

刘达,向纯怡,张玲,等.台风“杜苏芮”(2305)的主要特点及路径和强度预报难点分析[J].海洋气象学报,2023,43(4):1-10.
LIU Da, XIANG Chunyi, ZHANG Ling, et al. Analysis on main characteristics of Typhoon Doksuri (2305) and difficulties in its track and intensity forecast[J]. Journal of Marine Meteorology, 2023, 43(4): 1-10. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2023.04.001. (in Chinese)

台风“杜苏芮”(2305)的主要特点及路径和强度预报难点分析

刘达¹,向纯怡¹,张玲¹,许映龙^{1,2},罗琦¹

(1.国家气象中心,北京 100081;2.中国科学院大学,北京 100049)

摘要: 通过总结 2023 年第 5 号台风“杜苏芮”的主要特点,并对主要的预报难点问题进行分析 and 研究,得出以下主要结论:(1)“杜苏芮”登陆强度强,是 2023 年截至 10 月登陆我国最强的台风,登陆后在陆上长时间维持,造成福建、安徽等地多站点风雨观测突破历史极值,黄淮、华北等地出现历史极端强降雨天气。(2)在“杜苏芮”生成初期,由于副热带高压受到多系统的影响,数值模式对于“杜苏芮”台风东侧新生热带扰动的强度、位置预报存在偏差,是产生较大路径预报偏差的原因。(3)“杜苏芮”登陆前形成双眼墙结构增加了登陆强度预报的难度,有利的形势条件和多源观测资料的应用为台风强度预报提供了良好的支撑。(4)“杜苏芮”登陆后,来自西南季风和第 6 号台风“卡努”共同的水汽输送、太行山地形作用以及移动路径上弱的垂直风切变均有利于台风减弱后的低压环流长时间维持。

关键词: 台风“杜苏芮”;预报难点;预报偏差;热带扰动

中图分类号: P444;P458.124 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2023)04-0001-10
DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2023.04.001

Analysis on main characteristics of Typhoon Doksuri (2305) and difficulties in its track and intensity forecast

LIU Da¹, XIANG Chunyi¹, ZHANG Ling¹, XU Yinglong^{1,2}, LUO Qi¹

(1. National Meteorological Center, Beijing 100081, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The main characteristic of Typhoon Doksuri (2305) are summarized, and the difficulties in its forecast are also analyzed. The main conclusions are as follows. (1) Typhoon Doksuri is characterized by its strong landfall intensity, which, for the year 2023, is the strongest typhoon that makes landfall in China by October. Sustaining on land for a long time after landing, it breaks the historical records of wind and precipitation at multiple stations in places such as Fujian and Anhui, and brings historically extreme heavy rainfall to Huang-Huai region and North China. (2) After the genesis of Doksuri, as the circulations that affect the subtropical high are complicated, the numerical prediction of the intensity and location for the newborn tropical disturbance on the east of Doksuri has deviations, which is responsible for the track forecast errors. (3) The formation of double eyewall structure before Doksuri lands increases the difficulty of predicting the landfall intensity, while the favorable circulations and the application of multiple observations are supportive of the typhoon intensity prediction. (4) The sustainable water vapor

收稿日期:2023-10-18;修回日期:2023-10-26

基金项目:中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J027);国家自然科学基金青年科学基金项目(42205068)

第一作者简介:刘达,女,博士,高级工程师,从事台风与海洋气象预报工作,liuda@cma.gov.cn。

通信作者简介:向纯怡,女,博士,高级工程师,长期从事台风预报和研究工作,xiangcy@cma.gov.cn。

transport from the southwest monsoon and Typhoon Khanun (2306), the terrain effect of Taihang Mountain, and the weak vertical wind shear along the typhoon track jointly help the tropical depression maintain for a long time after Doksuri makes landfall.

Keywords: Typhoon Doksuri; forecast difficulty; forecast error; tropical disturbance

引言

台风是影响我国最严重的灾害性天气之一,平均每年有6~7个台风登陆我国。台风登陆后带来的强烈风雨天气以及其他次生灾害经常造成严重的生命和财产损失^[1]。在全球变暖的气候背景下,近30 a 西北太平洋和南海台风强度呈现增强的趋势,影响或登陆我国的台风强度也有所增强^[2-3],沿海地区防御台风灾害面临更加严峻的挑战。随着观测手段的丰富和数值预报的发展,台风强度和路径预报水平得到了极大的改善。然而,集合预报仍然存在台风预报离散度大的现象,同时台风结构与台风强度之间的关系依然是台风研究领域的难点问题^[4],尚无公认的结论。业务预报中上述这些问题考验着预报员的主观订正水平,通过分析台风典型个例的预报难点,同时积累相关的预报经验是提升主观预报水平的重要方式之一^[5-6]。

7月是西北太平洋和南海台风活动的活跃期,历史同期大量台风在我国南海东北部海域和菲律宾东北洋面生成。2023年7月,西北太平洋副热带高压(以下简称“副高”)的强度较历史同期偏强,副高平均脊线较历史同期偏北,副高西段脊点与常年相比位置偏西。2023年第5号台风“杜苏芮”于7月21日生成于副高南侧,生成后西行,于7月28日登

陆我国福建晋江,给福建、浙江和安徽等地造成了严重的风雨影响。受其减弱后低压环流长时间维持的影响,我国黄淮、华北等地出现历史极端强降雨天气。“杜苏芮”活跃期间,影响副高的环流系统复杂,路径预报难度大,同时台风登陆后低压环流的强度和路径预报也是目前业务预报的难点问题,因此,通过梳理并总结“杜苏芮”预报过程中的难点,发现预报中实际面临的问题和挑战,为台风预报提供参考,从而提升台风精细化预报水平。

