

崔梦雪,向纯怡,张晗昀,等.台风“杜苏芮”(2305)引发福建极端强降水的特征分析[J].海洋气象学报,2023,43(4):11-20.
CUI Mengxue, XIANG Chunyi, ZHANG Hanyun, et al. Characteristics of extreme precipitation in Fujian induced by Typhoon Doksuri (2305) [J]. Journal of Marine Meteorology, 2023, 43(4): 11-20. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2023.04.002. (in Chinese)

台风“杜苏芮”(2305)引发福建极端强降水的特征分析

崔梦雪^{1,2}, 向纯怡³, 张晗昀¹, 许映龙³, 苏志重^{1,2}

(1.厦门市海峡气象开放重点实验室,福建 厦门 361012;2.厦门市气象台,福建 厦门 361012;3.国家气象中心,北京 100081)

摘要: 台风“杜苏芮”(2305)是1949年至2023年9月登陆福建第2强台风,引发福建极端强降水。利用双偏振雷达、FY-4A等多源观测资料分析了福建强降水发展的主要特征,指出2个明显的降水阶段分别由台风眼壁与内螺旋雨带、台风外螺旋雨带造成。“杜苏芮”登陆后眼壁附近中 β 尺度对流云团发展,云团低层以大雨滴为主,对流云团分裂进入内螺旋雨带中发展为线状对流,数密度更高的较大雨滴产生极端雨量。而台风移出福建后外螺旋雨带后部对流组织化,形成带状中尺度对流系统,通过“列车效应”持续影响福建沿海,产生极端强降水,高浓度小雨滴是主要的云微物理特征。降水与鹞峰山、戴云山地形密切相关,向东开口的喇叭口地区利于形成强降水中心。

关键词: 台风;杜苏芮;强降水;中尺度对流系统

中图分类号: P458.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2023)04-0011-10

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2023.04.002

Characteristics of extreme precipitation in Fujian induced by Typhoon Doksuri (2305)

CUI Mengxue^{1,2}, XIANG Chunyi³, ZHANG Hanyun¹, XU Yinglong³, SU Zhizhong^{1,2}

(1. Xiamen Key Laboratory of Strait Meteorology, Xiamen 361012, China; 2. Xiamen Meteorological Observatory, Xiamen 361012, China; 3. National Meteorological Center, Beijing 100081, China)

Abstract: Typhoon Doksuri (2305) is the second strongest typhoon landing in Fujian from 1949 to September 2023, causing extreme heavy precipitation in Fujian. In this paper, the main characteristics of the extreme precipitation in Fujian are analyzed using multi-source observation data such as dual-polarization radar and FY-4A satellite data. It is found that the two obvious precipitation stages are caused by typhoon eyewall/inner spiral rain band and outer spiral rain band, respectively. The meso- β scale convective cloud in the eyewall of Typhoon Doksuri is mainly characterized by large raindrops after landing. The convective cloud splits, goes into the inner spiral rain band, and organizes into a linear convective system, with large raindrops of higher number density causing extreme hourly rainfall. After Typhoon Doksuri moves out of Fujian, the mesoscale convective system along the outer spiral rain band continuously affects the coastal areas of Fujian through the train effect, causing extreme precipitation. The high-concentration of small raindrops is the main cloud microphysical feature. The spatial distribution of precipitation is closely related to the topography such as Jiufeng Mountain and Daiyun Mountain. The trumpet-

收稿日期:2023-09-18;修回日期:2023-10-26

基金项目:福建省自然科学基金项目(2023J05061);福建省灾害天气重点实验室重大科技专项(2022TF02);厦门市社会发展领域指导性项目(3502Z20214ZD4011)

第一作者简介:崔梦雪,女,硕士,工程师,主要从事天气动力学研究,mengxuecui@126.com。

通信作者简介:向纯怡,女,博士,高级工程师,主要从事台风监测及预报研究,xiangcy@cma.gov.cn。

shaped topography of sea-land interface contributes to the forming of the extreme precipitation center.

Keywords: typhoon; Doksuri; extreme precipitation; mesoscale convective system

引言

台风是影响我国最主要的气象灾害之一^[1],产生的灾害主要包括大风、暴雨和风暴潮^[2]。台风暴雨常引发城市内涝、山体滑坡、泥石流等次生灾害,研究表明,登陆我国的台风降水可造成比大风更大的经济损失^[3],深入开展台风暴雨研究具有重要的现实意义。关于台风暴雨,国内外专家学者开展了大量研究^[4-9],根据台风暴雨形成机制和降水特征,将登陆台风暴雨分为台风核心区降雨、台风螺旋雨带降雨、台前飏线雨和台风远距离暴雨^[10-11]。陈联寿等^[12-13]将台风环流内的暴雨概括为5个落区:眼壁暴雨、螺旋雨带暴雨、小涡暴雨、倒槽暴雨、切变暴雨,将台风环流之外的暴雨分为台前飏线暴雨、远距离暴雨和变性下游效应暴雨,并指出地形对台风暴雨的强度和落区具有重要影响。

登陆台风极端降水主要是台风内部结构变化和不同天气尺度系统相互作用及下垫面强迫的结果^[14-16],台风内核对流爆发常引发降水增幅,台风中的中小尺度系统往往造成极端降水,而对台风微物理结构的研究还相对较少^[17]。不同属性的雨带,尽管雷达回波强度相同,但地面降水率却差别很大。近年来,随着探测技术的发展,对台风的观测手段更加丰富^[18-19]。双偏振天气雷达能够提供降水粒子在水平和垂直方向上的形状、大小、相态和数量等^[20],被更多地应用到台风研究领域,使得认识台风降水的微物理特征成为可能^[21-23]。Wang等^[24-25]对台风“麦德姆”(1410)内外雨带的粒子相态进行了分析,表明暖云碰并增长对于内雨带上升运动区的强降水起到重要作用。Bao等^[26]分析指出靠近台风眼壁的雨滴直径较大,但浓度低,较难产生高降水率。Dai等^[27]研究表明,台风不同象限的微物理过程差异导致了台风降水的非对称性。

