

颜玲, 周玉淑, 王咏青. 2019. 相似路径台风 Soudelor (1513) 与 Matmo (1410) 登陆前后的降水分布特征及成因的对比分析 [J]. 大气科学, 43 (2): 297–310.
Yan Ling, Zhou Yushu, Wang Yongqing. 2019. Analysis on different characteristics of precipitation distribution during the landing of typhoon “Soudelor” (1513) and typhoon “Matmo” (1410) with similar tracks [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43 (2): 297–310, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1805.17292.

相似路径台风 Soudelor (1513) 与 Matmo (1410) 登陆前后的降水分布特征及成因的对比分析

颜玲^{1,2} 周玉淑^{2,3} 王咏青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, 北京 100049

摘 要 利用欧洲气象中心 (ERA-interim) 再分析资料以及中国气象局观测站点的实况降水观测结合 CMORPH 卫星反演的逐时降水资料, 对比分析了路径类似的 1513 号台风 Soudelor 和 1410 号台风 Matmo 在登陆福建前后期间的降水分布特征以及造成登陆台风暴雨强度和落区差异的原因, 得到以下初步结论: Soudelor 和 Matmo 移动路径相似, 但在登陆福建的过程中对浙、闽地区造成的降水强度和分布差异明显, 如 Soudelor 造成的总降水强度比 Matmo 大, 且 Soudelor 的强降水在登陆前主要分布在台风路径的右侧, 台风中心的偏北方向, 登陆以后主要在台风的偏北以及东北方向; 而 Matmo 登陆前降水基本均匀分布在路径两侧, 强降水区位于台风中心的西北方向, 登陆福建以后向北移动的过程中强降水区转向台风中心的北边; 不同的大尺度环流背景也会导致登陆过程中不同的降水分布特征, Soudelor 影响期间副热带高压比较强盛, 并阻断它与中纬度西风槽的作用, 而 Matmo 登陆北上过程中逐渐减弱并汇入河北上空的西风槽中, 所以登陆后期 Matmo 的降水比 Soudelor 强; Soudelor 和 Matmo 台风登闽前后低层水汽输送及东风急流差异是导致大暴雨落区差异的原因之一, Matmo 的水汽输送主要来自孟加拉湾及南海, 而 Soudelor 登陆前东部有来自另一个台风 Molave 的水汽输送, 登陆后强水汽输送通量区及水汽辐合带位于 Soudelor 偏北侧, 这与 Soudelor 登陆造成的暴雨在中心偏北方向一致; 南亚高压相对于台风的位置也会影响降水, Soudelor 登陆时, 大兴安岭上空大槽前的偏西风急流与南部高压西北侧的西南急流一起使得它登陆后减弱速度变缓, 有利于台风暴雨的维持, 而 Matmo 高空受急流造成的气旋性切变流场加速了台风的减弱; 此外, 台风自身的结构和强度变化以及登陆后维持时间不同也是造成两次过程降水差异的主要原因之一, 台风暖心结构的强度以及台风高层暖心减弱的速度对台风降水有一定影响, 但对登陆时台风暴雨的不对称分布影响较小; Soudelor 登闽过程中, 涡度场强度比 Matmo 大, 且维持一个深厚的垂直对称结构, 登闽后期附近的辐合上升气流主要位于中心东侧, 而 Matmo 在登闽过程中, 低层的强辐合区和上升运动区始终偏西, 造成二者降水分布的不同。

关键词 登陆台风 暴雨结构演变 水汽输送 对比分析

文章编号 1006-9895(2019)02-0297-14

中图分类号 P445

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1805.17292.

Analysis on Different Characteristics and Causes of Precipitation Distribution during the Landing of Typhoon “Soudelor” (1513) and Typhoon “Matmo” (1410) with Similar Tracks

收稿日期 2017-11-29; 网络预出版日期 2018-07-02

作者简介 颜玲, 女, 1994 年出生, 博士研究生, 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、41475097、41875070

Funded by National Basic Research Program of China (973 Program) (Grant 2015CB452804), National Natural Science Foundation of China (Grants 41661144024, 41475054, 41475097, 41875070)

YAN Ling¹, ZHOU Yushu^{2,3}, and WANG Yongqing¹

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 University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049

Abstract Different characteristics of typhoon Soudelor (1513) and typhoon Matmo (1410) are analyzed before and after they made landfalls in Fujian based on reanalysis data of the ECMWF ERA-Interim and CMORPH data (which is derived from station observations and satellite retrievals of precipitation). The two typhoons shared similar tracks but showed different features of precipitation intensity and distribution. The results indicate that the discrepancy between rainfall distributions of the two TCs (tropical cyclone, the same hereafter) is much more evident after they made landfalls in Fujian Province. And one of the primary causes is the difference in the intensity and maintenance time after their landfalls. Furthermore, differences in large-scale circulation background may lead to different consequences. For Soudelor, the large-scale steering flow of the subtropical high was strong enough to cut off the interaction between Soudelor and the mid-latitude westly trough. However, the steering flow was relatively weak for Matmo, and thus it moved into the mid-latitude trough while passing by Hebei Province, resulting in precipitation enhancement. Besides, changes of heavy rainfall area were related to differences in low-level moisture transport and jet flow. For Matmo, the water vapor mainly came from the Bay of Bengal and the South China Sea, whereas Soudelor took water vapor transported from another tropical storm Molave (1514). Sufficient water vapor transport and distinct moisture convergence zone were locate to the north or northeast of Soudelor. In addition, the position of the typhoon with respect to the South Asia high also affected the location of the torrential rain area. The weakening of Soudelor after its landfall was slowed down by the joint effects of the westerly jet stream in front of the trough over the Greater Khingan Mountains and the southwesterly jet stream on the northwestern side of the South Asia high. In contrast, the cyclonic shear flow created by the upper-level jet accelerated the extinction of Matmo during its northward movement process. The result also shows that the difference in the dynamic structure of the typhoons before and after their landfalls is another reason for the different characteristics of precipitation distribution. The decrease of the warm core intensity of Soudelor was much more distinct during its landing, yet the vertical structure of the vorticity maintained deep and symmetric and stronger than that of Matmo. The dominant area of strong convergence and updraft was located to the east of the center of Soudelor, especially in the late stage of its lifetime, whereas the area was deflected to the west of the center of Matmo throughout its landing process.

Keywords Landfall typhoon rain, Comparative analysis, Evolution of structure, Transport of water vapor

1 引言

中国受台风灾害影响极为严重, 其中, 台风暴雨是台风灾害的主要表现形式之一, 而登陆台风暴雨往往对我国沿海城市人民的生命财产造成重大威胁, 比如经常性伴随台风暴雨而来的洪涝、滑坡和泥石流等次生灾害常给人类社会造成巨大冲击, 经济损失动辄数以亿元计(陈联寿和丁一汇, 1979; 陶诗言, 1980)。因此, 登陆台风暴雨的研究一直是大气科学研究的一个重要方面, 国内外学者针对台风造成的暴雨、环流特征及其数值模拟做了很多工作(陈联寿等, 1997; 孙建华和赵思雄, 2000; 张庆云和彭京备, 2003; 李英等, 2004a, 2004b, 2005;

徐亚梅和伍荣生, 2005; Atallah et al., 2007; Chen, 2011; Villarini et al., 2011)。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, 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, 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。但是在实际的台风暴雨预报业务中, 尤其对于台风登陆区的暴雨强度及分布的预报仍很困难(李江南等, 2003)。因为即使登陆点相近、运行路径相似的两个台风, 彼此降水分布特征、降水强度均可能存在

明显差异, 如范爱芬等(2004)对比分析指出了造成 Chebi (0102)、Toraji (0108) 等三个路径相似的热带气旋出现降雨差异的主要原因是西风带低槽和副热带高压的强弱及其相互配置以及它们与热带气旋的相互作用。梁军等(2006)对移动路径和转向趋势均相似的两个热带气旋 Winnie (9711) 和 Tim (9406) 进行对比分析后, 指出除了地形和海洋的影响, 副热带高压位置、高低空急流和锋区与辽东半岛地区的强降水有直接关系。相似预报法在台风暴雨的预报业务中是最为常用的方法之一(陈剑和孔玉寿, 2004), 但实际上在台风登陆后路径相似个例中暴雨分布有时会有很大差异, 例如对于 2016 年两例路径相似、登陆北上的台风 Nepartak 和 Meranti 而言, Nepartak 登陆之后的“空心化”特征使得它很难造成大范围暴雨(余贞寿等, 2009; 施春红等, 2017)。这是由于影响登陆台风暴雨的关键因子存在个体差异, 从而导致对登陆台风降水的落区和强度预报非常困难。因此, 非常有必要对相似路径的台风暴雨成因进行对比分析和探讨, 这有助于提高对台风暴雨发生机制的认识和预报, 也有助于预报员更加合理地选择重点关注的因子。

1513 号台风 Soudelor 与 1410 号台风 Matmo 就是两个登陆路径非常相似的风暴, 都是先登陆台湾继而登陆福建并经过江西、安徽、江苏四省入海, 且登陆前后都在浙、闽地区沿岸引起明显降水, 但降水分布特点又有明显不同。本文为了着重比较相似路径台风登陆前后的变化, 拟对 Soudelor 和 Matmo 的降水及动热力结构进行天气学诊断分析, 利用中国气象局(CMA)热带气旋最佳路径数据集、中国气象局自动站与 CMORPH 融合的逐时降水量 0.1° 网格数据集(1.0 版)以及欧洲气象资料中心(ERA-interim)的再分析资料(空间分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$, 时间分辨率为 6 h), 探讨造成这两个相似路径台风登陆福建时造成降水分布不同的原因, 以及台风登陆福建前后的动热力结构演变和水汽输送特征的异同点, 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 1513 号台风 Soudelor 与 1410 号台风 Matmo 简介