1 数据来源

所使用的数据包括:(1)国家气象信息中心提供的国家级地面气象观测站风雨观测资料。(2)中央气象台、日本气象厅(Japan Meteorological Agency, JMA)和美国联合台风警报中心(Joint Typhoon Warning Center, JTWC)的官方主观实时台风分析和预报资料。(3)欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)第五代再分析数据^[7](ECMWF Reanalysis v5, ERA5)和集合预报数据。(4)美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)再分析数据集和数值预报数据^[8]。(5)本文使用中国气象局、ECMWF、NCEP等机构发布的数值预报产品,产品名称如表1所示。

表1 数值预报产品名称及其发布机构

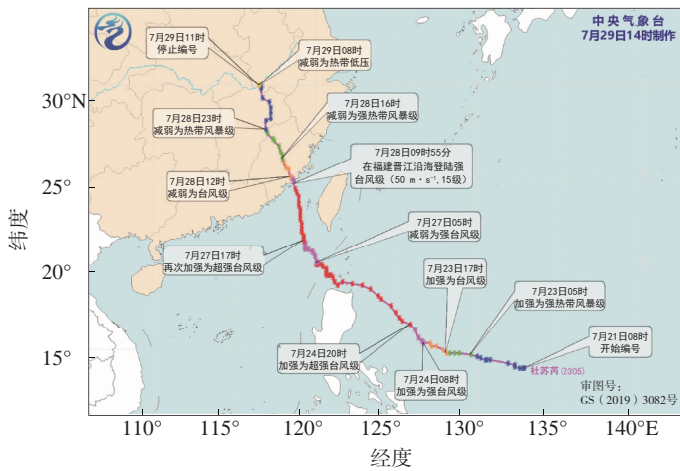
Table 1 Names and issuing institutions of numerical prediction products

发布机构	产品中文全称	产品英文全称	全称简写
中国气象局地球系统数值预报中心	中国气象局全球集合预报系统	China Meteorological Administration_Global Ensemble Prediction System	CMA-GEPS
中国气象局地球系统数值预报中心	中国气象局区域台风数值预报系统	China Meteorological Administration_Regional Mesoscale Typhoon Numerical Prediction System	CMA-TYM
中国气象局地球系统数值预报中心	中国气象局全球同化预报系统	China Meteorological Administration_Global Forecast System	CMA-GFS
中国气象局地球系统数值预报中心	中国气象局区域集合预报系统	China Meteorological Administration_Regional Ensemble Prediction System	CMA-REPS
NCEP	NCEP 确定性预报	NCEP deterministic forecast	NCEP
NCEP	NCEP 集合预报	NCEP Ensemble Prediction System	NCEP-EPS
ECMWF	EC 确定性预报	ECMWF deterministic forecast	EC
ECMWF	EC 集合预报	ECMWF Ensemble Prediction System	EC-EPS
华为	盘古气象大模型	PanGu-Weather	PanGu

2 台风“杜苏芮”概况和特点

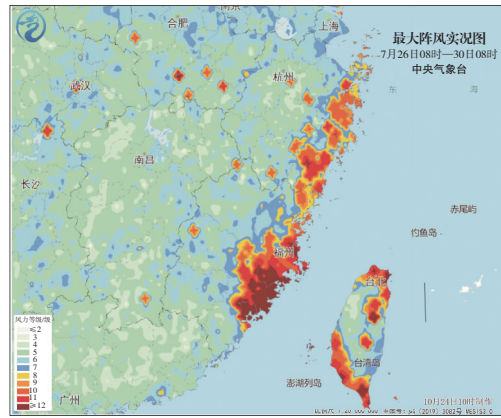
2023年第5号台风“杜苏芮”于7月21日08时(北京时,下同)在菲律宾以东洋面生成(图1a),生成后西行且强度逐渐增强,于24日夜间加强为超强台风级,转向西北方向移动,经过巴士海峡后减弱为强台风级。27日进入南海东北部海域后再度加

强为强台风级,并于28日09时55分以强台风级(15级, $50\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)在福建晋江沿海登陆。登陆后继续北上,影响福建、浙江、安徽等地后,在安徽境内减弱为热带低压,29日11时中央气象台对其停止编号。但受其残余低压环流继续北上的影响,7月30日—8月2日,我国黄淮、华北等地出现了极端降雨天气。

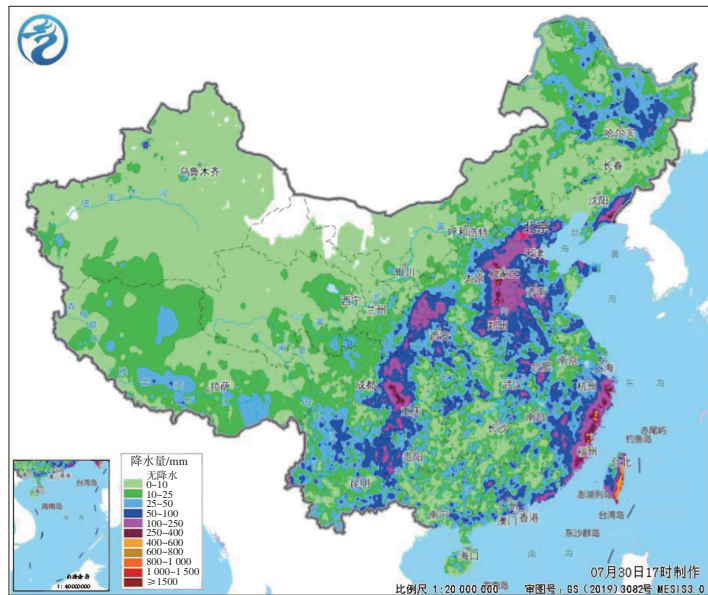


- 热带低压($10.8\sim 17.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)
- 热带风暴($17.2\sim 24.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)
- 强热带风暴($24.5\sim 32.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)
- 台风($32.7\sim 41.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)
- 强台风($41.5\sim 50.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)
- 超强台风($\geq 51.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

