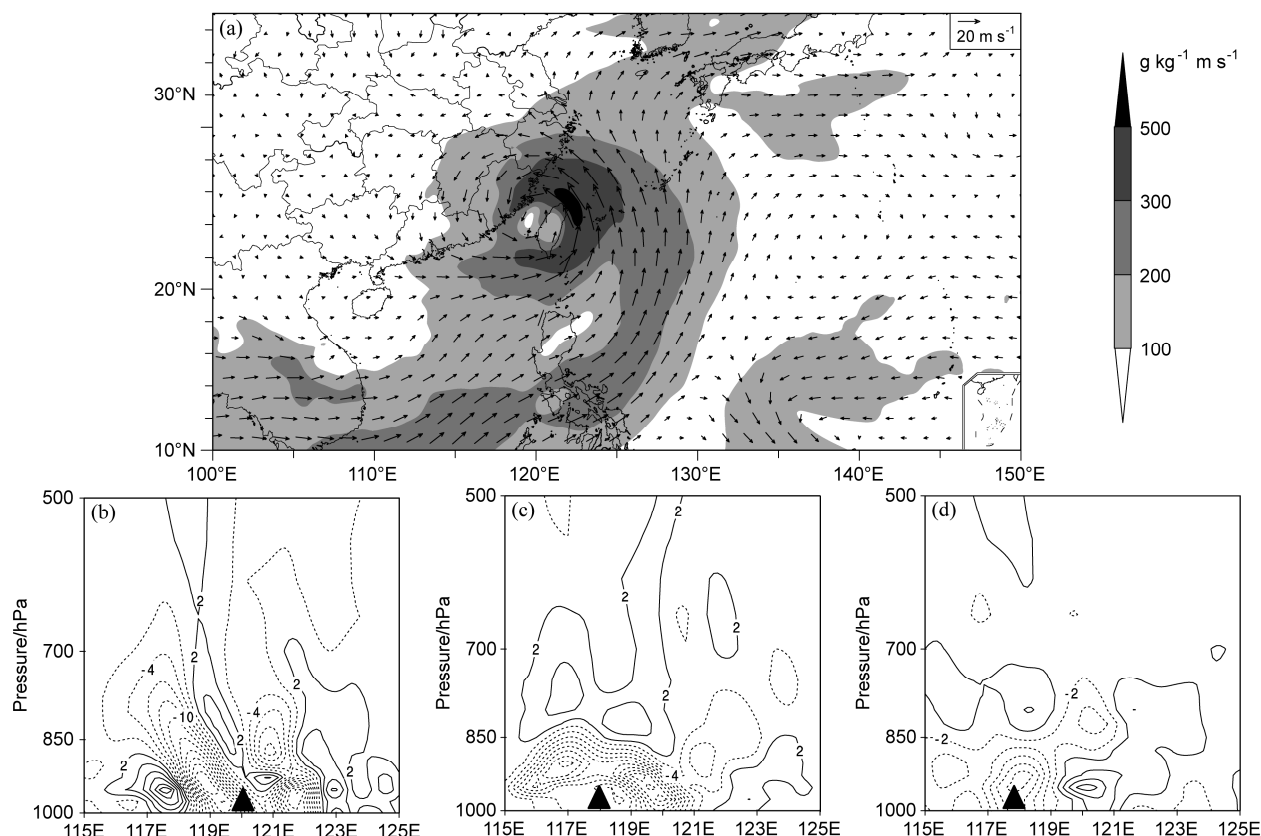


图 7 (a) 23 日 08 时 900 hPa 的风场 (箭头, 单位: m s^{-1}) 和水汽输送通量 (填色, 单位: $\text{g kg}^{-1} \text{m s}^{-1}$), (b) 23 日 08 时、(c) 24 日 02 时、(d) 24 日 14 时水汽通量散度沿台风中心的纬向—垂直剖面 (单位: $10^{-7} \text{g hPa}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)

Fig. 7 (a) Wind field (arrows, units: m s^{-1}) and moisture flux (shaded, units: $\text{g kg}^{-1} \text{m s}^{-1}$) at 900 hPa at 0800 BJT 23 July. (b) Longitude–pressure cross section of the moisture flux divergence (units: $10^{-7} \text{g hPa}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) along the typhoon center at 0800 BJT 23 July. (c), (d) As in (a), but for 0200 BJT 24 July and 1400 BJT 24 July

点进行了分析, 阐明天气背景、不同系统配置及水汽输送对 Matmo 台风系统的结构以及对降水强度和落区的影响, 有以下初步结论:

(1) Matmo 登陆台湾以及福建的路径主要受副高外围引导气流影响, 在副高断裂时, 大陆副高减弱, 但海上副高中心强度仍然很强, 并且稳定在东海附近, 此时 Matmo 主要受位于副热带高压西侧偏南气流影响, 以偏北行为主, 但由于同时受到大陆副高东侧偏北气流的阻挡作用, Matmo 北移速度缓慢, 且冷暖空气对峙导致持续降水发生。

(2) Matmo 登陆福建期间, 南海上空有明显的西南急流, 孟加拉湾和南海的水汽能够被不断输送到台风内部, 利于 Matmo 登陆后的维持。Matmo 在登陆福建前后, 台风上空一直维持着深厚的涡旋结构。福建东南部上空的上升区与台湾海峡及福建西部附近的下沉运动区形成明显的垂直环流圈。受地形影响, Matmo 登陆后的风场的不对称结构更加

明显。Matmo 登陆福建前后呈现出低层强烈辐合、高层辐散的动力场分布形态, 且辐合层次主要集中在 600 hPa 以下。Matmo 登陆后二级环流的“抽吸作用”使垂直上升运动加强的同时, 又加强了对流层中层凝结潜热的释放, 这种垂直结构及环境风速的弱垂直切变均有利于 Matmo 的维持和发展。在 Matmo 登陆前后, 其环流内还有重力波活动出现, 触发暴雨。

(3) Matmo 登陆福建前后主要的水汽来源为孟加拉湾、南海以及西太副高南侧两条水汽输送通道。南海季风爆发期间的西南季风水汽输送有利于 Matmo 登陆后给福建附近带来持续性强降水; Matmo 登陆福建期间, 福建上空为高层水汽辐散、低层水汽辐合, 这种配置有利于台风降水强度的维持, 而水汽凝结潜热的释放也有利于 Matmo 维持不消。

本文只是粗略地从环流背景场考虑 Matmo 登

陆福建前后的变化,主要是从环流场和动力场来分析 Matmo 对福建附近造成的降水,并没有充分考虑能量场以及非绝热加热对台风结构强度的影响,以及台风中重力波的活动等,他们对台风的影响其实是不容忽视的。另外也要考虑地形的作用,例如,在本文中并没有分析的 Matmo 登陆福建时浙闽山脉的强迫抬升作用以及云物理作用等,这些过程都还需要进行高分辨的数值模拟,都是本工作后续的主要研究内容。最后,虽然文中提到了台风的不对称结构,尤其是登陆时的不对称结构,但是目前各国学者对于造成这种不对称结构的原因并没有一个统一的解释,这方面也还需要进行更深入的分析研究。

参考文献 (References)

