

杨舒楠,曹勇,陈涛,等,2019.台风苏迪罗登陆次日分散性暴雨成因及预报着眼点[J].气象,45(1):38-49. Yang S N, Cao Y, Chen T, et al, 2019. Causes and focus points of forecasting the scattered rainstorm of Typhoon Soudelor on Day 2 after landing [J]. Meteor Mon, 45(1): 38-49 (in Chinese).

台风苏迪罗登陆次日分散性暴雨成因及预报着眼点*

杨舒楠 曹勇 陈涛 唐健 郭云谦

国家气象中心,北京 100081

提 要: 利用常规气象观测,卫星、雷达资料,数值模式和中央气象台定量降水预报数据以及 FNL 分析数据等对台风苏迪罗的定量降水预报进行检验,探讨台风登陆次日分散性暴雨成因和预报着眼点。苏迪罗登陆次日,暴雨分布相对较分散,各家数值模式对其把握均较差。NMC 的 24 h 定量降水预报虽在模式基础上有较好订正,但仍存在明显的暴雨空、漏报现象:暴雨落区预报较实况偏南,导致南侧空报、北侧漏报。受环境场和台风非对称结构影响,强降水产生的有利动力、水汽条件均位于台风北侧和东部沿海地区。台风东北象限对流层低层存在两条强辐合带,其间为降水较弱的弱辐散和下沉运动区。预报员对台风结构的非对称性及风场的非均匀性把握不足,对台风中心附近和两条辐合带间的弱降水区预报偏强,造成暴雨空报。在地形作用下,浙江沿海不断有强降水产生,随后沿切线方向发展为螺旋雨带并逐渐北扩。预报员对地形不断强迫作用下降水沿螺旋雨带的发展及向外围的扩散没有预期,导致浙江北部暴雨漏报。台风登陆次日分散性暴雨的预报着眼点包括:台风非对称性、风场非均匀性、螺旋雨带发展及地形作用等。非对称性影响较大尺度的降水落区;低层风场非均匀的辐合带及急流分布则引起螺旋雨带的发展、演变,决定了台风的精细强降水落区。除地形对局地降水具有增幅作用外,强降水沿螺旋雨带的发展还会对下游地区产生影响。

关键词: 台风暴雨,分散性暴雨,定量降水预报检验,螺旋雨带,地形

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.01.004

Causes and Focus Points of Forecasting the Scattered Rainstorm of Typhoon Soudelor on Day 2 After Landing

YANG Shunan CAO Yong CHEN Tao TANG Jian GUO Yunqian

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Conventional observation data, quantitative precipitation forecast (QPF) data of numerical weather prediction (NWP) models and NMC forecasters, and NCEP FNL analysis data are employed to verify the QPF and study the causes and forecast focus of the scattered rainstorm of Typhoon Soudelor on Day 2 after landing. On Day 2, rainstorm of Typhoon Soudelor was relatively scarred. QPF of NWP models all had obvious errors. Although 24 h QPF produced by NMC got many good corrections compared with numerical models, it still showed false heavy rainfall alarm or missed rainstorm in detail. Because of the forecasted location of rainstorm was more southerly than observation, there existed false alarm on the south side and missed rainstorm on the north side of the heavy rainfall. Impacted by environmental conditions and asymmetric structure of the typhoon, the favorable dynamical and water vapor conditions distributed in the north side of the typhoon and the eastern coastal areas. There were two strong convergence belts in low-level troposphere in northeast quadrant of typhoon. Between the two convergent belts, weak low-level divergence and downward motion were seen leading to much weaker rainfall in this area. Forecasters underestimated the asymmetry of typhoon structure and the inhomogeneity of wind field. So, for

* 国家重点研发计划(2017YFC1502502)、国家自然科学基金项目(41405051)和国家气象中心预报员专项(Y201704)共同资助

2017年2月7日收稿; 2018年11月26日收修定稿

第一作者:杨舒楠,主要从事灾害性天气预报与研究工作. Email: shunanyoung@163.com

the weak rainfall area around the typhoon center and between two convergence belts, they obviously over-estimated. Induced by topographic effect, heavy rainfall emerged continuously in Zhejiang coastal areas. And then the rainstorm evolved into a spiral rainband along tangential direction and extended northward. Forecasters omitted the tangential evolution and outward transportation of spiral rainband forced by terrain continuously, which resulted in the missing of rainstorm in the north of Zhejiang. The forecast key points of the Day 2 scattered rainstorm included typhoon's asymmetric structure, non-homogeneous distribution of wind, evolution of spiral rainband and terrain effect, etc. Larger-scale heavy rainfall distributions were decided by the asymmetric structure of typhoon, while for refined locations of rainstorm, the evolution of spiral rainband influenced by non-homogeneous low-level convergence and location of low-level jet was very important. Thus, terrain can not only amplify rainfall in local areas, but also have effects on downstream heavy rainfall.

Key words: typhoon rainstorm, scattered rainstorm, quantitative precipitation forecast (QPF) verification, spiral rainband, terrain

引 言

中国是世界上受台风影响最严重的国家之一,平均每年约有 7 个台风在我国登陆,登陆地点主要集中在华南及华东南部沿海地区。台风对中国影响的最重要方面是其所带来的强降水,但在台风的研究和预报中,风雨强度的研究和预报虽已取得不少成果(王咏梅等,2008;许映龙等,2015;谢惠敏等,2016;Wang et al,2016),但相比台风路径预报,风雨预报仍然是台风预报的薄弱环节之一(钮学新等,2005a)。

台风暴雨不仅发生在台风登陆前后,在登陆后的 2~3 d,在有利条件下,深入内陆的台风残余环流仍会产生暴雨或大暴雨,造成严重灾害(程正泉等,2009;任丽等,2013;周福等,2014;梁钊明和王东海,2015)。台风登陆后,影响降水的因素除了台风本身的路径、强度和大小外(刘爱鸣和高珊,2011),台风非对称结构(王瑾等,2007)、地形(梁旭东等,2002;陈俊等,2017)、螺旋雨带发展(余贞寿等,2009)、水汽输送(李英等,2005)、大陆前期热力条件(钮学新等,2005b)、海岸线分布、中低纬系统的相互作用(郭荣芬等,2013;刘建勇等,2014;梁军等,2015)等都会影响台风暴雨的强度和分布特征。

针对台风降水的非对称特征及成因,国内外学者已开展了很多研究工作(陈联寿等,2004;周玲丽等,2011)。孙力等(2015)、岳彩军和曹钰(2014)通过数值模拟研究指出,台风登陆后的强降水主要集中在台风西北侧的能量锋区附近。垂直风切变(Frank and Ritchie,1999;DeMaria,1996)和台风的

移动均能造成台风暴雨的非对称分布(Corbosiero and Molinari,2003;Bender,1997),强降水易在台风移动路径右侧产生。

地形对登陆台风降水的时空分布特征也有明显影响(杨仁勇等,2013;刘少军等,2011;段晶晶等,2017)。华东沿海的地形抬升作用有利于台风东侧对流的产生和加强(朱佩君等,2010)。在地形的强迫增幅作用下,强降水落区经常与地形走向或地形坡度具有较好的对应关系(冀春晓等,2007;黄新晴等,2015)。

螺旋雨带是台风降水的重要特征之一。台风环流中的风场结构水平分布不均匀导致垂直涡度的径向梯度,从而引起涡旋罗斯贝波,涡旋罗斯贝波的叠加和传播是造成螺旋雨带的原因之一(邓莲堂等,2004;康建伟等,2007)。螺旋雨带的发展能够把台风暴雨组织和传播到很远的距离,是台风暴雨预报的难点所在(李英等,2007;朱佩君等,2005)。王勇等(2010)对台风海棠的研究指出,螺旋雨带的非对称结构与水平风场的不均匀分布有关,高低层垂直切变风的辐散场有利于螺旋雨带低层辐合上升运动的发展。