(a) 台风“杜苏芮”全路径



(b) 7月26日08时—30日08时最大阵风实况



(c) 7月26日08时—30日16时累计降雨量实况

图1 台风“杜苏芮”路径及其影响期间最大阵风和降雨量实况资料

Fig.1 Track of Typhoon Doksuri and observations of the maximum gust and precipitation during its influence

“杜苏芮”是2023年截至10月登陆我国的最强台风,也是1949年以来登陆福建第二强的台风,

仅次于2016年超强台风“莫兰蒂”。“杜苏芮”给我沿海地区带来了极端的风雨影响,福建多观测站

点极大风突破历史记录,其中张坂镇最大瞬时风力达到16级($51.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,图1b)。

受台风“杜苏芮”影响,福建、浙江、台湾等地部分地区累计降雨量为200~350 mm,福建泉州、莆田、福州、宁德和浙江温州、丽水、台州、宁波等地局地降雨量为400~861 mm,台湾南部局地降雨量超过1400 mm(图1c)。受台风“杜苏芮”直接影响,福建和安徽等地共计6个国家级地面气象观测站日降水量突破历史极值。强降雨天气导致福建福州、泉州、漳州、宁德和浙江宁波、温州、丽水等多地发生严重内涝,局地发生山洪灾害。

“杜苏芮”于28日登陆后,环流系统在陆上维持近70 h(28日10时—31日08时)后完全消散,环流维持时间远超过登陆我国台风平均滞留陆地时间(20 h)。“杜苏芮”停编后,受其残余环流北上的影响,华北、黄淮等地出现强降雨天气,其中京津冀出现暴雨到大暴雨,部分地区出现特大暴雨,最大降雨量达1003.4 mm。北京多区和河北保定、石家庄等

地出现山洪、山体滑坡以及严重城市内涝,致使车辆、房屋被毁,多处道路塌方,桥梁坍塌,造成重大人员伤亡和经济损失。

综上所述,总结“杜苏芮”主要特点为:登陆强度高,风雨影响极端,陆上维持时间长。

3 预报误差分析

中央气象台对台风“杜苏芮”在24 h、48 h、72 h、96 h和120 h路径主观预报误差分别是51 km、89 km、141 km、234 km和310 km(图2),明显低于数值模式预报的偏差。通过对中国气象局(CMA)、日本气象厅(JMA)和美国联合台风警报中心(JTWC)主观预报进行对比,发现CMA与JMA预报水平相当,短时效预报误差略优于JTWC,CMA长时效预报误差明显好于JMA和JTWC。对比主观和客观的预报效果,CMA长时效路径预报偏差,与预报技巧较好的ECMWF相比明显偏大。

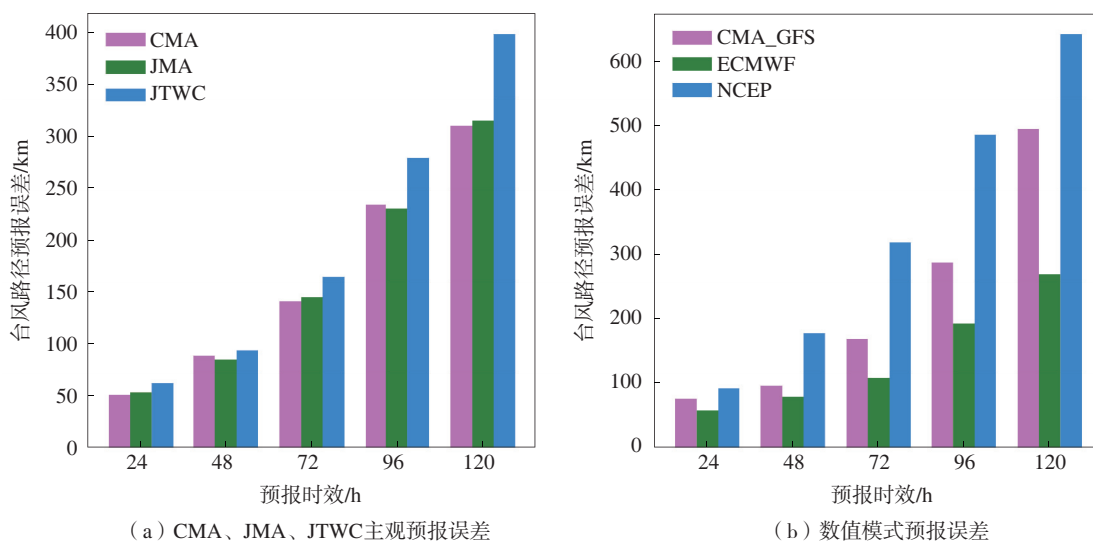


图2 台风“杜苏芮”路径预报误差对比

Fig.2 Comparison of track forecast errors for Typhoon Doksuri

CMA在24 h、48 h、72 h、96 h和120 h的强度预报误差分别是 $3.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $5.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $6.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $6.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $9.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图3),除了预报误差高于JMA外,较JTWC以及数值模式均有明显提升,主观预报偏差明显优于模式预报偏差,体现出预报员对数值预报模式结果的订正能力。

