

郑秀丽,林小红,关辉,等,2025. 三次不同冷空气过程对登闽台风极端降水影响的对比分析[J]. 气象,51(6):660-674. Zheng X L,Lin X H,Guan H,et al,2025. Comparative analysis of the effect of three different cold air events on extreme rainfall brought by landfall typhoons in Fujian[J]. Meteor Mon,51(6):660-674(in Chinese).

三次不同冷空气过程对登闽台风极端降水影响的对比分析*

郑秀丽^{1,2} 林小红^{2,3} 关辉⁴ 林昕¹ 姚林塔¹ 梁宝元⁵

1 福州市气象局,福州 350008

2 中国气象局海峡灾害天气重点开放实验室,福州 350007

3 福建省气象局,福州 350007

4 民航福建空中交通管理局,福州 350209

5 福建省莆田市气象局,莆田 351100

提 要: 针对“海葵”(2311 号)、“杜苏芮”(2305 号)以及“鲇鱼”(1617 号)三个台风登陆福建后引发的特强极端暴雨过程,采用地面自动气象观测站降水、台风最佳路径数据集以及再分析数据等多源资料,选取基于拉格朗日方法的 HYSPLIT5.0 模型定量分析冷空气和水汽输送路径及其不同源地的水汽贡献率,并对比不同强度冷空气冷暖作用形式和水汽输送对极端降水的影响。结果表明:对流层低层冷空气的强度、路径以及水汽输送作用不同,导致台风极端降水落区和强度不同。“海葵”在源自蒙古国的变性冷空气影响下,极端降水落区沿偏东风呈纬向型分布;“鲇鱼”东路和西路弱冷空气分别源自西西伯利亚的东部和中部地区,冷空气影响下的极端降水落区沿台风倒槽偏向于经向型分布;无冷空气侵入“杜苏芮”外围环流,在台风后部外雨带“列车效应”的持续影响下,极端降水落区沿西南急流呈经向型分布。水汽输送分析显示,“海葵”和“杜苏芮”是源自南海和西太平洋通道的水汽输送占主导作用(水汽贡献率分别为 90.4% 和 100%),降水极端性强;较低的南海和西太平洋通道水汽贡献率(25.5%)是“鲇鱼”降水强度最小的重要原因,但更广的冷空气影响范围造成“鲇鱼”大暴雨区域更大。

关键词: 台风登陆,极端降水,冷空气,水汽输送,轨迹示踪

中图分类号: P458,P447

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.011604

Comparative Analysis of the Effect of Three Different Cold Air Events on Extreme Rainfall Brought by Landfall Typhoons in Fujian

ZHENG Xiuli^{1,2} LIN Xiaohong^{2,3} GUAN Hui⁴ LIN Xin¹ YAO Linta¹ LIANG Baoyuan⁵

1 Fuzhou Meteorological Bureau, Fuzhou 350008

2 Key Laboratory of Straits Severe Weather, CMA, Fuzhou 350007

3 Fujian Meteorological Service, Fuzhou 350007

4 Civil Aviation Fujian Air Traffic Management Branch, Fuzhou 350209

5 Putian Meteorological Office of Fujian Province, Putian 351100

Abstract: Targeting the extremely severe rainstorms caused by three landfall typhoons in Fujian, i. e. Haikui (No. 2311), Doksuri (No. 2305) and Megi (No. 1617), and employing the multi-source data including the surface automatic weather station data, the best typhoon track data and the ERA5 and GDAS reanalysis

* 福建省科技厅面上项目(2024J011144,2021J01456)和中国气象局复盘总结专项项目(FPJ2025-061,FPJ2024-063,FPJ2024-066)共同资助

2024 年 7 月 3 日收稿; 2025 年 2 月 24 日收修定稿

第一作者:郑秀丽,主要从事台风动力学和精细结构研究. E-mail:xlzheng0308@163.com

通讯作者:林小红,主要从事台风、暴雨预报技术研究. E-mail:pop_lxh@163.com

data, as well as the HYSPLIT 5.0 trajectory model which was built by the Lagrangian method, this article quantitatively analyzes the cold air and water vapor transport pathways and their contribution rates from different sources. Besides, the impacts of cold air intensity, warm-cold interaction mechanism and water vapor transport on the extreme rainfall are compared. The results show that variations in cold air intensity, pathways and water vapor transport in the lower troposphere led to the differences in the rainfall area and intensity of the typhoon extreme rainfall events. Under the influence of the denatured cold air from Mongolia, the extreme rainfall triggered by Typhoon Haikui exhibited a zonal distribution pattern aligned with the easterly wind. For Typhoon Megi, it had the weak cold airs from the eastern and western pathways originated respectively from the east and central regions of West Siberia. Influenced by the weak cold airs, the extreme rainfall area was distributed along the typhoon inverted trough in the meridional direction. In contrast, there was no cold air invading the peripheral circulation of Typhoon Doksuri, but driven by the persistent “train effect” in the rainband behind the typhoon, extreme rainfall area of “Doksuri” presented a meridional distribution pattern along a southwesterly jet. The analysis on water vapor transport reveals that the water vapor supplies for “Haikui” and “Doksuri” were mainly from the South China Sea and western Pacific channels, with water vapor contribution rates of 90.4% and 100%, respectively, which resulted in the exceptionally intense rainfall events. However, for Typhoon Megi, the low moisture contributions (25.5%) from the South China Sea and western Pacific were the major reasons for the lowest rainfall intensity among the three typhoons, but the much broader cold air influence expanded the affected-area of the extremely heavy rainfall.

Key words: landfall typhoon, extreme rainfall, cold air, water vapor transport, trajectory tracing

引言

通常台风登陆后,受下垫面摩擦影响,台风结构破碎明显,强度也会迅速减弱,此时若有冷空气与台风发生相互作用,易触发极端降水发生,而极端降水的落区与量级仍是当今的预报难点。如2023年“海葵”登陆福建14 h后,受北方变性冷空气南下与“海葵”东北侧东南气流交汇影响,福建福州和宁德两市多项降水量破历史纪录。冷空气强度偏弱、位置偏北及东南气流偏强,导致极端降水落区预报与实况有较大偏离、降水量级严重低估。因此,加强冷空气与暖湿水汽输送的作用研究对台风极端降水的预报预警具有非常重要的现实意义。

诸多研究表明冷空气入侵台风环流或倒槽会增强台风降水(魏应植等,2008;Yang et al,2009;杜惠良等,2011;郭荣芬等,2013;刘建勇等,2014),但并不是所有冷空气入侵都会增强台风降水强度,适当强度的冷空气入侵才有利于台风降水发展(刘晓波等,2008;Gao et al,2010;姚晨等,2019)。姚增权和魏鼎文(1985)对冷空气强度的敏感性试验为后续研究提供了一种量化参考方案,即弱冷空气(降温

1.4℃以下)、中等强度冷空气(降温2.0~3.5℃)以及强冷空气(降温大于4.2℃),试验结果表明只有弱冷空气影响时才有利于台风强降水的产生。后来,钮学新等(2005)对冷空气在“森拉克”(0216号)台风暴雨中的作用进行了数值模拟,发现弱冷空气(降温1~4℃)作用于台风北侧及外围,过程雨量可增幅80~120 mm,但冷空气越强(降温2~8℃),其影响区域的上升速度和水汽辐合减小越快,越不利于降水发生。近些年的模拟和观测分析进一步验证了弱冷空气对台风降水的增强过程(韩瑛和伍荣生,2008;陆佳麟和郭品文,2012)。综上所述,适当强度的冷空气是影响台风暴雨准确性预报的重要因子之一。而冷空气侵入形式不同对台风降水造成的影响不同(吴海英等,2014;于玉斌等,2015;2024;王承伟等,2017)。例如,崔晶和张丰启(2002)分析冷空气对“启德”(0004号)台风降水作用时发现,冷空气从台风西南侧卷入,切断了南部的能量输送,使台风南部螺旋云带迅速减弱,而冷空气自西北向东南移动并与台风外围的切变线相互作用,则有利于锋生,导致降水增强。孙力等(2015)和孙密娜等(2021)均发现冷空气多是从台风西北侧侵入,而降水发生在台风西北侧能量锋区附近。

水汽是极端降水产生的关键因子(程正泉等, 2005; 2009; 李英等, 2005; 陈联寿, 2006; 杨舒楠和端义宏, 2020)。极端降水过程中水汽输送和路径的定量分析一直是科研热点和难点之一(陈斌等, 2011)。以往关于水汽来源和输送路径的研究主要是基于欧拉方法, 但是欧拉方法是基于水汽通量进行分析, 呈现的是瞬时特征, 无法定量获取水汽源地及其各通道水汽输送的贡献, 仅能主观地给出简单的水汽输送路径(陈斌等, 2011; 杨浩等, 2014; 孙力等, 2016; 孔祥伟等, 2021)。近年有研究发现, 基于拉格朗日方法的 HYSPLIT(Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory)模型是定量分析水汽源地和输送路径很好的技术途径(孙力等, 2016; 刘晶等, 2023; 付伟等, 2024)。该方法通过计算空气质点的运动轨迹, 定量统计出各水汽源地的路径和贡献大小, 弥补了欧拉方法的不足(程正泉等, 2005; 江志红等, 2013; 施逸等, 2022)。国内外学者利用该方法针对季风暴雨区的水汽输送研究较多(Stohl and James, 2004; 孙力等, 2016; 庄晓翠等, 2022; 刘晶等, 2023), 近些年来在台风暴雨的水汽输送研究上也开始受到关注。杨舒楠等(2018)追踪“麦德姆”(1410 号)和“苏迪罗”(1513 号)四个冷空气质点的轨迹, 发现冷空气作用形式不同导致两个台风的强降水分布和动热力条件不同。马梁臣等(2023b)应用欧拉和拉格朗日方法对“利奇马”(1909 号)和“罗莎”(1910 号)引发东北地区暴雨过程的水汽条件和输送过程进行分析。马梁臣等(2023a)对两次秋季北上台风引发东北地区暴雨的水汽特征分析发现, 日本群岛东部的西北太平洋的东南水汽通道是其最重要的水汽通道。刘希等(2023)基于拉格朗日轨迹示踪进一步验证了“利奇马”(1909 号)远距离暴雨的水汽来源。综上, 当前基于 HYSPLIT 模型探讨水汽与冷空气相结合的定量作用对台风降水影响的研究仍相对较少, 值得继续开展研究, 以获得对台风极端降水的更多认识与理解。