1513 号台风苏迪罗于 2015 年 8 月 7—11 日影响我国,造成 11 个省(市)出现了暴雨、大暴雨天气。中央气象台(NMC)针对“苏迪罗”强降水过程的预报服务工作总体来说较为成功,但由于登陆后第二天台风暴雨分布较分散,给预报带来很大难度,定量降水预报(quantitative precipitation forecast, QPF)准确率下降。本文将对此次台风暴雨过程进行 QPF 检验及诊断分析,并对台风登陆次日 QPF 准确率下降问题进行探讨,总结预报着眼点。

1 资料选取

本文的台风降水观测包括国家级观测站和自动站观测降水。QPF 检验中, 预报员主观预报为 NMC 08 时(北京时, 下同)对外发布的 24 h QPF; 数值模式检验为欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 以下简称 EC)细网格模式, T639 全球模式及美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)模式前一日 20 时起报的 36 h 预报。在对台风登陆次日分散性暴雨成因的诊断分析中, 选用了东南沿海地区雷达拼图资料, 地面自动站观测资料及 NCEP 6 h 间隔、 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的全球再分析资料(Final Operational Global Analysis, FNL)等。

2 台风暴雨过程和 QPF 检验

2.1 台风暴雨过程

2015 年第 13 号台风苏迪罗于西北太平洋洋面生成后以西北路径向我国沿海靠近, 8 月 8 日早晨在台湾登陆, 22:10 在福建莆田再次登陆, 登陆时中心附近最大风力为 13 级($38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 中心最低气压为 970 hPa(台风级别)。登陆后, “苏迪罗”由西北转向偏北方向移动, 强度逐渐减弱, 9 日夜间减弱为热带低压, 10 日下午在安徽境内减弱为低压环流。受“苏迪罗”影响, 8 月 7 日 08 时至 11 日 08 时, 11 个省(市)出现了强降水天气(图 1a), 其中, 浙江中南部、福建东北部、江西西北部、江苏中南部及安徽东部等地过程累积雨量普遍达 100 mm 以上, 局地超过 300 mm(福建周宁为 467.9 mm, 浙江括苍山为 372.7 mm, 江苏大丰为 353.5 mm, 江西庐山为 441.2 mm)。

台风登陆过程中(8 月 8 日 08 时至 9 日 08 时, D1), 已具有明显的非对称结构, 台风北侧和东侧的风速较大(图 2a); 强降水比较集中(图 1b), 主要位于台风移动路径的右侧(浙江南部和福建东北部)。台风登陆后第二天(8 月 9 日 08 时至 10 日 08 时, D2), 非对称性加强, 结构变得松散, 中心气压迅速上升, 风速减小, 等位势高度线变得稀疏, 台风北侧为强偏东风急流(图 2b)。受其影响, D2 台风本体降水较弱, 中心附近(福建西部、江西东部)仅为中到

大雨, 局地暴雨; 但台风外围的北侧和东部沿海地区出现了较强的暴雨、大暴雨天气(图 1c)。10 日, 台风北侧高压坝东退入海, 台风沿高压系统左侧偏南引导气流北上, 与中纬度系统逐渐接近, 台风外围环流与北方回流冷空气间的相互作用(图 2c)导致台风登陆后第三天(8 月 10 日 08 时至 11 日 08 时, D3), 给苏皖地区带来了强降水, 其中江苏中部出现了大暴雨、局地特大暴雨(图 1d)。

对比台风影响过程的逐日降水(图 1b~1d)发现, D1 和 D3 暴雨空间分布均比较集中, 但 D2 的暴雨则非常分散。从降水强度上看(图略), 虽然 D2 的大暴雨和特大暴雨站点数较 D1 略有减少, 但其大雨和暴雨的站点数却明显高于 D1 和 D3。台风登陆次日, 暴雨仍然很强, 暴雨站点分布非常分散, 这给 QPF 带来很大挑战。

2.2 定量降水预报检验

为定量检验台风降水预报, 图 3 给出了 NMC 预报员与数值预报模式(EC, T639, NCEP)的逐日暴雨、大暴雨预报 TS 评分。对于 D1 及 D3 的强降水, 预报员和各家数值模式均有较好表现, 其中预报员的暴雨 TS 评分分别达 0.43 和 0.52, 大暴雨 TS 评分分别达 0.47 和 0.49; 各家模式的暴雨 TS 评分在 0.44~0.56, 大暴雨 TS 评分在 0.32~0.67。但对于 D2 的分散性暴雨, 各家数值模式的 TS 评分均较 D1 和 D3 出现显著下降(图 3), 其中暴雨 TS 评分仅有 0.11~0.23, 有些大暴雨 TS 评分甚至低于 0.07。预报员对 D2 的暴雨和大暴雨预报评分虽然较数值模式有所提高, 但与 D1 和 D3 相比, 预报评分下降十分显著。对于分散性强降水数值模式往往把握较差, 除上述全球模式外, 中尺度模式和集合预报系统等对 D2 的暴雨预报也均出现了较大偏差(图略)。面对数值模式的偏差及暴雨的分散性, 预报员对 D2 暴雨的预报订正难度较大, QPF 评分也出现了下降。

预报员 24 h QPF 误差的空间分布显示(图 4a), 其对安徽南部、福建东北部及浙江东南部沿海的强降水把握较好, 但在浙江北部出现了暴雨漏报, 在浙江西南部、福建西北部和江西东北部等地出现了暴雨、大暴雨空报(图 4a)。对比 EC 模式预报(图 4b), 两者误差分布整体较相似, 但预报员在 EC 基础上有一些较好的订正, 如预报员将浙江东南部和福建东北部沿海的降水量级调大, 其对台风

