

2022年9月台风“梅花”引发烟台暴雨的多尺度特征分析

孙英慧, 姜雨萌*

烟台市气象局, 山东 烟台

收稿日期: 2025年12月1日; 录用日期: 2025年12月28日; 发布日期: 2026年1月5日

摘要

利用欧洲中心再分析数据、逐时自动气象站降雨量等资料, 从水汽条件、动力条件、热力条件等重要物理量场对2022年9月14~16日由台风“梅花”引起的烟台历史极端暴雨的多尺度特征进行研究。结果表明: (1) 此次过程整层水汽深厚, 一是台风倒槽携带大量水汽, 偏东南急流沿副热带高压底后部气流向西北偏北输送。二是台风登陆北上, 台风主体从海上携带大量水汽, 东南急流头部在暴雨区形成强烈的水汽辐合区, 产生大暴雨; (2) 低空急流把大量水汽和不稳定能量向降水区输送, 也有利于对流不稳定层结的建立和维持, 触发不稳定能量释放; 同时低层东南风急流正好位于高空急流入口区右侧, 低层辐合、高层辐散, 高低空急流耦合抽吸作用, 也为降水产生提供了有利动力条件; (3) 此次降水有水汽先行、东南急流滞后的特征; (4) 随着台风北上, 由于冷空气的作用破坏了热带气旋的对称结构, 造成变性, 使降水由稳定性降水向对流性降水转变。干冷空气由台风西侧侵入台风环流内部, 弱的冷空气有利于斜压锋生, 产生不稳定能量, 对降水有利。

关键词

烟台市, 台风, 多尺度特征, 暴雨

Multi-Scale Characteristics of Extreme Rainstorm Caused by Typhoon “Muifa” in Yantai in September 2022

Yinghui Sun, Yumeng Jiang*

Yantai Meteorological Bureau, Yantai Shandong

Received: December 1, 2025; accepted: December 28, 2025; published: January 5, 2026

*通讯作者。

Abstract

Using data from the European Center for reanalysis and hourly automated weather station precipitation, this study investigates the multi-scale characteristics of the historically extreme rainstorm in Yantai caused by Typhoon “Muifa” from September 14 to 16, 2022, by analyzing key physical fields such as moisture, dynamic, and thermodynamic conditions. The results indicate that: (1) The entire atmospheric column was characterized by deep moisture during this event. First, the typhoon inverted trough transported substantial moisture, with a southeasterly low-level jet conveying it northwestward to northward along the rear of the subtropical high. Second, as the typhoon made landfall and moved northward, its circulation carried abundant moisture from the ocean. The leading edge of the southeasterly jet formed an intense moisture convergence zone over the rainstorm area, resulting in heavy precipitation. (2) The low-level jet transported both ample moisture and unstable energy into the precipitation area, facilitating the establishment and maintenance of convectively unstable stratification and triggering the release of unstable energy. Simultaneously, the low-level southeasterly jet was located to the right of the entrance region of the upper-level jet. The coupling of low-level convergence and upper-level divergence, along with the pumping effect of the coupled low- and upper-level jets, provided favorable dynamic conditions for precipitation. (3) The precipitation event was characterized by moisture arriving ahead of the southeasterly jet. (4) As the typhoon moved northward, the intrusion of cold air disrupted the symmetric structure of the tropical cyclone, leading to its extratropical transition. This caused a shift from stable to convective precipitation. The intrusion of dry, cold air into the typhoon’s circulation from the west promoted weak baroclinicity and frontogenesis, generating unstable energy that was conducive to precipitation.

Keywords

Yantai City, Typhoon, Multiscale Characteristics, Rainstorm

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

中国是世界上受台风影响最严重的国家之一，台风所造成的灾害主要由大风、暴雨和风暴潮引起，并且会衍生出洪涝、山体滑坡、泥石流等地质灾害，易导致重大人员伤亡，造成的经济损失数以亿计，给社会发展造成很大影响[1]。因此，深入开展台风强降水研究对预防和减轻台风灾害具有重要意义。近年来许多学者[2]-[9]对台风强降水进行了研究。对于北上台风，当低空急流、冷空气等中纬度天气系统与台风发生相互作用时，台风能获得较强斜压能量，引起环流结构的改变并且可能变性发展，由于降水本身及台风与西风带系统相互作用的复杂性，台风引起强降水的中尺度特征就更为复杂[10]。

烟台地处中纬度，东濒太平洋，台风是造成大范围洪涝暴雨灾害的主要天气系统之一。2022年第12号台风“梅花”给烟台带来了大量降水，在1978年以来影响烟台的台风过程降水量中排名第四，是一个历史罕见的台风暴雨个例，对其进行深入分析具有重要意义。

本文从水汽条件、动力条件、热力条件等重要物理量场对2022年9月14~16日由台风“梅花”引起的烟台历史极端暴雨的多尺度特征进行研究，以期得出有指导意义的结论，能对烟台的台风强降水预报预警、决策服务及防灾减灾有所裨益。