总之, 从上述国内外针对冷空气和水汽关键因子作用对台风强降水的研究回顾分析可知, 尽管该领域已取得了较丰硕的成果, 但是专门针对不同强度、不同轨迹冷空气与水汽输送相结合的定量作用研究较少。由福建有区域自动站以来 2007—2023 年登陆或影响福建台风个例的 12 h 累计降水量排名表(表略)可见, 2023 年“海葵”和“杜苏芮”以及 2016 年“鲇鱼”的降水量依次排名前三位, 属特强极

端暴雨过程。三次极端降水发生时段内冷空气强度及路径存在差异: “海葵”为东路变性冷空气影响、“杜苏芮”无冷空气参与, 而“鲇鱼”有东、西路弱冷空气渗透作用。因此, 本文以“海葵”(2311 号)变性冷空气、“杜苏芮”(2305 号)无冷空气及“鲇鱼”(1617 号)弱冷空气作用这三个典型登闽台风极端降水过程为例, 采用地面自动气象观测站(以下简称自动站)降水、台风最佳路径数据集以及再分析数据等多源资料, 从冷空气和水汽输送关键因子入手, 以 HYSPLIT5.0 模型定量分析不同强度、不同轨迹冷空气与水汽输送相结合的作用对台风极端降水关键区的影响, 为台风极端降水的精细预报提供参考。

1 资料与方法

1.1 地面自动站降水资料

自动站降水资料来自中国气象局地面常规降水观测资料, 福建省地面气象观测站共 2373 个, 降水数据的时间分辨率为 5 min。为便于分析, 本文采用克里金法将站点资料插值成水平分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的格点降水数据。

1.2 台风最佳路径数据集

台风最佳路径数据来自中国气象局上海台风研究所(<https://tcdata.typhoon.org.cn>), 包含台风中心位置、中心最低气压及中心附近最大风速等, 时间分辨率为 6 h。

1.3 再分析数据

环境场分析采用 ERA5 再分析资料, 数据垂直方向从 1000~100 hPa 共 27 层, 时间分辨率为 1 h, 水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。包含的物理量有位势高度、水平风、温度、比湿、垂直速度、相对涡度等变量。

采用 NCEP 全球数据同化系统(GDAS)再分析数据(水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$)进行 HYSPLIT5.0 模型计算, 可逐时或每 6 h、12 h 等输出一次轨迹点的位置, 插值得到相应位置的物理量(如温度、高度以及比湿等)。

1.4 HYSPLIT 模型简介

HYSPLIT 模型是由美国国家海洋和大气管理

局(NOAA)的空气资源实验室和澳大利亚气象局在过去 20 年间联合研发的一种用于计算和分析大气污染物输送、扩散轨迹的专业模型。近年来该模型在天气学诊断方面的应用也逐渐增多(Stein et al, 2015; Rolph, 2016; Zhang et al, 2019; 刘晶等, 2023)。为便于分析轨迹通道, 本文在分析冷暖气流轨迹特征方面, 采用 HYSPLIT5.0 的簇分析方法,

以 800 m 和 5500 m 两个高度(分别代表对流层低层和中层)为起始高度, 过程最大 6 h 强降水中心极值点为起始点, 对“海葵”“杜苏芮”“鲇鱼”计算的 240 h 后向运动轨迹进行聚类(模拟参数见表 1), 具体模拟过程以及不同通道的水汽贡献率计算方法见孙力等(2016)的研究。

表 1 HYSPLIT5.0 模型后向轨迹追踪模拟信息表

Table 1 Simulation parameters of the backward trajectory by HYSPLIT5.0 model

模拟参数	“海葵”	“杜苏芮”	“鲇鱼”
起始位置	26.03°N, 119.33°E	26.48°N, 119.69°E	26.85°N, 119.33°E
起始高度	800 m 和 5500 m	800 m 和 5500 m	800 m 和 5500 m
起始时间/BT	2023 年 9 月 5 日 20 时	2023 年 7 月 29 日 02 时	2016 年 9 月 28 日 02 时
模拟时长	240 h	240 h	240 h
模拟方向	后向	后向	后向
轨迹数量	42 条	40 条	40 条

1.5 欧拉方法的水汽输送

单位边长大气水汽输送通量(Q)的计算式为:

$$Q = \frac{1}{g} \times q \times V$$

式中: q 为比湿(单位: $g \cdot kg^{-1}$), V 为水平风速矢量(单位: $m \cdot s^{-1}$), g 为重力加速度(单位: $m \cdot s^{-2}$)。

本文附图涉及地图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网下载的审图号为 GS(2019)1822 号的标准地图制作, 底图无修改。全文时间均为北京时。

2 三个登闽台风降水概况

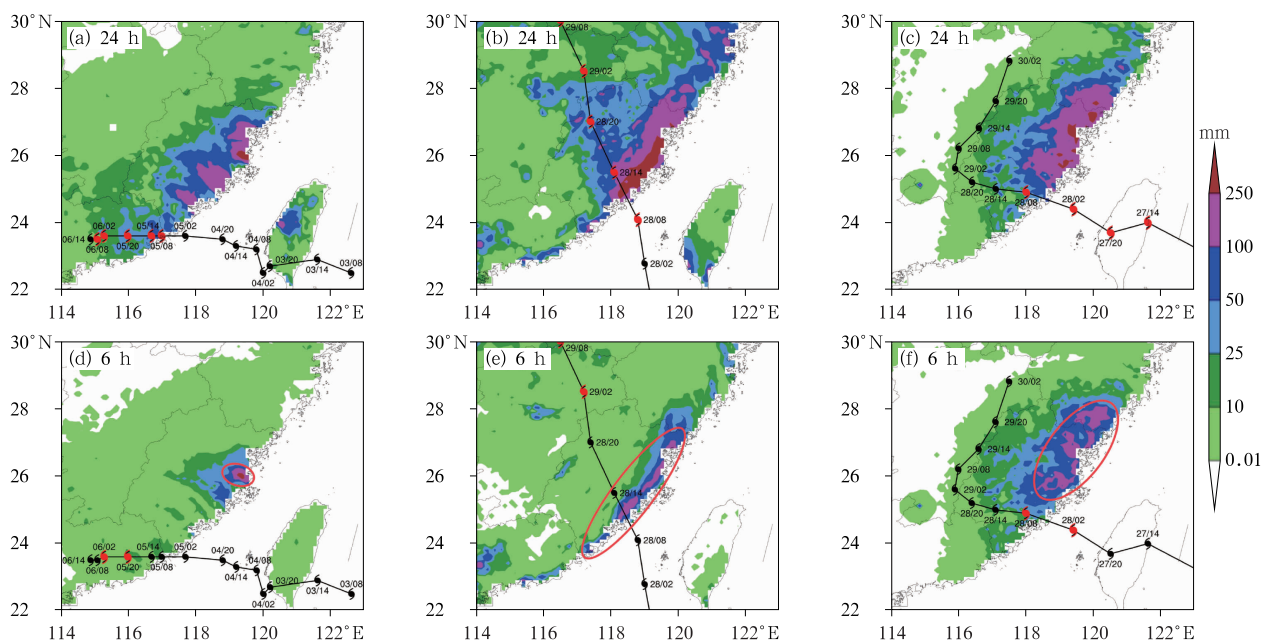
“海葵”自 2023 年 8 月 28 日在菲律宾以东洋面生成后向西北偏西方向移动, 于 9 月 3 日 15:30 登陆台湾台东, 之后于 5 日 05:20 以强热带风暴级别再次登陆福建东山。5 日夜间受台风外围雨带东西向“列车效应”的持续影响, 莆田、福州以及宁德等地出现罕见大暴雨过程(图 1a)。强降水范围窄, 强降水中心位于福州(图 1a), 最大日降水为 556.2 mm(福州仓山区盖山镇); 最大 6 h 降水量达到 494.3 mm(福州仓山区盖山镇, 图 1d), 最大小时雨强为 148.9 $mm \cdot h^{-1}$ (图 2)。

“杜苏芮”于 2023 年 7 月 21 日在菲律宾以东洋面生成, 先是沿西北行至近海, 之后在台湾岛南侧转西北偏北行, 绕过台湾直奔福建, 28 日 09:55 登陆泉州晋江。台风登陆日降水最强(28 日), 最大达到

675.3 mm, 强降水中心位于泉州、莆田和福州(图 1b)。28 日夜间至 29 日受台风后部外围雨带南北向“列车效应”的持续影响, 最大 6 h 降水量达 334.4 mm(福州罗源县碧里乡, 图 1e), 该时段内最大小时雨强为 97.9 $mm \cdot h^{-1}$ (图 2)。

“鲇鱼”自西北太平洋生成后一路西北行, 于 2016 年 9 月 27 日 14:10 登陆台湾花莲, 之后于 28 日 05:05 再次登陆泉州惠安。27 日, 受“鲇鱼”外围雨带东北—西南向“列车效应”影响, 福建莆田、福州、宁德以及浙江文成等地发生大暴雨过程(图 1c)。最强降水中心位于宁德, 最大日降水量为 402.5 mm(宁德霞浦县柏洋乡, 图 1c); 最大 6 h 降水量为 247.8 mm(宁德蕉城区霍童镇, 图 1f), 最大小时雨强为 76.8 $mm \cdot h^{-1}$ (图 2)。