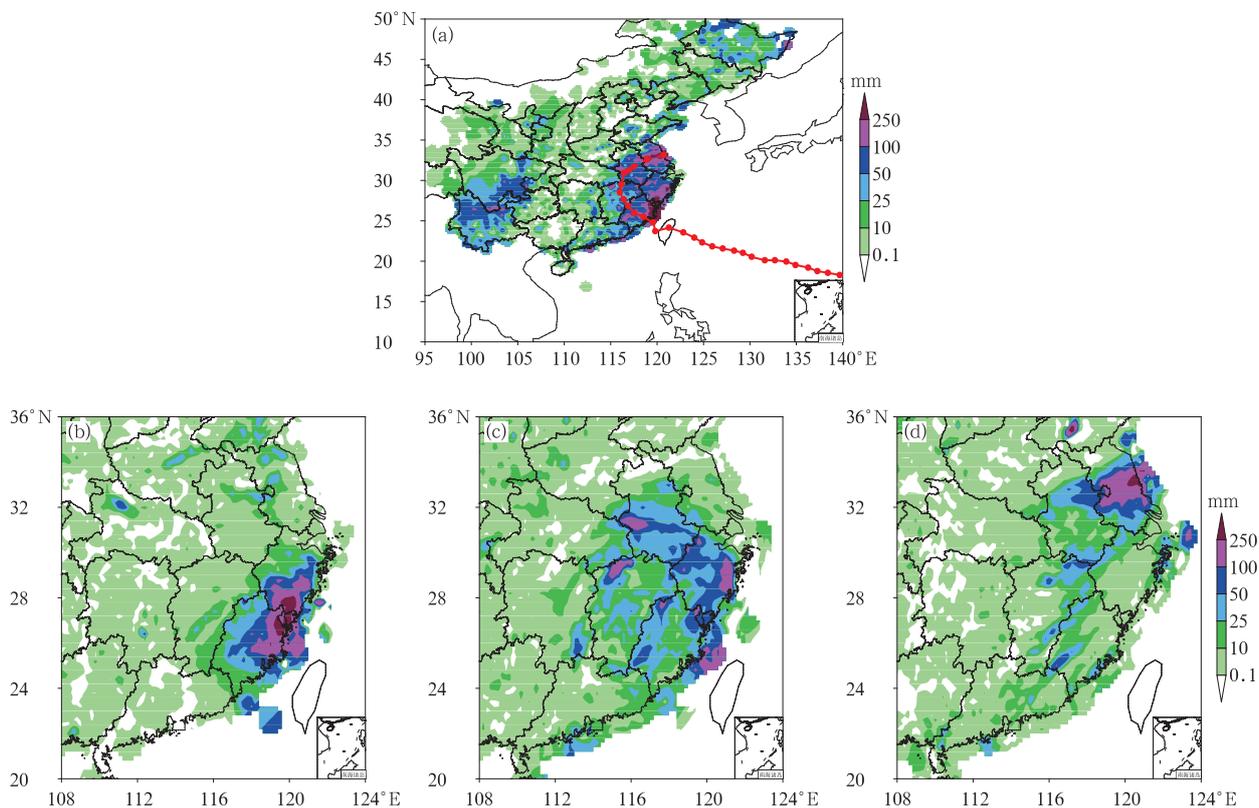


图 1 台风苏迪罗 2015 年 8 月 7 日 08 时至 11 日 08 时过程累积降水量(a,红色圆点为台风路径,虚线为台风停编后低压中心位置),8 日 08 时至 9 日 08 时(b)、9 日 08 时至 10 日 08 时(c)和 10 日 08 时至 11 日 08 时(d)24 h 累积降水量

Fig. 1 (a) Accumulated precipitation from 08:00 BT 7 to 08:00 BT 11 August 2015 and 24 h accumulated precipitation from (b) 08:00 BT 8 to 08:00 BT 9, (c) 08:00 BT 9 to 08:00 BT 10, (d) 08:00 BT 10 to 08:00 BT 11 August 2015 of Typhoon Soudelor (TC track is shown by red dots, and the last four dots linked by dashed line indicate the locations of depression circulation center after Soudelor became tropical depression in Fig. 1a)

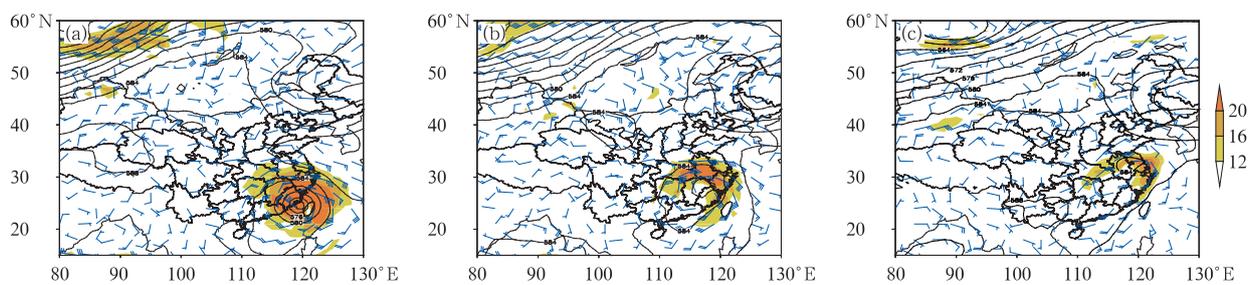


图 2 2015 年 8 月 8 日 20 时(a)、9 日 20 时(b)和 10 日 20 时(c)500 hPa 位势高度场(黑色实线,单位:dagpm)、850 hPa 风场(风向杆)及风速(填色: $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 2 The 500 hPa geopotential height (black solid line, unit: dagpm) and 850 hPa wind (wind barb) and wind speed (shaded area, $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) of Soudelor at (a) 20:00 BT 8, (b) 20:00 BT 9, and (c) 20:00 BT 10 August 2015

东侧的强降水把握明显优于 EC;此外,预报员将台风北侧的暴雨范围扩大,抓住了安徽东南部的暴雨点,减少了暴雨漏报。尽管这些订正提高了暴雨和

大暴雨评分,但其仍存在较大误差,下文将对此次分散性暴雨的成因进行探讨。

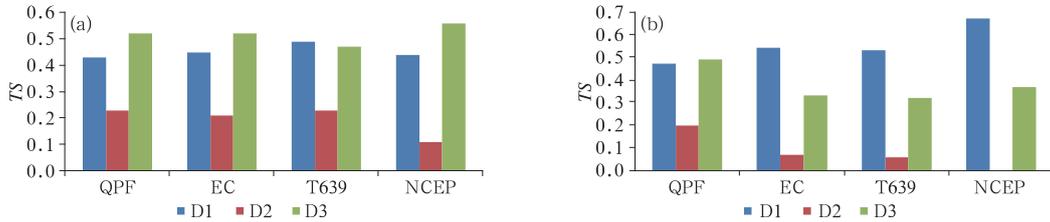


图 3 台风苏迪罗登陆后 D1、D2 和 D3 的 NMC 预报员 24 h QPF 及 EC、T639、NCEP 数值模式 36 h QPF 的暴雨(a)和大暴雨(b)TS 评分

Fig. 3 TS scores of (a) rainstorm (daily rainfall ≥ 50 mm) and (b) heavy rainstorm (daily rainfall ≥ 100 mm) for NMC forecasters' 24 h QPF and EC, T639 and NCEP numerical model 36 h QPF forecasting after Soudelor's landing

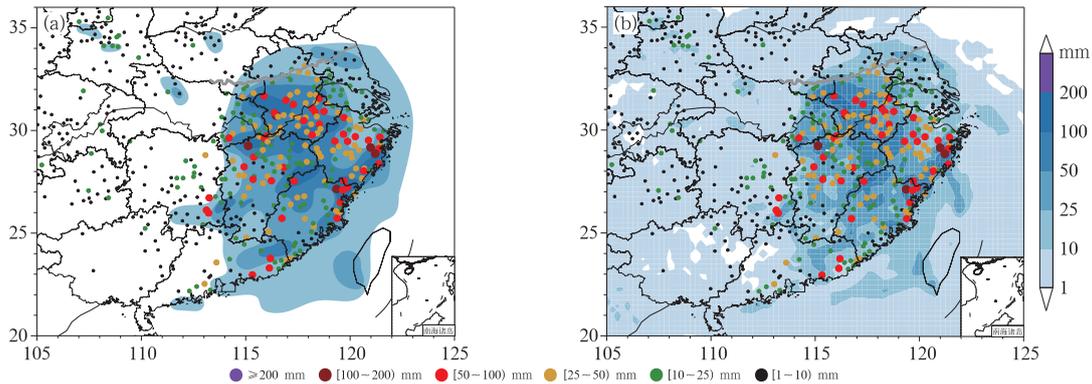


图 4 台风苏迪罗登陆后 D2 预报员 24 h QPF(a)和 EC 模式 36 h QPF(b)检验 (圆点为不同量级的观测降水, 填色为预报降水量)

Fig. 4 Quantitative precipitation forecast verification of (a) 24 h QPF of NMC forecasters and (b) 36 h EC numerical model forecasting

(Colored dots represent observed precipitation of different precipitation grades and forecasted precipitation is shown by shaded area)

3 分散性暴雨成因分析

3.1 大尺度暴雨落区环流形势及热力条件

天气尺度环流形势演变显示,“苏迪罗”登陆我国大陆前,500 hPa 上中高纬地区为两槽一脊形势,我国大陆上淮河以南的广大地区受均压场控制。在台风系统北侧,副热带高压呈带状分布,形成一个高压坝。台风在海洋上以西偏北路径向我国大陆靠近,同时也向带状副热带高压逼近,副热带高压南侧与台风之间的等位势高度线变得越来越密集,在台风北侧逐渐有强东风急流发展,与此同时,由于我国大陆中纬度地区前期处于均压场控制,台风西侧的等压线相对稀疏,从水平风场看,强风速区基本位于台风环流的北侧,而台风中心和西南侧的风速则相对较弱(图 2a,图 5a)。台风北侧的偏东风急流从海洋上带来较强的水汽输送,导致动量、热力高值区均不断在台风北侧发展;而台风西侧和南侧为偏北和偏西风控