对比客观预报结果可以发现,数值模式存在不

同程度的强度和路径预报偏差,并且模式之间也存在一定的差异。在“杜苏芮”预报过程中,预报员对数值模式预报主观订正能力发挥了重要作用。

4 预报难点分析

通过回顾台风“杜苏芮”主要特点和预报情况,不难发现中央气象台对“杜苏芮”长时效路径预报

存在较大的预报偏差,对比不同起报时段的预报效果发现长时效路径预报偏差主要产生于“杜苏芮”生成初期,此时预报误差远高于全时效统计结果(图4)。此外,强度预报方面,“杜苏芮”登陆前双眼墙结构的形成加大了强度预报的难度,尽管“杜苏芮”主观强度预报准确率较客观模式有较大的提

升,但强度预报偏差仍高于2022年平均预报偏差(12h预报误差为 $2.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。同时,“杜苏芮”登陆后环流长时间维持造成极端强降雨天气,目前对于台风登陆后环流维持的监测和预报仍然是科学研究和预报业务面临的共同问题。因此,以下将针对上述3方面问题进行具体分析。

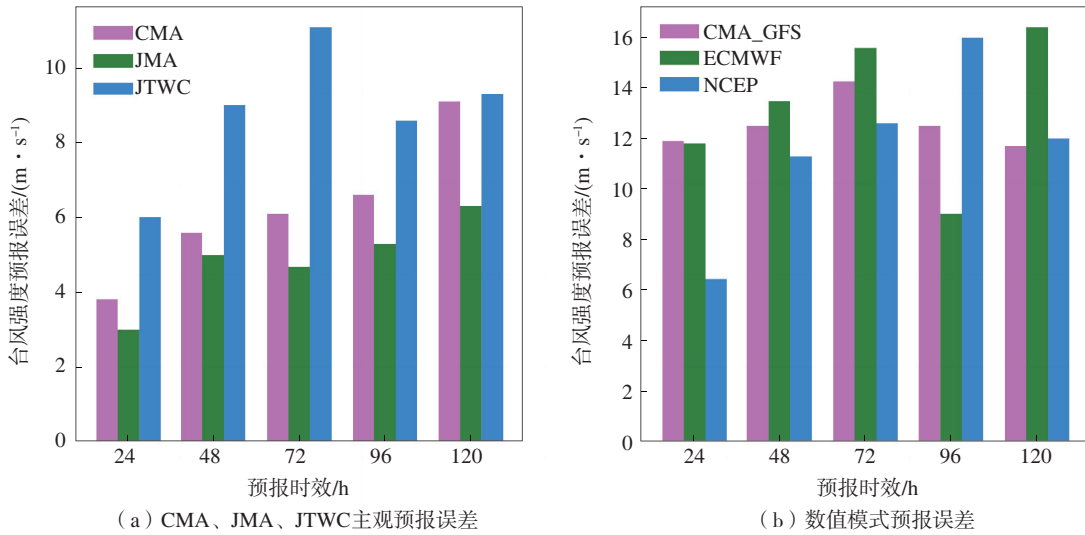


图3 台风“杜苏芮”强度预报误差对比
Fig.3 Comparison of intensity forecast errors for Typhoon Doksuri

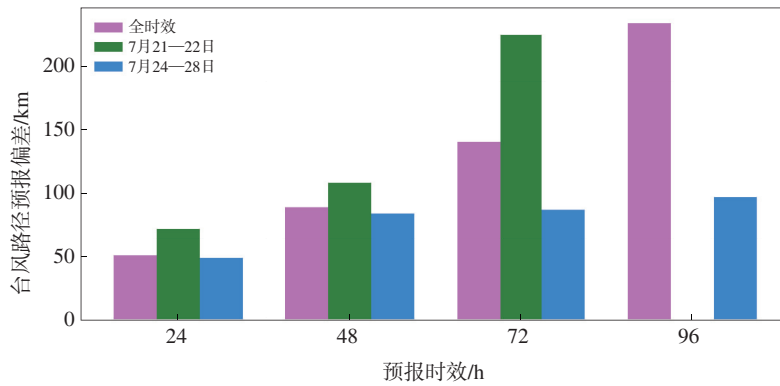


图4 中央气象台主观路径预报偏差比较
Fig.4 Comparison of track forecast errors by CMA

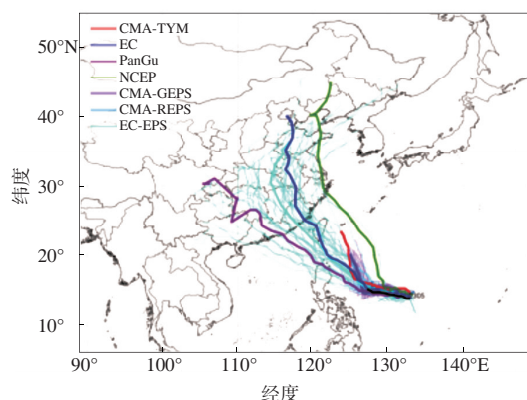
4.1 “杜苏芮”生成初期路径预报偏差

对比不同起报阶段的路径预报偏差发现,“杜苏芮”生成初期路径预报偏差较大(图4),此时“杜苏芮”穿过巴士海峡进入南海东北部海域,台风生成初期主观预报“杜苏芮”将登陆台湾岛后进入台湾海峡,预报路径较实况明显偏东,从而产生了较大的预报误差。

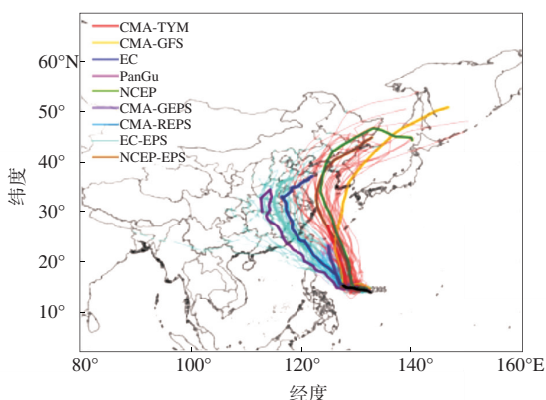
“杜苏芮”生成于副高南侧,此时副高不仅受到“杜苏芮”影响,同时受到中纬度西风带系统和“杜苏芮”东侧新生热带扰动(该扰动后续发展成为2023年第6号台风“卡努”,以下简称“卡努”扰动)的共同影响(图5),副高形态的变化对于台风路径预报具有重要的影响。由于影响副高的环流系统复杂,数值模式对于副高变化的预报各异,在“杜苏芮”生成初期路