对比可见, 三个登闽台风外雨带“列车效应”均给福建沿海带来了极端降水。其中, “海葵”极端降水落区(即 6 h 降水量 ≥ 100 mm 的落区, 下同)具有东西向的纬向型特征, 范围窄; 强降水中心位于福州, 由台风北侧外围窄雨带引发; 短时降水强度最强。“杜苏芮”极端降水落区具有东北—西南向的经向型特征, 范围广; 强降水中心位于莆田和福州, 雨强仅次于“海葵”, 是由台风右侧外围雨带引发。“鲇鱼”极端降水落区整体上也表现出东北—西南向的经向型特征, 范围最广; 强降水中心位于宁德, 降水强度在三个台风中最小, 是由台风北侧外围宽雨带造成, 并且“鲇鱼”不仅最大小时雨强最小, 前 3 小时雨强均明显弱于“海葵”与“杜苏芮”(图 2)。



注:红色圆圈示意关注区,红色台风符号示意最强降水期间台风中心位置,数字代表时间(如 2714 为 27 日 14:00)。

图 1 三个登闽台风最强 24 h、6 h 累计降水量(填色)与台风路径(黑色折线)

(a, d)“海葵”:2023 年 9 月(a)5 日 08:00 至 6 日 08:00 和(d) 5 日 20:00 至 6 日 02:00;

(b, e)“杜苏芮”:2023 年 7 月(b)28 日 08:00 至 29 日 08:00 和(e)29 日 02:00—08:00;

(c, f)“鲇鱼”:2016 年 9 月(c)27 日 08:00 至 28 日 08:00 和(f)28 日 02:00—08:00

Fig. 1 (a, b, c) 24 h and (d, e, f) 6 h heaviest precipitation (colored) and tracks (black line) of three landfall typhoons in Fujian

(a, d) “Haikui” from (a) 08:00 BT 5 to 08:00 BT 6 and (d) 20:00 BT 5 to 02:00 BT 6 September 2023,

(b, e) “Doksuri” from (b) 08:00 BT 28 to 08:00 BT 29 and (e) 02:00 BT to 08:00 BT 29 July 2023,

(c, f) “Megi” from (c) 08:00 BT 27 to 08:00 BT 28 and (f) 02:00 BT to 08:00 BT 28 September 2016

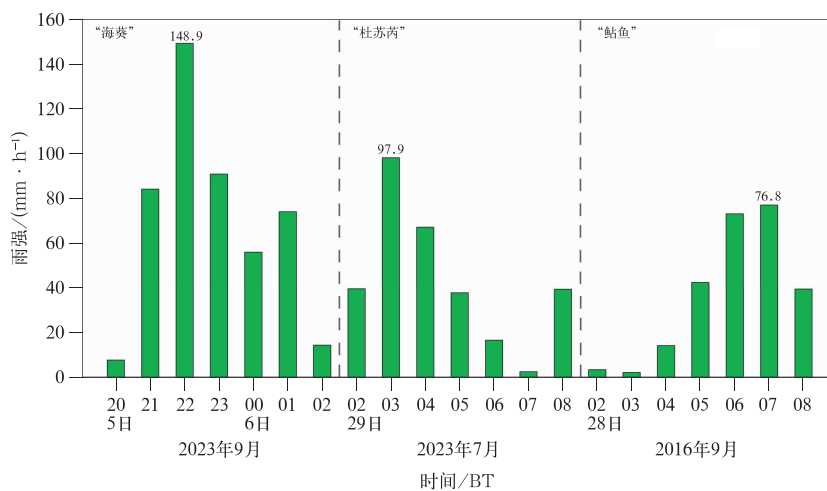


图 2 三个登闽台风极端降水期间的小时雨强演变

Fig. 2 Evolution of hourly precipitation intensity during extreme rainfall processes of three landfall typhoons in Fujian

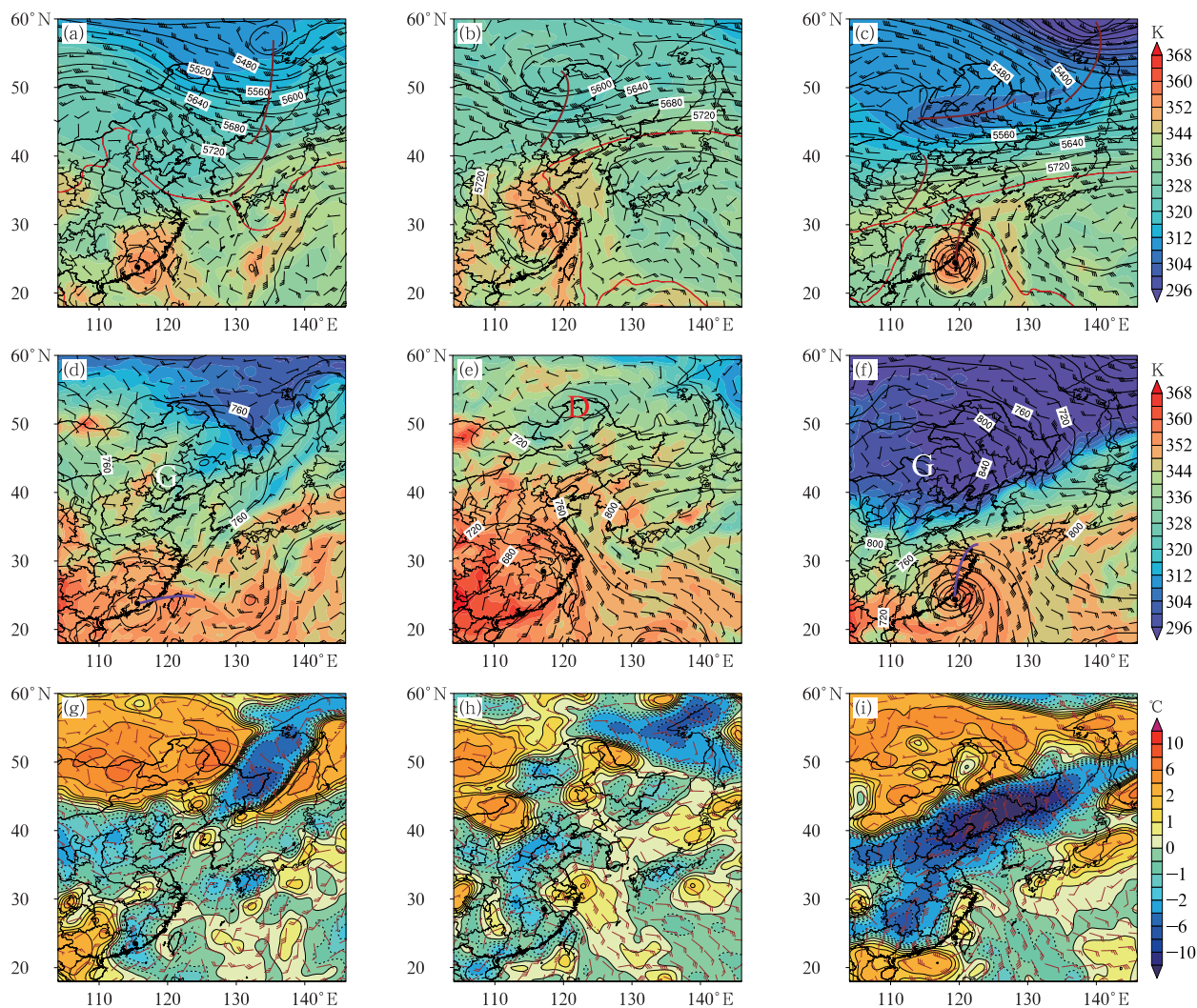
3 冷空气影响对比

极端降水发生时,三个台风 500 hPa 形势差异

明显(图 3a~3c)。“海葵”处于副热带高压(以下简称副高)内,我国东北地区冷槽加深南压(图 3a)。“杜苏芮”位于副高西侧,副高北缘抬至 40°N 以北,东北冷涡位于蒙古国东北部附近,槽后冷空气被副

高隔离开(图 3b)。“鲇鱼”位于副高南侧,台风北侧倒槽清晰(图 3c);中纬度西风带南压至 40°N 以南,西风带上短波槽活跃并东移;东北地区横槽中堆积大量冷空气。由此可见,对流层中层,“海葵”与“杜苏芮”台风相距冷槽槽底均较远,冷空气侵入影响弱,而“鲇鱼”西北侧 30°N 附近有短波槽槽后的西北气流侵入。

假相当位温(θ_{se})场显示,“海葵”和“鲇鱼”对流层低层均有显著的冷中心,但其分布形式不同(图 3d,图 3f)。“海葵”东北侧的冷舌近乎南北向,冷舌中心的 θ_{se} 约为 304 K (图 3d)。冷空气沿高压东侧的偏北风从日本海附近扩散南下。冷空气侵入后,闽东北地区降水强度突增,最大小时雨强达到 $148.9\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ (9月5日 21:00—22:00)。“鲇鱼”



注:图 a~c 中,红棕色短线代表 500 hPa 槽线,红色加粗等值线为 5880 gpm 线;图 d~f 中,紫色短线代表 925 hPa 切变线, G 和 D 分别代表位势高度高、低值中心;台风符号代表对应时刻台风中心位置,下同。

图 3 (a~c) 500 hPa 和 (d~f) 925 hPa 的假相当位温(填色)、位势高度(黑色等值线,单位:gpm)以及风场(风羽)分布, (g~i) 925 hPa 的 24 h 变温(填色和黑色等值线,单位: $^{\circ}\text{C}$, 负值为虚线, 正值为实线)和风场(风羽)分布 (a, d, g) “海葵”: 2023 年 9 月 5 日 20:00, (b, e, h) “杜苏芮”: 2023 年 7 月 29 日 02:00, (c, f, i) “鲇鱼”: 2016 年 9 月 28 日 02:00

Fig. 3 Distribution of (a~f) θ_{se} (colored), geopotential height (black contour, unit: gpm) and wind field (barb) at (a~c) 500 hPa and (d~f) 925 hPa; (g~i) 24 h temperature change (colored and black contour, unit: $^{\circ}\text{C}$, dashed line: negative value, solid line: positive value) and wind field (barb) at 925 hPa

(a, d, g) “Haikui” at 20:00 BT 5 September 2023, (b, e, h) “Doksuri” at 02:00 BT 29 July 2023, (c, f, i) “Megi” at 02:00 BT 28 September 2016