2023年第5号台风“杜苏芮”是2023年截至8月底登陆我国的最强台风,也是1949年至2023年9月登陆福建第2强台风。“杜苏芮”登陆强度高、影响范围大、风雨并重、致灾性强。据不完全统计,台风“杜苏芮”造成福建266.69万人受灾,紧急

转移安置16.24万人,直接经济损失达147.55亿元。“杜苏芮”不仅本体降水强度高,台风减弱并移出福建后,仍造成大范围极端强降水,各家模式对降水出现明显低估,尤其是台风移出福建后的极端降水出现明显漏报。由此可见,此次台风影响下的极端降水需要深入认识和分析。本文基于多源数据对台风“杜苏芮”引起的福建极端强降水进行分析,对比不同阶段的降水特征及云微物理差异,以期加深对台风暴雨的认识,为提高台风暴雨的预报能力提供参考。

1 资料来源

所用资料包括:(1)中央气象台官方主观分析台风路径数据集,包含台风中心位置、中心最低气压及中心附近最大风速等,当台风进入我国24h警戒线内时间间隔为1h;(2)福建省地面常规观测数据,其中国家气象观测基本(准)站、一般站和区域地面自动气象站观测资料共2373个站点数据,时间分辨率为1h;(3)泉州S波段双偏振多普勒天气雷达,海拔531.3m,主要选用产品包括反射率因子 Z_H 产品、差分反射率 Z_{DR} 产品、差分传播相移率 K_{DP} 产品等;(4)欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)第五代大气再分析资料(ECMWF Reanalysis v5, ERA5; <https://cds.climate.copernicus.eu>),选取位势高度、温度、比湿、风场等资料,垂直方向从1000hPa到100hPa共27层,水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,时间分辨率为1h;(5)FY-4A卫星10.8 μm 红外通道辐射亮温,水平分辨率为4km。

2 台风“杜苏芮”概况

2023年第5号台风“杜苏芮”于7月21日08时(北京时,下同)在西北太平洋面上生成(图1a),向西偏北方向移动,23日05时加强为强热带风暴,23日17时加强为台风,24日08时加强为强台风,强度快速加强(图1b),24日20时加强为超强台风,峰值强度达到 $62\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (17级以上,超强台风级),绕过菲律宾吕宋岛北部进入南海,强度先是减弱,近海再度加强,27日17时加强为超强台风,28日09时55分在福建晋江沿海登陆(登陆时强度

为强台风级,近中心最大风速为 $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (15 级), 是 2023 年截至 8 月底登陆我国最强台风,也是 1949 年至 2023 年 9 月登陆福建第 2 强的台风。

3 强降水分布特征和极端性

受台风“杜苏芮”影响,2023 年 7 月 26—30 日,福建连续 4 d 出现强降水,全省共有 12 站降水量超过 600 mm,122 站降水量超过 400 mm(图 2a),主要集中在宁德、福州、莆田、泉州、厦门一线,沿海岸线呈东北—西南走向分布,形成一条长逾 300 km,宽 40~60 km 的强降水带。气象自动观测站最大累计降水

量达 763.1 mm(莆田市涵江区白沙镇,图 2b 五角星),水利自动观测站最大累计降水量达 820.5 mm(莆田市涵江区新县镇)。此次降水过程是一次极端降水事件,极端性主要体现在日降水量、小时降水强度等方面。7 月 28 日 08 时—29 日 08 时,福建 5 个国家级气象观测站日降水量突破当地 1961 年以来历史记录,其中莆田站日降水量 526.8 mm 破福建国家级气象观测站历史纪录。最大雨强达到 $151.2 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$, 7 月 28 日 15:10—16:10 出现在莆田荔城区新度镇下横山村站。同时降水与地形密切相关,强降水主要集中在福建沿海到中部鹭峰山、戴云山迎风坡一侧。

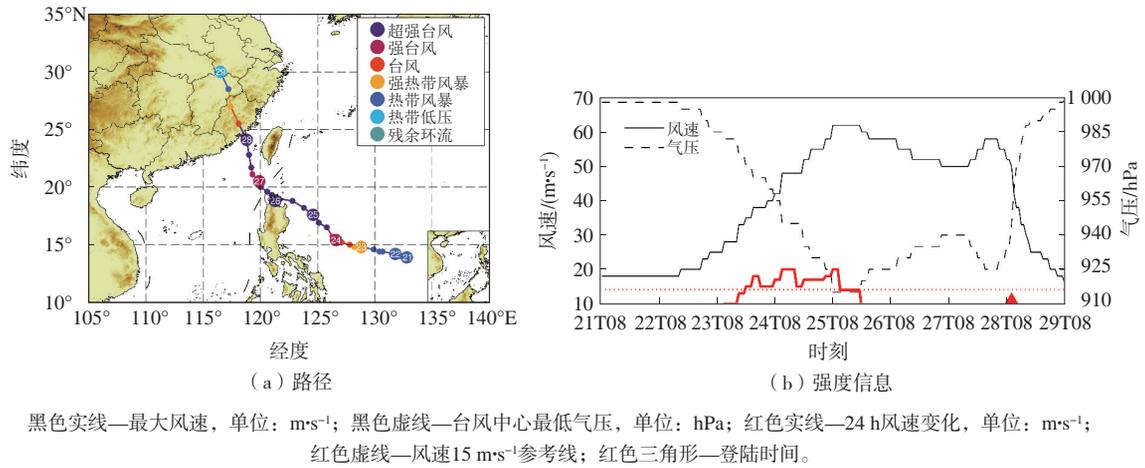
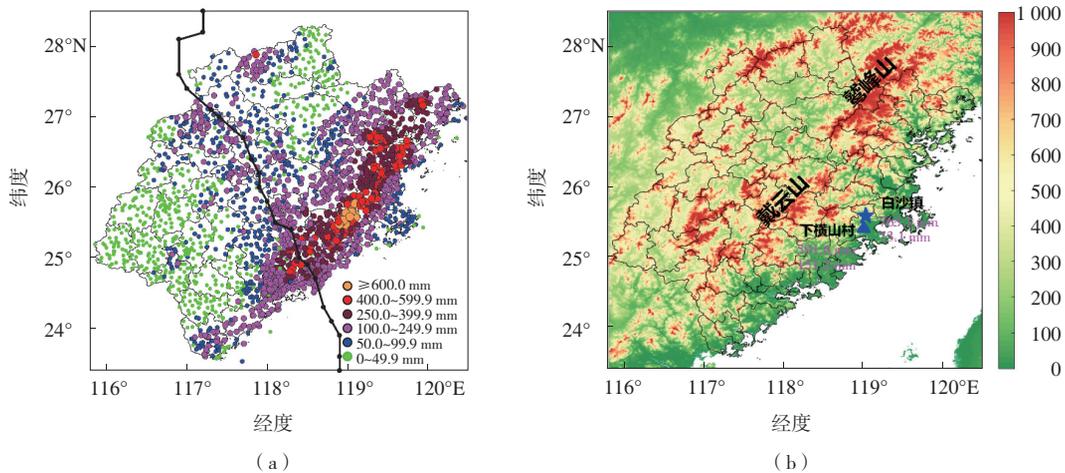