- 白莉娜, 何敏, 王元, 等. 2010. 西北太平洋风速垂直切变异常对热带气旋活动年际变化的影响 [J]. 气象学报, 68 (6): 877–884. Bai Li'na, He Min, Wang Yuan, et al. 2010. The influence of the vertical wind shear variation on interannual changes in the tropical cyclone activity in the western North Pacific [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 68 (6): 877–884, doi:10.11676/qxb2010.083.
- Braun S A. 2006. High-resolution simulation of hurricane Bonnie (1998). Part II: Water budget [J]. J. Atmos. Sci., 63 (1): 43–64, doi:10.1175/JAS3609.1.
- 陈国民, 沈新勇, 刘佳. 2010. 垂直风切变对热带气旋强度及结构的影响 [J]. 气象研究与应用, 31 (1): 1–4. Chen Guomin, Shen Xinyong, Liu Jia. 2010. Role of vertical wind shear on tropical cyclone intensity and structure [J]. Journal of Meteorological Research and Application (in Chinese), 31 (1): 1–4, doi:10.3969/j.issn.1673-8411.2010.01.001.
- 陈联寿, 丁一汇. 1979. 西太平洋台风概论 [M]. 北京: 科学出版社, 1–26. Chen Lianshou, Ding Yihui. 1979. Introduction to the Western Pacific Typhoons (in Chinese). [M]. Beijing: Science Press, 1–26.
- 陈佩燕, 杨玉华, 雷小途, 等. 2009. 我国台风灾害成因分析及灾情预估 [J]. 自然灾害学报, 18 (1): 64–73. Chen Peiyan, Yang Yuhua, Lei Xiaotu, et al. 2009. Cause analysis and preliminary hazard estimate of typhoon disaster in China [J]. Journal of Natural Disasters (in Chinese), 18 (1): 64–73, doi:10.3969/j.issn.1004-4574.2009.01.010.
- Chen S S, Knaff J A, Marks F D. 2006. Effects of vertical wind shear and storm motion on tropical cyclone rainfall asymmetries deduced from TRMM [J]. Mon. Wea. Rev., 134 (11): 3190–3208, doi:10.1175/MWR3245.1.
- 程正泉, 陈联寿, 徐祥德, 等. 2005. 近 10 年中国台风暴雨研究进展 [J]. 气象, 31 (12): 3–9. Cheng Zhengquan, Chen Lianshou, Xu Xiangde, et al. 2005. Research progress on typhoon heavy rainfall in China for last ten years [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 31 (12): 3–9, doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2005.12.001.
- Corbosiero K L, Molinari J. 2002. The effects of vertical wind shear on the distribution of convection in tropical cyclones [J]. Mon. Wea. Rev., 130 (8): 2110–2123, doi:10.1175/1520-0493(2002)130<2110:TEOVWS>2.0.CO;2.
- 邓国, 周玉淑, 李建通. 2005. 台风数值模拟中边界层方案的敏感性试验 I: 对台风结构的影响 [J]. 大气科学, 29 (3): 417–428. Deng Guo, Zhou Yushu, Li Jiantong. 2005. The experiments of the boundary layer schemes on simulated typhoon. Part I: The effect on the structure of typhoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (3): 417–428, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.03.09.
- 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, 49–64. Ding Yihui. 1989. The Diagnostic and Analysis Method in Synoptic Dynamics (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 49–64.
- Djath B, Verron J, Melet A, et al. 2014. Multiscale dynamical analysis of a high-resolution numerical model simulation of the Solomon Sea circulation [J]. J. Geophys. Res., 119 (9): 6286–6304, doi:10.1002/2013JC009695.
- 端木宏, 陈联寿, 梁建茵, 等. 2014. 台风登陆前后异常变化的研究进展 [J]. 气象学报, 72 (5): 969–986. Duan Yihong, Chen Lianshou, Liang Jianyin, et al. 2014. Research progress in the unusual variations of typhoons before and after landfalling [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 72 (5): 969–986, doi:10.11676/qxb2014.085.
- Fillion L. 2002. Variational assimilation of precipitation data and gravity wave excitation [J]. Mon. Wea. Rev., 130 (2): 357–371, doi:10.1175/1520-0493(2002)130<0357:VAOPDA>2.0.CO;2.
- 黄明凤, 殷桂兰, 刘伟. 2014. 彭泽县 2014 年台风“麦德姆”暴雨天气过程诊断分析 [J]. 南方农业, 8 (33): 189–191. Huang Mingfeng, Yin Guilan, Liu Wei. 2014. The diagnosis of the meteorological process of the rainstorm caused by typhoon Matmo in County Pengze [J]. South China Agriculture (in Chinese), 8 (33): 189–191.
- Koch S E, Golus R E, Dorian P B. 1988. A mesoscale gravity wave event observed during CCOPE. Part II: Interactions between mesoscale convective systems and the antecedent waves [J]. Mon. Wea. Rev., 116 (12): 2545–2569, doi:10.1175/1520-0493(1988)116<2545:AMGWEO>2.0.CO;2.
- 雷小途, 陈联寿. 2001. 斜压大气中热带气旋运动特征的动力分析 [J]. 地球物理学报, 44 (4): 467–476. Lei Xiaotu, Chen Lianshou. 2001. Dynamic studies on the role of baroclinic processes in tropical cyclone movement [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese) 44 (4): 467–476, doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2001.04.005.
- 李麦村. 1978. 重力波对特大暴雨的触发作用 [J]. 大气科学, 2 (3): 201–209. Li Maicun. 1978. Studies on the gravity wave initiation of the excessively heavy rainfall [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 2 (3): 201–209, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1978.03.03.
- Li T, Fu B. 2006. Tropical cyclogenesis associated with Rossby wave energy dispersion of a preexisting typhoon. Part I: Satellite data analyses [J]. J. Atmos. Sci., 63 (5): 1377–1389, doi:10.1175/JAS3692.1.
- 李耀辉, 寿绍文. 2000. 一次江淮暴雨的 MPV 及对称不稳定研究 [J]. 气象科学, 20 (2): 171–178. Li Yaohui, Shou Shaowen. 2000. A study on MPV and symmetric instability during a torrential rain process [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 20 (2): 171–178, doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2000.02.008.
- 刘汉华, 寿绍文, 周军. 2007. 非地转湿 Q 矢量的改进及其应用 [J]. 南京气象学院学报, 30 (1): 86–93. Liu Hanhua, Shou Shaowen, Zhou Jun.