Soudelor 是 2015 年西北太平洋地区的最强风暴, 其生命史内两度发展出现“双重眼壁”, 对近

年西北太平洋的热带气旋而言甚为罕见。Soudelor 横扫塞班岛及台湾期间造成严重破坏, 而随后登陆中国福建省时亦为当地及邻近的浙江省带来破纪录雨量, 给台湾和东南沿海造成严重人员伤亡和经济损失。而 1410 号台风 Matmo 登陆点一级登陆后的路径与 Soudelor 较为类似, 登陆后虽然持续时间长, 影响范围广, 降水也较强(颜玲等, 2017), 但其带来的降水强度明显弱于 Soudelor 造成的降水。这两个登陆后路径类似但降水强度及分布均有明显不同的台风, 为我们理解和预报我国登陆台风的风雨分布提供了较好个例作为对比分析。

Soudelor 于 2015 年 7 月 30 日晚在西北太平洋洋面上生成, 继而向西北偏西方向移动发展, 于 8 月 8 日凌晨登陆台湾花莲, 中心附近最大风力为 15 级 (48 m s^{-1}), 中心最低气压 950 hPa, 夜间 22:10 (除非特别注明, 本文所有时间为北京时)以中心附近最大风力 13 级 (38 m s^{-1}) 在福建省莆田市登陆, 登陆时依然维持台风等级, 中心最低气压 965 hPa, 进入内陆后逐渐减弱, 9 日减弱为热带低压, 10 日 17:00 停止编号。Matmo 于 2014 年 07 月 18 日凌晨 02:00 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, 23 日 00:15 前后在台湾省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; 在穿过台湾海峡后于 23 日 15:30 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, 25 日 23:00 停止编号(图 1)。

从 2015 年 8 月 3 日中午到 8 月 8 日中午, Soudelor 都维持着中心气压低于 940 hPa、最大风速大于等于 40 m s^{-1} 这样一个比较强的状态。图 1 显示 Soudelor 在海上的强度明显比 Matmo 大, 且强度维持时间很长, 甚至在登陆台湾后强度也并没有明显减弱, 但是在登陆福建后迅速减弱, 并且比 Matmo 减弱得更快, 所以在经过江西、安徽、江苏三省时 Soudelor 的强度比 Matmo 弱。而 Matmo 则是在登陆台湾后强度便迅速减小。Matmo 二次登陆时间间隔大约为 15 h, Soudelor 则大概为 22 h, 二者在台湾海峡移动的时间有明显区别, Soudelor 在洋面上的移动时间长, 对于下垫面水汽的摄取更为有利, 这或许也是 Soudelor 对陆地降水的影响比 Matmo 强的原因之一。

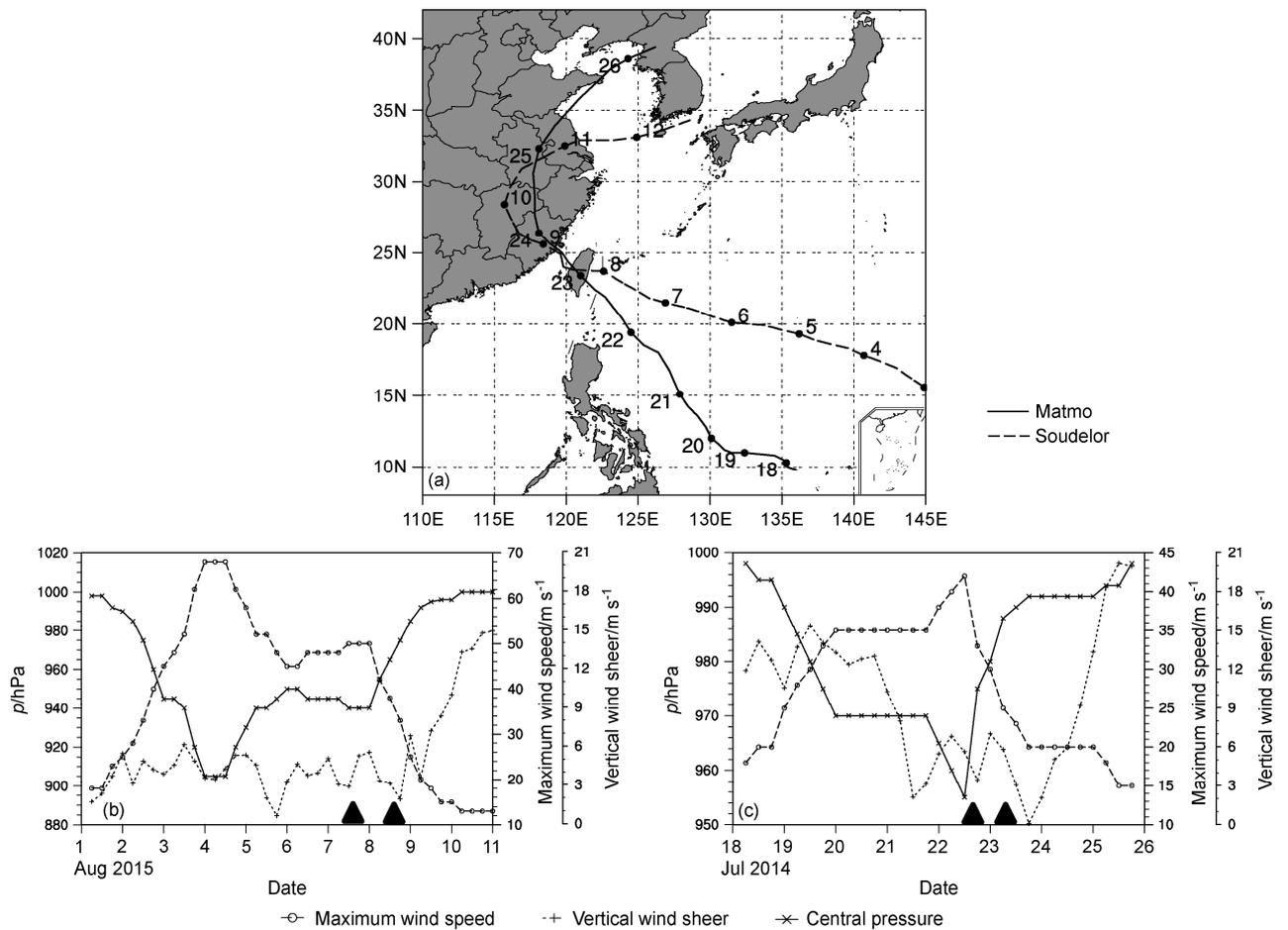


图 1 (a) 台风 Soudelor (虚线) 和 Matmo (实线) 的移动路径; (b) Soudelor 的最大风速 (虚线, 单位: $m s^{-1}$), 中心最低气压 (实线, 单位: hPa) 以及垂直风切变 (点线, 单位: $m s^{-1}$)。第一个黑色实心三角形代表台风登陆台湾的时间, 第二个为登陆福建的时间; (c) 同 (b), 但为 Matmo

Fig. 1 (a) Best TC (tropical cyclone) tracks of typhoon Soudelor (dashed line) and Matmo (solid line); (b) time series of maximum wind speed (dashed line, units: $m s^{-1}$), minimum central pressure (solid line, units: hPa), and vertical wind shear (dotted line, units: $m s^{-1}$) of typhoon Soudelor. The first black solid triangle represents the time when Soudelor landed in Taiwan, while the second represents the time landing in Fujian; (c) same as (b), but for typhoon Matmo

3 Soudelor 和 Matmo 引起的降水强度和区域分布对比

Soudelor 给我国台湾、福建、浙江、江西、安徽、江苏等地区均带来强风暴雨, 从 8 月 7 日 08:00 至 10 日 20:00, 文成、泰顺、平阳等地普遍 300~500 mm, 给浙江带来百年一遇的特大降水。福州 8 月 8 日日降水量 244.4 mm, 刷新该站历史记录, 乌山站 8 月 8 日日雨量高达 244.4 mm, 最大 24 h 雨量 270.5 mm, 为 1946 年有气象记录以来的最高纪录, 晋安站 8 日雨量高达 318.5 mm, 最大 24 h 雨量 360.5 mm, 亦大幅度刷新历史纪录, 福州市区出现大面积特大暴雨, 导致闽江福州市区段水位超警, 晋安河水位暴涨, 进而造成严重城市内涝, 历时长达 38 h, 8 月 7 日 08:00 至 10 日 20:00 温州地

区的总降水量相当于 215 个西湖水量, 这些都属历史罕见。图 3a-c 为 8 月 8~10 日每隔 24 h 一次的 1 h 累计降水, 大陆上受 Soudelor 带来的降水影响最大的为福建、浙江两省, 且强降水多集中在 8~9 日。从 48 h 降水图 (图 2a) 可以看出 Soudelor 在登陆福建的过程中造成的大暴雨主要在福建省东北沿岸以及浙江省东南沿岸, 并且大暴雨落区主要在台风路径右侧, 另外, 6 h 累计降水量 (图 3a-c) 显示, Soudelor 的强降水在登陆前主要分布在台风路径的右侧, 台风中心的偏北方向, 登陆以后主要在台风的偏北以及东北方向, 随着 Soudelor 折向东北进入黄海, 雨带也随之移入安徽、江苏等地。Matmo 在登陆福建 (2014 年 7 月 23 日 15:30 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, 登陆前后 48 h 降水超过 300 mm(图 2b), 23 日 20:00 (图 3e) 的逐小时降水量最大。从 6 h 降水量变化图(图 3d-f) 来看, Matmo 登陆前降水基本均匀分布在路径两侧, 强降水区位于台风中心的西北方向, 登陆福建以后向北移动的过程中强降水区转向台风中心的北边。