2. 总体思路

- (1) 分析 2022 年台风“梅花”概况、路径，以及受其影响烟台地区降水时空分布特征。
- (2) 利用 ERA5 再分析资料，使用 MeteoInfo 画图工具编程画图，分析 500 hPa 高空图叠加 850 hPa 风场，进行大尺度环流形势分析。
- (3) 从水汽条件、动力条件和热力条件方面进行中尺度特征分析。重点解决的技术难点和关键问题：
通过对降水时间段内不同时刻 850 hPa 比湿、水汽通量散度物理量场的叠加图，分析水汽条件对降水强度的影响。
分析降水时间段内低空急流与雨强的对应关系，得出低空急流与雨强的时间演变特征。850 hPa 散度场和 500 hPa 散度场和风场叠加分析，得出高低空垂直运动对台风降水的影响。
通过对 850 hPa 假相当位温分析，从热力条件角度得出台风降水的特征。

3. 台风“梅花”概况

2022 年第 12 号台风“梅花”于 9 月 8 日 08 时在西北太平洋洋面上生成，9 日 02 时加强为强热带风暴，10 日 11 时加强为台风，11 日凌晨加强为强台风并转向偏北方向缓慢移动，12 日 14 时减弱为台风，13 日 05 时再度加强为强台风，并向北偏西方向移动，靠近浙江东北部一带沿海，14 日 20:30 前后在浙江舟山普陀沿海登陆(14 级， $42 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，强台风)。穿过杭州湾后，于 15 日 00:30 前后在上海奉贤沿海再次登陆(12 级， $35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，台风)，尔后北偏西行，15 日中午减弱为热带风暴并由江苏射阳进入黄海，16 日 00 时前后在山东青岛崂山区第 3 次登陆(9 级， $23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，热带风暴)，之后向北偏东方向移动，穿过渤海海峡后于 16 日 12:40 前后在辽宁大连金普新区第 4 次登陆(9 级， $23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，热带风暴)。“梅花”在登陆后北上的过程中与冷空气结合，经历变性过程，于 16 日夜间在辽宁东北部转化为温带气旋，中央气象台于 16 日 20 时停止对其编号(图 1)。



(来源：中央气象台台风网)

Figure 1. Track of typhoon “Muifa”
图 1. 2022 年台风“梅花”路径

4. 台风“梅花”引发烟台降水的时空分布特征

台风“梅花”的主要特征为：登陆次数多，登陆强度强，大风范围广、持续时间长，降雨强度大，给

烟台带来了大量降水，在1978年以来影响烟台的台风过程降水量中排名第四；对烟台造成的强降水主要集中在14~16日，全市平均过程降水量为196.0 mm，其中栖霞平均过程降水量超过250 mm，蓬莱、长岛、福山超过200 mm。过程最大降水量506.5 mm，出现在蓬莱大辛店站，过程降水总体上北部多，南部少(图2(a))。

降水时间分布(图3)显示此次过程主要有两个降水时段，分别是14日08~15日08时，降水比较均匀稳定，时间长；15日08~16日08时，持续的强降水，出现暴雨。本文将这两个降水时段分别命名为：时段1和时段2。图2(b)显示时段1降水空间分布，图2(c)显示时段2降水空间分布。综合时空分布图可见：