北侧的冷舌呈东北—西南向,强度强、范围广,冷舌中心的 θ_{se} 约为 296 K(图 3f)。冷空气沿高压东侧偏北风扩散南下后侵入台风倒槽。冷空气影响期间,闽东北最大小时雨强达 $76.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。虽然“鲇鱼”雨强比“海葵”小,但其冷空气影响范围比“海葵”广,对应的极端降水范围明显更大。“杜苏芮”北侧未见明显冷中心(图 3e),但对比三个台风的 θ_{se} 可见,“杜苏芮”低层更加暖湿,湿对流明显。进一步从低层变温可见(图 3g~3i)，“海葵”24 h 变温低于 -6°C ,但福建中北部沿海正变温为 0.5°C ,即冷空气抵达福建前已经增暖变性(图 3g)。而强盛的东南气流将冷空气推离,无冷空气侵入“杜苏芮”强降水区(图 3h)。“鲇鱼”24 h 变温低于 -12°C (图 3i),冷空气南下过程中增暖但未完全变性,冷空气前沿 24 h 变温为 -1°C 左右,以弱冷空气的形式侵入强降水区。

从极端降水落区与环流场、热力条件的配置看:“海葵”没有明显台风倒槽,极端降水由变性冷空气与东南暖湿气流交汇引发。“鲇鱼”北侧有明显的台风倒槽,极端降水由冷空气侵入倒槽内引发。“杜苏芮”无冷空气影响,极端降水由台风右侧的西南急流辐合激发产生。综上分析可见,“海葵”和“鲇鱼”影响系统相似,但系统位置以及冷空气的性质、路径和冷暖交汇位置均存在显著差异。

4 水汽输送及冷暖作用分析

4.1 基于欧拉方法的水汽输送及冷暖对比

极端降水的发生离不开充足的水汽供应。图 4

为小时雨强最大时刻 925 hPa 风场和水汽通量分布。可以看到,“海葵”南侧有一支西南水汽输送带,但西南气流基本上没有达到急流强度($8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 图 4a)。此外,北面有一支与西南风势力相当的偏北气流南下至闽东北地区,尽管该区域水汽通量不强(低于 $20 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$),但东南风和东北风在该区域对峙长达 6 h 之久。相比之下,“杜苏芮”西南气流十分强盛,急流核风速大于 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,向北推至 40°N 附近,阻挡了冷空气南下,相应的西南急流携带大量水汽输送到福建沿海(图 4b)。“杜苏芮”北上后,粤东—闽南海岸线附近地面辐合抬升触发对流发展,并组织化形成一条贯穿福建沿海的强对流带,“列车效应”显著,持续影响约 10 h。并且,绕岛产生的东南气流与西南急流在福州交汇更是加剧了该地的辐合抬升。“鲇鱼”东侧急流核风速达到 $26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,暖湿气流强度稍强于北侧的偏北气流,北方冷空气南下侵入台风倒槽,冷暖风向辐合激发对流发展并形成“列车效应”,持续影响浙闽交界长达 5 h 之久(图 4c)。综上可见,“海葵”和“鲇鱼”是绕岛产生的东南气流、穿过台湾海峡的西南气流以及南下冷空气三支气流的冷暖交汇过程,“杜苏芮”则是两支暖湿气流控制下引发的强降水,但三个台风南北气流相对应的水汽输送强度差异显著。

图 5 显示,低层冷空气的入侵给“海葵”和“鲇鱼”北面带来了明显的冷平流。对比发现,“鲇鱼”冷平流的整体强度要比“海葵”强而广,与其冷空气影响范围较广相对应(图 5a,5c)。同时,台风南面的西南气流也带来了较强的暖平流,尤其“杜苏芮”强盛的西南急流给强降水区带来了非常强的暖平流(图 5b)。

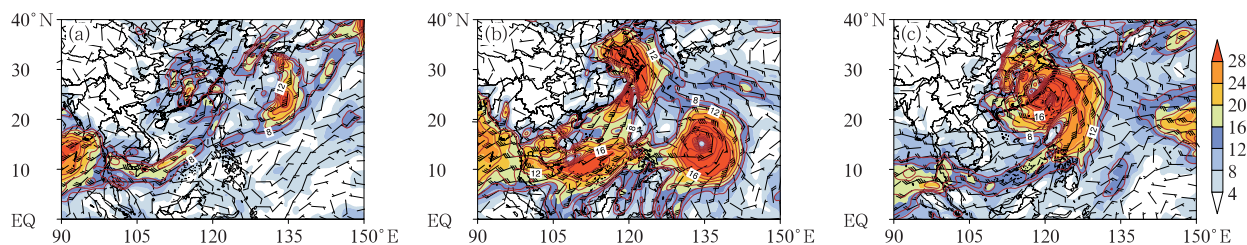


图 4 小时雨强最大时刻 925 hPa 水汽通量(填色,单位: $10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)、风场(风羽)及风速(等值线, $\geq 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)分布
(a)“海葵”:2023 年 9 月 5 日 22:00,(b)“杜苏芮”:2023 年 7 月 29 日 03:00,(c)“鲇鱼”:2016 年 9 月 28 日 07:00

Fig. 4 Distribution of water vapor flux (colored, unit: $10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), wind field (barb) and wind speed (contour, $\geq 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 925 hPa at the time with maximum hourly precipitation intensity of
(a) “Haikui” at 22:00 BT 5 September 2023, (b) “Doksuri” at 03:00 BT 29 July 2023,
(c) “Megi” at 07:00 BT 28 September 2016

4.2 基于拉格朗日方法的冷空气路径和水汽输送定量分析

与图 4 呈现的瞬时特征不同, HYSPLIT 模型

能够定量获取冷暖气流轨迹及其水汽输送贡献率, 可以更直观地分析冷暖气流输送特征。聚类结果显示(图 6), 三个台风 5500 m 高度(黑色标记)未见南北气流交汇现象, 这与前文的分析一致。因此, 接下

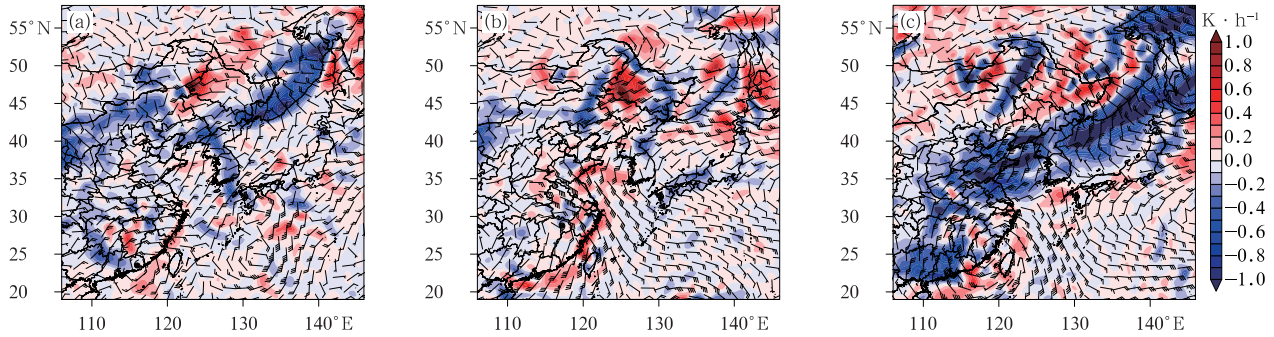
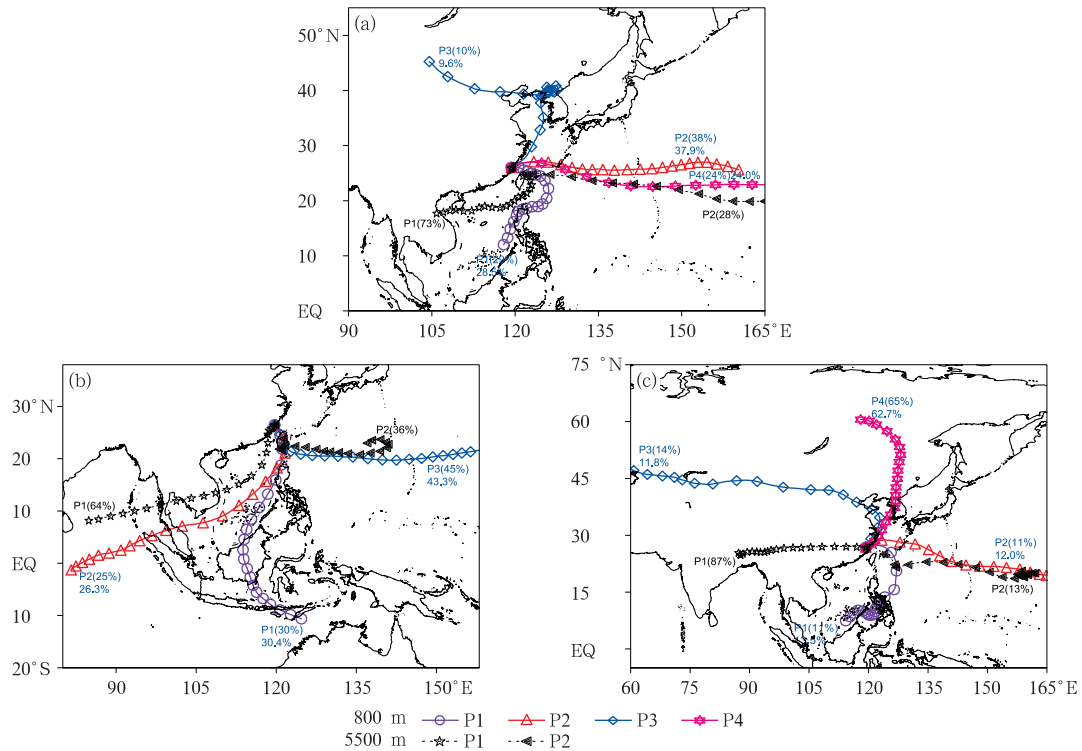