制,水汽输送很弱(图 5d),这一区域的动量和热力条件均较弱,台风环流的非对称性进一步加强。

925 hPa 的水平散度分布显示(图 5b),台风北侧和东侧存在两条强辐合带,台风中心由于气旋性环流明显,速度场上也表现为很强的低层辐合,但对流层高层的辐散场上台风中心附近则没有很好的高空辐散相匹配,高空强辐散区主要位于台风北侧及东部沿海地区(图 5c)。而从水汽条件上看,台风中心附近从登陆后始终没有明显的水汽输送,卫星云图(图略)上也显示,台风中心附近的云系非常弱。较强的水汽条件同样位于台风北侧和东侧。因此,受环境场及台风非对称结构的影响,在台风北侧和东部沿海地区,既有有利的动力条件,也有较好的水汽输送,而台风中心附近以及台风环流西南侧的水汽和动力条件均较差,从而导致 D2 的强降水主要位于台风北侧及东部沿海地区(图 1c)。此外,东北地区有东北冷涡活动(图 2),槽后偏北风有利于冷空气或干空气从东路南下,在台风北侧存在明显的露点锋(图略),也有利于台风北侧强降水的产生。

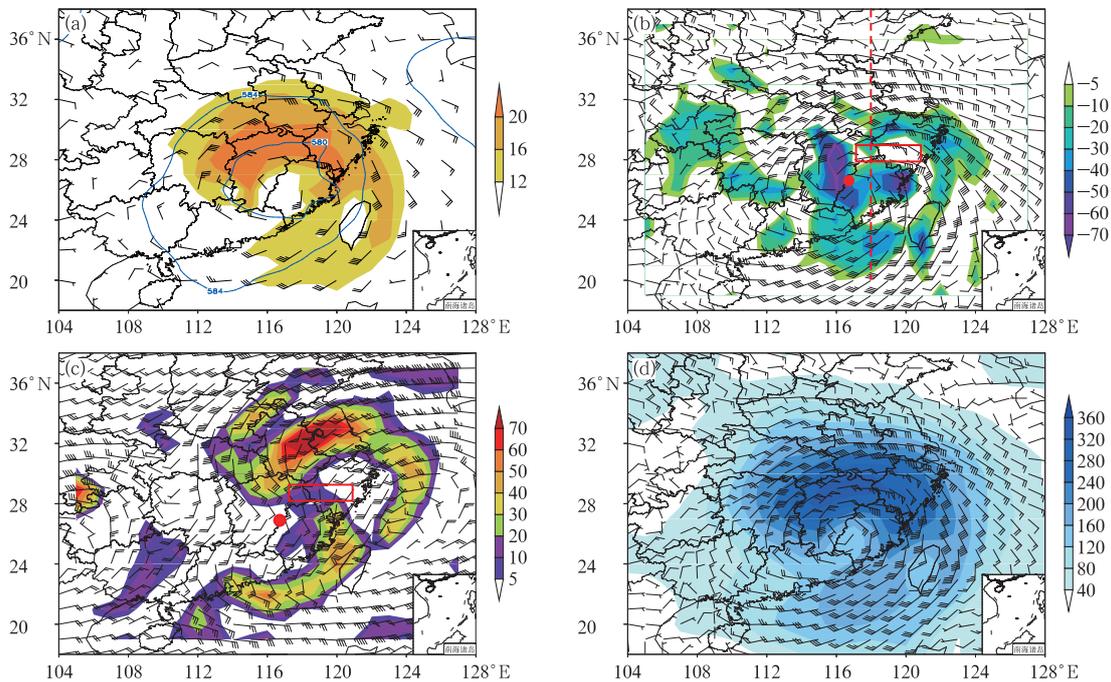


图 5 2015 年 8 月 9 日 14 时(a)500 hPa 位势高度场(蓝色实线,单位:dagpm)、850 hPa 风场(风向杆)及风速(填色; $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), (b)925 hPa 散度(填色,单位: 10^{-5} s^{-1})和风场(风向杆), (c)200 hPa 散度(填色,单位: 10^{-5} s^{-1})和风场(风向杆), (d)850 hPa 水汽通量(填色,单位: $10^{-4} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)和风场(风向杆)

(图 5b 和 5c 中红色圆点代表台风中心,红色方框为弱动力条件区,图 5b 中红色虚线为图 6 垂直剖面位置)

Fig. 5 (a) The 500 hPa geopotential height (blue solid line, unit: dagpm) and 850 hPa wind (wind barb) and wind speed (shaded area, $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), (b) 925 hPa divergence (shaded area, unit: 10^{-5} s^{-1}) and wind (wind barb), (c) 200 hPa divergence (shaded area, unit: 10^{-5} s^{-1}) and wind (wind barb), and (d) 850 hPa water vapor flux (unit: $10^{-4} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and wind (wind barb) of Soudelor at 14:00 BT 9 August 2015

(Red dots and frame in Figs. 5b and 5c indicate the location of TC center and weak dynamic condition zone respectively, vertical cross-section in Fig. 6 is shown in Fig. 5b by dashed red line)

3.2 台风暴雨不均匀分布成因

3.2.1 动力条件的非均匀分布

在 8 月 9 日白天,尽管有利降水产生的动热力和水汽条件均位于台风北侧,但其分布并不均匀。台风东北象限对流层低层(925 hPa)两条强辐合带之间($28^{\circ} \sim 29^{\circ} \text{N}$, $118^{\circ} \sim 120^{\circ} \text{E}$)为辐散区,相应 200 hPa 这一区域为弱辐散或辐合区。不管是对流层低层的辐合带还是对流层高层的辐散区均在 $28^{\circ} \sim 29^{\circ} \text{N}$, $118^{\circ} \sim 120^{\circ} \text{E}$ (以下称为弱动力条件区)出现了断裂(图 5b, 5c),因此该区域的动力条件较差,降水较弱。此时台风的中心位置位于 26.8°N , 116.8°E ,弱动力条件区位于台风中心的东北侧。

图 6 给出了 9 日 14 时,沿 118°E 的水平风速、散度及垂直速度的垂直结构。从图中可以看出, 27°N

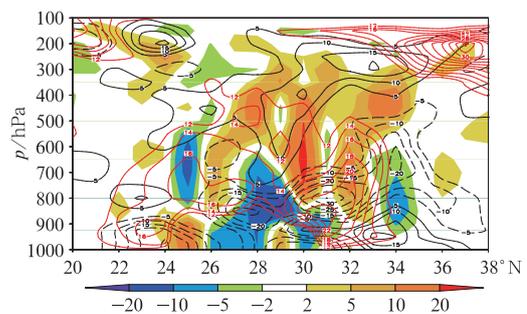


图 6 2015 年 8 月 9 日 14 时沿 118°E 垂直剖面的风速(红色等值线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、散度(黑色等值线,单位: 10^{-5} s^{-1})和垂直速度(填色,单位: $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 6 Vertical distribution of wind speed (red line, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), divergence (black line, unit: 10^{-5} s^{-1}), and vertical speed (shaded area, unit: $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) along 118°E at 14:00 BT 9 August 2015