(1) 时段1的特征为逐小时降水比较均匀稳定，由于持续时间长，所以累计雨量也较大，且空间上东部多，西部少。

(2) 时段2的特征为降水强度大，持续时间长，影响范围广，全市范围内普遍出现暴雨、大暴雨，空间上北部比南部雨量更大。

(3) 时段2较时段1过程降水量级更大；逐小时降水强度更强；影响范围更广，覆盖全市。

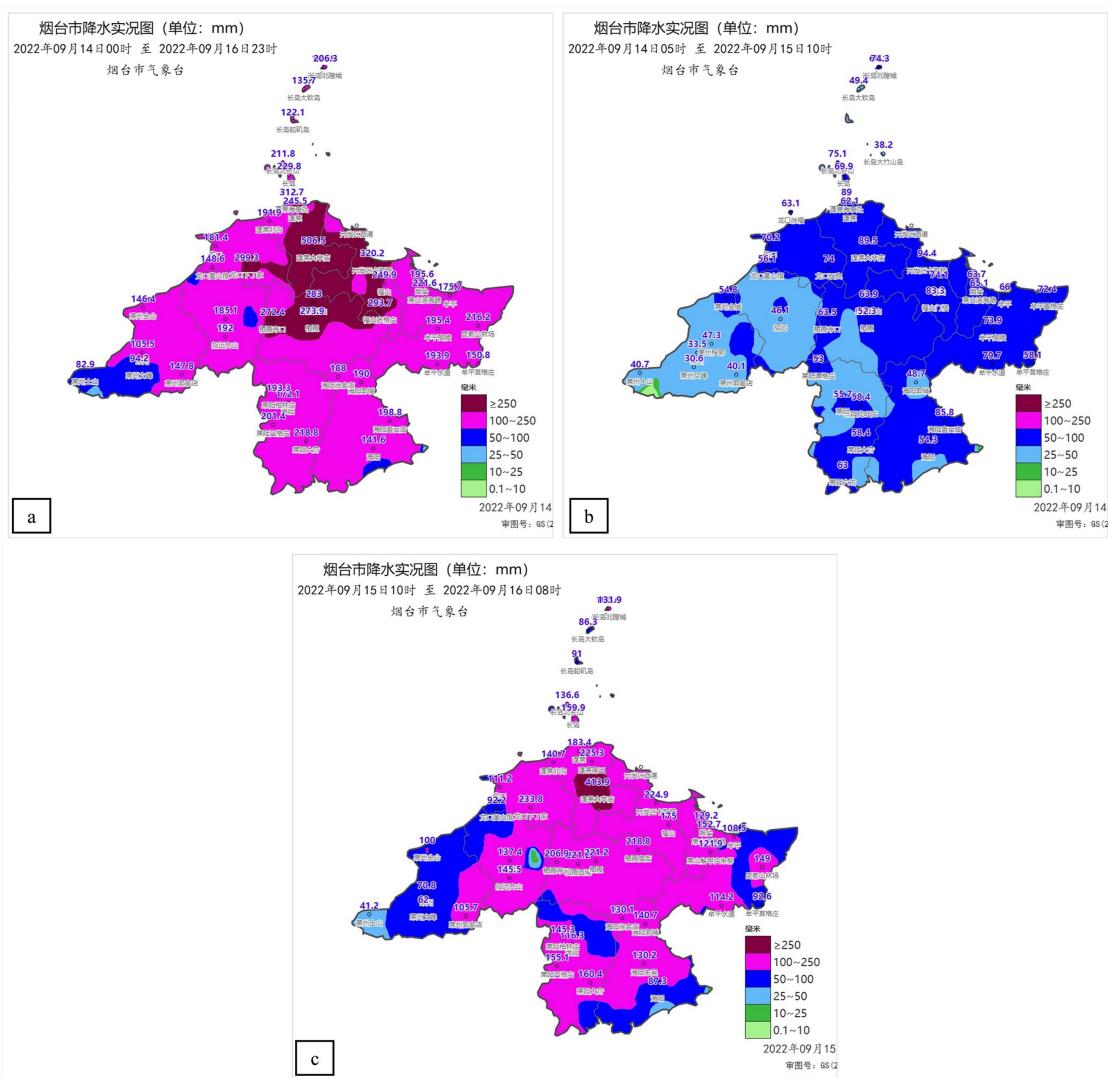


图1: 观测站 54765【降水量】序列图 (单位: mm) (返回上页)



Figure 3. Hourly precipitation (units: mm) in Penglai Station from 14~16 September 2022

图3. 蓬莱站 2022 年 9 月 14~16 日逐时降水量(单位: mm)

5. 大尺度环流形势分析

图4为500 hPa高度场叠加850 hPa风场图,可以看出,在500 hPa上,13日14时,台风“梅花”中心已北抬至26°N,125°E附近,此时太平洋上还有另一个热带气旋存在,它加强了台风北侧的东风急流。台风与西风槽结合,台风中心南部风力减弱,而北侧受东风急流和冷空气的影响,强风速继续维持,在低层850 hPa风场上北风侵入台风环流北部。台风北侧受到冷空气和偏东风急流的影响,外围雨带十分宽广。