图 5 小时雨强最大时刻 925 hPa 水平温度平流(填色)和风场(风羽)分布

(a)“海葵”:2023 年 9 月 5 日 22:00, (b)“杜苏芮”:2023 年 7 月 29 日 03:00, (c)“鲇鱼”:2016 年 9 月 28 日 07:00

Fig. 5 Distribution of temperature advection (colored) and wind field (barb) at 925 hPa at the time with maximum hourly precipitation intensity of (a) “Haikui” at 22:00 BT 5 September 2023, (b) “Doksuri” at 03:00 BT 29 July 2023, (c) “Megi” at 07:00 BT 28 September 2016



注: 标记点间隔 12 h; P1~P4 表示通道序号, 括号内数字表示轨迹数量占比, 括号外数字表示该通道的水汽贡献率。

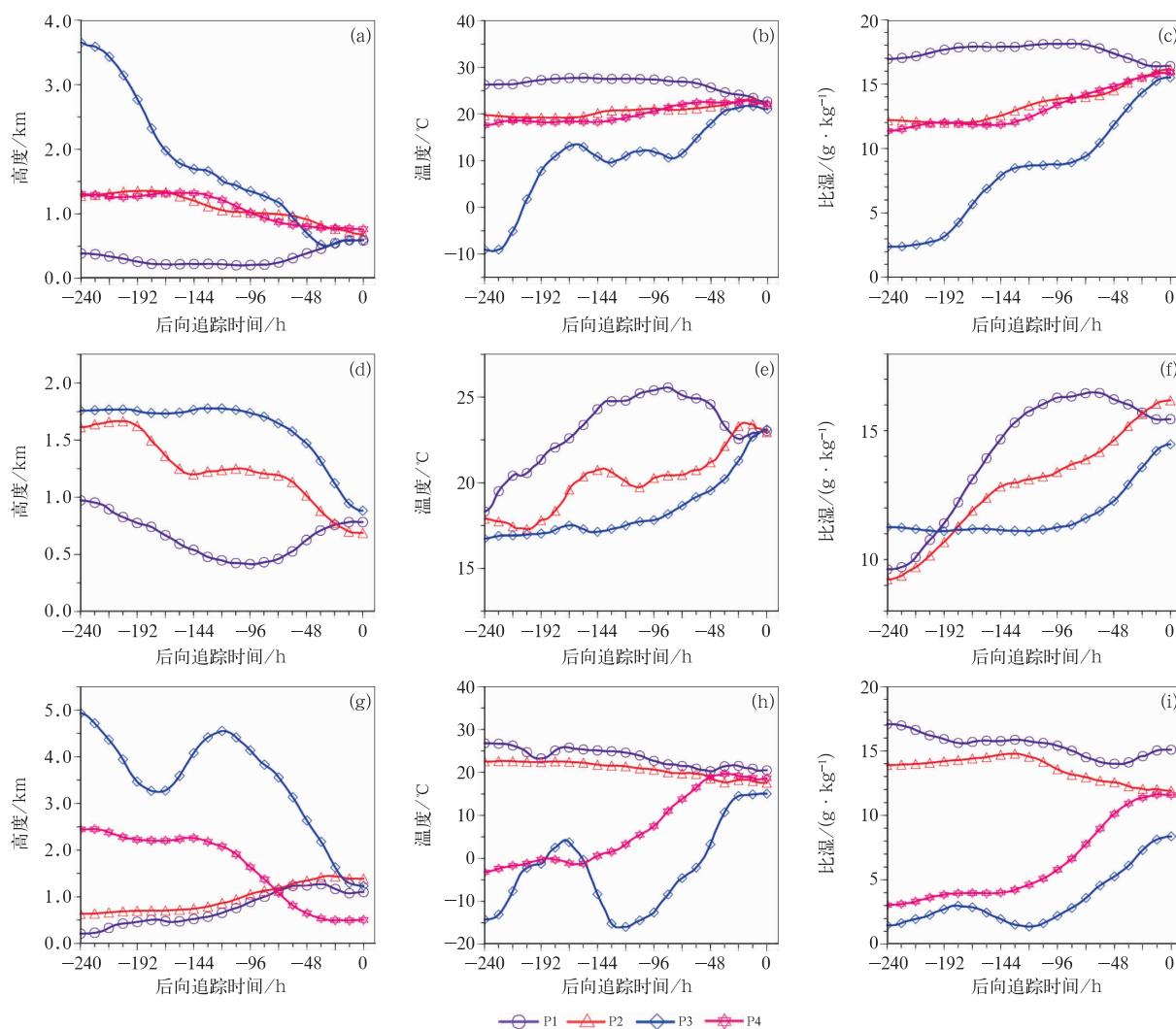
图 6 台风极端降水区上空 800 m 和 5500 m 高度空气块聚类通道的空间分布
(a)“海葵”, (b)“杜苏芮”, (c)“鲇鱼”

Fig. 6 Spatial distribution of backward clustering of air block at the 800 m and 5500 m height over the extreme precipitation area of
(a) “Haikui”, (b) “Doksuri”, and (c) “Megi”

来主要关注 800 m 高度(彩色标记)各通道的冷暖气流输送特征。

对流层低层可见,“海葵”有三个水汽通道和一个冷空气通道(图 6a)。其中,源自南海 0.5 km 高度的水汽通道(通道 1)占有轨迹数量的 29%(图 6a,图 7a)。初始温度为 25.9℃,随气块抬升后略降至 21.2℃(图 7b)。初始比湿为 16.7 g·kg⁻¹,移动过程中损耗较少,最终比湿仍在 15 g·kg⁻¹之上(图 7c)。源自西太平洋的两个水汽通道(通道 2 和通道 4)占有轨迹数量的 62%,在西移过程中水汽通道高度略有下降(图 6a,图 7a)。两个通道温度

均稳定在 17~20℃(图 7b),比湿从 11~12 g·kg⁻¹增至 15~16 g·kg⁻¹(图 7c)。北方的冷空气通道(通道 3)源自蒙古国(3.7 km 高度),仅占有轨迹数量的 10%,在东移过程中,冷空气通道高度急剧下降(图 6a,图 7a)。初始温度为 -10.7℃(图 7b),初始比湿为 2.4 g·kg⁻¹(图 7c)。干冷空气在东北地区附近滞留期间较为稳定,但进入黄海,尤其途经东海后,温度和比湿显著增加,最终温度和比湿分别为 19.5℃和 15.5 g·kg⁻¹。由各通道的水汽贡献率可知,南海(通道 1)和西太平洋通道(通道 2 和通道 4)气流携带的水汽在强降水区的水汽输送贡献



注:标记点间隔 12 h;P1~P4 为图 6 中 800 m 高度对应通道。

图 7 800 m 高度空气块输送过程中(a,d,g)高度、(b,e,h)温度以及(c,f,i)比湿变化

(a,b,c)“海葵”,(d,e,f)“杜苏芮”,(g,h,i)“鲇鱼”

Fig. 7 Changes in (a, d, g) height, (b, e, h) temperature and (c, f, i) specific humidity during the transport of air block at 800 m height of (a, b, c) “Haikui”, (d, e, f) “Doksuri”, and (g, h, i) “Megi”

中占主要作用(90.4%)。

“杜苏芮”有三个暖湿水汽通道,未见冷暖交汇现象(图 6b)。其中,源自南印度洋的两个水汽通道(通道 1 和通道 2)与强盛的西南气流相联系,占有所有轨迹数量的 55%(图 6b)。西太平洋通道(通道 3)则占有所有轨迹数量的 45%,三个水汽通道的高度始终位于 2 km 以下(图 6b,图 7d)。途经南海的两个水汽通道北上后增温增湿明显,最终温度和比湿分别达到 26℃和 15 g·kg⁻¹以上(图 7e,7f)。“杜苏芮”南海(通道 1 和通道 2)和西太平洋通道(通道 3)水汽输送贡献率分别为 56.7%和 43.3%,对本次强降水过程具有重要作用。

“鲇鱼”有两个水汽通道和两个冷空气通道(图 6c)。其中,两个水汽通道(通道 1 和通道 2)分别源自南海和西太平洋,占有所有轨迹数量的 22%,水汽通道高度始终低于 1.5 km(图 6c,图 7g)。水汽输送过程中略有损耗,但最终温度和比湿维持在 18℃和 12~15 g·kg⁻¹(图 7h,7i)。通道 3 输送的冷空气源自西西伯利亚的中部地区,占有所有轨迹数量的 14%(图 6c)。起始高度为(5.2 km),从我国西部东移过程中通道高度急剧下降(图 7g)。冷空气强度高,初始温度和比湿分别为-15.3℃和 1.38 g·kg⁻¹(图 7h,7i)。通道 4 输送的冷空气源自西西伯利亚的东部地区(2.6 km)高度,占有所有轨迹数量的 65%(图 6c,图 7g)。初始温度为-3.8℃(图 7h),初始比湿为 2.6 g·kg⁻¹(图 7i),途经黄海、东海后温度和比湿显著增加,最终温度为 15.7℃,比湿为 10.1 g·kg⁻¹。与“海葵”和“杜苏芮”不同,“鲇鱼”南海(通道 1)和西太平洋通道(通道 2)的水汽贡献率仅为 25.5%,而两个冷空气通道(通道 3 和通道 4)气块携带的水汽贡献率达到了 74.5%,这与其更高的轨迹数量占比息息相关(轨迹数总占比达 79%)。

综上所述,“海葵”和“鲇鱼”都有冷暖交汇过程,但“鲇鱼”冷空气路径更为复杂(东路为主,西路补充)。其中,“海葵”冷空气源自蒙古国(104.5°E),东移至 125°E 后转南下卷入台风外围。“鲇鱼”东路冷空气源自西西伯利亚的东部地区(118°E),沿着黑龙江、吉林南下侵入强降水区;而西路冷空气源自西西伯利亚的中部地区(54.3°E),东移至 121°E 后转南下与东路冷空气汇合。此外,南海和西太平洋是“海葵”和“杜苏芮”极端强降水过程的主要水汽源地,而少量弱冷空气的侵入也是“海葵”强降水出现的重要条件之一。“鲇鱼”强降水区上空被大量冷空气占