附近在 700~800 hPa 出现了风速大于 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的较强风速带; 31°N 在 850 hPa 附近水平风速超过了 $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 强风速带十分明显。而在两个强风速带之间的 $28^\circ\sim 29^\circ\text{N}$ 附近风速则相对较弱, 对应着垂直下沉运动。对流层低层具有两个强辐合中心, 分别位于 850 hPa、 27.5°N 和 800 hPa、 31°N , 分别对应着左右两个中尺度强风速带, 而两个急流核之间的区域辐合相对较弱, 这与以往台风暴雨研究中的对流层低层强风速带和台风外围雨带的对应关系(王勇等, 2008; 周海光, 2010)相一致。在对流层高层, 中纬度高空急流核位于 37°N 附近, 高空急流向南延伸至台风北侧。受低层辐合特征的影响, 26° 、 30° 和 32°N 均有垂直上升运动发展, 而对流层低层(700~900 hPa)两条辐合带之间的 $28^\circ\sim 29^\circ\text{N}$ 则为下沉运动, 其动力条件较差, 降水强度明显弱于其他地区。此外, 对于近地面层(900~1000 hPa), 由于台风中心位于 26.8°N , 因此 $26^\circ\sim 28^\circ\text{N}$ 附近受台风眼下沉运动的影响也存在着较强的下沉运动。

预报员在预报时, 考虑到台风环流中心的破坏和非对称性的发展, 增强了台风北侧的降水强度和强降水范围, 取得了较好的订正效果。但是, 对于台

风东北象限动力条件的非均匀性分布考虑明显不足, 对两条强辐合带间的相对风速较弱、辐合条件较差的下沉运动区没有预估能力, 因此造成了在浙江西南部、福建西北部、江西东北部出现了较大范围的暴雨、大暴雨的空报。

3.2.2 螺旋雨带发展及地形作用

华南沿海地区的雷达拼图显示(图 7), 8月9日 08 时, 浙江东南部沿海地区有较强回波(图 7a), 且回波沿切向方向不断发展, 逐渐形成一条明显的螺旋雨带(图 7b)。螺旋雨带在 9 日 11 时位于浙江中南部到安徽南部、江西北部之间(图 7b)。到 9 日 16 时, 雨带开始北推, 浙江南部的强回波消失, 浙江东部沿海到浙江北部地区有强回波发展, 并一直持续到 10 日 00 时(图 7d~7f), 造成了浙江北部的暴雨。从雷达拼图的演变看, 浙江东部偏中沿海地区不断有强回波产生, 并沿切线方向发展, 该地的强回波从 9 日 08 时至 10 日 00 时共持续了 16 h。

强回波不断在浙江东部偏中沿海地区产生, 表明该地区具有明显的对流触发机制。图 8 给出了浙江东部沿海地区的地形分布及自动站观测地面风场和 1 h 累积降水量。由图可见, 在洪家—台州为一

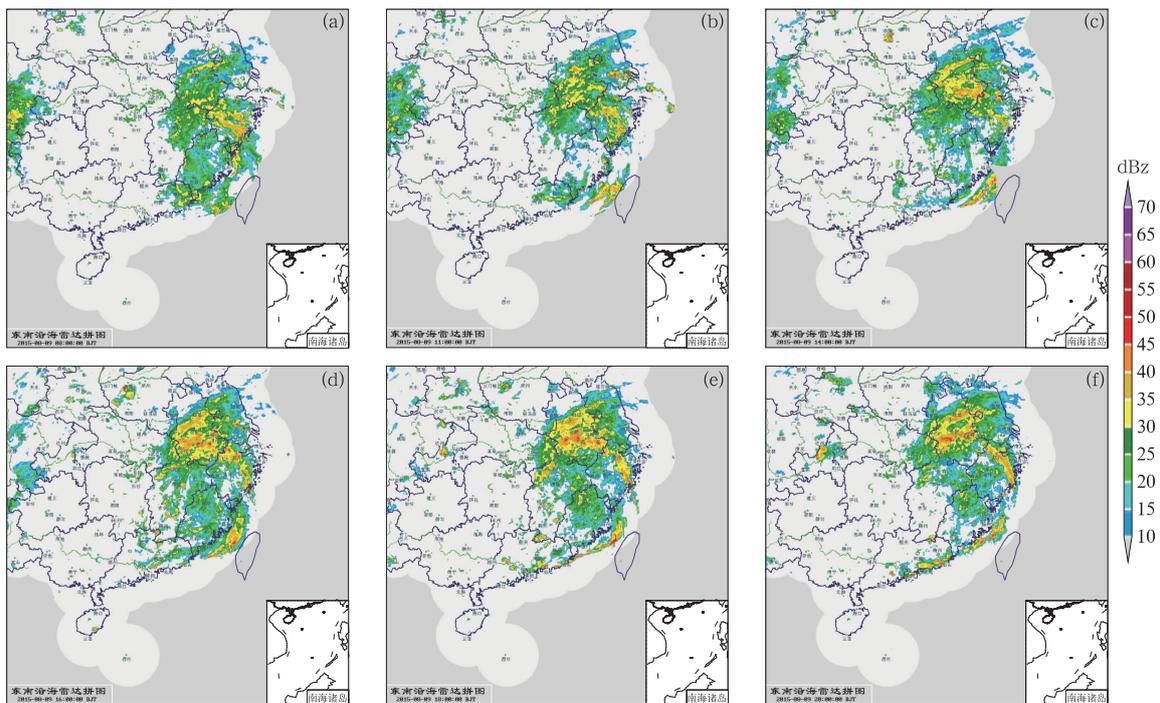


图 7 2015 年 8 月 9 日 08 时(a)、11 时(b)、14 时(c)、16 时(d)、18 时(e)和 20 时(f)东南沿海雷达拼图

Fig. 7 Composition of radar echo images in southeast coastal area of China at (a) 08:00 BT, (b) 11:00 BT, (c) 14:00 BT, (d) 16:00 BT, (e) 18:00 BT, and (f) 20:00 BT 9 August 2015

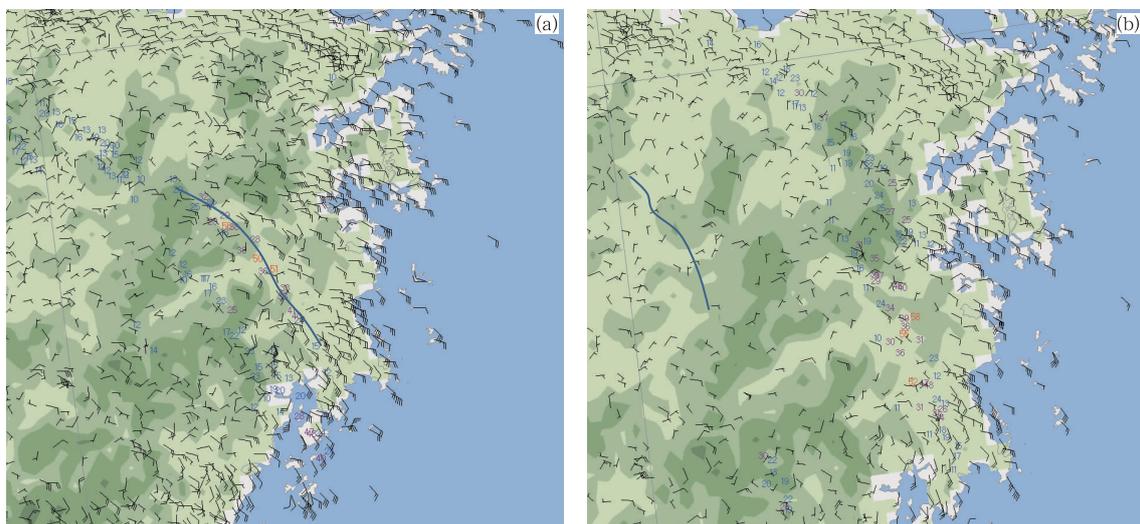


图 8 2015 年 8 月 9 日 16 时(a)和 22 时(b)自动站观测地面风场(风向杆)和 1 h 累积降水量(数值,单位:mm)(填色为地形分布,蓝色线条为地面辐合线)

Fig. 8 Automatic weather station surface wind (wind barb) and 1 h accumulated precipitation (value, unit: mm) at (a) 16:00 BT and (b) 22:00 BT 9 August 2015