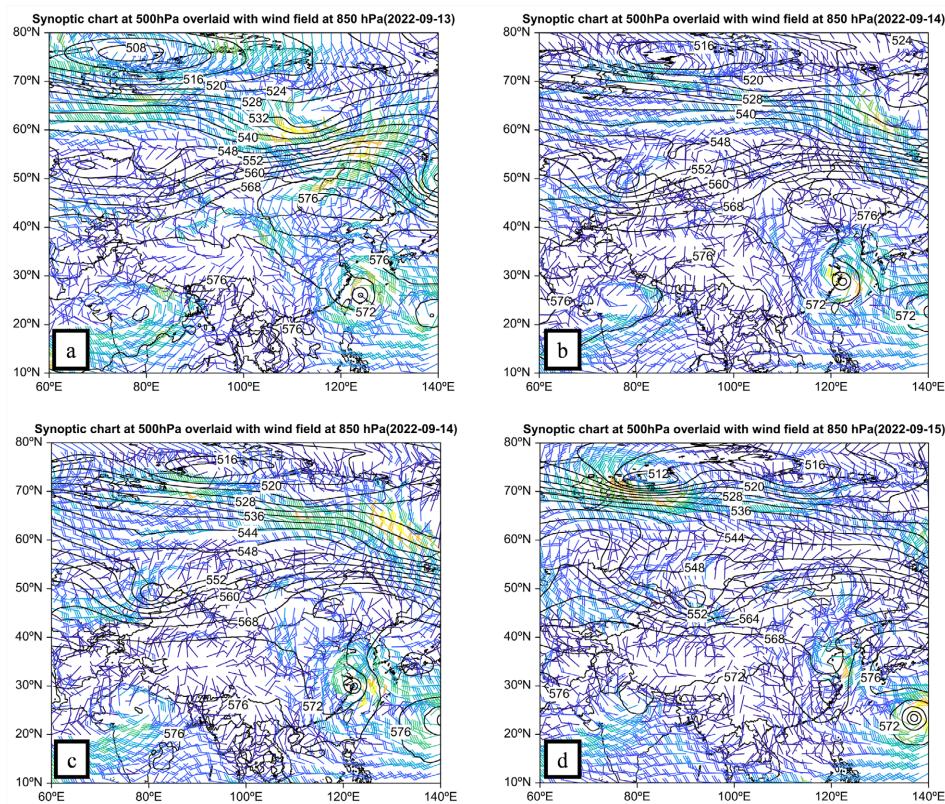


Figure 4. Synoptic chart at 500 hPa overlaid with wind field at 850 hPa (wind vane pole, units: m/s) at 14:00 CST 13 (a), 14:00 BST 14 (b), 20:00 BST 14 (c), and 20:00 BST 15 (d) (solid line, units: dagpm) September 2022

图4. 2022年9月13日14时(a)、14日14时(b)、14日20时(c)、15日20时(d) 500 hPa 高度场(黑色实线, 单位: dagpm)和850 hPa 风场(风向杆, 单位: m/s)

14日14时，台风“梅花”已进入浙江近海，中心位于 29°N , 122°E 附近，此时副高显著加强，台风南北两侧气压梯度均增大，中心附近风速增大，台风强度略增强。

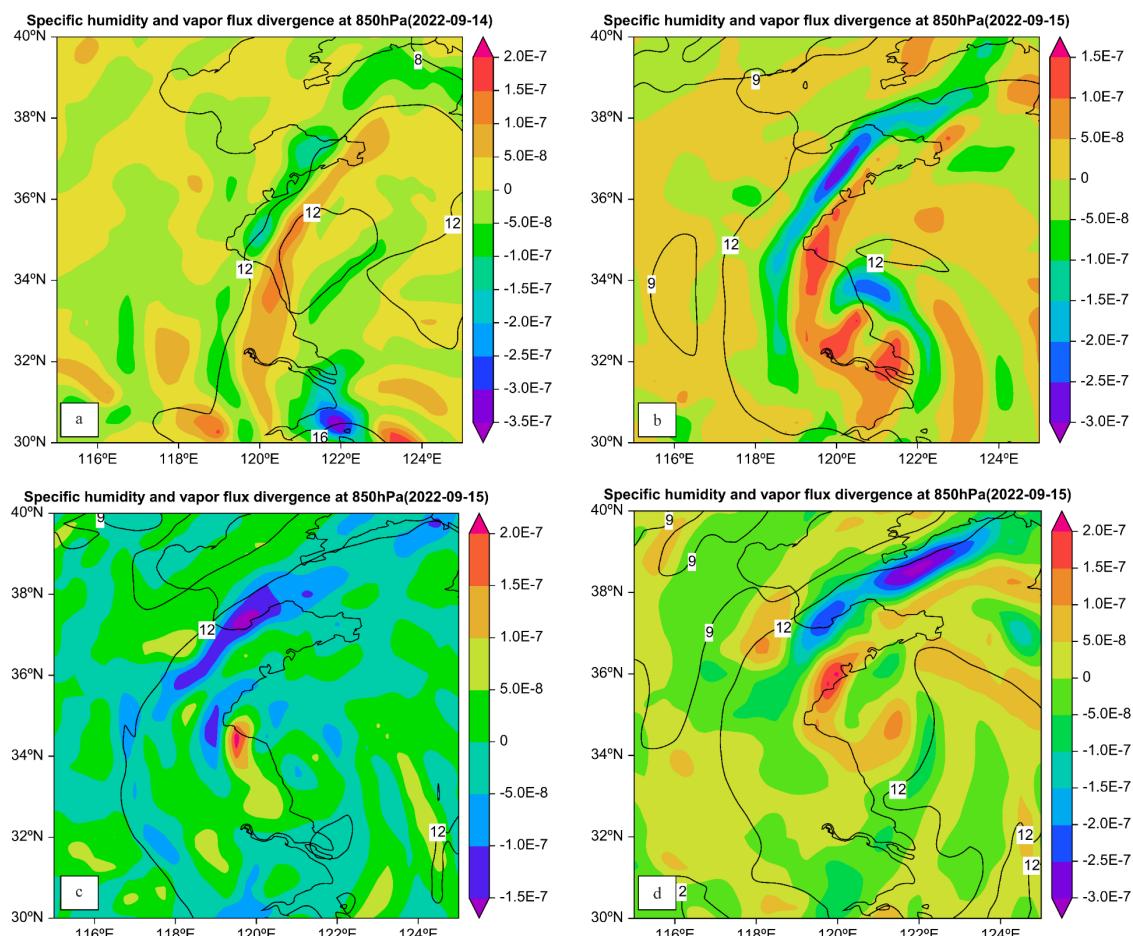
到了14日20时，台风登陆，中心在 30°N , 122°E 附近，虽然受到地形摩擦的影响，但由于北侧冷空气和东风急流的影响仍然存在，台风强度减弱较慢，北侧雨带范围依然很广。