2007. Improvement and application of ageostrophic wet Q -vector [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 30 (1): 86–93, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2007.01.012.
- Lowag A, Black M L, Eastin M D. 2008. Structural and intensity changes of hurricane Bret (1999). Part I: Environmental influences [J]. Mon. Wea. Rev., 136 (11): 4320–4333, doi:10.1175/2008MWR2438.1.
- McBride J L, Zehr R. 1981. Observational analysis of tropical cyclone formation. Part II: Comparison of non-developing versus developing systems [J]. J. Atmos. Sci., 38 (6): 1132–1151, doi:10.1175/1520-0469(1981)038<1132:OAOTCF>2.0.CO;2.
- Nuissier O, Rogers R F, Roux F. 2005. A numerical simulation of hurricane Bret on 22–23 August 1999 initialized with airborne Doppler radar and dropsonde data [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 131 (605): 155–194, doi:10.1256/qj.02.233.
- 施望芝, 毛以伟, 王建生, 等. 2006. 台风降水云区中单站强降水诊断分析和预报 [J]. 气象科学, 26 (6): 668–675. Shi Wangzhi, Mao Yiwei, Wang Jiansheng, et al. 2006. Diagnostic analysis and forecast of heavy rainstorm at single station about precipitation cloud area of typhoon [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 26 (6): 668–675, doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2006.06.013.
- Shukla J, Saha K R. 1974. Computation of non-divergent streamfunction and irrotational velocity potential from the observed winds [J]. Mon. Wea. Rev., 102 (6): 419–425, doi:10.1175/1520-0493(1974)102<0419:CONDSA>2.0.CO;2.
- Srinivas C V, Yesubabu V, Venkatesan R, et al. 2010. Impact of assimilation of conventional and satellite meteorological observations on the numerical simulation of a bay of Bengal tropical cyclone of November 2008 near Tamilnadu using WRF model [J]. Meteor. Atmos. Phys., 110 (1–2): 19–44, doi:10.1007/s00703-010-0102-z.
- 汪汇洁, 陆维松, 邵海燕, 等. 2009. 一次梅雨期苏北大暴雨的时空结构及其非线性亚临界对称不稳定 [J]. 南京气象学院学报, 32 (2): 287–297. Wang Huijie, Lu Weisong, Shao Haiyan, et al. 2009. Analysis of spatial-temporal structures and nonlinear subcritical symmetric instability in a heavy rainstorm in North Jiangsu [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 32(2): 287–297, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2009.02.016.
- 王志烈. 1981. 亚洲上空西风带长波槽对西太平洋台风路径的影响 [J]. 大气科学, 5 (2): 198–206. Wang Zhilie. 1981. The influence of the westerly belt long-wave trough over Asia on the western Pacific typhoon tracks [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 5 (2): 198–206, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1981.02.09.
- 吴国雄, 蔡雅萍. 1997. 风垂直切变和下滑倾斜涡度发展 [J]. 大气科学, 21 (3): 273–282. Wu Guoxiong, Cai Yaping. 1997. Vertical wind shear and down-sliding slantwise vorticity development [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 21 (3): 273–282, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1997.03.03.
- 吴立广, 梁佳. 2009. “莫拉克”台风登陆过程的数值模拟 [C]//2009 年海峡两岸气象科学技术研讨会论文集. 北京: 中国气象学会. Wu Liguang, Liang Jia. 2009. Numerical simulation of the landfall process in typhoon Morakot [C]// Proceedings of Conference on Meteorological Science and Technology of Chinese Mainland and Taiwan (in Chinese). Beijing: Chinese Meteorological Society.
- 吴蓁, 范学峰, 郑世林, 等. 2008. 台风外围偏东气流中的暴雨及其等熵位涡特征 [J]. 高原气象, 27 (3): 584–595. Wu Zhen, Fan Xuefeng, Zheng Shilin, et al. 2008. Rainstorm in the east airflow of typhoon Periphery and its isentropic potential vorticity character [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27 (3): 584–595.
- 徐明, 余锦华, 赖安伟, 等. 2009. 环境风垂直切变与登陆台风强度变化关系的统计分析 [J]. 暴雨灾害, 28 (4): 339–344. Xu Ming, Yu Jinhua, Lai Anwei, et al. 2009. A statistical analysis on the relations between effect of wind vertical shear and landing typhoons intensity [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 28 (4): 339–344.
- 徐文慧, 倪允琪. 2009. 登陆台风环流内的一次中尺度强对流过程 [J]. 应用气象学报, 20 (3): 267–275. Xu Wenhui, Ni Yunqi. 2009. A strong mesoscale convective process in landfalling typhoon [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 20 (3): 267–275, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2009.03.002.
- 于玉斌, 姚秀萍. 2000. 对华北一次特大台风暴雨过程的位涡诊断分析 [J]. 高原气象, 19 (1): 111–120. Yu Yubin, Yao Xiuping. 2000. The diagnosis analysis of potential vorticity for a severe typhoon rainstorm in North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 19 (1): 111–120, doi:10.3321/j.issn.1000-0534.2000.01.014.
- 于玉斌, 陈联寿, 杨昌贤. 2008. 超强台风“桑美”(2006)近海急剧增强特征及机理分析 [J]. 大气科学, 32 (2): 405–416. Yu Yubin, Chen Lianshou, Yang Changxian. 2008. The features and mechanism analysis on rapid intensity change of super typhoon Saomai (2006) over the offshore of China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (2): 405–416, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.02.18.
- 于玉斌, 赵大军, 陈联寿. 2015. 干冷空气活动对超强台风“桑美”(2006)近海突然增强影响的数值模拟研究 [J]. 热带气象学报, 31 (1): 21–31. Yu Yubin, Zhao Dajun, Chen Lianshou. 2015. Effect of dry cold air activity on the offshore rapid intensification of super typhoon Saomai (2006): A numerical simulation research [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 31 (1): 21–31, doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2015.01.003.
- 余贞寿, 高守亭, 任鸿翔. 2007. 台风“海棠”特大暴雨数值模拟研究 [J]. 气象学报, 65 (6): 864–876. Yu Zhenshou, Gao Shouting, Ren Hongxiang. 2007. A numerical study of the severe heavy rainfall associated with the typhoon Haitang (0505) [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 65 (6): 864–876, doi:10.3321/j.issn.0577-6619.2007.06.004.
- Zehr R M. 1992. Tropical cyclogenesis in the western North Pacific [D]. Ph. D. dissertation, Colorado State University.
- Zehr R M. 2003. Environmental vertical wind shear with hurricane Bertha (1996) [J]. Wea. Forecasting, 18 (2): 345–356, doi:10.1175/1520-0434(2003)018<0345:EVWSWH>2.0.CO;2.
- 张兴旺. 1998. 湿 Q 矢量表达式及其应用 [J]. 气象, 24 (8): 3–7. Zhang Xingwang. 1998. An expression of the wet Q vector and application [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 24 (8): 3–7.
- 赵付竹, 王凡, 郑艳. 2013. “纳沙”、“尼格”强度和结构差异对海南暴雨分布的影响 [J]. 广东气象, 35 (2): 14–20. Zhao Fuzhu, Wang Fan, Zheng Yan. 2013. The effects of intensity and structure differences between typhoons “NESAT” and “NALGAE” on the distribution of