图 1 台风“杜苏芮”路径和强度信息
Fig.1 Track and intensity of Typhoon Doksuri



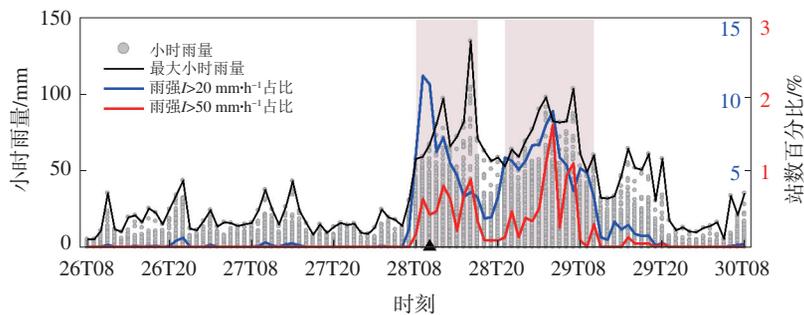
蓝色三角形—下横山村站(站号: F4127), 小时雨量最大站; 蓝色五角星—白沙镇站(站号: F4151), 过程降水量最大站; 紫色数字—过程累计降水量和最大小时雨量, 单位: mm。

图 2 福建地区 2023 年 7 月 26 日 08 时—30 日 08 时累计降水量(a;单位:mm)、福建地形及 2 个代表性自动气象观测站位置(b)

Fig.2 Accumulated precipitation in Fujian from 08:00 BST 26 to 08:00 BST 30 July 2023 (a; units: mm); terrain of Fujian and location of two representative automatic meteorological stations (b)

图3为福建区域气象观测站(以下简称“区域站”)整点小时雨量及雨强分别大于 $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $50\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 区域站数百分比。可以看出,福建强降水主要集中在28日08时—29日10时,也就是台风“杜苏芮”登陆前后及登陆后约1d的时间内,自动气象观测站小时雨量和强降水的范围均明显增加。由强降水的强度和范围来看,存在2个明显的强降水阶段:第一强降水阶段出现在28日08—17时,即台风“杜苏芮”登陆前后,其中09—10时受台风眼壁影响,小时雨量 20 mm 以上的站数占比达到最大,16时前后,“杜苏芮”在三明境内减弱为强热带

风暴,受台风内螺旋雨带影响,多站小时雨量达到 100 mm 以上,最大小时雨量即出现在这个时段。第二强降水阶段出现在28日21时—29日10时,此时“杜苏芮”逐渐移入江西境内并减弱为热带风暴,福建受台风外螺旋雨带影响,雨强达到 $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $50\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的站数再次跃增,降水峰值时段在29日04时前后,雨强超过 $50\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的站数占比明显强于第一强降水阶段,且强降水维持时间长、累计雨量大,造成福建沿海出现大范围大暴雨到特大暴雨。综合来看,第二强降水阶段的范围、持续时间、累计雨量均明显大于第一强降水阶段。

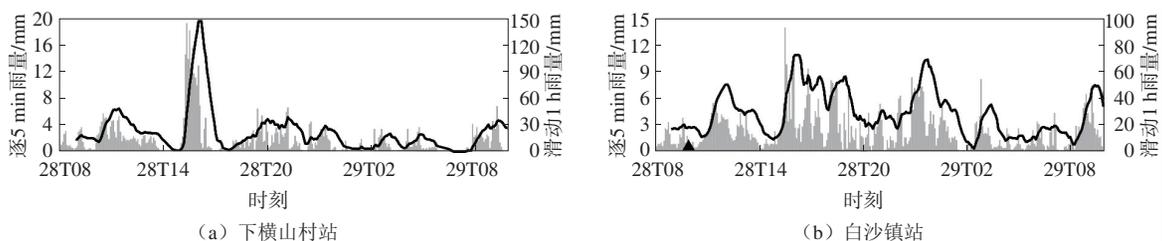


灰色散点—整点小时雨量时序,单位: mm; 黑线—最大整点小时雨量,单位: mm; 蓝线—雨强大于 $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 站数占比,单位: %; 红线—雨强大于 $50\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 站数占比,单位: %; 黑色三角形—台风登陆时刻。

图3 福建地区2023年7月26日08时—30日08时加密自动气象观测站要素时间序列
Fig.3 Time series of elements at dense automatic meteorological stations in Fujian from 08:00 BST 26 to 08:00 BST 30 July 2023

分别选取28日08时—29日10时下横山村站和白沙镇站逐5 min降水量与逐小时降水量数据(图4),下横山村站(图4a)降水呈单峰型,强降水主要集中在28日16时前后,此时降水为台风内螺旋雨带降水,最大滑动1 h降水量达 151.2 mm ,最大5 min降水量达到 19.4 mm ,雨强十分极端。

白沙镇站(图4b)降水呈现多个峰值,分别为28日12时前后、28日16—19时、28日23时—29日01时, $30\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上的雨强维持11 h,最大5 min降水量达 14.1 mm ,最大滑动1 h降水量达到 73.1 mm ,降水强度高、持续时间长,产生极端强降水。