在15日20时，随着台风继续北上，中心位于日照南部海域，东南风急流水汽通道被切断，台风逐渐减弱。

6. 水汽条件分析

充沛的水汽是强降雨形成的重要条件，所以对水汽条件的分析必不可少。图5为850 hPa比湿场叠加水汽通量散度场。从比湿场可以看出，14日20时， 12 g/kg 的比湿高值区在烟台南部的黄海海域，随着台风“梅花”北上和东风急流的不断输送，自15日08时至16日08时，烟台整体处于 12 g/kg 以上的高比湿区内，至16日14时， 12 g/kg 高比湿区已南撤。这说明自14日20时烟台上空开始集聚大量水汽，至16日08时，烟台上空水汽条件一直比较充沛，此后水汽开始消散。这与烟台此次过程的两个降水时段相对应。

水汽通量散度揭示了水汽输送在某个区域集中及集中的程度。850 hPa水汽通量散度场显示14日20时烟台处于水汽通量弱辐合区内，且弱水汽辐合中心位于烟台东部。此时烟台地区降水为平稳均匀降水，且东部多，西部少，对应时段1。



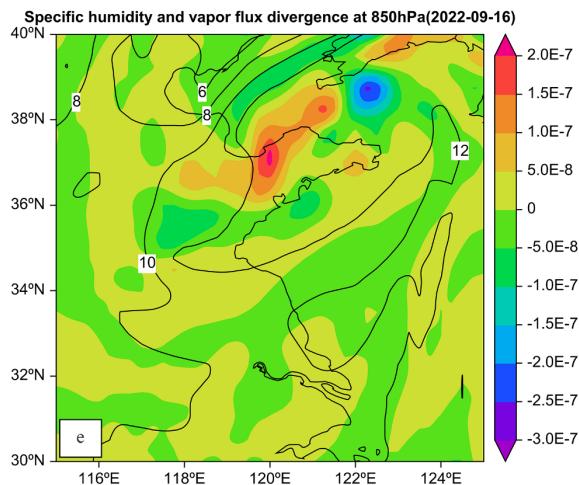


Figure 5. Specific humidity (solid line, units: g/kg) and vapor flux divergence (color scale, units: g/hPa/cm²/s) at 850 hPa at 20:00 CST 14 (a), 08:00 CST 15 (b), 14:00 CST 15 (c), 20:00 CST 15 (d) and 08:00 CST 16 (e) September 2022

图5. 2022年9月14日20时(a)、15日08时(b)、15日14时(c)、15日20时(d)、16日08时(e)850 hPa比湿(黑色实线, 单位: g/kg)和水汽通量散度(色阶, 单位: g/hPa/cm²/s)

至15日08时西部、北部处在强烈的水汽辐合带内, 中心最大水汽通量散度为 -3×10^{-7} g/hPa/cm²/s以上, 为此次大暴雨的产生提供了充足的水汽条件。此后水汽辐合中心向偏西方向移动, 15日14时, 烟台全市仍处于辐合区内, 只是辐合中心向偏西方向移动, 位于烟台西北部及沿海海面, 至15日20时, 烟台北部仍处于弱辐合区, 强度减小。说明自15日08时开始至15日20时, 烟台上空水汽强烈辐合激增, 此阶段也是台风“梅花”主体影响烟台的主要强降水时段, 对应时段2, 产生强降水, 降水量北部多, 南部少。

16日08时, 烟台大部分地区处于低空水汽辐散区, 降水基本结束。

7. 动力条件分析

7.1. 低空急流的作用

低空急流是一支较强的风速带, 能够把大量水汽和不稳定能量向降水区输送。**图6**为850 hPa上风速在12 m/s以上的低空急流图, 可以看出, 15日08时台风东南风急流中心位于东海海上, 最大风速在28 m/s以上, 急流以偏东南急流为主, 08时至20时, 随着急流北上, 急流由前期的东南风急流转为偏东风急流, 将大量水汽和不稳定能量源源不断输送至北方, 至15日20时烟台上空急流比较旺盛, 风速高达20 m/s。

低空急流有利于对流不稳定层结的建立和维持, 触发不稳定能量释放, 产生强降水。烟台强降水时段(时段2)主要出现在低空偏东风急流北上阶段。

7.2. 动力辐合条件

图7为500 hPa风场、散度场和850 hPa散度场叠加图。可以看出, 14日20时烟台东部、南部地区处在低空弱辐合区内, 随着台风北上, 低层850 hPa辐合中心向西北方向移动, 至15日08时烟台西北部位于低空急流辐合中心, 且由于台风主体的移入, 高低层辐合辐散强度有所增强, 中心强度在 $-20 \times 10^{-5}/s$, 15日14时至20时, 低层辐合中心继续向西北方向移动, 强度有所减弱, 辐合中心位于烟台西北部沿海海面, 期间850 hPa辐合区始终位于高空500 hPa急流入口区的右后方, 低层辐合高层辐散, 高低空急流的耦合作用也有利于上升运动的加强和维持, 为强降水的产生提供了较好的动力触发机制。