径预报稳定性较差,不仅集合预报路径发散度很大,而且不同起报时次客观路径预报调整的方向分歧也较大,从而增加了主观订正的难度(图6)。

7月21日08时—23日14时,中央气象台主观预报“杜苏芮”生成后向西北方向移动,趋向于登陆台湾岛,7月23日17时预报调整为穿过巴士海峡进入南海东北部海域。后期实况中“杜苏芮”于26日经过巴士海峡,此时数值模式零场对于台风北侧副高底部偏东风较台风生成初期预报明显加强,风速梯度大值区位于台风北侧,在偏东气流的引导作用下向西移动。对比模式零场和预报场可以发现偏东风强度和位置一定程度上受到“卡努”扰动预报差异的影响(图7)，“杜苏芮”生成初期“卡努”扰动强度偏弱而且位置偏南,“杜苏芮”处于副高的西侧,在偏南气流的引导下向北移动,导致进入南海的可能性降低。



(a) 起报时间: 7月21日08时

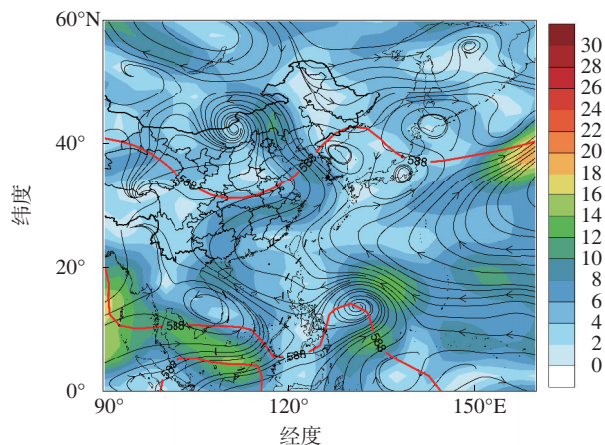


(b) 起报时间: 7月21日20时

图6 数值模式和集合预报系统不同起报时间对“杜苏芮”的路径预报

Fig.6 Track forecast for Typhoon Doksuri by numerical models and ensemble forecast systems with different initial times

对比集合预报中路径预报极端成员可以验证“卡努”扰动预报的差异对于“杜苏芮”路径的影响,对于路径预报显著偏东表现为进入东海南部海域的成员(图8a)，“卡努”强度明显偏弱,而且扰动几乎处于5°N附近,相较于零场显著偏南,“杜苏芮”与副高之间的梯度大值区位于台风的东侧,在偏南气流的引导下向北移动,排除了进入南海的可能性。对于集合预报中路径穿过巴士海峡进入南海的成员则可以较好地预报出“卡努”扰动的位置和强度(图8b)，“杜苏芮”北侧偏东气流的强度明显增强。因此,在台风相对活跃时期,台风东侧新生系统预报的调整可以通过影响环流形势进而引起台风路径预报的变化。



流线—850 hPa风向; 色阶—850 hPa风速, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;
红色实线—500 hPa高度场, 单位: dagpm。

图5 7月21日08时500 hPa高度场和850 hPa风场

Fig.5 500-hPa geopotential height and 850-hPa wind at 08:00 BST 21 July

4.2 “杜苏芮”近海加强

“杜苏芮”于7月25日移入巴士海峡,并逐渐向福建沿海靠近,台风登陆强度预报成为主观预报面临的主要挑战。一方面,对于登陆台风来讲,数值模式时间分辨率还很难满足精细化预报服务的需求;另一方面,“杜苏芮”在登陆前逐渐形成双眼墙结构,目前对于台风结构变化与台风强度之间的关系还没有充足的客观观测事实支撑,同时也缺乏统一共性的研究结论^[4],台风双眼墙结构性形成和维持依然是近海加强台风强度预报面临的主要挑战之一,因此“杜苏芮”登陆前是否会出现强度在近海增强成为台风强度预报的难点问题。