灰色柱状—逐5 min雨量; 黑色曲线—滑动1 h累计雨量; 黑色三角形—台风登陆时刻。

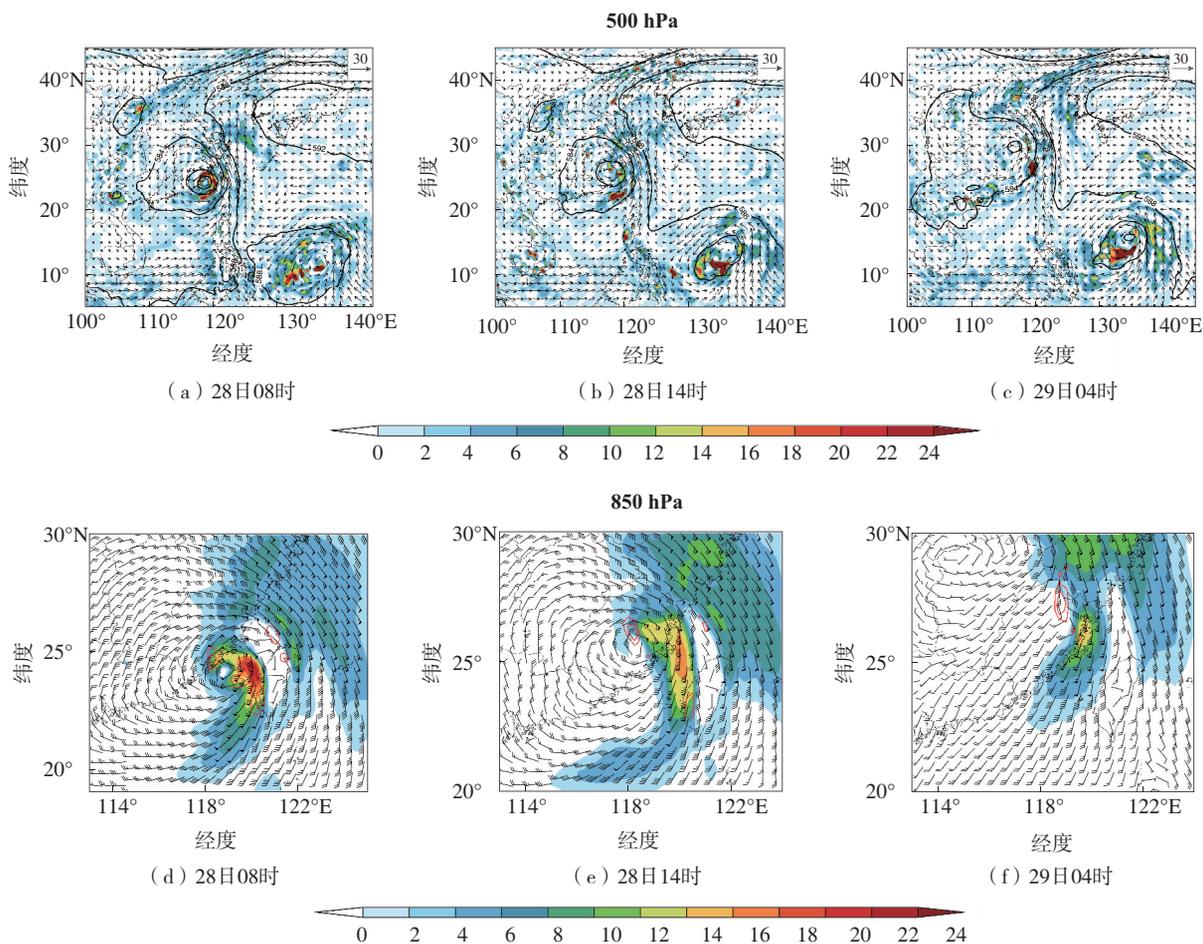
图4 2023年7月28日08时—29日10时莆田下横山村站、白沙镇站雨量变化

Fig.4 Variation of 5-min rainfall and hourly moving accumulated rainfall at Xiahengshancun Station and Baishazhen Station in Putian from 08:00 BST 28 to 10:00 BST 29 July 2023

4 环流背景

有利的高低空环流配置是产生台风暴雨的重要成因。台风“杜苏芮”登陆前,欧亚中高纬维持“两脊一槽”的形势。28日08时(图5a),随着西风槽东移,西北太平洋副热带高压(以下简称“副高”)呈现出南北向“方头副高”的特殊环流形势,台风“卡努”与“杜苏芮”相距2 000 km以上,“杜苏芮”在副高的引导下以偏北方向移动为主,副高脊线北抬至35°N附近,

“杜苏芮”内核收缩,上升运动主要集中在眼壁和内螺旋云带附近。28日14时(图5b),“杜苏芮”登陆后其东侧与副高之间的偏南气流维持较强,上升运动区较登陆前范围减小,此时强降水也呈现为局地性特征。29日04时(图5c),“杜苏芮”已移至江西北部并减弱为热带风暴,台风与副高之间的偏南风仍维持较强,强上升运动区并不在“杜苏芮”中心及其附近,而是在福建中北部沿海一带,与福建的强降水相对应,表明强降水区有较强的上升运动。



a、b、c中箭矢—风场(单位: $m \cdot s^{-1}$), 等值线—位势高度场(单位: dagpm), 色阶—垂直速度(单位: $cm \cdot s^{-1}$); d、e、f中箭矢—风场(单位: $m \cdot s^{-1}$), 红色等值线—水汽通量散度, 从 $-20 \times 10^{-5} g \cdot s^{-1} \cdot cm^{-2} \cdot hPa^{-1}$ 向外间隔 $-10 \times 10^{-5} g \cdot s^{-1} \cdot cm^{-2} \cdot hPa^{-1}$ (单位: $10^{-5} g \cdot s^{-1} \cdot cm^{-2} \cdot hPa^{-1}$), 色阶—水汽通量(单位: $g \cdot s^{-1} \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1}$)。

图5 2023年7月28—29日500 hPa和850 hPa要素分布

Fig.5 Distribution of meteorological elements at 500 hPa and 850 hPa from 28 to 29 July 2023