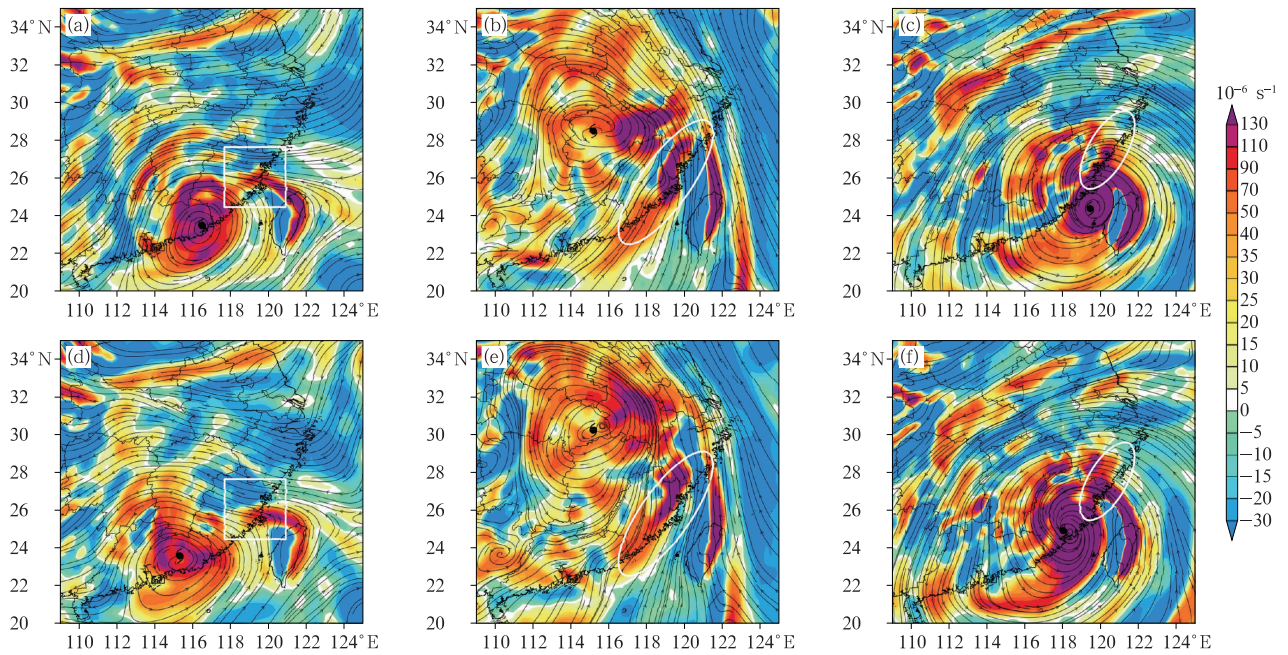
据,南海和西太平洋较低的水汽贡献率是其降水强度最小的原因之一。

5 极端降水成因诊断

冷空气性质、侵入形式以及强度不同会导致台风降水强度和落区不同。从图 8 动力特征看,正涡度峰值区与极端降水区域叠置,最大值均大于 $90 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 。其中,“海葵”东北侧强正涡度中心由偏东风引起,呈东西向的纬向型分布(图 8a)。“杜苏芮”后部强的正涡度带沿西南急流呈东北—西南向分布,正涡度带贯穿浙江、福建、广东沿海,最强正涡度中心出现在福建中北部沿海(图 8b)。“鲇鱼”东北侧有一正涡度带沿台风倒槽呈东北—西南向的经向型分布(图 8c)。随着台风继续深入内陆,正涡度带西移减弱(图 8d~8f)。此外,强降水区均是低层正涡度、高层负涡度相配置,且正涡度柱非常深厚,有较强的垂直上升运动(图略)。

垂直环流特征上,“海葵”26°N 附近局地且狭窄的强上升运动区与其在福州局地的强降水有较好的对应(图 9a)。“杜苏芮”上升运动的峰值中心位于 36°~40°N,与其偏北冷暖交汇位置对应(图 9b)。“鲇鱼”垂直上升运动覆盖范围很广,这与其降水范围宽广相一致(图 9c)。同时,暴雨区上空(26°N 或 28°N 附近)500 hPa 以下 θ_{se} 等值线呈垂直柱状分布,即 $-\partial\theta_{se}/\partial p$ 值近于零,为降水发展提供了有利条件。同时,未来 6 h 内,即使上升运动呈减弱特征,但是 θ_{se} 高值区仍与强上升区维持叠置(图 9d~9f)。此外,可以看到,“海葵”北侧 θ_{se} 等值线密集区呈倾斜状态向下凹,而近地面 θ_{se} 等值线密集区略微向上抬,指示暖层浅薄(图 9a)。“鲇鱼”北侧 36°N 附近的 θ_{se} 等值线以较大的倾斜角度向下延伸至低层,暖层同样较薄(图 9c),与轨迹追踪结果一致,体现了二者均以低层冷空气影响为主。

综合以上分析,表 2 和图 10 总结了三个台风冷暖作用形式和降水落区配置。Harr and Elsberry (2000)、Harr et al(2000)等研究指出,中纬度系统位于台风西北方向时,台风环流的演变更具有经向型特征,而中纬度系统位于台风东北方向时,台风环流的发展更具有纬向型特征。与其结论相似,当地面冷高压位于“海葵”东北侧时,其环流发展偏向纬向型,地面冷高压位于“鲇鱼”西北侧时,其环流发展偏向经向型。该影响形势下,来自南海和西太平洋



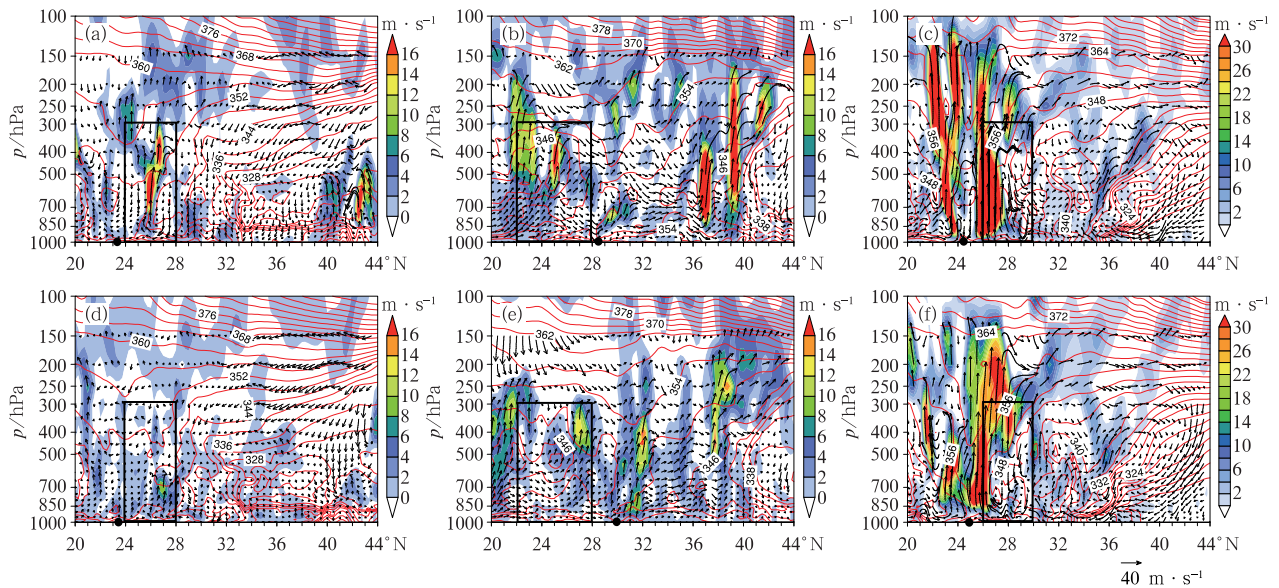
注:白色标记框指示关注区。

图 8 850 hPa 流场(流线)和相对涡度(填色)分布

(a, d)“海葵”:2023 年 9 月(a)5 日 20:00 和(d)6 日 02:00, (b, e)“杜苏芮”:2023 年 7 月 29 日

(b)02:00 和(e)08:00, (c, f)“鲇鱼”:2016 年 9 月 28 日(c)02:00 和(f)08:00

Fig. 8 Distribution of wind stream field (streamline) and relative vorticity (colored) at 850 hPa of (a, d) “Haikui” at (a) 20:00 BT 5 and (d) 02:00 BT 6 September 2023, (b, e) “Doksuri” at (b) 02:00 BT and (e) 08:00 BT 29 July 2023, (c, f) “Megi” at (c) 02:00 BT and (f) 08:00 BT 28 September 2016



注:黑点为台风中心纬度位置,黑框指示关注区。

图 9 v (风矢)、假相当位温(等值线,单位:K)及垂直速度(填色)的经向垂直剖面

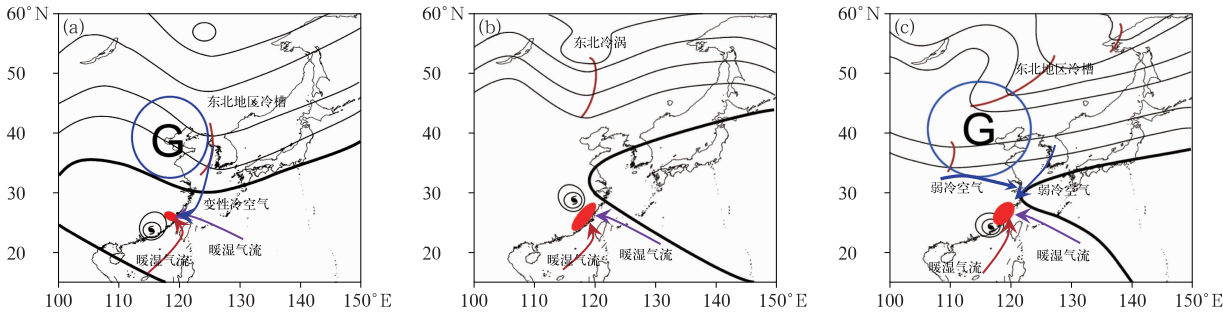
(a, d)“海葵”:2023 年 9 月(a)5 日 20:00 和(d)6 日 02:00, (b, e)“杜苏芮”:2023 年 7 月 29 日