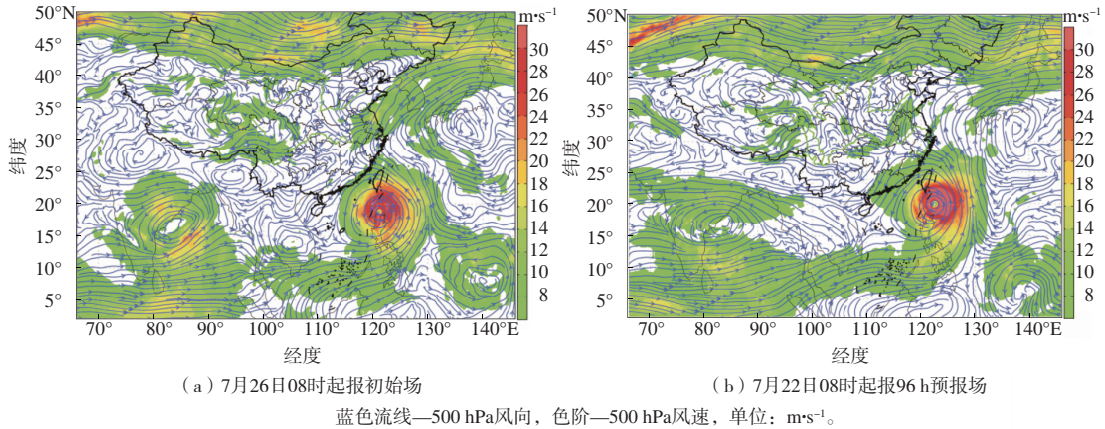


图7 7月26日08时模式预报的500 hPa风场
Fig.7 500-hPa wind forecast at 08:00 BST 26 July

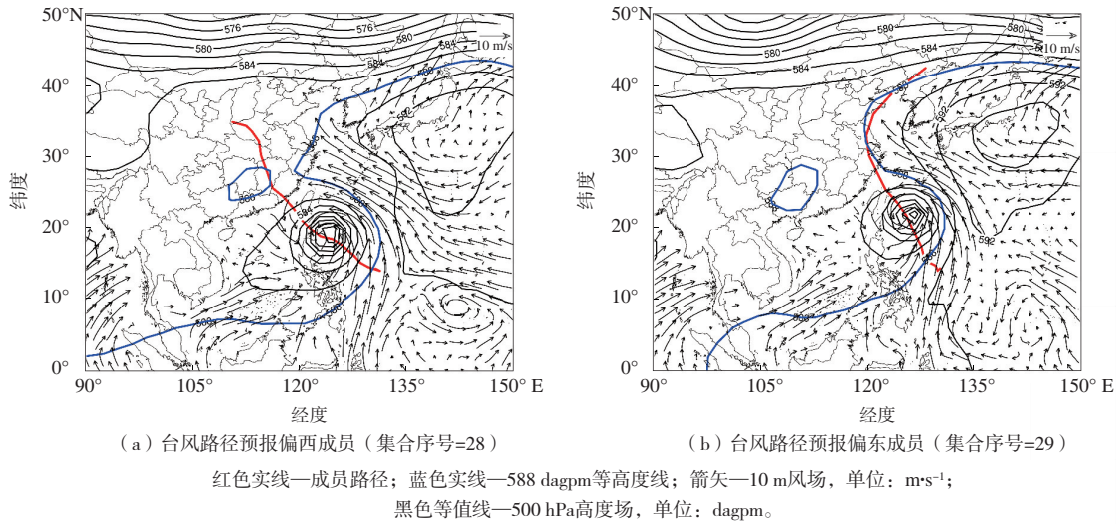


图8 7月22日08时起报的集合预报成员
Fig.8 Ensemble members with initial time of 08:00 BST 22 July

“杜苏芮”登陆前来自西南季风和“卡努”持续的水汽输送、台风北侧高层良好的出流条件以及南海东北部海域相对较高的海面温度条件(图9)均有利于台风强度增强。通过上述有利的形势条件,中央气象台7月26日10时主观预报结论指出“杜苏芮”将出现近海增强并以强台风级登陆福建。后期雷达观测显示“杜苏芮”登陆前双眼墙结构的维持,并且内、外眼墙均有增强的现象,同时在路径经过的海峡二号浮标观测到28日凌晨出现气压下降的现象,最低气压达到931.1 hPa,观测的最大平均风速达到 $46.5 m \cdot s^{-1}$ (15级)。因此,在实际预报中应用浮标、雷达等多源观测资料,不仅可以提高近海台风的监测水平,也可以支撑“杜苏芮”近海增强的事实,从而验证主观预报结果。

尽管近海加强的台风预报难度大,但是多源观测的应用为确定台风强度提供了良好的支撑,增强了主观预报的信心。目前,已有短时临近同化预报系统具备较好的台风强度和路径预报能力,未来通过利用雷达、卫星以及浮标站等观测手段进一步加强对于台风结构的监测,并探索其与短时临近快速同化预报系统的结合,提升台风强度预报精细化水平,从而为主观预报提供更加直观定量的参考。

4.3 “杜苏芮”陆上长时间维持的原因

“杜苏芮”于7月28日上午登陆福建晋江后,环流维持近70 h后完全消散,其登陆后陆上的维持时间远超过登陆我国台风的平均滞留陆地时间(20 h)。受其减弱后低压环流北上且长时间维持影响,我国黄淮、华北等地出现了历史极端强降雨天气。

“杜苏芮”登陆后北上的过程中,受到大别山地形影响,环流系统消散,地面气压升高,在其进入河南境内后,地面观测出现气压降低而后环流系统逐渐清晰的现象,该低压环流继续北上并于7月30日在太行山东侧长时间停滞。目前已有研究关注了这种台风环流减弱后降水增强的现象,称为台风残

涡复苏^[9-10]。陈联寿等^[9]通过研究多个造成特大暴雨的登陆台风个例指出,登陆台风残涡复苏导致的暴雨超过强台风登陆引起的暴雨,台风残涡复苏导致的强降雨往往与持续的水汽输送、中纬度系统结合以及台风高层云团内的微物理过程和地形密切相关^[9-12]。