台风暴雨需要持续而充分的水汽输送, 28日08时850 hPa(图5d)在福建沿海一带有明显的水汽通量,并在中部沿海存在水汽通量辐合大值区,达 $-3 \times 10^{-4} g \cdot s^{-1} \cdot cm^{-2} \cdot hPa^{-1}$,水汽通量辐合的大值区也同样是强降水的落区。28日14时850 hPa(图

5e),水汽输送主要集中在福建中北部沿海及台风中心右侧,水汽通量辐合则集中在台风中心附近。夜间水汽输送先是减弱,29日02时开始再度增强(图略),29日04时850 hPa(图5f),福建沿海一带维持明显的水汽通量,表明台风深入内陆后,仍在

福建沿海产生明显的水汽输送,并存在水汽通量辐合,同时受地形、海陆下垫面摩擦差异等影响,有利于在福建沿海到鹞峰山、戴云山的迎风坡一侧产生强降水。

5 极端强降水特征分析

5.1 第一强降水阶段

进一步分析2个强降水阶段特征。28日12时30分(图6a)，“杜苏芮”登陆泉州晋江后,垂直风切变加大,高低空环流中心有所分离,在“杜苏芮”眼壁附近有中 β 尺度深对流云团发展并逐渐扩大,云顶亮温低至 -80°C 以下。低仰角的雷达图上可见台风眼壁区对流发展强度强(图6b),反射率因子达到

50 dBZ以上,并存在明显不对称性,台风前进方向的右侧对流旺盛。深对流云团原地发展,维持约3 h后该中 β 尺度对流云团云顶逐渐坍塌,结构分裂对流减弱,15时以后南部内螺旋雨带中的对流云团发展加强并形成线状(图略),云顶亮温逐渐降低至 -70°C 以下,对流云带长轴与其走向基本平行,该线状对流持续约2 h,“列车效应”造成莆田、泉州一带强降水。在这一阶段,受台风眼壁和内螺旋雨带影响,强降水主要集中在台风中心附近(图6c),最大雨强 $151.2\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 即出现在此阶段,9 h内最大累计降水量达到310.8 mm,强降水中心集中在戴云山的迎风坡一侧向东开口的区域,汇合流场有利于降水增强。

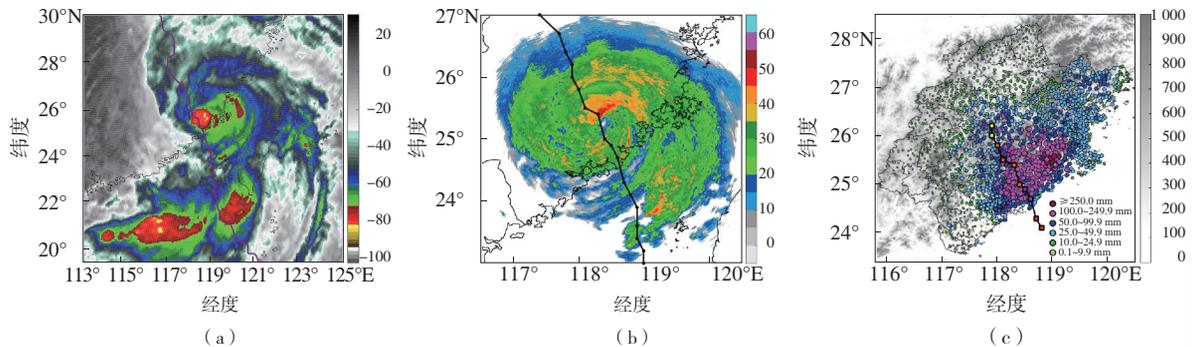


图6 2023年7月28日12时30分FY-4A $10.8\ \mu\text{m}$ 红外通道亮温(a;色阶,单位: $^{\circ}\text{C}$)、12时28分泉州雷达 1.5° 仰角雷达反射率因子(色阶,单位:dBZ)和“杜苏芮”路径(b)以及7月28日08—17时(即第一次强降水阶段)累计降水量(单位:mm)和同时段“杜苏芮”路径(c)

Fig.6 Infrared brightness temperature (a; color scale, units: $^{\circ}\text{C}$) at $10.8\ \mu\text{m}$ from FY-4A at 12:30 BST 28; reflectivity (color scale, units: dBZ) at 1.5° elevation from Quanzhou Doppler radar at 12:28 BST and track of Doksuri (b); accumulated precipitation (units: mm) and track of Doksuri from 08:00 BST to 17:00 BST 28 July 2023 (c)

5.2 第二强降水阶段

随着“杜苏芮”进一步深入内陆,环流逐渐减弱,台风本体降水进一步减弱。28日22时,“杜苏芮”中心位于江西境内,但在距台风中心300 km以外的福建沿海一带,在台风松散的外螺旋雨带后部开始有多个对流云团发展并逐渐组织化。29日00时以后对流单体排列成线状和台风外螺旋雨带相接,发展成为一条长百余千米、宽几十千米的中尺度对流系统(mesoscale convective system, MCS),该MCS在福建沿海地区维持长达11 h(29日00时—29日10时)。29日03时30分(图7a),卫星云图上该MCS云顶亮温低至 -70°C 以下,持续维持在福建沿海一带,通过“列车效应”产生第二降水高峰。雷

达图上呈现为一条东北—西南走向的强对流带(图7b),该对流带上存在多个强回波中心,反射率因子为35~50 dBZ,回波走向与其长轴方向基本一致,产生明显的“列车效应”影响长达11 h。在此阶段,福建沿海一带形成一条长约500 km、宽40~80 km的大暴雨—特大暴雨带(图7c),28日21时—29日10时最大累计降水量达到441.7 mm,明显强于第一强降水阶段,即远离台风中心的外螺旋雨带上的MCS通过“列车效应”引发福建沿海的极端强降水。

“列车效应”是对流系统反复生成并经过同一地区,造成降水时间长、累计雨量大的天气现象^[28]。在第二强降水阶段,福建沿海形成带状MCS并存在明显的“列车效应”,沿白沙镇站一线作雷达组合反