(b)02:00 和(e)08:00, (c, f)“鲇鱼”:2016 年 9 月 28 日(c)02:00 和(f)08:00

Fig. 9 Meridional cross-section of v (wind vector), θ_{se} (contour, unit: K), and vertical velocity (colored) of (a, d) “Haikui” at (a) 20:00 BT 5 and (d) 02:00 BT 6 September 2023, (b, e) “Doksuri” at (b) 02:00 BT and (e) 08:00 BT 29 July 2023, (c, f) “Megi” at (c) 02:00 BT and (f) 08:00 BT 28 September 2016

表 2 三个登闽台风冷暖气流及极端降水落区对比
Table 2 Comparison of the cold/warm air and the extreme precipitation area
of the three landfall typhoons in Fujian

对比项目	“海葵”	“杜苏芮”	“鲇鱼”
冷空气路径	东路	无冷空气	东路、西路
冷空气源	东北冷槽、地面冷高压	/	东北冷槽、西风带短波槽、地面冷高压
冷空气强度	变性冷空气(地面或近低层近乎无变温,但有明显东北气流)	/	弱冷空气(地面或近低层有负变温,且有明显东北气流)
高低层冷空气配置	地面和低层冷空气侵入时间相当	/	低层早于地面侵入,中层有槽后冷空气侵入
低层水汽来源及贡献率	南海(28.5%)、西太平洋(61.9%)、北方(9.6%)	南海(56.7%)、西太平洋(43.3%)	南海(13.5%)、西太平洋(12.0%)、北方(74.5%)
降水强区 925 hPa 急流	$8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (未达到急流强度)	$20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	$26\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
台风倒槽	无明显倒槽	无	有台风倒槽
降水与环流配置	台风东北侧沿偏东风呈东西向的纬向型分布	台风东南侧沿西南风呈东北—西南向的经向型分布	台风东北侧沿倒槽呈东北—西南向的经向型分布



注:黑色等值线为 500 hPa 高度场(其中加粗为 5880 gpm 线),红色短线为 500 hPa 槽线,红色阴影为 6 h 降水量 $\geq 100\text{ mm}$ 强降水落区,红色或紫色箭头分别为低层来自南海和西太平洋的暖湿气流,蓝色箭头为低层变性或弱冷空气。

图 10 (a)“海葵”,(b)“杜苏芮”,(c)“鲇鱼”冷暖作用形式和降水落区配置概念模型
Fig. 10 Conceptual models of the cold/warm action patterns and precipitation area configuration of typhoons (a) “Haikui”, (b) “Doksuri” and (c) “Megi”

的两股暖湿气流与北方南下的变性冷空气在“海葵”东北侧交汇产生极端降水过程;“杜苏芮”冷空气被阻隔在中高纬度,强盛的西南急流引发东南沿海持续强降水;“鲇鱼”则是东路和西路弱冷空气汇合后与南面和东面的两支暖湿气流交汇引发极端降水。冷暖气流输送分析显示,“海葵”和“鲇鱼”极端降水区上空均有四个水汽通道,“杜苏芮”有三个水汽通道。其中,南海和西太平洋通道是“海葵”和“杜苏芮”主要的水汽贡献通道,“鲇鱼”则以北方通道贡献率最高。冷暖气流强度和作用形式不同,导致极端降水落区和强度差异明显。“海葵”极端降水落区沿偏东风偏向于纬向型分布,范围窄、雨强强;“杜苏芮”极端降水落区沿强盛的西南急流呈显著的经向型分布,范围广、雨强强;“鲇鱼”极端降水落区沿台

风倒槽偏向于经向型分布,雨强小于“海葵”和“杜苏芮”,但更广的冷空气影响范围导致“鲇鱼”大暴雨区域更大。总之,冷空气影响强度、侵入形式、冷暖交汇及其各通道的水汽贡献率均可作为台风极端降水强度和落区业务预报提供参考。

6 结论与讨论

本文以 2023 年“海葵”“杜苏芮”及 2016 年“鲇鱼”这三个典型台风特强极端暴雨过程个例为例,对比分析了三次不同冷空气过程对登闽台风极端降水的影响,得到以下主要结论。

(1)冷空气对比诊断及 HYSPLIT5.0 模型簇分析表明:三个台风对流层中层北方冷舌的冷空气均

被副高阻断。对流层低层,“海葵”沿东路南下的变性冷空气强度较弱(24 h 变温为 0.5°C),从台风东北侧侵入外围环流;“鲇鱼”弱冷空气(24 h 变温为 -1°C)以东路南下为主,西路补充为辅,两路冷空气在沿海汇合后从台风北侧卷入台风中心;影响系统均有地面冷高压和东北冷槽,西风带短波槽对“鲇鱼”也有影响。“杜苏芮”强盛西南急流和偏北的副高阻断了冷空气侵入台风环流。

(2)“海葵”与“杜苏芮”南海和西太平洋通道的水汽输送占主导地位,尤其南海通道有较强的水汽垂直输送(即有明显通道高度增加的特征),水汽贡献率分别为 90.4% 和 100%。南海和西太平洋通道较低的水汽贡献率(25.5%)是“鲇鱼”降水强度小于“海葵”和“杜苏芮”的重要原因。

(3)“海葵”低层偏东风引起正涡度发展,强降水落区沿偏东风呈近乎东西向的纬向型分布。“杜苏芮”强盛西南急流引起正涡度带发展,强降水落区沿西南风呈东北—西南向的经向型分布。而“鲇鱼”台风东北侧沿台风倒槽有强的正涡度中心和大范围上升运动,导致强降水落区沿台风倒槽呈东北—西南向的经向型分布。

由此可见,对流层低层冷空气的强度、路径以及水汽输送的定量作用不同可导致登闽台风极端降水落区和强度明显不同。本文总结的概念模型可为今后类似台风个例极端降水落区的预报提供技术支撑,但以上研究结论仅是基于三个台风个例的对比分析,普适性存在一定的局限性。更科学合理的结论将依赖对大量登陆福建并与冷空气相互作用的台风降水过程的统计分析佐证,这也将是我们下一步的工作重点。

参考文献

- 陈斌,徐祥德,施晓晖,2011. 拉格朗日方法诊断 2007 年 7 月中国东部系列极端降水的水汽输送路径及其可能蒸发源区[J]. 气象学报,69(5):810-818. Chen B, Xu X D, Shi X H, 2011. Estimating the water vapor transport pathways and associated sources of water vapor for the extreme rainfall event over east of China in July 2007 using the Lagrangian method[J]. Acta Meteor Sin, 69(5):810-818(in Chinese).
- 陈联寿,2006. 热带气旋研究和业务预报技术的发展[J]. 应用气象学报,17(6):672-681. Chen L S, 2006. The evolution on research and operational forecasting techniques of tropical cyclones[J]. J Appl Meteor Sci, 17(6):672-681(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 large-scale circulation features associated with strong and weak landfalling typhoon precipitation events[J]. Acta Meteor Sin, 67(5):840-850(in Chinese).
- 程正泉,陈联寿,徐祥德,等,2005. 近 10 年中国台风暴雨研究进展[J]. 气象,31(12):3-9. Cheng Z Q, Chen L S, Xu X D, et al, 2005. Research progress on typhoon heavy rainfall in China for last ten years[J]. Meteor Mon, 31(12):3-9(in Chinese).
- 崔晶,张丰启,2002. 冷空气侵入对启德台风降水的作用分析[J]. 山东气象,22(3):19-21. Cui J, Zhang F Q, 2002. The analysis for the action of cold air on precipitation of Typhoon “Kai-Tak”[J]. J Shandong Meteor, 22(3):19-21(in Chinese).
- 杜惠良,黄新晴,冯晓伟,等,2011. 弱冷空气与台风残留低压相互作用对一次大暴雨过程的影响[J]. 气象,37(7):847-856. Du H L, Huang X Q, Feng X W, et al, 2011. The effect of the interaction between weak cold flow and typhoon depression on a rainstorm[J]. Meteor Mon, 37(7):847-856(in Chinese).
- 付伟,魏秋实,邱学兴,等,2024. 芜湖市一次引发严重内涝暴雨过程的水汽输送特征[J]. 大气科学学报,47(3):486-497. Fu W, Wei Q S, Qiu X X, et al, 2024. Water vapor transport characteristics of a rainstorm process leading to severe urban waterlogging in Wuhu[J]. Trans Atmos Sci, 47(3):486-497(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).
- 韩瑛,伍荣生,2008. 冷空气入侵对热带气旋发生发展的影响[J]. 地球物理学报,51(5):1321-1332. Han Y, Wu R S, 2008. The effect of cold air intrusion on the development of tropical cyclone[J]. Chin J Geophys, 51(5):1321-1332(in Chinese).
- 江志红,任伟,刘征宇,等,2013. 基于拉格朗日方法的江淮梅雨水汽输送特征分析[J]. 气象学报,71(2):295-304. Jiang Z H, Ren W, Liu Z Y, et al, 2013. Analysis of water vapor transport characteristics during the Meiyu over the Yangtze-Huaihe River Valley using the Lagrangian method[J]. Acta Meteor Sin, 71(2):295-304(in Chinese).
- 孔祥伟,杨建才,李红,等,2021. 河西走廊西部干旱区一次极端暴雨天气的水汽特征分析[J]. 气象,47(4):412-423. Kong X W, Yang J C, Li H, et al, 2021. Analysis on water vapor characteristics of an extreme rainstorm in the arid region of Western Hexi Corridor[J]. Meteor Mon, 47(4):412-423(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]. Chin J Atmos Sci, 29(1):91-98(in Chinese).
- 刘晶,刘兆旭,杨莲梅,等,2023. 西风带大陆高压外围新疆哈密地区典型暴雨事件水汽输送特征对比分析[J]. 气象,49(9):1045-1062. Liu J, Liu Z X, Yang L M, et al, 2023. Water vapor transport characteristics during typical rainstorm events around west-erlies continental high in Hami Area, Xinjiang[J]. Meteor Mon,