根据图 2 和图 3 来看两个台风的降水分布特点, 可以发现, Soudelor 和 Matmo 台风在登陆时都对浙江福建影响产生强降水, 从降水强度来看, Soudelor 在登陆福建前后的 48 h 内累积降水量比 Matmo 大, 且 Soudelor 强降水多集中在浙江南部和福建东北沿海地区, 极值出现在两省交界处, 强降水区主要位于台风路径右侧, 而 Matmo 降水多

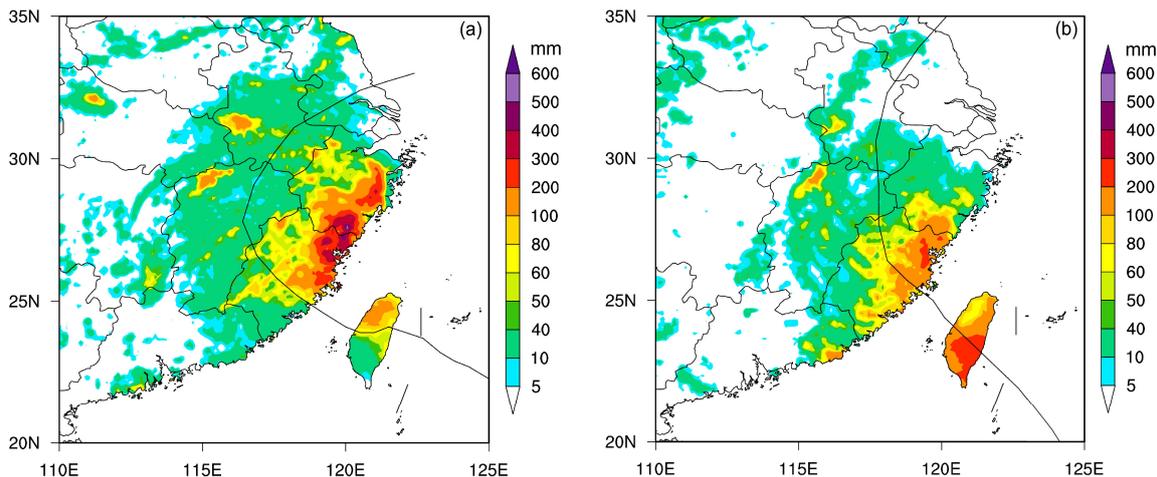


图 2 (a) Soudelor 和 (b) Matmo 台风登陆福建前后的 48 h 累积降水分布(填色表示降水量, 单位: mm; 黑色实线为台风路径)
 Fig. 2 48-h accumulated rainfall before and after typhoon (a) Soudelor and (b) Matmo landed. Shaded areas represent precipitation (units: mm), solid lines represent TC tracks

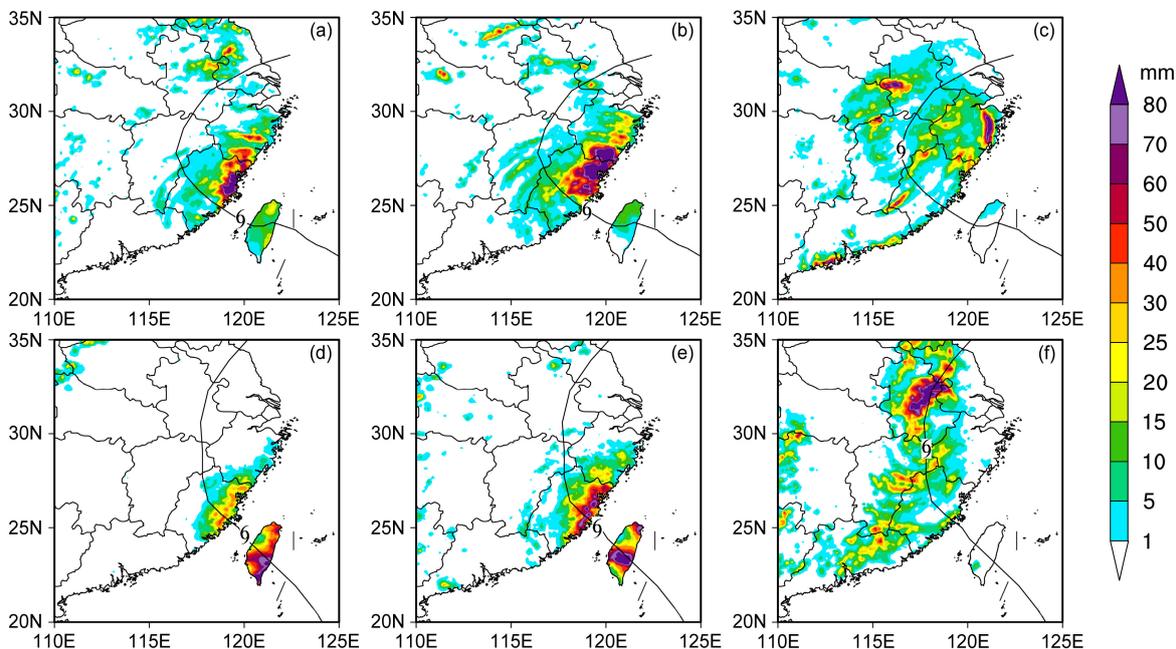


图 3 台风登陆福建前后 Soudelor 在 2015 年 8 月 (a) 8 日 16:00、(b) 8 日 22:00 和 (c) 9 日 22:00 6 小时累积降水分布; 台风登陆福建前后 Matmo 在 2014 年 7 月 (d) 23 日 08:00、(e) 23 日 14:00、(f) 24 日 14:00 6 小时累积降水分布。填色表示降水量, 单位: mm; 黑色实线为台风路径; 台风中心用台风符号表示
 Fig. 3 6-h accumulated rainfall before and after typhoon Soudelor landed in Fujian at (a) 1600 BT (Beijing time) 8 August, (b) 2200 BT 8 August, and (c) 2200 BT 9 August in 2015 ; 6-h accumulated rainfall before and after typhoon Matmo landed in Fujian at (d) 0800 BT 23 July, (e) 1400 BT 23 July, and (f) 1400 BT 24 July in 2014. Shaded areas represent precipitation (units: mm), and solid lines represent TC tracks. The typhoon symbol represents the TC center

集中在福建省沿岸,对浙江影响比 Soudelor 要小,登陆过程中产生的 48 h 总降水基本沿路径对称分布(图 2)。从 6 h 降水量变化图来看,登陆前和登陆福建时 Soudelor 在浙、闽沿岸产生的暴雨强度比 Matmo 大,且 Soudelor 的暴雨范围沿路径的不对称分布更明显,主要在路径的右侧及台风中心的北侧,而 Matmo 的降水则主要在台风中心的西北方向(图 3a-b; 图 3d-e)。陈联寿和丁一汇(1979)指出在台风登陆前后与海岸相交气流受海岸地形作用产生的辐合以及风速的辐合将加强台风中心东侧降雨, Soudelor 登陆福建时沿海地区的强降水中心主要位于台风移动方向的右侧,且主要沿着浙闽丘陵一带,这也说明由于台风登陆造成的降水与地形有很大关系,台风带来的偏东气流与地形辐合从而更有利于迎风坡的降水;而在登陆地点以及登陆路径相似的情况下,对 Matmo 而言,在台风中心的東西两侧都产生了强降水,这说明有比地形更重要的影响因素。登陆福建以后向北移动的过程中, Soudelor 移动速度比 Matmo 慢,所以图 3c 中 Soudelor 强降水主要影响江西、浙江北部以及安徽南部,基本都是台风本体引起的降水,主要影响区域还在 31°N 以南,而图 3f 显示此时受 Matmo 影响的强降水区在安徽省以及江苏北部附近,比 Soudelor 影响范围偏北,尤其在 31°N~33°N 有强降水,这可能还与此时 Matmo 上空 500 hPa 高空槽有关(下文将作详细分析)。

4 天气环流背景分析

一直以来“相似预报法”在台风暴雨业务预报中是常用的方法之一,但实际上在台风登陆后路径相似的个例中暴雨分布有时会有很大差异,因此要对相似路径台风的暴雨成因作对比分析,从而加深对台风暴雨发生机制的认识,进而提高预报水平。本文研究的 Soudelor 和 Matmo 台风登陆后移动路径相似而降水分布明显不同。首先从大尺度环流背景场来看,在登陆台湾之前, Soudelor 受副热带高压(简称副高)南侧偏东气流的引导作用向西移动,快登陆时副高同时受西南侧的 Soudelor 以及南侧的 1514 号热带风暴 Molave 的影响从而北抬至 35°N 附近,其环流控制着江苏、山东、河南以及安徽北部等地,此时 Soudelor 在副高西南侧东南风引导气流作用下继续向西北方向移动继而登陆福建。 Soudelor 影响期间副高发展强盛,即使在登陆时副