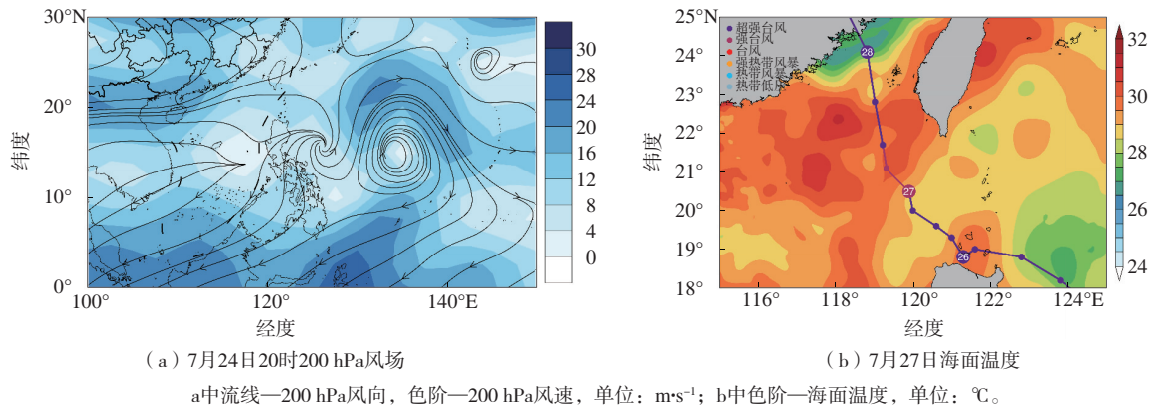


图9 7月24日20时200 hPa风场和27日海面温度资料
Fig.9 200-hPa wind at 20:00 BST 24 July and sea surface temperature on 27 July

“杜苏芮”残涡北上期间,华北平原地形相对平坦,摩擦作用小,同时在其路径经过的区域环境垂直风切变小(图10),有研究指出垂直风切变小于 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 有利于低压环流长时间维持^[13]。另外,副高南侧“卡努”强度逐渐增强,通过副高底部偏南气流将水汽输送到华北地区,良好的湿度条件同样促使“杜苏芮”低压环流长时间维持并且造成局地可降水量增加(图11),从而导致极端暴雨的发生。

和路径的预报均表现出不足,并且对于台风减弱后环流还没有建立有效的客观监测和分析机制,因此台风登陆后陆上阶段的预报业务相对薄弱,相关的业务体系有待于进一步完善,同时急需开展相关的理论研究以提升对机理的认识。

5 结论和讨论

利用中央气象台等主观预报和数值模式客观预报资料,以及再分析数据等对2023年第5号台风“杜苏芮”主要特点和预报难点进行了回顾和分析,主要结论如下:

(1)“杜苏芮”登陆强度强,是2023年截至10月登陆我国的最强台风,福建、安徽等地多站点风雨观测突破极值。“杜苏芮”登陆后北上且长时间维持,造成我国黄淮、华北等地出现历史极端强降雨天气。

(2)由于影响副高环流的系统复杂,“杜苏芮”生成初期路径预报是预报难点问题之一。此时数值模式预报发散度大且预报调整的结论不一,预报员主观订正难度大。受“杜苏芮”东侧热带扰动预报调整的影响,副高南侧偏东气流增强,“杜苏芮”向偏西方向移动,经过巴士海峡进入南海,主观预报路径较实况明显偏东,因此产生了较大的预报偏差。

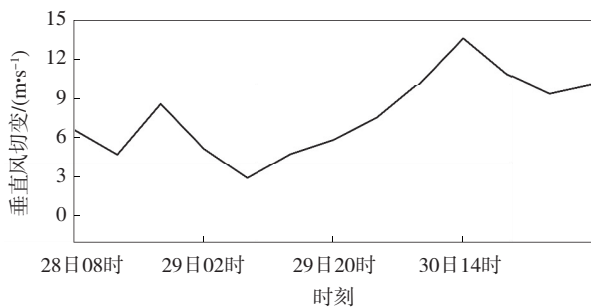


图10 7月28—31日“杜苏芮”路径经过的 4° 范围内环境垂直风切变
Fig.10 Vertical wind shear averaged within 4° along the track of Typhoon Doksuri from 28 to 31 July