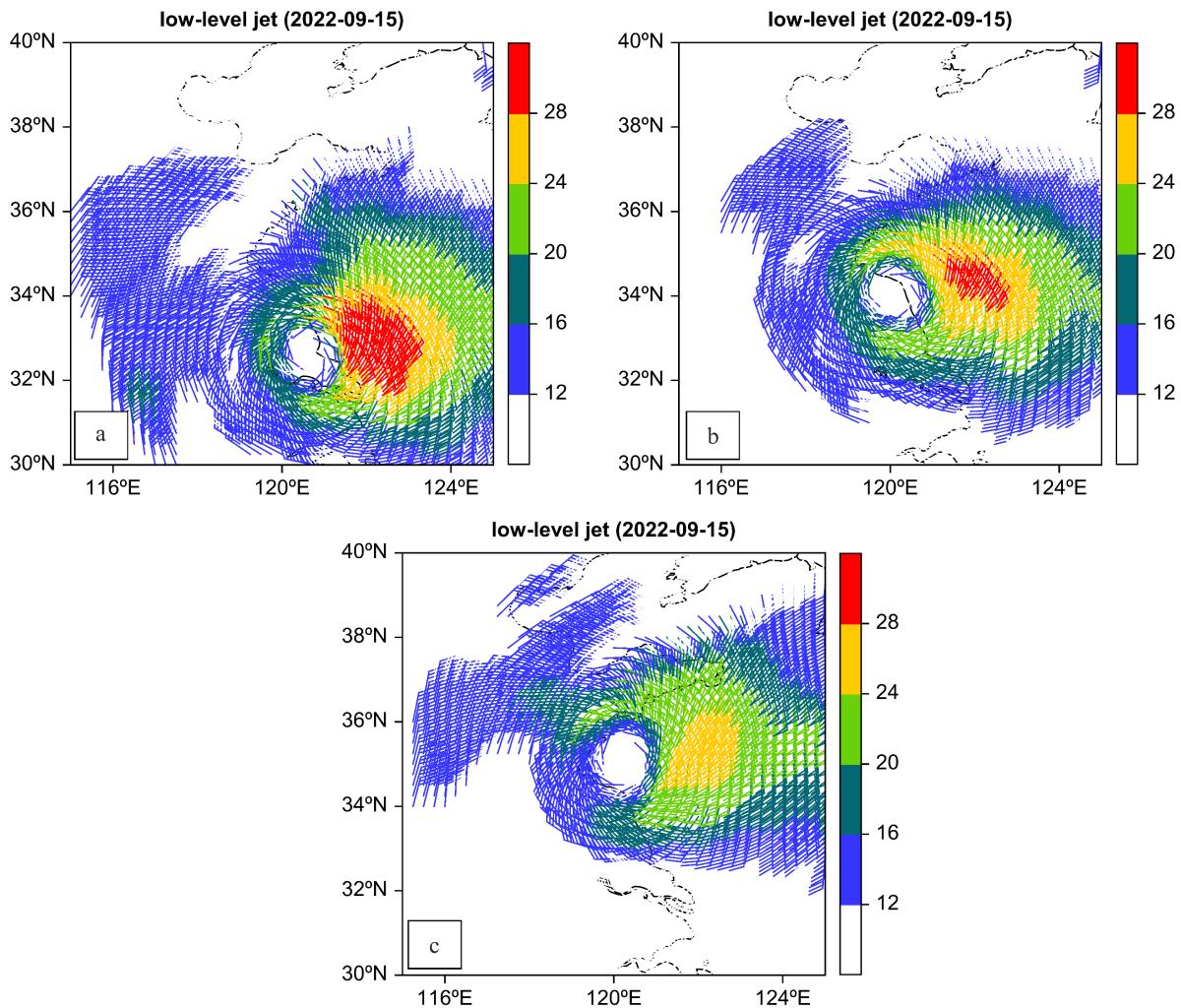
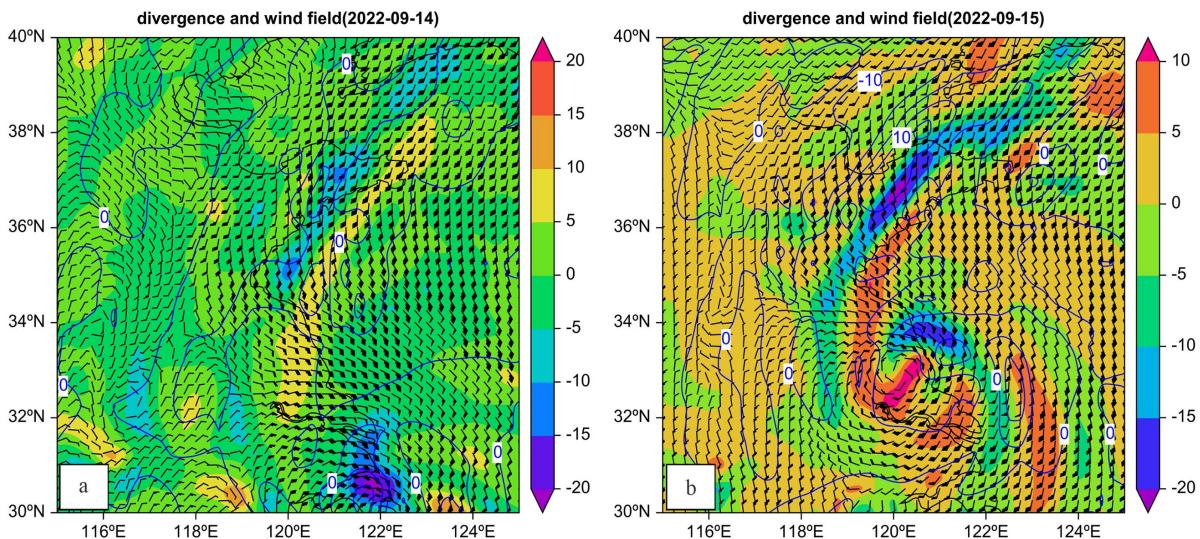