高依然西伸至台风的北边从而减小了 Soudelor 与中纬度西风槽的作用,这也是 Soudelor 与 Matmo 在大尺度环流形势上最大的区别。 Soudelor 登陆福建北上的过程中由于 Molave 的影响副高东退很明显,副高中心已移到 150°E 附近,因此在 Soudelor 与 Molave 之间留下一个高压脊(图 4a-c)。

在 1410 号台风 Matmo 登陆台湾之前,西太平洋副热带高压脊线维持在 30°N 以南并逐渐西伸与大陆高压合并, Matmo 在副高西南侧东北气流引导下稳定向西北方向移动。7 月 23 日台风快登陆时,副高主体开始减弱并北抬东退, Matmo 登陆后强度迅速减弱。与 Soudelor 不同的是, Matmo 登陆福建后沿副高西侧北上的过程中副高东退很快,所以在 25 日 02:00 Matmo 逐渐移入河北上空的槽中,表现为台风逐渐减弱消失但是西风槽加强向南发展(图 4f),这也可以用来解释图 3f 中 Matmo 西北部的降水(图 4d-f),此处降水由西风槽和台风环流共同作用造成。而 Soudelor 登陆后期与北部的槽相互作用不大,因此降水多是由 Soudelor 自身环流引起。

5 水汽输送及高空急流

水汽输送充沛是台风造成强降水的前提条件之一,本节将分析两个台风的水汽输送特点及其对应的急流变化对降水差异的影响。

台风 Soudelor 登陆过程中水汽输送主要来自低纬经中南半岛南部到南海的西南偏西水汽输送带,在登陆福建前 24 h 时台风东侧到东北侧盛行偏南—东南风急流,且 Soudelor 东部还有来自 1514 号热带风暴 Molave 的水汽输送,福建北部到浙江上空主要受 Soudelor 北部的东风急流控制,且有水汽辐合(图 5a)。在 Soudelor 登陆福建之前,它的强水汽输送通量场(图 5a 橙红色部分)以及强水汽辐合区(图 5a 等值线密集区)基本呈对称分布。图 5b 可以看出 Soudelor 登陆福建后受 Molave 的影响减弱,此时主要来自南海、台湾海峡以及东海的水汽向 Soudelor 内部输送,台风东北侧急流将东海充沛暖湿气流输送到台风北侧上空(图 5c),该区域上空水汽辐合加强。强水汽输送通量区位于 Soudelor 北侧,强水汽辐合带主要在 Soudelor 北、东北以及东侧,与台风登陆后造成的强降水分布相一致。而向 Matmo 输送水汽的两支通道,一支同样来自低纬, Matmo 与西南季风结合,有很强水汽辐合输送带进入台风环流中,这支水汽输送带明显

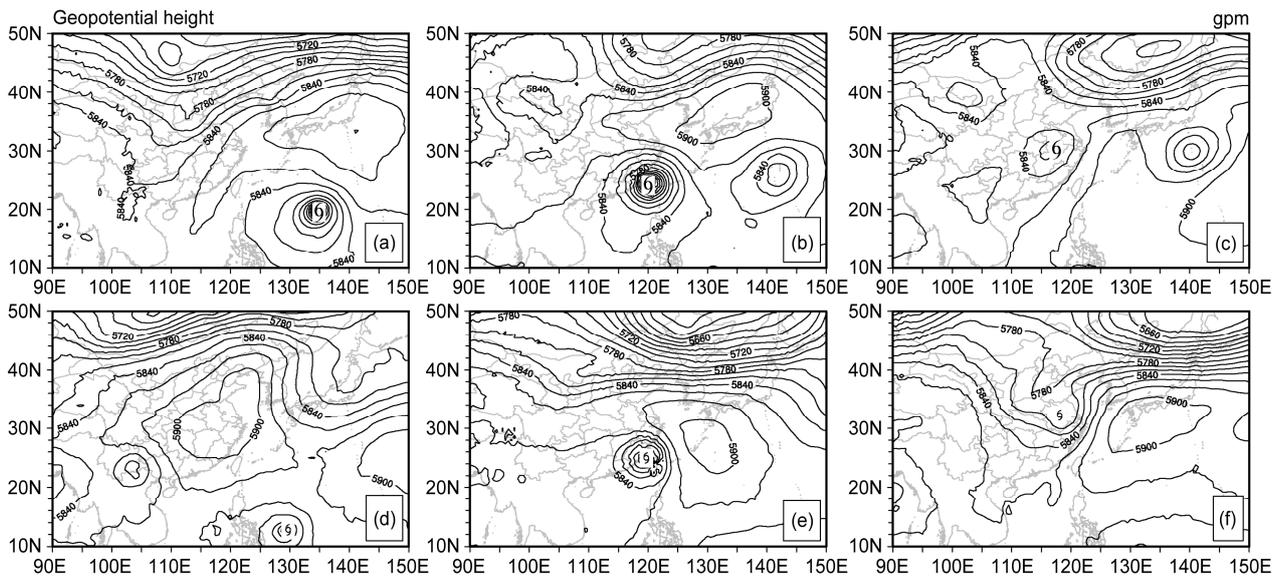


图 4 台风 Soudelor 登陆前后在 2015 年 8 月 (a) 5 日 08:00、(b) 8 日 14:00 和 (c) 10 日 08:00 的 500 hPa 位势高度场 (单位: gpm); 台风 Matmo 登陆前后在 2014 年 7 月 (d) 20 日 08:00、(e) 23 日 14:00 和 (f) 25 日 02:00 的 500 hPa 位势高度场 (单位: gpm)。台风符号为台风中心所在位置
 Fig. 4 Geopotential height (units: gpm) at 500 hPa before and after typhoon Soudelor landed at (a) 0800 BT 5 August, (b) 1400 BT 8 August, and (c) 0800 BT 10 August in 2015; geopotential height (units: gpm) at 500 hPa before and after typhoon Matmo landed at (d) 0800 BT 20 July, (e) 1400 BT 23 July, (f) 0200 BT 25 July in 2014. The typhoon symbol represents the TC center

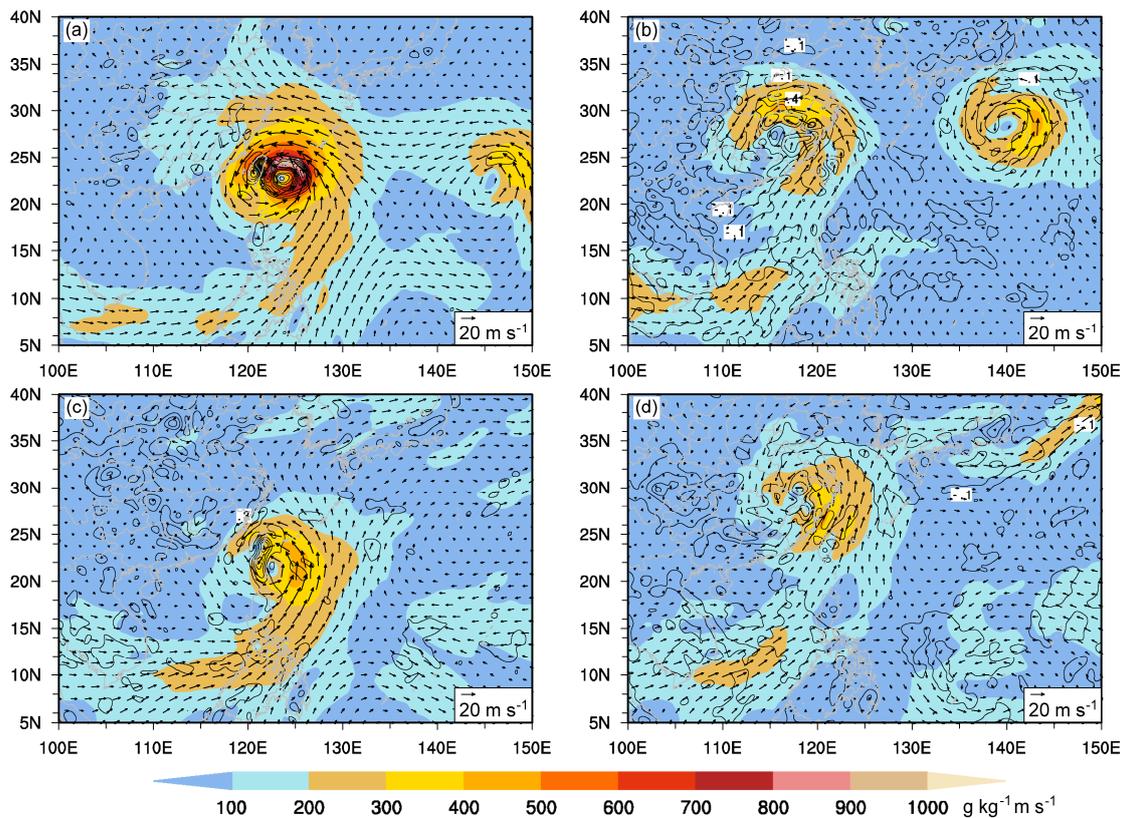


图 5 台风 Soudelor 登陆前后在 2015 年 8 月 (a) 7 日 20:00、(b) 9 日 20:00 以及台风 Matmo 登陆前后在 2014 年 7 月 (c) 22 日 14:00、(d) 24 日 14:00 的 900 hPa 的风场 (矢量, 单位: m s^{-1})、水汽输送通量 (填色, 单位: $\text{g kg}^{-1} \text{m s}^{-1}$)。等值线为水汽辐合带
 Fig. 5 Wind fields (arrows, units: m s^{-1}) and moisture fluxes (shaded, units: $\text{g kg}^{-1} \text{m s}^{-1}$) at 900 hPa before and after typhoon Soudelor (top row) and Matmo (bottom row) landed: (a) 2000 BT 7 August 2015, (b) 2000 BT 9 August 2015, (c) 1400 BT 22 July 2014, (d) 1400 BT 24 July 2014. Contours represent vapor convergence zone