(Shaded area represents terrain distribution and blue line shows surface convergence line)

条地势相对较低的山谷,其东侧为台州湾,南北两侧则是括苍山和天台山山脉,山脉之间的山谷地区因地形强迫作用,在台风东北象限的有利动力条件下,不断有地面辐合线发展维持(辐合线南侧为东南风,北侧为偏东到偏北风),导致强降水不断在上述地区产生(图 8)。9 日 16 时,强降水位于山脉间的喇叭口地形处,最大小时雨强达 $58 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。受螺旋雨带发展的影响,山谷地形的下游地区也有较强降水产生,沿台风北侧形成一条螺旋雨带(图 8a)。

针对台风螺旋雨带的理论和数值模拟研究均指出,螺旋雨带的形成与涡旋罗斯贝波有关,涡旋罗斯贝波是一种频散波,其能量会不断向外围扩散,因此螺旋雨带在形成后,会一边围绕热带风暴中心做反时针旋转,一边向外扩展(朱佩君等,2005;余志豪,2002)。8 月 9 日 22 时,山谷地区受地形强迫影响,依然有强降水被激发,但下游地区的强降水已经北推至杭州湾南岸宁波与绍兴之间,同时 $925 \sim 500 \text{ hPa}$ 东南风向内陆推进,东南风与西南风构成的辐合线向北推进,东南风与东北风构成的辐合线向西推进(图 8b)。卫星云图显示(图略),位于浙江北部 122°E 的次螺旋雨带中心在 9 日 15 时位于 29.9°N ,到 21 时,其向北推进至 31.2°N ,两者相差 1.3° ,而台风中心在此阶段则由 26.9°N 移到 27.9°N ,北移

了 1° ,其值小于螺旋雨带北推的距离(1.3°),说明螺旋雨带的北推是台风北移与螺旋雨带向外能量扩散共同造成的,这与朱佩君等(2005)和余志豪(2002)的结论相同。

预报员在制作预报时,考虑到地形的增幅作用并结合前期经验,在浙江沿海地区提高了降水量级,对 EC 预报做出了较好订正,抓住了浙江东部沿海的暴雨和大暴雨点(图 4)。但是,预报员没有考虑到降水沿切线方向螺旋雨带的发展以及螺旋雨带的北扩,因此对于地形下游地区浙江北部的强降水预报把握不足,出现了强降水的漏报。

4 预报着眼点

台风登陆次日,本体降水减弱,暴雨较分散,且影响因素十分复杂,如台风的非对称结构、动力结构的非均匀性、地形及螺旋雨带发展等均会影响强降水,导致数值模式表现较差,预报员订正难度较大。在东急流背景下,分散性强降水预报要特别关注台风东北象限风场的中尺度结构特征、浙江东部沿海的地形增幅作用以及台风外围螺旋雨带的发展演变和低层辐合线的变化。

图 9 总结了“苏迪罗”登陆次日的强降水与影响

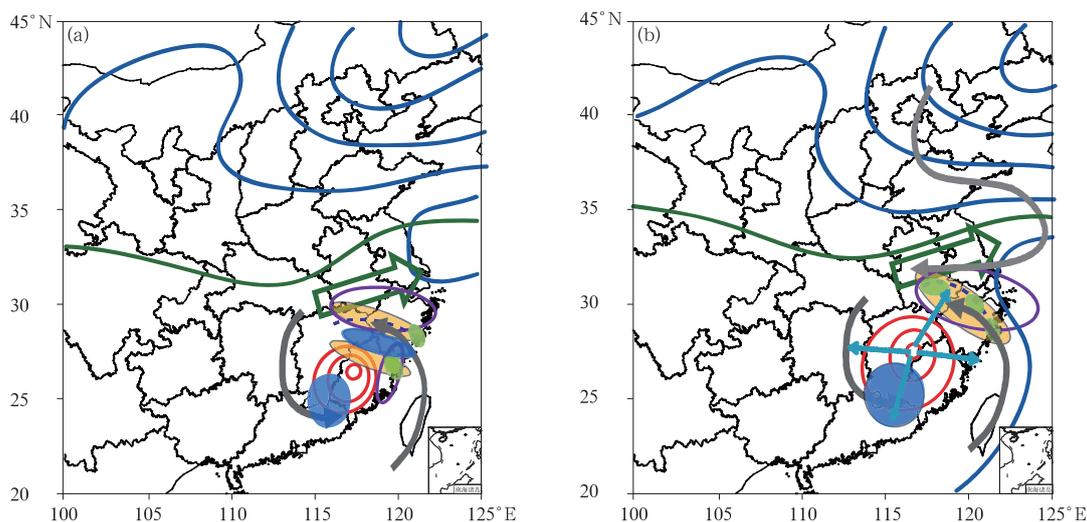


图 9 台风苏迪罗登陆后 D2 强降水与影响系统演变概念图

(a)D2 初期, (b)D2 后期

(蓝色实线为 500 hPa 高度场, 绿色实线为 200 hPa 高空槽, 绿色箭头为 200 hPa 高空急流, 红色实线为台风环流, 黄色阴影为低层辐合区, 蓝色阴影为低层辐散区, 紫色椭圆为高层辐散区, 灰色箭头为 850 hPa 流场, 蓝色虚线为台风外围螺旋雨带, 绿色阴影为强降水落区, 天蓝色箭头展示了台风螺旋雨带向外围的扩散)

Fig. 9 Conceptual model of precipitation and influencing systems of Soudelor

on Day 2 after landing

(a) initial stage, (b) later stage

(Blue solid line shows 500 hPa geopotential height, green solid line and arrow represent 200 hPa trough and upper-level jet, respectively, red solid line indicates the TC circulation, yellow and blue shaded areas represent low-level convergence and divergence areas respectively, purple ellipse is upper-level divergence area, gray arrow represents 850 hPa flow field, blue dashed line indicates the spiral rainbands of TC, green shaded area is heavy rainfall area, and the dispersion of TC spiral band is shown by sky blue arrows)

系统概念图。台风登陆后, 环流结构的非对称性增强, 台风东北侧对流层低层为较强辐合, 高层为强辐散, 配合偏东风气流的水汽输送作用, 其动力条件和水汽条件均有利于强降水的产生; 而台风中心到西南象限动力条件和水汽条件均较差, 不利于强降水的产生(图 9a)。台风东北象限风场结构存在非均匀性, 有中尺度急流核发展, 低层动力场表现为两条分隔的强辐合带, 两条辐合带之间为弱辐散和下沉运动区(图 9a)。因此台风东北象限的强降水分布也不均匀, 两条辐合带伴随着较强降水, 而之间区域降水则较弱。随着台风北上及螺旋雨带的向外频散, 一方面地形不断在浙江东部沿海诱发对流系统, 并沿切线方向发展为螺旋雨带; 另一方面雨带逐渐向外围扩散, 导致浙江北部的强降水(图 9b)。此外, 在 D2 后期, 东北地区的冷槽系统增强南压, 低层回流冷空气沿偏东风与台风外围环流结合, 促进

了低层锋生, 更有利于台风北侧降水的发展。

预报员在制作定量降水预报时, 不仅要考虑台风本体降水的减弱及东北象限降水的增强, 更要关注台风北侧的风场中尺度精细结构, 分析螺旋雨带的发展和演变规律, 细化降水落区分布。此外, 在地形的降水增幅作用外, 还要注意降水沿切向方向螺旋雨带的发展以及雨带向外围的扩散, 关注对流层低层辐合条件及地面辐合线的演变。

5 结 论

本文利用常规气象观测数据, 雷达、卫星资料, FNL 分析数据及各家数值模式和 NMC 的 QPF 数据等对 1513 号台风苏迪罗的降水特征及预报检验进行了分析, 并针对台风登陆次日的分散性强降水成因及预报误差原因进行了探讨, 总结了分散性强

降水的预报着眼点,主要结论如下:

(1)“苏迪罗”登陆次日,台风本体降水减弱,强降水非常分散。各家数值预报模式均出现了预报评分显著下降的情况。预报员 QPF 虽然对数值模式做出了较好订正,但其仍然存在较明显误差,预报评分较 D1 和 D3 下降显著,显示出对分散性强降水的预报把握能力较差。

(2)环境流场导致台风非对称结构的发展,台风东侧和北侧对流层低层为较强辐合,配合高层辐散和较强水汽输送,有利于强降水的产生;而台风中心及西南象限动力、水汽条件均较差,降水较弱。台风东北象限风场具有非均匀性,对流层低层为两条强辐合带,其间为弱辐散和下沉运动区。预报员对风场中尺度结构演变缺乏有效判断,且对台风中心附近的降水存在高估,因此在江西东北部、福建西北部和浙江西南部出现了暴雨、大暴雨的空报。实际预报中要密切关注中尺度模式的风场演变、雷达回波螺旋雨带的发展以及台风中心的填塞,根据中尺度风场辐合带,结合雷达雨带外推,细化强降水落区。

(3)地形对台风降水有明显增幅作用。浙江沿海山脉地形附近不断有强降水产生,并沿切线方向发展为螺旋雨带,随后向北推进。预报员成功调大了浙江沿海山脉地形附近的降水,但对降水沿螺旋雨带的发展和向外围的扩散把握不足,从而导致浙江北部暴雨漏报。在预报中,预报员面对地形对降水的作用不能仅调大降水强度,更要详细分析对流层低层切变线的发展特征,分析雷达回波中雨带的演变规律,对雨带的精细落区进行把握。

(4)对于台风登陆次日分散性强降水的预报关键点为:台风的非对称性、风场结构的非均匀性、地形作用以及螺旋雨带的发展等。特别是螺旋雨带的发展、演变,决定了强降水的具体落区位置。预报员往往能预估到螺旋雨带的出现,但对具体螺旋雨带会在距离台风中心多远处发展、螺旋雨带的宽度如何、两条螺旋雨带间的距离以及螺旋雨带的影响因素等问题目前还缺乏理论认识和预报方法,有待于进一步的研究工作。

参考文献

陈俊,平凡,王秀春,等,2017.台湾岛地形对“麦德姆”台风的影响[J].大气科学,41(5):1037-1058. Chen J, Ping F, Wang X C,

et al, 2017. Topographic influence of Taiwan Island on Typhoon “Matmo”[J]. Chinese J Atmos Sci, 41(5): 1037-1058 (in Chinese).

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 L S, Luo Z X, Li Y, 2004. Research advances on tropical cyclone landfall process[J]. Acta Meteor Sinica, 62(5): 541-549 (in Chinese).

程正泉,陈联寿,李英,2009.登陆台风降水的大尺度环流诊断分析[J].气象学报,67(5):840-850. Cheng Z Q, Chen L S, Li Y, 2009. Diagnostic analysis of larger-scale circulation features associated with strong and weak landfalling typhoon precipitation events. Acta Meteor Sinica, 67(5): 840-850 (in Chinese).

邓莲堂,刘式适,徐祥德,等,2004. Rossby 参数 β 在涡旋 Rossby 波中的作用[J].热带气象学报,20(5):483-492. Deng L T, Liu S S, Xu X D, et al, 2004. The effect of Rossby parameter in vortex Rossby waves[J]. J Tropical Meteor, 20(5): 483-492 (in Chinese).

段晶晶,钱燕珍,周福,等,2017.台风灿鸿造成浙江东北部大暴雨地形作用的数值模拟研究[J].气象,43(6):686-695. Duan J J, Qian Y Z, Zhou F, et al, 2017. Numerical simulation of topographic effect on heavy rainfall in northeastern Zhejiang caused by Typhoon Chan-Hom[J]. Meteor Mon, 43(6): 686-695 (in Chinese).

郭荣芬,肖子牛,鲁亚斌,2013.登陆热带气旋引发云南强降水的环境场特征[J].气象,39(4):418-426. Guo R F, Xiao Z N, Lu Y B, 2013. Ambient field characteristics of westbound landing tropical cyclones impacting rainfall process of Yunnan[J]. Meteor Mon, 39(4): 418-426 (in Chinese).

黄新晴,陆玮,滕代高,2015.“莫拉克”台风在浙江产生强降水的初步分析[J].科技通报,31(3):16-20,37. Huang X Q, Lu W, Teng D G, 2015. The preliminary analysis of heavy rain from Typhoon Morakot in Zhejiang[J]. Bull Sci Tech, 31(3): 16-20 (in Chinese).

冀春晓,薛根元,赵放,等,2007.台风 Ranim 登陆期间地形对其降水和结构影响的数值模拟试验[J].大气科学,31(2):233-244. Ji C X, Xue G Y, Zhao F, et al, 2007. The numerical simulation of orographic effect on the rain and structure of Typhoon Ranim during landfall[J]. Chinese J Atmos Sci, 31(2): 233-244 (in Chinese).

康建伟,陆汉城,钟科,等,2007.台风内部的中尺度波动与多边形眼墙的形成[J].热带气象学报,23(1):21-26. Kang J W, Lu H C, Zhong K, et al, 2007. The mesoscale waves and the formation of polygonal eye wall in typhoon[J]. J Tropical Meteor, 23(1): 21-26 (in Chinese).

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 Y, Chen L S, Xu X D, 2005. Numerical experiments of the impact of moisture transportation on sustaining of the landfalling tropical cyclone and precipitation [J]. Chinese J Atmos Sci, 29(1): 91-98 (in