射率因子随时间演变图(图8),可以看出不断有40 dBZ以上的回波影响福建沿海,包含多个中尺度对流单体,回波反射率因子以35~50 dBZ为主,弱于福建沿海一带产生暖区暴雨的回波强度^[29]。但

MCS影响时间长,强回波影响白沙镇的时间集中在28日21时—29日01时、29日03—06时以及08—10时,与该站出现强降水的时段基本一致(图4b)。

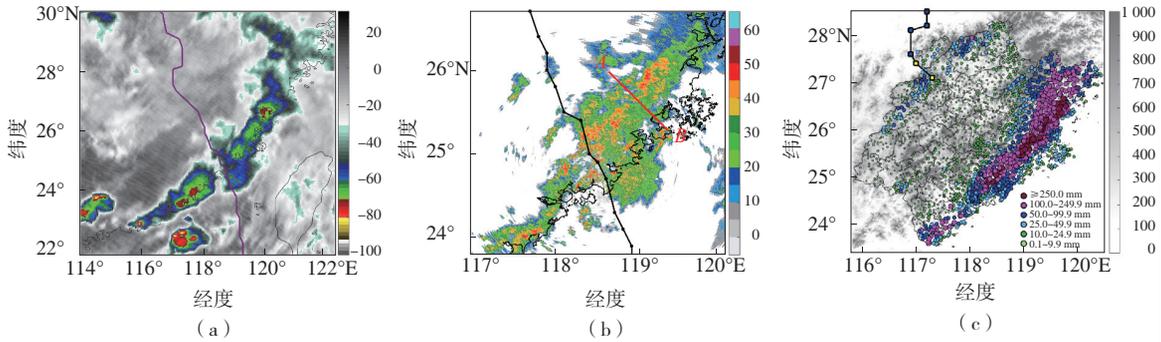
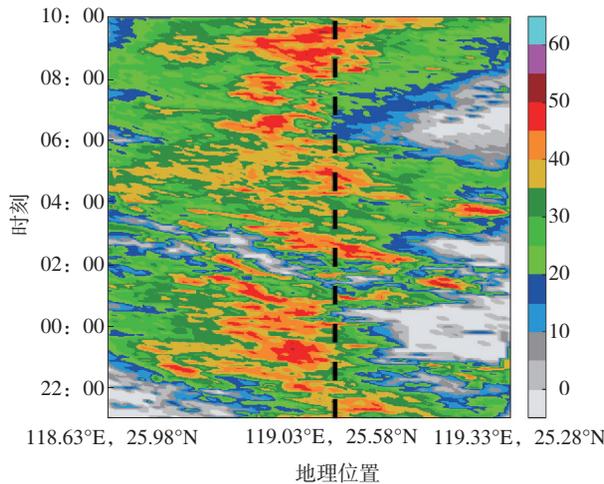


图7 同图6,但为29日03时30分(a)、03时31分(b;红色直线AB穿过白沙镇站)、28日21时—29日10时(c)

Fig.7 The same as Fig.6, but for 03:30 BST 29 (a), 03:31 BST 29 (b; red line AB across Baishazhen Station), and from 21:00 BST 28 to 10:00 BST 29 July 2023 (c)



色阶—组合反射率因子,单位: dBZ; 虚线—白沙镇站位置; 横坐标左边—A点; 横坐标右边—B点。

图8 2023年7月28日21时—29日10时沿图7b中直线AB的组合反射率因子时间演变

Fig.8 Evolution of composite reflectivity along line AB in Fig.7b from 21:00 BST 28 to 10:00 BST 29 July 2023

6 台风登陆后不同阶段云微物理特征分析

分析台风“杜苏芮”影响福建降水中台风眼壁、内螺旋雨带及外螺旋雨带强降水雷达双偏振参量特征(图9)。28日09时57分(图9a),台风“杜苏芮”正在登陆泉州晋江,0.5°仰角雷达回波上“杜苏芮”呈现出明显的非对称结构,台风西侧眼壁水平反射率因子 Z_H 达到60 dBZ以上,而东侧水平反射率因子强度为30~40 dBZ。 Z_{DR} 是水平极化雷达反射率因子 Z_H

与垂直极化雷达反射率因子 Z_V 之比的对数($Z_{DR} = 10 \log Z_H / Z_V$),反映粒子的形状、空间取向及相态信息^[30]。此时,雷达差分反射率 Z_{DR} 在西侧眼壁为4~5 dB(图9d),表明西侧眼壁粒子扁平程度高,以大雨滴为主,而台风其他部位以小雨滴为主。差分传播相移率 K_{DP} 在西侧眼壁处达到 $6 (^\circ) \cdot km^{-1}$ (图9g),表明大雨滴浓度大,而外围螺旋雨带 K_{DP} 值为 $1 \sim 2 (^\circ) \cdot km^{-1}$,表明小雨滴浓度也较大。