较 Soudelor 强盛,由此可见, Matmo 在登陆福建前 24 h 时的水汽输送主要来自孟加拉湾及南海,而 Soudelor 更多是自身环流夹带的水汽,因此 Matmo 登陆后强度迅速减弱,登陆后维持时间比 Soudelor 短,在陆上的 48 h 总降水量也比 Soudelor 小(图 2)。从图 5c-d 也可看出,与 Soudelor 不同的是, Matmo 在登陆福建之前强水汽输送通量场已经呈不对称分布,东侧为强水汽输送区,而西侧台湾岛地形的辐合抬升作用使得它周围的水汽辐合最强。登陆福建后受下垫面摩擦作用, Matmo 强度迅速减弱,水汽输送强度随之减小,但不对称分布依然明显,强水汽输送通量区在 Matmo 东侧,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。此时浙闽上空的强水汽辐合以及强水汽输送通量有利于降水。

夏季 200~100 hPa 附近,在亚洲和太平洋地区,南亚高压是一个重要的行星尺度环流系统。在 2015 年 8 月 7 日 20:00 Soudelor 登闽前,由于大兴安岭上空大槽南伸使得南亚高压已分裂为两个中心,其中一

个中心在高原西侧的 25°N 附近,另一个中心在东海附近,高空反气旋环流因此扩展到西太平洋热带地区,在我国东部地区高空造成有利于台风维持的高层辐散流场,高空辐散的抽吸作用对登陆台风低压的垂直运动和低空辐合上升运动有正贡献,从而提供一个有利于暴雨维持的条件场。图 6a 可见,此时 Soudelor 在南亚高压西南侧的东南气流控制下,高空辐散中心与台风中心基本重合,200 hPa 依然维持着气旋性环流; Matmo 登闽前(图 6d),200 hPa 南亚高压强大,南亚高压中心在 35°N 附近,位置比 Soudelor 时偏北、偏东。Matmo 处在南亚高压东南侧,其环流西北侧有强的东北气流,强辐散区范围比 Soudelor 小。Soudelor 登陆时依然在南亚高压西南侧,高压单体强度减弱,强辐散场在台风中心北部,仍维持明显气旋性环流,此时大兴安岭上空大槽呈东北—西南走向,槽前偏西风急流与南部高压西北侧的西南急流一起,给 Soudelor 环流的高层流出提供了高速气流以及一个高层反气旋切变的环境,可使 Soudelor 登陆后减弱速度变缓,有利于暴雨的维持; Matmo 登闽时南

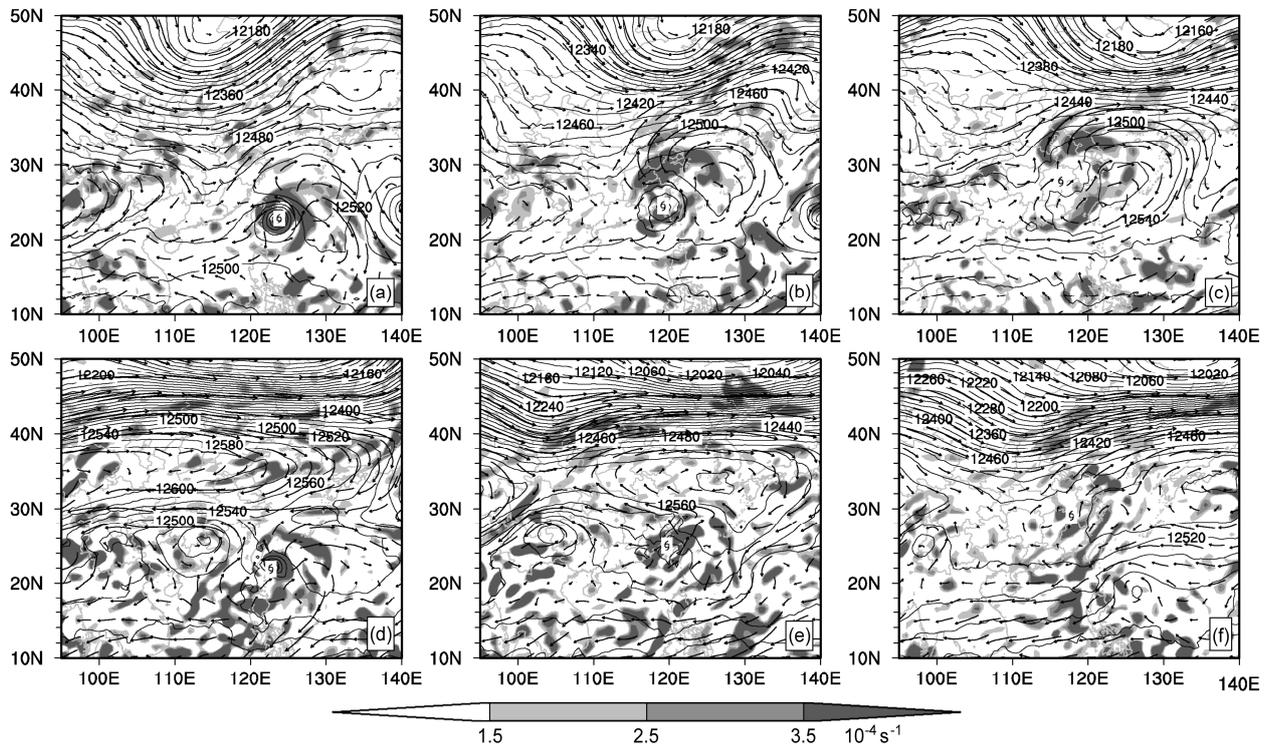


图 6 台风 Soudelor 在 2015 年 8 月 (a) 7 日 20:00、(b) 8 日 20:00、(c) 9 日 20:00 以及台风 Matmo 2014 年 7 月 (d) 22 日 14:00、(e) 23 日 14:00、(f) 24 日 14:00 的 200 hPa 的高度场(等值线,单位: gpm)、风场(矢量,单位: m s^{-1})以及散度场(单位: 10^{-4}s^{-1} , 阴影部分为辐散区)。台风符号为台风中心所在位置

Fig. 6 Distributions of geopotential height (contours, units: gpm), wind (vectors, units: m s^{-1}), and divergence (units: $\times 10^{-4} \text{s}^{-1}$, shaded areas represent divergence) at 200 hPa before and after typhoon Soudelor (top row) landed at (a) 2000 BT 7 August 2015, (b) 2000 BT 8 August 2015, (c) 2000 BT 9 August 2015 and Matmo (bottom row) landed at (d) 1400 BJT 22 July 2014, (e) 1400 BT 23 July 2014, and (f) 1400 BT 24 July 2014. The typhoon symbol represents the TC centers

亚高压分裂为两个高压单体, Matmo 在东边高压的西南侧, 浙闽上空为强辐散区 (图 6b 和 e)。结合降水 (图 3) 可看出, 在两个台风登陆福建时, Soudelor 上空的辐散强度比 Matmo 大, 且 Soudelor 上空的散度场不对称结构明显, 强辐散区偏台风中心北部, 这与降水的不对称分布对应起来。Matmo 登陆后一天, 即图 6f 所示, 此时它与西风急流距离很近, 受南亚高压影响减弱, 由急流造成的气旋性切变流场使得 Matmo 迅速减弱, 强辐散范围变小; 而 Soudelor 上空的 200 hPa 强辐散场依然位于中心北部以及浙闽沿岸, 这也是造成它们登陆过程中产生的暴雨总量不同的原因之一。

可见, 500 hPa 副高位置、中纬度西风槽与台风环流的相互作用、水汽输送源地的差异、西南季风气流对水汽输送的影响、高层南亚高压的位置及急流位置的不同配置, 对登陆后台风暴雨的分布和强度有重要影响。

6 Soudelor 和 Matmo 登陆前后动热力结构对比

台风结构对降水区域和强度有重要影响。图 7a-c 和图 7d-f 分别给出了台风 Soudelor 和台风

Matmo 中心附近的温度距平垂直剖面图, 图中的值是温度距平值, 具体计算方法如下: 先求出所研究区域垂直方向每层的温度平均值, 再由每层上各点的温度值减去同一层上的温度平均值。由 Soudelor 的暖心结构变化过程 (图 7a-c) 可看出: 在登陆期间, Soudelor 一直维持一个典型的对称且深厚的台风暖心结构。在登陆前期 (图 7a), 暖中心位于 300 hPa 附近, 最大温度距平为 63°C, 暖心外侧等温线密集, 温度梯度大; 随着 Soudelor 登陆福建 (图 7b), 暖中心向北移动到 250 hPa 附近, 最大温度距平为 53°C, 600 hPa 附近出现一个小的次暖心, 强度有 3°C, 高层的温度最大值附近水平范围分布宽广, 而中下层则只聚集在中心附近的狭窄范围内, 此时依然是典型的台风暖心结构。我们知道台风暖心主要是由水汽凝结释放的潜热加热作用造成 (陈联寿和丁一汇, 1979), 而强的潜热释放反映了较强的降水, 并且按照第二类条件不稳定理论, 台风暖心结构可以使高空形成辐散流场。台风登陆以后如果暖中心不受破坏, 持续不消, 那么会有利于高空辐散的维持, 这也是台风连下暴雨的有利背景。所以强台风降水主要发生在 Soudelor 登陆福建时以及登陆前; 随着 Soudelor 登陆以后向北移动, 在 8 月 9