- Chinese).
- 李英,王继志,陈联寿,等,2007. 台风麦莎(Matsa)的波状降水特征研究[J]. 科学通报,52(3):344-353. Li Y, Wang J Z, Chen L S, et al, 2007. Study on wave precipitation characteristics of Typhoon Matsa[J]. Chinese Sci Bull, 52(3):344-353(in Chinese).
- 梁军,张胜军,黄艇,等,2015. 辽东半岛“达维”(1210)台风暴雨的诊断分析[J]. 气象,41(3):364-371. Liang J, Zhang S J, Huang T, et al, 2015. Diagnostic analyses of typhoon rain over Liaodong Peninsula[J]. Meteor Mon, 41(3):364-371(in Chinese).
- 梁旭东,端义宏,陈仲良,2002. 登陆台风对流和非对称结构[J]. 气象学报,60(S):26-35. Liang X D, Duan Y H, Chen Z L, 2002. Convective asymmetries associated with tropical cyclone landfall[J]. Acta Meteor Sinica, 60(S):26-35(in Chinese).
- 梁钊明,王东海,2015. 一次台风变性并入东北冷涡过程的动力诊断分析[J]. 大气科学,39(2):397-412. Liang Z M, Wang D H, 2015. A diagnostic study of a typhoon transitioning and merging into the northeast cold vortex[J]. Chinese J Atmos Sci, 39(2):397-412(in Chinese).
- 刘爱鸣,高珊,2011. 0908号台风“莫拉克”异常路径及其对台湾海峡两岸强降水的影响[J]. 台湾海峡,30(2):151-157. Liu A M, Gao S, 2011. Analysis of the abnormal track of Typhoon 0908 Morakot and its effect on heavy rainfall on both sides of Taiwan Strait[J]. J Oceanogr Taiwan Strait, 30(2):151-157(in Chinese).
- 刘建勇,周冠博,顾思楠,等,2014. 台风菲特暴雨诊断分析[J]. 气象科技,42(6):1047-1056. Liu J Y, Zhou G B, Gu S N, et al, 2014. Diagnosis of heavy rainfall associated with Typhoon Fitow[J]. Meteor Sci Technol, 42(6):1047-1056(in Chinese).
- 刘少军,张京红,何政伟,等,2011. 地形因子对海南岛台风降水分布影响的估算[J]. 自然灾害学报,20(2):196-199. Liu S J, Zhang J H, He Z W, et al, 2011. Estimate of topography influences on precipitation distribution during typhoon process in Hainan Island[J]. J Natural Disasters, 20(2):196-199(in Chinese).
- 钮学新,董加斌,杜惠良,2005a. 华东地区台风降水及影响降水因素的气候分析[J]. 应用气象学报,16(3):402-407. Niu X X, Dong J B, Du H L, 2005a. Climatic analysis on typhoon rainfall of East China and affecting factors of the precipitation[J]. J Appl Meteor Sci, 16(3):402-407(in Chinese).
- 钮学新,杜惠良,刘建勇,2005b. 0216号台风降水及其影响降水机制的数值模拟试验[J]. 气象学报,63(1):57-68. Niu X X, Du H L, Liu J Y, 2005b. The Numerical simulation of rainfall and precipitation mechanism associated with Typhoon Sinlaku (0216)[J]. Acta Meteor Sinica, 63(1):57-68(in Chinese).
- 任丽,王承伟,张桂华,等,2013. 台风布拉万(1215)深入内陆所致的大暴雨成因分析[J]. 气象,39(12):1561-1569. Ren L, Wang C W, Zhang G H, et al, 2013. Analysis of severe rainstorm caused by Typhoon Bolaven (1215) invading interior territory[J]. Meteor Mon, 39(12):1561-1569(in Chinese).
- 孙力,董伟,药明,等,2015. 1215号“布拉万”台风暴雨及降水非对称性分布的成因分析[J]. 气象学报,73(1):36-49. Sun L, Dong W, Yao M, et al, 2015. A diagnostic analysis of the causes of the torrential rain and precipitation asymmetric distribution of Typhoon Rolaven (2012)[J]. Acta Meteor Sinica, 73(1):36-49(in Chinese).
- 王瑾,柯宗建,江吉喜,2007. “麦莎”台风暴雨落区非对称分布的诊断分析[J]. 热带气象学报,23(6):563-568. Wang J, Ke Z J, Jiang J X, 2007. A diagnostic analysis to the asymmetric distribution of typhoon rainfall area[J]. J Trop Meteor, 23(6):563-568(in Chinese).
- 王勇,丁治英,李勋,等,2010. 台风“海棠”(2005)登陆前后非对称螺旋雨带[J]. 热带气象学报,26(5):544-554. Wang Y, Ding Z Y, Li X, et al, 2010. Dynamic analysis of asymmetric spiral rain bands around the landing of Typhoon Haitang(2005)[J]. J Trop Meteor, 26(5):544-554(in Chinese).
- 王咏梅,任福民,李维京,等,2008. 中国台风降水的气候特征[J]. 热带气象学报,24(3):233-238. Wang Y M, Ren F M, Li W J, et al, 2008. Climatic characteristics of typhoon precipitation over China[J]. J Trop Meteor, 24(3):233-238(in Chinese).
- 谢惠敏,任福民,李国平,等,2016. 超强台风丹娜丝对1323号强台风菲特极端降水的作用[J]. 气象,42(2):156-165. Xie H M, Ren F M, Li G P, et al, 2016. Role of Super Typhoon Danas in the extreme precipitation caused by Severe Typhoon Fitow[J]. Meteor Mon, 42(2):156-165(in Chinese).
- 许映龙,吕心艳,张玲,等,2015. 1323号强台风菲特特点及预报难点分析[J]. 气象,41(10):1222-1231. Xu Y L, Lü X Y, Zhang L, et al, 2015. Analysis on the characteristics and forecasting difficulty of Severe Typhoon Fitow (No. 1323)[J]. Meteor Mon, 41(10):1222-1231(in Chinese).
- 杨仁勇,闵锦忠,冯文,2013. 海南岛地形对南海西行台风降水影响的数值试验[J]. 热带气象学报,29(3):474-480. Yang R Y, Min J Z, Feng W, 2013. Numerical simulations of the Hainan Island topographic effects on the rainfall of west-going typhoons[J]. J Trop Meteor, 29(3):474-480(in Chinese).
- 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 Z S, Chen M, Ye Z X, et al, 2009. Analysis of rainstorm associated with similar track tropical cyclones “Haitang”(0505) and “Bilis”(0604)[J]. J Trop Meteor, 25(1):37-47(in Chinese).
- 余志豪,2002. 台风螺旋雨带——涡旋 Rossby 波[J]. 气象学报,60(4):502-507. Yu Z H, 2002. The spiral rain bands of tropical cyclone and vortex Rossby waves[J]. Acta Meteor Sinica, 60(4):502-507(in Chinese).
- 岳彩军,曹钰,2014. “海棠”台风(2005)降水非对称分布特征成因之大气因子研究[J]. 热带气象学报,30(2):219-228. Yue C J, Cao Y, 2014. Study on the genesis of asymmetrical distribution characteristics of precipitation associated with Typhoon Haitang (2005) from the viewpoint of atmospheric factor[J]. J Trop

- Meteor, 30(2):219-228(in Chinese).
- 周福, 钱燕珍, 朱宪春, 等, 2014. “菲特”减弱时浙江大暴雨过程成因分析[J]. 气象, 40(8): 930-939. Zhou F, Qian Y Z, Zhu X C, et al, 2014. Cause analysis on the severe rainfall in Zhejiang during the weakening of Fitow[J]. Meteor Mon, 40(8): 930-939(in Chinese).
- 周海光, 2010. 罗莎(0716)台风外围螺旋雨带中尺度结构的双多普勒雷达试验研究[J]. 气象, 36(3): 54-61. Zhou H G, 2010. Structure of Typhoon Krosa (0716) outer rainband observed by Dual-Doppler radars [J]. Meteor Mon, 36(3): 54-61 (in Chinese).
- 周玲丽, 翟国庆, 王东海, 等, 2011. 0713号“韦帕”台风暴雨的中尺度数值研究和非对称性结构分析[J]. 大气科学, 35(6): 1046-1056. Zhou L L, Zhai G Q, Wang D H, et al, 2011. Mesoscale numerical study of the rainstorm and asymmetric structure of 0713 Typhoon Wipha[J]. Chinese J Atmos Sci, 35(6): 1046-1056(in Chinese).
- 朱佩君, 郑永光, 王洪庆, 等, 2005. 台风螺旋雨带的数值模拟研究[J]. 科学通报, 50(5): 486-494. Zhu P J, Zheng Y G, Wang H Q, et al, 2005. Numerical simulation analysis on typhoon spiral rainfall[J]. Chinese Sci Bull, 50(5): 486-494(in Chinese).
- 朱佩君, 郑永光, 郑沛群, 2010. 华东登陆台风的对流非对称结构分析[J]. 热带气象学报, 26(6): 651-658. Zhu P J, Zheng Y G, Zheng P Q, 2010. Asymmetric distribution of convection associated with tropical cyclone making landfall along the East China coast [J]. J Trop Meteor, 26(6): 651-658(in Chinese).
- Bender M A, 1997. The effect of relative flow on the asymmetric structure in the interior of hurricanes[J]. J Atmos Sci, 54(6): 703-724.
- Corbosiero K L, Molinari J, 2003. The relationship between storm motion, vertical wind shear, and convective asymmetries in tropical cyclones[J]. J Atmos Sci, 60(2): 366-376.
- DeMaria M, 1996. The effect of vertical shear on tropical cyclone intensity change[J]. J Atmos Sci, 53(14): 2076-2088.
- Frank W M, Ritchie E A, 1999. Effects of environmental flow upon tropical cyclone structure [J]. Mon Wea Rev, 127(9): 2044-2061.
- Wang B Y, Wei M, Hua W, et al, 2016. Characteristics and possible formation mechanisms of severe storms in the outer rainbands of Typhoon Mujigae (1522)[J]. J Meteor Res, 31(3): 612-624.