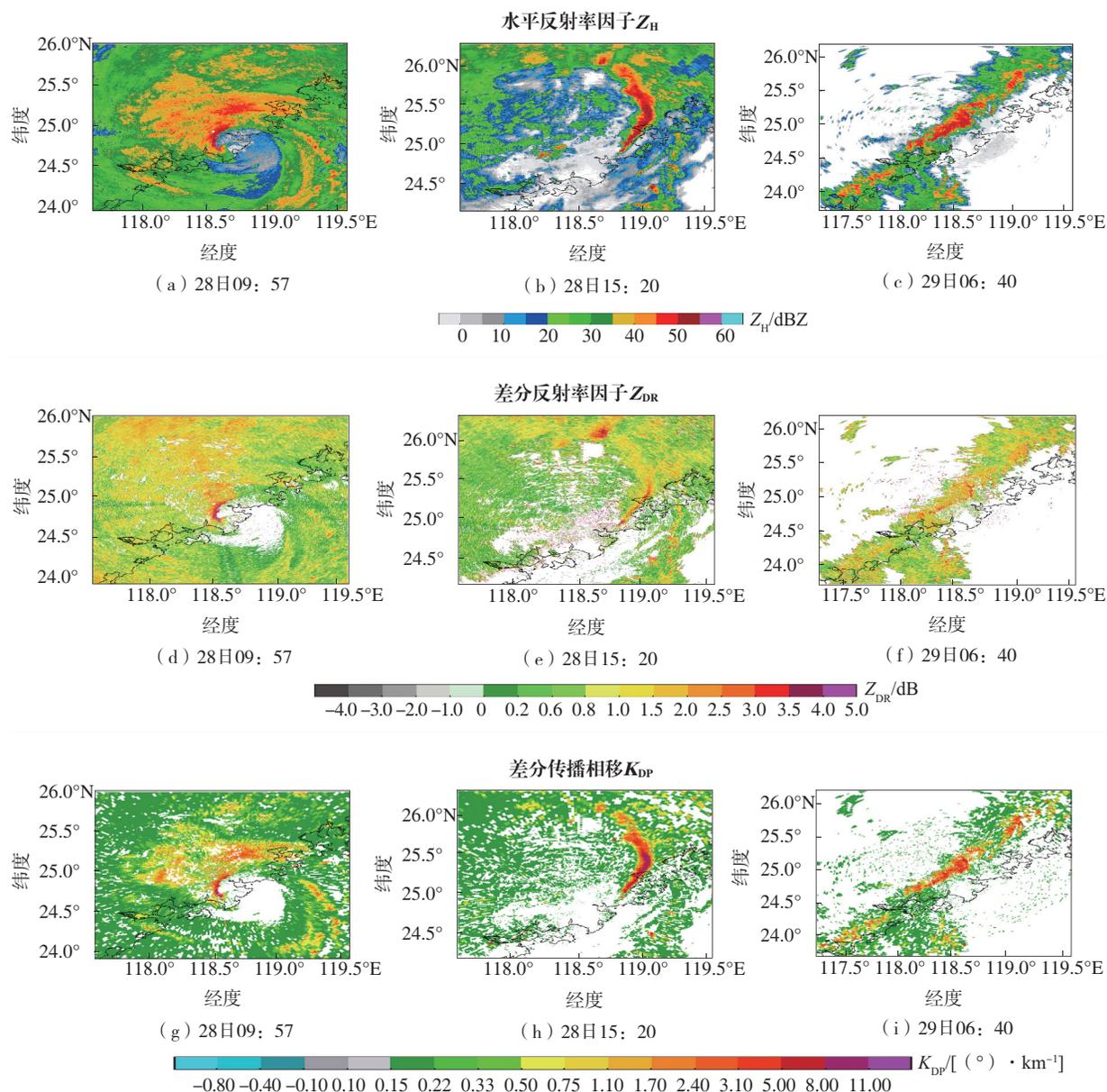


图9 2023年7月28日—29日不同时刻水平反射率因子、差分反射率因子和差分传播相移

Fig.9 Horizontal reflectivity Z_H , differential reflectivity factor Z_{DR} , and differential phase shift

K_{DP} at different times from 28 to 29 July 2023

28日15时20分(图9b),台风“杜苏芮”内螺旋雨带线状对流单体呈弓形,南部反射率因子强度高梯度大, Z_H 达到55 dBZ以上, Z_{DR} 在线状对流单体中为2~4 dB(图9e),表明存在较大雨滴, K_{DP} 值达3~5 $(^\circ)\cdot\text{km}^{-1}$ (图9h),表明低层有大量较大雨滴,粒子浓度高于“杜苏芮”登陆前后眼壁区,最大雨强 $151.2\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 也出现在这一阶段,表明高浓度的较大雨滴有利于产生极端短时强降水。

29日06时40分(图9c),台风外螺旋雨带降水阶段,在福建沿海形成一条长约500 km、宽30~

50 km的MCS,该MCS低层反射率因子最强为50~55 dBZ,距离海岸线20~30 km。 Z_{DR} 在3个阶段中最小(图9f),为1~3 dB,表明此时降水粒子直径较小,以小雨滴为主, K_{DP} 值为2~3 $(^\circ)\cdot\text{km}^{-1}$ (图9i),表明以高浓度的小雨滴为主,此时福建沿海一带大部雨强在 $50\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 上下,由于该MCS与海岸线近乎平行,并沿海岸线移动,存在明显的“列车效应”,降水持续时间长,造成大范围强降水。这一阶段降水的雷达双偏振特征与福建沿海暖区暴雨特征类似^[29],表明高浓度小雨滴长时间维持是产生福建强

降水的主要云微物理特征。

7 结论与讨论

台风“杜苏芮”是1949年至2023年9月登陆福建第2强台风,登陆强度高、影响范围大、风雨并重、致灾性强。利用双偏振雷达、FY-4A等多源观测资料分析了台风“杜苏芮”引发福建极端强降水的特征,主要结论如下:

(1)“杜苏芮”引发福建强降水存在2个明显的降水阶段。第一强降水阶段28日08—17时以台风眼壁和内螺旋雨带降水为主,强降水集中在台风中心附近,小时雨量极端;第二强降水阶段28日21时—29日10时为“杜苏芮”移出福建后台风外螺旋雨带上MCS发展,雨强大、持续时间长,造成福建沿海大范围极端强降水。

(2)“杜苏芮”登陆前上升运动主要集中在眼壁和螺旋雨带附近,登陆后台风与副高之间偏南气流维持产生持续不断的水汽输送,为福建沿海强降水提供了充沛的水汽和不稳定能量条件,鹫峰山、戴云山地形增幅作用进一步加剧了迎风坡一侧降水,强降水中心集中在鹫峰山向东开口的喇叭口地区。

(3)台风登陆后不对称结构加剧,眼壁附近中 β 尺度对流云团原地发展,云顶亮温低。对流云团分裂进入内螺旋云带中发展为线状对流,最大雨强达到 $151.4\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。“杜苏芮”移出福建台风后外螺旋雨带上多个对流单体发展并连成一线,MCS持续影响福建沿海约11h,形成长约500km、宽40~80km的强降水带。