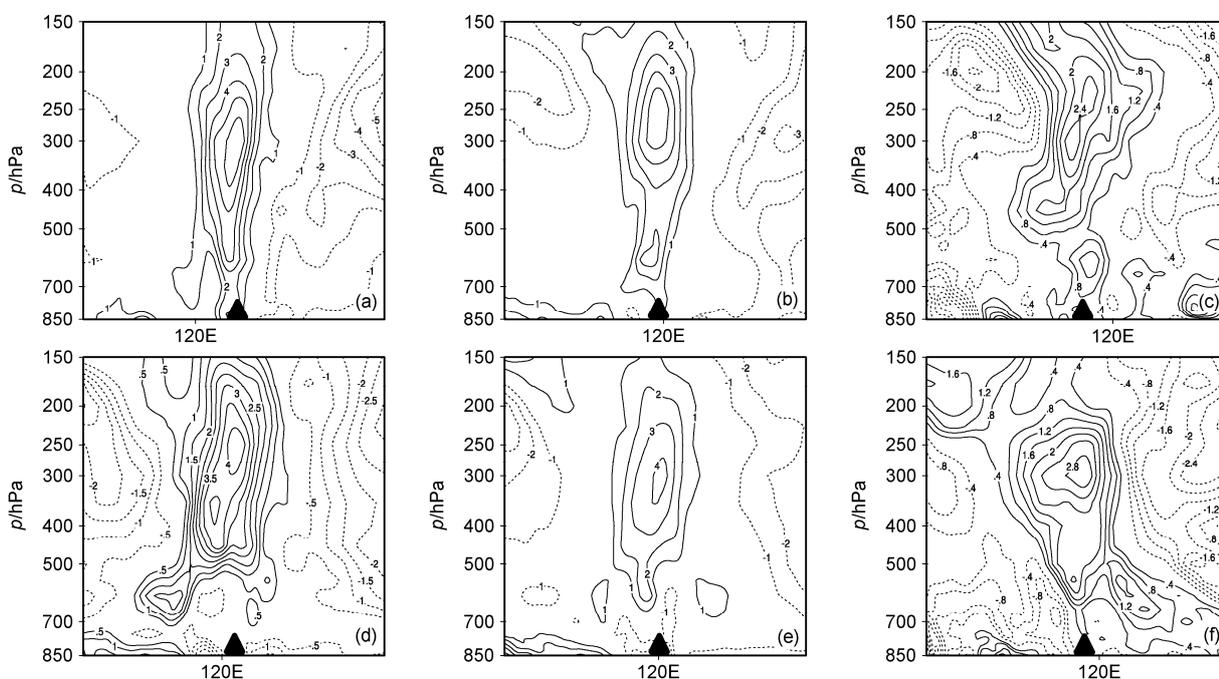


图 7 台风 Soudelor 登陆前后在 2015 年 8 月 (a) 7 日 20:00、(b) 8 日 20:00、(c) 9 日 20:00 以及台风 Matmo 登陆前后在 2014 年 7 月 (d) 22 日 14:00、(e) 23 日 14:00、(f) 24 日 14:00, 温度距平场 (单位: °C) 沿台风中心的经向垂直剖面, 三角形标记为台风中心所在位置

Fig. 7 Longitude–pressure cross sections of temperature anomalies (units: °C) along the center of Soudelor before and after its landing at (a) 2000 BT 7 August 2015, (b) 2000 BT 8 August 2015, (c) 2000 BT 9 August 2015, and along the center of Matmo before and after its landing at (d) 0200 BT 24 July 2014, (e) 1400 BT 24 July 2014, (f) 1400 BT 25 July 2014. The triangles represent the center positions of the two typhoons

日 20:00 (图 7c), 受下垫面摩擦影响, 冷空气从低层逐步侵入台风环流中, 暖心形状已不均匀, 暖心分裂为 2 个, 低层的暖心结构被破坏, 次暖心强度在 600 hPa 附件, 只比周围大气高 1.2°C, 最大温度距平出现在高空 250 hPa 附近, 为 2.4°C, 暖心外侧温度梯度减弱, 台风结构变得松散, 台风降水强度也明显减弱 (图 3c)。Matmo 在登陆福建的过程中的暖心结构变化和 Soudelor 类似, 但进一步对比会发现有很多不同特征, 例如 Matmo 的暖心水平范围比 Soudelor 大, 但暖心强度比 Soudelor 弱 (图 7d-f)。在 Matmo 还未登陆福建时 (图 7d), 其暖心在垂直方向上的结构与 Soudelor 相比是不均匀的, 高层在 250 hPa 和 400 hPa 附近有两个暖中心, 强度都是 4°C, 另外在 400hPa 还有一个次暖心, 位于 Matmo 中心西侧, 强度为 2°C, 且 700 hPa 以下没有暖心出现, 造成这种暖心结构不对称的原因可能是由于下垫面的变化导致 (付驹等, 2011), 此时 Matmo 刚登陆台湾, 受到台湾地形摩擦影响, 因此低层的次暖心结构不对称; 随着 Matmo 登陆福建 (图 7e), 暖中心移到 300 hPa 附近, 强度仍为 4°C, 由图 7b 和图 7e 对比可看出 Matmo 在登陆时的暖心结构比 Soudelor 弱, 垂直范围缩短至 700 hPa 以上; 登陆以后低层暖心结构更加不对称, 300 hPa 附近暖中心强度也减小为 2.8°C。

以上分析可知, 在登陆福建前, Matmo 的暖心结构强度明显弱于 Soudelor, 而同时期的 6 h 降水也显示 Matmo 登陆前在浙闽沿岸造成的暴雨强度比 Soudelor 小 (图 3a-b 和图 3d-e)。登陆以后两个台风的暖心均遭到破坏, 但 Soudelor 的暖心强度减小得更明显, 这与 Knaff et al. (2004) 提到的“热带气旋高空暖心结构会随对应的垂直风切变的增强而减弱”结果一致, 由 (图 1b、c) 可知 Soudelor 在登陆福建之后垂直风切变有增强的过程, 而 Matmo 对应的则是垂直风切变有减弱的过程, 因此可以解释为什么登陆以后 Soudelor 的暖心结构减弱比 Matmo 更明显, 而 Matmo 不仅在高层暖心减弱缓慢, 在边界层附近甚至从原来的冷心转为暖心结构, 6 h 降水显示在登陆以后北上的过程中 Matmo 产生的暴雨强度比 Soudelor 大 (图 3c、f)。另外, 在 Soudelor 登陆过程中, 暖心结构的对称分布并没有和台风路径两侧的暴雨强度和落区的非对称分布对应起来。这说明台风暖心结构的强度以及台风高层暖心减弱的速度对台风降水有一定影响, 但对

登陆时台风暴雨的不对称分布影响较小。

图 8 是 Soudelor 和 Matmo 从登陆福建前 24 h 到登陆福建后 24 h 的涡度、散度以及垂直速度场沿台风中心的纬向剖面随时间变化图。从涡度场来看 (图 8a、b、d、e), 在登闽前到登闽时, Soudelor 的涡度场垂直结构无明显变化, 强度明显比 Matmo 强, 并且维持一个深厚的垂直对称结构, 直到登陆以后涡度场才随着台风强度的减弱而减小; Matmo 在登闽前中心上空的涡度场分布均匀, 但登陆福建时 500 hPa 以下的正涡度中心偏西, 300~500 hPa 在 Matmo 中心东侧上空出现一个正涡度中心, 这与程正泉等 (2010) 研究结果类似, 台风登陆前, 天气尺度涡度场在海洋上分布均匀, 登陆后受地形和陆地上其他天气系统影响, 涡度场会发生改变, 呈非对称分布, 并且当辐合叠加正涡度环流时, 产生的次级环流利于局地涡度增长和暴雨发生。图 8e 就表明此时 Matmo 的涡度场、散度场与垂直速度场的垂直结构均呈明显不对称分布, 且正涡度中心与强辐合中心叠加在 Matmo 中心的西侧, 产生的次级环流以及上升运动均有利于该处暴雨的维持。登陆福建后期 (图 8c 和 f), Matmo 上空的涡度环流却比 Soudelor 强, 中层的正涡度中心向低层移动, 这是因为 Matmo 登陆向北移动到安徽南部时, 与山东省西侧上空的高空槽相互作用, 使得 Matmo 上空正涡度环流增强, 再与低层的辐合上升气流叠加, 有利于安徽、江苏附近的强降水, 此时沿 Matmo 中心作一个经向剖面图 (图 9), 会发现低层的强上升运动区和强辐合区都偏北, 这与图 3f 的降水分布结果一致。从散度场和垂直速度场来看, Soudelor 登闽前, 不仅涡度场分布比较均匀, 而且中心两侧均为辐合上升运动, 台风眼上空为弱下沉气流, 符合一般成熟台风的基本结构 (图 8a); 而 Matmo 登陆福建前, 700 hPa 以下 (低层) 的强辐合区和上升运动区均偏西, 且综合图 8d、e、f 发现无论是登闽前还是登闽后, 这一特点始终存在。与 Matmo 不同, Soudelor 附近的辐合上升气流主要位于中心东侧, 尤其是在登陆后期更加明显。所以登陆前后的热动力结构的不同也是造成 Soudelor 和 Matmo 的降水分布特征不同的原因之一。