登陆台风减弱后的低压环流长时间维持所造成的暴雨天气已经得到了公众的广泛关注,但是目前无论是全球模式还是区域模式对于台风登陆后强度

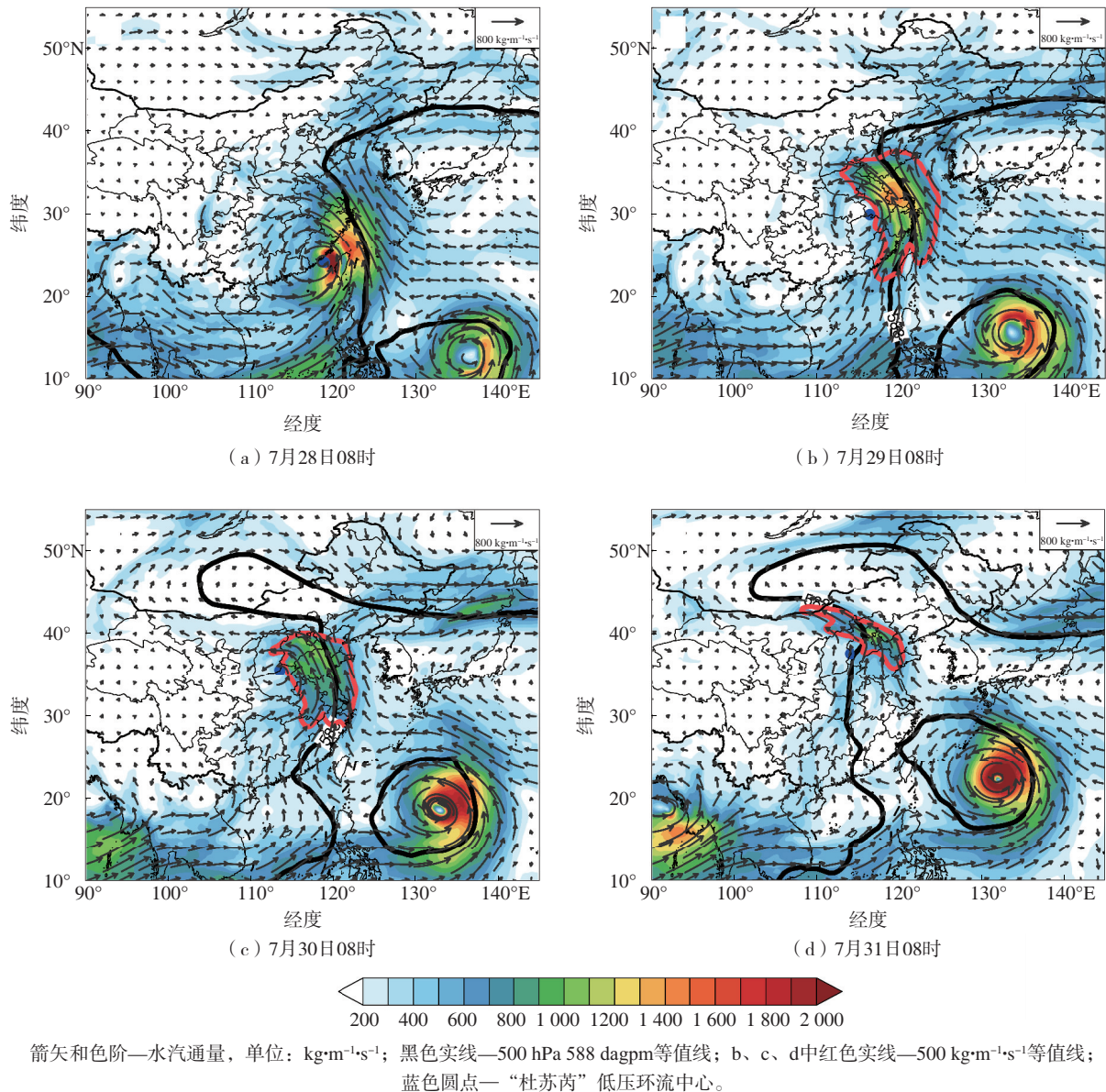


图 11 整层(1 000~300 hPa)大气水汽通量和 500 hPa 副高位置

Fig.11 Atmospheric water vapor flux of the whole layer (1 000~300 hPa) and position of subtropical high at 500 hPa

(3)“杜苏芮”登陆前形成双眼墙结构,增加了登陆强度主观预报的难度。预报员根据海面温度条件、持续的水汽输送以及高层良好的出流等有利的环流条件判断“杜苏芮”会出现近海加强现象,但是对于台风结构监测以及台风结构变化与台风强度之间的关系仍需要开展大量的工作,从而更好地支撑台风强度的确定性预报。

(4)“杜苏芮”登陆后,受华北平原地形作用,同时弱的垂直风切变以及来自“卡努”的水汽输送使得环流长时间维持,影响我国黄淮、华北等地出现极端降雨天气。目前对于台风登陆后的监测与预报还

是台风业务亟待完善的环节,需要开展相关的工作从而进一步提升台风精准预报能力。

上述分析中主要关注了“杜苏芮”强度和路径监测和预报中的难点问题,“杜苏芮”极端降雨也是此次预报过程中的难点问题。一方面,“杜苏芮”对福建降雨的影响主要集中在登陆后期,目前台风后部极端降雨的研究相对较少,极端降雨量级预报面临极大的挑战,而台风后部降雨往往会给沿海地区造成恶劣的影响,因此也需要开展个例分析从而积累相关经验;另一方面,除台风“杜苏芮”以外,第9号台风“苏拉”、第11号台风“海葵”同样造成了极

端强降雨天气,已有研究关注了台风登陆减弱后残余环流造成极端降水并分析了暴雨形成的相关机理^[9,14-15],但对于已有的研究成果如何在实际业务预报中应用以及预报员在台风预报中如何评估台风登陆阶段的风雨影响仍然有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 陈联寿,丁一汇.西太平洋台风概论[M].北京:科学出版社,1979.
- [2] 雷小途,徐明,任福民.全球变暖对台风活动影响的研究进展[J].气象学报,2009,67(5):679-688.
- [3] 向纯怡,高拴柱,刘达.2021年西北太平洋和南海台风活动概述[J].海洋气象学报,2022,42(1):39-49.
- [4] CHEN G H. Secondary eyewall formation and concentric eyewall replacement in association with increased low-level inner-core diabatic cooling[J]. J Atmos Sci,2018,75(8):2659-2685.
- [5] 王海平,董林,许映龙,等.台风“烟花”的主要特点和路径预报难点分析[J].海洋气象学报,2022,42(1):83-91.
- [6] 王靖,钱传海,董林,等.台风“梅花”(2212)的主要特点和路径预报难点分析[J].海洋气象学报,2023,43(1):52-62.
- [7] MUÑOZ-SABATER J. ERA5-Land hourly data from 1950 to present [EB/OL]. (2019-07-12) [2023-10-28]. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/10.24381/cds.e2161bac?tab=overview>.
- [8] KANAMITSU M, EBISUZAKI W, WOOLLEN J, et al. NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2) [J]. Bull Amer Meteor Soc,2002,83(11):1631-1643.
- [9] 陈联寿,许映龙.中国台风特大暴雨综述[J].气象与环境科学,2017,40(1):3-10.
- [10] DONG M Y, CHEN L S, LI Y, et al. Rainfall reinforcement associated with landfalling tropical cyclones [J]. J Atmos Sci,2010,67(11):3541-3558.
- [11] CHEN G H, WU C C, HUANG Y H. The role of near-core convective and stratiform heating/cooling in tropical cyclone structure and intensity [J]. J Atmos Sci,2018,75(1):297-326.
- [12] 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.
- [13] 陈国民,沈新勇,刘佳.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,2010,31(1):1-4.
- [14] 励申申,寿绍文.登陆台风维持和暴雨增幅实例的能量学分析[J].南京气象学院学报,1995,18(3):383-388.
- [15] 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.