Figure 6. Low-level jet at 850 hPa at 08:00 CST 15 (a), 14:00 CST 15 (b), and 20:00 CST 15 (c) September 2022
图 6. 2022 年 9 月 15 日 08 时(a)、14 时(b)、20 时(c) 850 hPa 风速



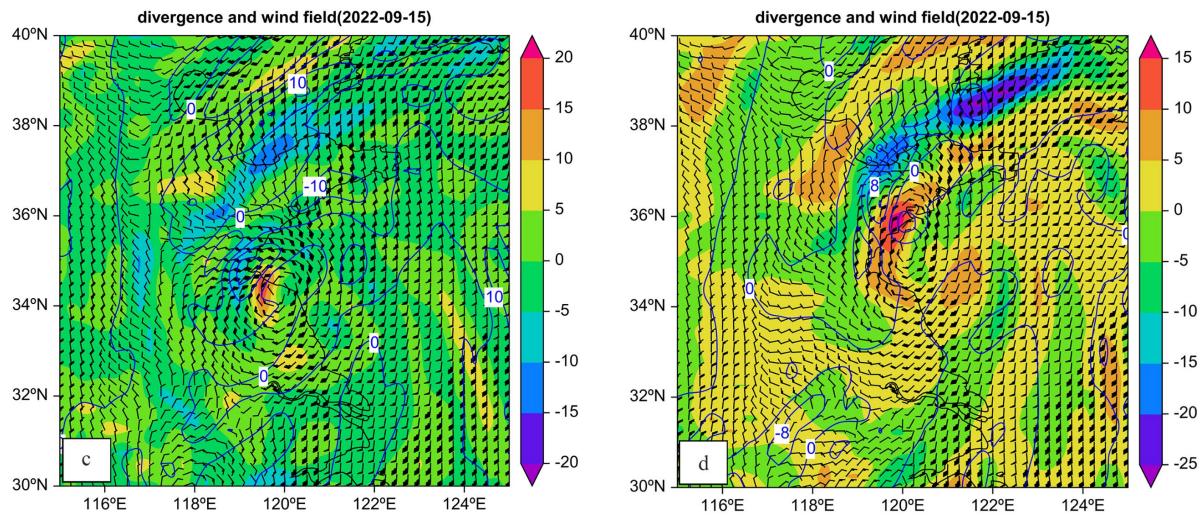


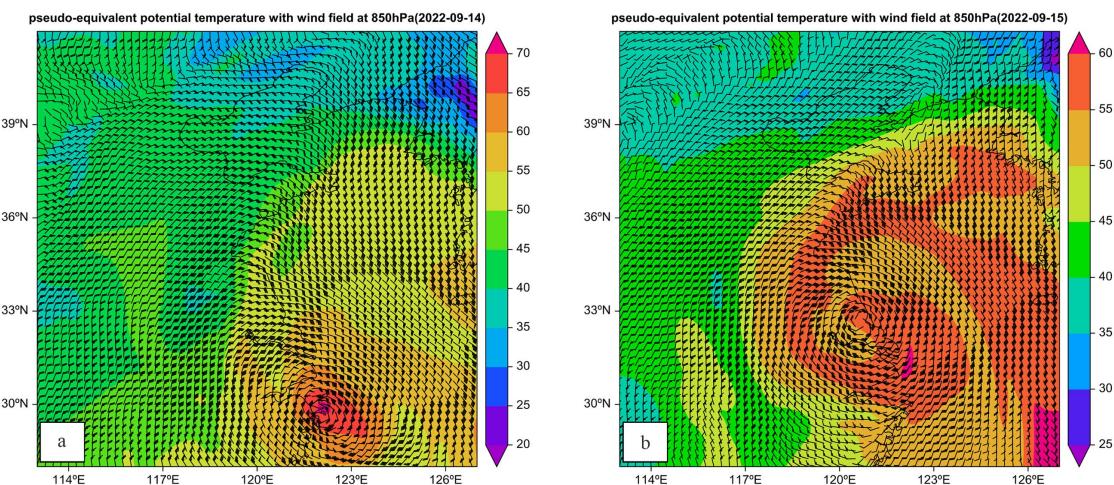
Figure 7. Wind field (wind vane pole, units: m/s), divergence (solid line, units: $10^{-5}/s$) at 500hPa and divergence (color scale, units: $10^{-5}/s$) at 850 hPa at 20:00 CST 14 (a), 08:00 CST 15 (b), 14:00 CST 15 (c) and 20:00 CST 15 (d), 14 September 2022
图 7. 2022 年 9 月 14 日 20 时(a)、15 日 08 时(b)、15 日 14 时(c)、15 日 20 时(d) 500 hPa 风场(风向杆, 单位: m/s)、散度场(蓝色实线, 单位: $10^{-5}/s$)和 850hPa 散度场(色阶, 单位: $10^{-5}/s$)