7 小结与讨论

本文对 1513 号台风 Soudelor 和 1410 号台风 Matmo 在登陆福建前后期间的降水分布特征的不

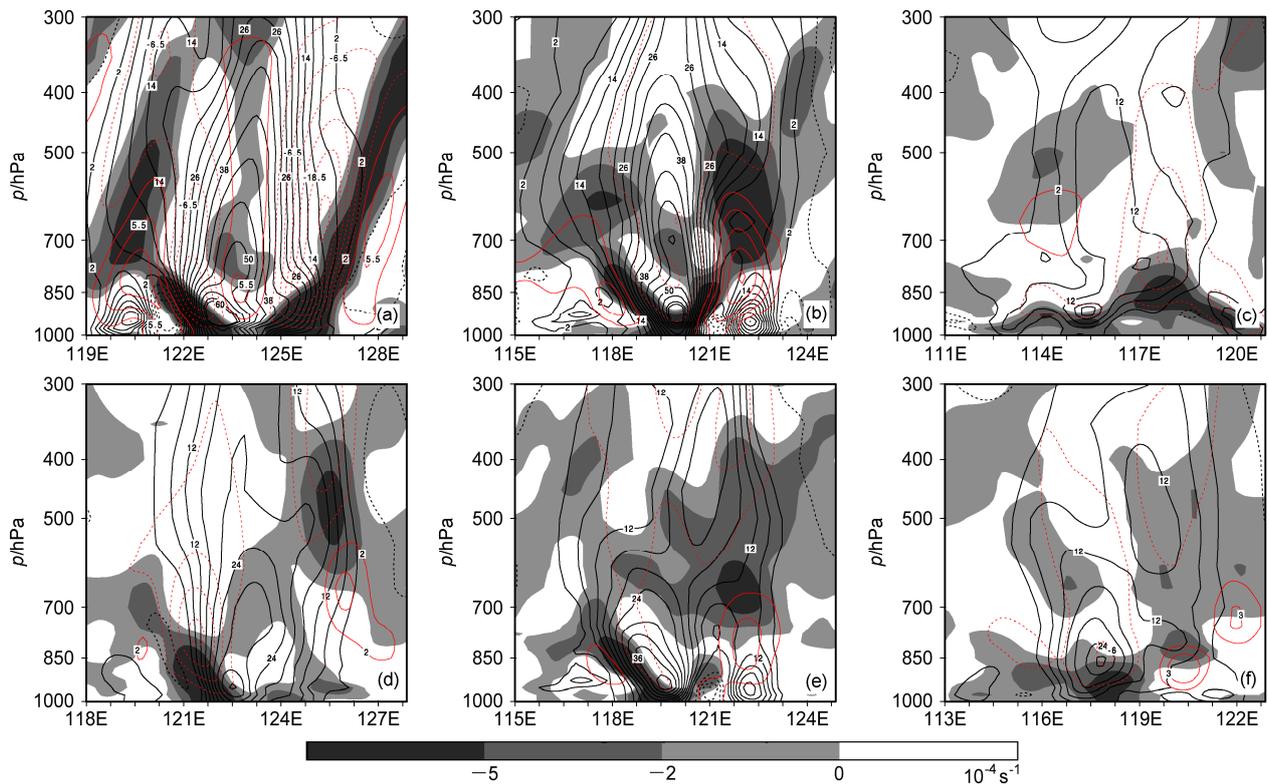


图8 台风 Soudelor 登陆前后在 2015 年 8 月 (a) 7 日 20:00、(b) 8 日 20:00、(c) 9 日 20:00 以及台风 Matmo 登陆前后在 2014 年 7 月 (d) 22 日 14:00、(e) 23 日 14:00、(f) 24 日 14:00 的垂直速度[单位: Pa s^{-1} , 红色等值线, 实(虚)线为正(负)值, 负值代表上升运动]、涡度[单位: 10^{-4} s^{-1} , 黑色等值线, 实(虚)线为正(负)涡度]以及散度(单位: 10^{-4} s^{-1} , 阴影部分为辐合区)沿台风中心的纬向—垂直剖面

Fig. 8 Longitude–pressure cross sections of vertical velocity [units: Pa s^{-1} ; red contours, solid (dashed) lines represent positive (negative) values, and negative values are for ascending motion], vorticity [units: 10^{-4} s^{-1} ; black contours, solid (dashed) lines represent positive (negative) vorticity values], and divergence (units: 10^{-4} s^{-1} , shaded areas represent convergence) along the center of Soudelor before and after its landing at (a) 2000 BT 7 August, (b) 2000 BT 8 August, (c) 2000 BJT 9 August 2015, and along the center of Matmo before and after its landing at (d) 0200 BT 23 July, (e) 1400 BT 24 July, and (f) 1400 BT 25 July 2014

同以及动热力结构变化和水汽输送的异同点进行了分析, 得到以下初步结论:

(1) 台风 Soudelor 和 Matmo 移动路径相似, 先登陆台湾继而登陆福建并经过江西、安徽、江苏四省入海, 都在浙江福建产生强降水, 但在登陆过程中对浙闽地区造成的降水强度和分布差异明显: Soudelor 在登陆福建前后的 48 h 内累积降水量比 Matmo 大, 暴雨区在福建省东北沿岸以及浙江省东南沿岸, 且主要在台风路径右侧, 而 Matmo 降水多集中在福建省沿岸, 对浙江影响比 Soudelor 要小, 且总降水基本沿路径对称分布; 另外, 在登陆前 Soudelor 的暴雨区主要在路径的右侧及台风中心的北侧, 而 Matmo 的降水则主要在台风中心的西北方向。登陆福建以后向北移动的过程中, Soudelor 的暴雨区主要落在台风中心的偏北及东北方向, 而 Matmo 的强降水区渐渐位于台风中心的偏北方向。

(2) Soudelor 和 Matmo 台风登陆前后低层水汽输送及东风急流差异是导致大暴雨落区差异的原因之一。Matmo 在登陆福建前的水汽输送主要来自孟加拉湾及南海, 而 Soudelor 更多是自身环流夹带的水汽, 因此 Matmo 登陆后强度迅速减弱, 登陆后维持时间比 Soudelor 短, 在陆上的总降水量也比 Soudelor 小。另外, Soudelor 登陆前东部有来自 Molave 的水汽输送, 登陆后强水汽输送通量区位于 Soudelor 北侧, 强水汽辐合带主要在 Soudelor 北、东北以及东侧, 因此 Soudelor 登陆造成的暴雨在路径的东侧及台风中心的偏北方向。

(3) 台风本身的强度以及登陆后维持的时间是造成两次过程降水差异的原因之一, Soudelor 在海上的强度比 Matmo 大, 强度维持时间长, 登陆台湾后也并没有减弱, 所以 Soudelor 对陆地降水的影响比 Matmo 强。此外, 不同的大尺度环流背景也会导

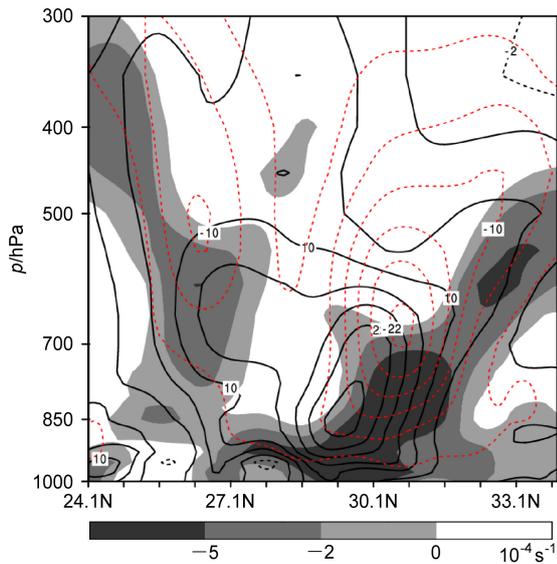


图9 2014年7月25日14:00垂直速度[单位: Pa s^{-1} , 红色等值线, 实(虚)线为正(负)值, 负值代表上升运动]、涡度[单位: 10^{-4}s^{-1} , 黑色等值线, (虚)线为正(负)涡度]以及散度(单位: 10^{-4}s^{-1} , 阴影部分为辐合区)沿台风Matmo中心的经向-垂直剖面

Fig. 9 Latitude-pressure cross sections of vertical velocity [units: Pa s^{-1} ; red contours, solid (dashed) lines represent positive (negative) values, negative values show ascending motion], vorticity [units: 10^{-4}s^{-1} ; black contours, solid (dashed) lines represent positive (negative) vorticity values], and divergence (units: 10^{-4}s^{-1} , shaded areas represent convergence) along the center of Matmo at 1400 BT 25 July 2014

致台风登陆过程中不同的降水分布特征。Soudelor影响期间副高比较强盛,即使在登陆时副高依然西伸至台风的北边从而阻隔了Soudelor与中纬度西风槽的作用, Soudelor的降水主要是自身环流造成的台风降水,而Matmo登陆过程中是逐渐融入河北上空的西风槽,使得低槽向南加强发展, Matmo后期的降水成为西风槽前降水。

(4) 高层南亚高压和急流与台风的相对位置对登陆台风的强度变化和降水有明显影响。登闽前, Soudelor在南亚高压西南侧, Matmo在南亚高压东南侧, 强辐散区范围比Soudelor小, 高空辐散的抽吸作用对登陆台风低压的垂直运动和低空辐合上升运动有正贡献, 从而提供一个有利于暴雨维持的条件场, 所以登陆前Matmo的降水强度比Soudelor小; 登陆时, 大兴安岭上空大槽前的偏西风急流与南部高压西北侧的西南急流一起, 给Soudelor环流的高层流出提供了高速气流以及一个高层反气旋切变的环境, 可使Soudelor登陆后减弱速度变缓, 有利于暴雨的维持, 且此时Soudelor上空的散度场