(4)雷达双偏振参量分析表明,台风眼壁区强降水以大雨滴为主,内螺旋雨带粒子尺度略小于眼壁区,但仍以大雨滴为主,且粒子浓度更大,造成极端小时雨强,而台风外螺旋雨带上MCS引起的强降水云微物理特征与暖区暴雨类似,但回波强度和雨强略弱,高浓度小雨滴是主要的云微物理特征。

本文利用多源资料讨论了“杜苏芮”引发的福建强降水的基本特征,但对于台风登陆后眼壁对流发展的中小尺度结构、台风远离福建后外螺旋雨带上MCS长时间维持的成因还需要更为深入的分析 and 诊断,关于海陆分布及地形对台风降水的影响还需要高分辨率数值模式进一步验证。

参考文献:

- [1] 王咏梅,任福民,李维京,等.中国台风降水的气候特征[J].热带气象学报,2008,24(3):233-238.
- [2] 陈联寿,丁一汇.西太平洋台风概论[M].北京:科学出版社,1979:491.
- [3] 张庆红,韦青,陈联寿.登陆中国大陆台风影响力研究[J].中国科学:地球科学,2010,40(7):941-946.
- [4] 徐亚钦,叶妍婷,刘瑞,等.1814号台风“摩羯”造成浙江内陆强降水的动力特征分析[J].海洋气象学报,2022,42(4):37-47.
- [5] 向纯怡,赵海坤,刘青元,等.1909号台风“利奇马”登陆后强降水分布特征[J].气象科学,2020,40(3):294-302.
- [6] 何立富,陈双,郭云谦.台风利奇马(1909)极端强降水观测特征及成因[J].应用气象学报,2020,31(5):513-526.
- [7] 秦思,姚美,任福民,等.强台风“菲特”(1323)极端降水研究进展[J].海洋气象学报,2021,41(1):11-18.
- [8] 高晓梅,李峰,王文波,等.台风“利奇马”引发山东极端暴雨的多尺度特征分析[J].海洋气象学报,2022,42(2):33-43.
- [9] 陈涛,董林,罗玲,等.台风利奇马登陆期间的对流结构特征及对强降雨影响[J].气象,2021,47(12):1433-1443.
- [10] 陈联寿.热带气旋研究和业务预报技术的发展[J].应用气象学报,2006,17(6):672-681.
- [11] CHEN L S, LI Y. An overview on the study of the tropical cyclone rainfall[C]//Proceeding International Conference on Storms. Brisbane: Australian Meteorological and Oceanographic Society, 2004:112-113.
- [12] 陈联寿,孟智勇,丛春华.台风暴雨落区研究综述[J].海洋气象学报,2017,37(4):1-7.
- [13] CHEN L S, LI Y, CHENG Z Q. An overview of research and forecasting on rainfall associated with landfalling tropical cyclones[J]. Adv Atmos Sci, 2010,27(5):967-976.
- [14] 程正泉,陈联寿,徐祥德,等.近10年中国台风暴雨研究进展[J].气象,2005,31(12):3-9.
- [15] 任福民,吴国雄,王小玲,等.近60年影响中国之热带气旋[M].北京:气象出版社,2011.
- [16] 林小红,杨舒楠,王健治,等.过台湾岛的台风所引发的东南沿海地区的暴雨特征分析[J].气象,2023,49(9):1097-1107.
- [17] 任福民,杨慧.1949年以来我国台风暴雨及其预报研究回顾与展望[J].暴雨灾害,2019,38(5):526-540.

- [18] SIMPSON R H. On the structure of tropical cyclones as studied by aircraft reconnaissance [C]//Proceeding of the UNESCO symposium on Typhoons. Tokyo, 1954: 129-150.
- [19] 冀春晓, 陈联寿, 徐祥德, 等. 多普勒雷达资料动态定量估测台风小时降水量的研究 [J]. 热带气象学报, 2008, 24(2): 147-155.
- [20] 刘黎平, 曹俊武, 莫月琴, 等. 雷达遥感新技术及其在灾害性天气探测中的应用 [J]. 热带气象学报, 2006, 22(1): 1-9.
- [21] BRINGI V N, CHANDRASEKAR V. Polarimetric Doppler weather radar: principles and applications [M]. New York: Cambridge University Press, 2001.
- [22] 王睿, 黄燕燕, 伍志方, 等. 基于双偏振雷达资料对南海弱台风降水微物理结构的分析 [J]. 热带气象学报, 2022, 38(1): 43-57.
- [23] 马孝林, 王举, 黄泓, 等. 台风“莫兰蒂”登陆前后微物理特征研究 [J]. 气象科学, 2022, 42(6): 730-741.
- [24] WANG M J, ZHAO K, XUE M, et al. Precipitation microphysics characteristics of a Typhoon Matmo (2014) rainband after landfall over Eastern China based on polarimetric radar observations [J]. J Geophys Res; Atmos, 2016, 121(20): 12,415-12,433.
- [25] WANG M J, ZHAO K, LEE W C, et al. Microphysical and kinematic structure of convective-scale elements in the inner rainband of Typhoon Matmo (2014) after landfall [J]. J Geophys Res; Atmos, 2018, 123(12): 6549-6564.
- [26] BAO X W, WU L G, ZHANG S A, et al. Distinct raindrop size distributions of convective inner- and outer-rainband rain in Typhoon Maria (2018) [J]. J Geophys Res; Atmos, 2020, 125(14): e2020JD032482.
- [27] DAI H N, ZHAO K, LI Q Q, et al. Quasi-periodic intensification of convective asymmetries in the outer eyewall of Typhoon Lekima (2019) [J]. Geophys Res Lett, 2021, 48(5): e2020GL091633.
- [28] 高留喜, 王彦, 万明波, 等. 2009-08-17 山东特大暴雨雷达回波及地形作用分析 [J]. 大气科学学报, 2011, 34(2): 239-245.
- [29] 胡雅君, 张伟, 赵玉春, 等. “5·7” 闽南沿海暖区特大暴雨中尺度特征分析 [J]. 气象, 2020, 46(5): 629-642.
- [30] 俞小鼎, 王秀明, 李万莉. 雷暴与强对流临近预报 [M]. 北京: 气象出版社, 2020: 18.