- rainstorm in Hainan Island [J]. Guangdong Meteorology (in Chinese), 35 (2): 14–20, doi:10.3969/j.issn.1007-6190.2013.02.003.
- 郑秀云, 章秋英, 孙琼博, 等. 2015. 1410 号台风“麦德姆”暴雨诊断分析 [C]//第 31 届中国气象学会年会. 北京: 中国气象学会. Zheng Xiuyun, Zhang Qiuying, Sun Qiongbo, et al. 2015. The diagnosis of heavy rain caused by typhoon Matmo (1410) [C]// The 31th Annual Meeting of Chinese Meteorological Society (in Chinese). Beijing: Chinese Meteorological Society.
- 周冠博, 崔晓鹏, 高守亭. 2012. 台风“凤凰”登陆过程的高分辨率数值模拟及其降水的诊断分析 [J]. 大气科学, 36 (1): 23–34. Zhou G B, Cui X P, Gao S T. 2012. The high-resolution numerical simulation and diagnostic analysis of the landfall process of typhoon Fungwong [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (1): 23–34, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.01.03.
- 朱洪岩, 陈联寿, 徐祥德. 2000. 中低纬度环流系统的相互作用及其暴雨特征的模拟研究 [J]. 大气科学, 24 (5): 669–675. Zhu Hongyan, Chen Lianshou, Xu Xiangde. 2000. A numerical study of the interactions between typhoon and mid-latitude circulation and its rainfall characteristics [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24 (5): 669–675, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.05.11.