不对称结构明显, 强辐散区偏台风中心北部, 这与降水的不对称分布对应起来; 登陆福建以后向北移动的过程中, Matmo与西风急流距离很近, 受南亚高压影响减弱, 由急流造成的气旋性切变流场使得它迅速减弱, 强辐散范围变小, 而Soudelor上空200 hPa强辐散场依然位于中心北部以及浙闽沿岸, 这也是造成它们登陆过程中在浙闽地区产生的暴雨总量不同的原因之一。

(5) 登陆前后的动热力结构的不同也是造成Soudelor和Matmo的降水分布特征不同的原因之一。在登陆福建前, Matmo的暖心结构强度明显弱于Soudelor, 而Matmo登陆前在浙闽沿岸造成的暴雨强度比Soudelor小。登陆以后Soudelor的暖心强度减小得更明显, 而Matmo不仅在高层暖心减弱缓慢, 在边界层附近甚至从原来的冷心转为暖心结构, 而降水显示在登陆以后北上的过程中Matmo产生的暴雨强度比Soudelor大。另外, 在Soudelor登陆过程中, 暖心结构的对称分布并没有和台风路径两侧的暴雨强度和落区的非对称分布对应起来。这说明台风暖心结构的强度以及台风高层暖心减弱的速度对台风降水有一定影响, 但对登陆时台风暴雨的不对称分布影响较小。从涡度场来看, 在登闽前到登闽时, Soudelor的涡度场垂直结构无明显变化, 强度比Matmo强, 并且维持一个深厚的垂直对称结构, Matmo登陆福建时的涡度场呈明显不对称分布, 且正涡度中心与强辐合中心叠加, 产生的次级环流以及上升运动均有利于该处暴雨的维持, 登陆福建后期Matmo上空的正涡度环流比Soudelor强, 这是因为与高空槽相互作用; 从散度场和垂直速度场来看, Soudelor登闽前中心两侧均为辐合上升运动, 登陆后期附近的辐合上升气流主要位于中心东侧, 而Matmo在登闽过程中, 低层的强辐合区和上升运动区始终偏西, 且登陆后期低层的强上升运动区和强辐合区都偏北, 这与Matmo的降水在台风中心的西北方向一致。

本文主要是从天气学的角度讨论了两次登陆后移动路径较为相似的台风登陆降水过程, 所做分析还较为初步。影响台风降水落区和强度的问题相当复杂, 今后还需通过大量个例的诊断和高分辨数值模拟试验进行更深入的研究。

参考文献 (References)

Atallah E, Bosart L F, Ayyer A R. 2007. Precipitation distribution

- associated with landfalling tropical cyclones over the eastern United States [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 135 (6): 2185–2206, doi:10.1175/MWR3382.1.
- Chen G H. 2011. A comparison of precipitation distribution of two landfalling tropical cyclones during the extratropical transition [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 28 (6): 1390–1404, doi:10.1007/s00376-011-0148-y.
- 陈剑, 孔玉寿. 2004. 卫星云图资料在台风路径相似预报中的应用 [J]. *海洋预报*, 21 (3): 22–28. Chen Jian, Kong Yushou. 2004. The application of satellite nephogram on analog forecast for typhoon track [J]. *Marine Forecasts (in Chinese)*, 21 (3): 22–28, doi:10.3969/j.issn.1003-0239.2004.03.004.
- 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.
- 陈联寿, 徐祥德, 解以扬, 等. 1997. 台风异常运动及其外区热力不稳定非对称结构的影响效应 [J]. *大气科学*, 21 (1): 83–90. Chen Lianshou, Xu Xiangde, Jie Yiyang, et al. 1997. The effect of tropical cyclone asymmetric thermodynamic structure on its unusual motion [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 21 (1): 83–90, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1997.01.09.
- 程正泉, 陈联寿, 李英. 2010. 地形作用对登陆台风螺旋雨带的影响 [C]// 第 27 届中国气象学会年会灾害天气研究与预报分会场论文集. 北京: 中国气象学会. Cheng Zhengquan, Chen Lianshou, Li Ying. 2010. Effect of topography on spiral rain bands of landing typhoon [C]// *Disaster Weather Research and Forecast Session on the Annual Meeting of Chinese Meteorological Society (in Chinese)*. Beijing: Chinese Meteorological Society.
- 端义宏, 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.
- 范爱芬, 李秀莉, 董加斌. 2004. 三个路径相似降雨特征不同的热带气旋分析 [J]. *气象*, 30 (5): 33–37. Fan Aifen, Li Xiuli, Dong Jiabin. 2004. Analysis of three tropical cyclones with similar tracks but different precipitation feature [J]. *Meteorological (in Chinese)*, 30 (5): 33–37, doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2004.05.008.
- 付驹, 董贞花, 谭季青. 2011. 台风登陆前后暖心结构变化的探讨 [J]. *科技通报*, 27 (1): 18–24. Fu Ju, Dong Zhenhua, Tan Jiqing. 2011. Study on the investigation of the variation of the warm core structures for typhoons just before and after landing on the mainland of the China [J]. *Bulletin of Science and Technology (in Chinese)*, 27 (1): 18–24, doi:10.3969/j.issn.1001-7119.2011.01.005.
- Knaff J A, Seseske S A, DeMaria M, et al. 2004. On the influences of vertical wind shear on symmetric tropical cyclone structure derived from AMSU [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 132 (10): 2503–2510, doi:10.1175/1520-0493(2004)132<2503:OTIOVW>2.0.CO;2.
- 李江南, 王安宇, 杨兆礼, 等. 2003. 台风暴雨的研究进展 [J]. *热带气象学报*, 19 (S1): 152–159. Li Jiangnan, Wang Anyu, Yang Zhaoli, et al. 2003. Advancement in the study of typhoon rainstorm [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 19(S1): 152–159, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2003.z1.017.
- 李英, 陈联寿, 张胜军. 2004a. 登陆我国热带气旋的统计特征 [J]. *热带气象学报*, 20 (1): 14–23. Li Ying, Chen Lianshou, Zhang Shengjun. 2004. Statistical characteristics of tropical cyclone making landfalls on China [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 20 (1): 14–23, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2004.01.002.
- 李英, 陈联寿, 王继志. 2004b. 登陆热带气旋长久维持与迅速消亡的大尺度环流特征 [J]. *气象学报*, 62 (2): 167–179. Li Ying, Chen Lianshou, Wang Jizhi. 2004. The diagnostic analysis on the characteristics of large scale circulation corresponding to the sustaining and decaying of tropical cyclone after its landfall [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 62 (2): 167–179, doi:10.11676/qxb2004.018.
- 李英, 陈联寿, 徐祥德. 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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.01.11.
- 梁军, 陈联寿, 李英, 等. 2006. 影响辽东半岛的热带气旋降水分析 [J]. *热带气象学报*, 22 (1): 41–48. Liang Jun, Chen Lianshou, Li Ying, et al. 2006. The analysis of tropical cyclone precipitation affecting the Liaodong Peninsula [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 22 (1): 41–48, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2006.01.006.
- 施春红, 吴君婧, 漆梁波. 2017. 两例相似路径台风降水差异的成因及预报分析 [J]. *海洋气象学报*, 37 (3): 36–45. Shi Chunhong, Wu Junjing, Qi Liangbo. 2017. Analysis on precipitation difference of two typhoons with similar tracks [J]. *Journal of Marine Meteorology (in Chinese)*, 37 (3): 36–45, doi:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.03.005.
- 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 Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 24 (2): 223–237, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.02.11.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 1–7. Tao Shiyan. 1980. *Heavy Rainfall in China (in Chinese)* [M]. Beijing: Science Press, 1–7.
- Villarini G, Smith J A, Baeck M L, et al. 2011. Characterization of rainfall distribution and flooding associated with U.S. landfalling tropical cyclones: Analyses of hurricanes Frances, Ivan, and Jeanne (2004) [J]. *J. Geophys. Res.*, 116 (D23): D23116, doi:10.1029/2011JD016175.
- 徐亚梅, 伍荣生. 2005. 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 [J]. *大气科学*, 29 (1): 79–90. Xu Yamei, Wu Rongsheng. 2005. The numerical simulation of the genesis of tropical cyclone Bilis (2000): The evolution and transformation of asymmetric momentum [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 29(1): 79–90, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.01.10.
- 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.

- 余贞寿, 陈敏, 叶子祥, 等. 2009. 相似路径热带气旋“海棠”(0505)和“碧利斯”(0604)暴雨对比分析 [J]. 热带气象学报, 25(1): 37-47. Yu Zhenshou, Chen Min, Ye Zixiang, et al. 2009. Analysis of rainstorm associated with similar track tropical cyclones “Haitang” (0505) and “Bilis” (0604) [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 25 (1): 37-47, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2009.01.005.
- 张庆云, 彭京备. 2003. 夏季东亚环流年际和年代际变化对登陆中国台风的影响 [J]. 大气科学, 27 (1): 97-106. Zhang Qingyun, Peng Jingbei. 2003. The interannual and interdecadal variations of East Asian summer circulation and its impact on the landing typhoon frequency over China during summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (1): 97-106, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.01.09.