- 49(9):1045-1062(in Chinese).
- 刘建勇,周冠博,顾思南,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).
- 刘希,曾明剑,王亚强,等,2023. 台风“利奇马”远距离暴雨的关键动力因子和水汽来源[J]. 大气科学学报,46(5):776-789. Liu X, Zeng M J, Wang Y Q, et al, 2023. Analysis of key dynamical factors and water vapor sources influencing remote heavy rainfall produced by Typhoon Lekima[J]. Trans Atmos Sci, 46(5):776-789(in Chinese).
- 刘晓波,邹兰军,夏立,2008. 台风罗莎引发上海暴雨大风的特点及成因[J]. 气象,34(12):72-78,132. Liu X B, Zou L J, Xia L, 2008. Analysis on the characteristics and reason of heavy rain and strong wind in Shanghai caused by Typhoon Krosa[J]. Meteor Mon, 34(12):72-78,132(in Chinese).
- 陆佳麟,郭品文,2012. 入侵冷空气强度对台风变性过程的影响[J]. 气象科学,32(4):355-364. Lu J L, Guo P W, 2012. Impacts of the intrusion intensity of cold air on extratropical transition of Typhoon Krosa[J]. J Meteor Sci, 32(4):355-364(in Chinese).
- 马梁臣,李倩,于月明,等,2023a. 两次秋季北上台风引发东北地区暴雨的水汽特征[J]. 气象科学,43(3):316-325. Ma L C, Li Q, Yu Y M, et al, 2023a. Water vapor characteristics of two northward typhoons heavy rain in Northeast China in autumn[J]. J Meteor Sci, 43(3):316-325(in Chinese).
- 马梁臣,刘海峰,沈柏竹,等,2023b. 2019 年台风“利奇马”和“罗莎”引发东北地区暴雨的水汽特征分析[J]. 气象与环境学报,39(2):1-10. Ma L C, Liu H F, Shen B Z, et al, 2023b. Characteristics of water vapor triggered by Typhoons Lekima and Krosa in Northeast China in 2019[J]. J Meteor Environ, 39(2):1-10(in Chinese).
- 钮学新,杜惠良,刘建勇,2005. 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, 2005. The numerical simulation of rainfall and precipitation mechanism associated with Typhoon Sinlaku (0216)[J]. Acta Meteor Sin, 63(1):57-68(in Chinese).
- 施逸,江志红,李肇新,2022. 基于拉格朗日方法的中国东部雨季水汽输送垂直特征[J]. 大气科学,46(2):380-392. Shi Y, Jiang Z H, Li Z X, 2022. Vertical characteristics of water vapor transport during the rainy season in Eastern China based on the Lagrangian method[J]. Chin J Atmos Sci, 46(2):380-392(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 Bolaven (2012)[J]. Acta Meteor Sin, 73(1):36-49(in Chinese).
- 孙力,马梁臣,沈柏竹,等,2016. 2010 年 7~8 月东北地区暴雨过程的水汽输送特征分析[J]. 大气科学,40(3):630-646. Sun L, Ma L C, Shen B Z, et al, 2016. A diagnostic study of water vapor transport and budget of heavy rainfall over Northeast China during July to August 2010[J]. Chin J Atmos Sci, 40(3):630-646(in Chinese).
- 孙密娜,韩婷婷,徐姝,2021. 冷空气在北上台风“利奇马”致灾暴雨中的作用分析[J]. 自然灾害学报,30(1):201-212. Sun M N, Han T T, Xu S, 2021. Analysis of the role of cold air in the rainstorm caused by Typhoon “Lichma”[J]. J Nat Dis, 30(1):201-212(in Chinese).
- 王承伟,齐铎,徐玥,等,2017. 冷空气入侵台风“灿鸿”引发的东北暴雨分析[J]. 高原气象,36(5):1257-1266. Wang C W, Qi D, Xu Y, et al, 2017. Analysis of rainstorm induced by interaction between Typhoon Chan-Hom (2015) and cold air in Northeast China[J]. Plateau Meteor, 36(5):1257-1266(in Chinese).
- 魏应植,吴陈锋,林长城,等,2008. 冷空气侵入台风“珍珠”的多普勒雷达回波特征[J]. 热带气象学报,24(6):599-608. Wei Y Z, Wu C F, Lin C C, et al, 2008. Doppler radar echo characteristics for cold air intruding into Typhoon Chanchu[J]. J Trop Meteor, 24(6):599-608(in Chinese).
- 吴海英,陈海山,曾明剑,等,2014. 冷空气对台风“海葵”(1211)倒槽特大暴雨作用分析[J]. 热带气象学报,30(5):871-880. Wu H Y, Chen H S, Zeng M J, et al, 2014. Analysis on the functions of cold air in a super heavy rainfall caused by a reverse trough of Typhoon Haikui (1211)[J]. J Trop Meteor, 30(5):871-880(in Chinese).
- 杨浩,江志红,刘征宇,等,2014. 基于拉格朗日法的水汽输送气候特征分析——江淮梅雨和淮北雨季的对比[J]. 大气科学,38(5):965-973. Yang H, Jiang Z H, Liu Z Y, et al, 2014. Analysis of climatic characteristics of water vapor transport based on the Lagrangian method: a comparison between Meiyu in the Yangtze-Huaihe River Region and the Huaibei rainy season[J]. Chin J Atmos Sci, 38(5):965-973(in Chinese).
- 杨舒楠,陈涛,刘建勇,2018. 两次台风暴雨冷空气影响对比分析[J]. 气象科技,46(2):324-335. Yang S N, Chen T, Liu J Y, 2018. Comparative analysis of TC rainstorms induced by cold air intrusion of two TC cases[J]. Meteor Sci Technol, 46(2):324-335(in Chinese).
- 杨舒楠,端义宏,2020. 台风温比亚(1818)降水及环境场极端性分析[J]. 应用气象学报,31(3):290-302. Yang S N, Duan Y H, 2020. Extremity analysis on the precipitation and environmental field of Typhoon Rumbia in 2018[J]. J Appl Meteor Sci, 31(3):290-302(in Chinese).
- 姚晨,娄珊珊,叶金印,2019. 冷空气影响台风暴雨的中尺度分析及数值模拟[J]. 暴雨灾害,38(3):204-211. Yao C, Lou S S, Ye J Y, 2019. Mesoscale analysis and numerical simulation of a typhoon rainstorm event affected by cold air[J]. Torr Rain Dis, 38(3):204-211(in Chinese).
- 姚增权,魏鼎文,1985. 冷空气对台风影响的流体动力学模拟实验研究[J]. 气象学报,43(1):53-62. Yao Z Q, Wei D W, 1985. The actions of the cool air on the tropical cyclone: an experimental study[J]. Acta Meteor Sin, 43(1):53-62(in Chinese).
- 于玉斌,彭思越,赵大军,2024. 干冷空气活动对热带气旋强度变化影响的研究进展与展望[J]. 气象,50(2):133-143. Yu Y B, Peng S

- Y, Zhao D J, 2024. Research progresses and prospects of dry cold air activity impacts on the intensity change of tropical cyclones[J]. Meteor Mon, 50(2):133-143(in Chinese).
- 于玉斌, 赵大军, 陈联寿, 2015. 干冷空气活动对超强台风“桑美”(2006)近海突然增强影响的数值模拟研究[J]. 热带气象学报, 31(1):21-31. Yu Y B, Zhao D J, Chen L S, 2015. Effect of dry cold air activity on the offshore rapid intensification of Super Typhoon Saomai (2006): a numerical simulation research[J]. J Trop Meteor, 31(1):21-31(in Chinese).
- 庄晓翠, 李博渊, 赵江伟, 等, 2022. 基于 HYSPLIT 模式分析的塔克拉玛干沙漠南缘暴雨水汽特征[J]. 气象, 48(3):311-323. Zhuang X C, Li B Y, Zhao J W, et al, 2022. Water vapor characteristics of rainstorm in southern Taklimakan Desert based on HYSPLIT model analysis[J]. Meteor Mon, 48(3):311-323(in Chinese).
- Gao S T, Yang S, Chen B, 2010. Diagnostic analyses of dry intrusion and nonuniformly saturated instability during a rainfall event [J]. J Geophys Res Atmos, 115(D2):D02102.
- Harr P A, Elsberry R L, 2000. Extratropical transition of tropical cyclones over the Western North Pacific. Part I: evolution of structural characteristics during the transition process[J]. Mon Wea Rev, 128(8):2613-2633.
- Harr P A, Elsberry R L, Hogan T F, 2000. Extratropical transition of tropical cyclones over the Western North Pacific. Part II: the impact of midlatitude circulation characteristics[J]. Mon Wea Rev, 128(8):2634-2653.
- Rolph G D, 2016. Real-time environmental applications and display system (READY) [EB/OL]. College Park: NOAA Air Resources Laboratory. [2017-04-18]. <http://www.ready.noaa.gov>.
- Stein A F, Draxler R R, Rolph G D, et al, 2015. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system[J]. Bull Amer Meteor Soc, 96(12):2059-2077.
- Stohl A, James P, 2004. A Lagrangian analysis of the atmospheric branch of the global water cycle. Part I: method description, validation, and demonstration for the August 2002 flooding in Central Europe[J]. J Hydrometeor, 5(4):656-678.
- Yang S, Cui X P, Ran L K, 2009. Analyses of dry intrusion and instability during a heavy rainfall event that occurred in Northern China[J]. Atmos Ocean Sci Lett, 2(2):108-112.
- Zhang Y, Huang W Y, Zhong D Y, 2019. Major moisture pathways and their importance to rainy season precipitation over the Sanjiangyuan Region of the Tibetan Plateau[J]. J Climate, 32(20):6837-6857.

(本文责编:戴洋)