8. 热力条件分析

图 8 为 850 hPa 假相当位温叠加风场。由图可见, 14 日 20 时, 台风倒槽东侧受偏南风低空急流影响低层为暖湿层结, 有弱的对流不稳定。

倒槽西侧为干冷空气, 随着台风向西北方向移动, 近地面层弱的干冷空气侵入台风暖心结构, 干冷空气的加入有利于加强对流不稳定。至 15 日 08 时, 台风暖心结构比较明显, 至 15 日 20 时随着台风移动以及冷空气的入侵, 台风暖心结构逐渐向西倾斜, 倒槽东部中低层对流不稳定性加强, 降水强度增强。16 日 08 时随着冷空气加强, 台风暖心结构被破坏, 台风内冷空气代替暖空气, 降水开始减弱。

由此可见, 此次台风“梅花”造成的强降水具有一定的对流性, 前期倒槽向降水区输送暖湿气流造成暖区降水, 但降水强度较小, 对应时段 1; 当冷空气卷入台风使冷暖空气交汇, 不稳定能量随之增加, 在一定的触发机制下产生对流性降水, 雨强增大, 对应时段 2。可见北上台风与西风带短波槽相互作用在一定条件下有利于台风暴雨的产生。



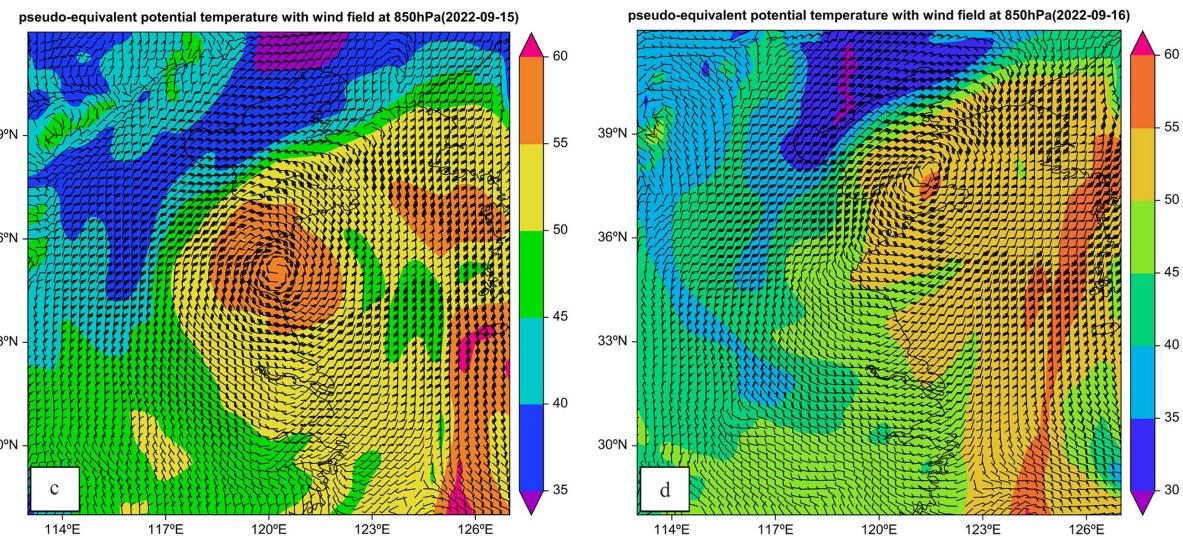


Figure 8. Pseudo-equivalent potential temperature (color scale, units: °C) and wind field (wind vane pole, units: m/s) at 850 hPa at 20:00 CST 14 (a), 08:00 CST 15 (b), 20:00 CST 15 (c) and 08:00 CST 16 (d), 14 September 2022

图 8. 2022 年 9 月 14 日 20 时(a)、15 日 08 时(b)、15 日 20 时(c)、16 日 08 时(d) 850 hPa 假相当位温(色阶, 单位: °C)、风场(风向杆, 单位: m/s)

9. 结论

(1) 台风“梅花”引发烟台降水分两个降水时段, 分别为 14 日 08 时~15 日 08 时(时段 1)和 15 日 08 时~16 日 08 时(时段 2)。时段 1 降水比较均匀稳定, 降水强度相对较小, 空间分布上东部多, 西部少。时段 2 降水强度大, 持续时间长, 影响范围广, 全市范围内普遍出现暴雨、大暴雨, 空间分布上北部比南部雨量更大。时段 2 较时段 1 过程降水量级更大; 逐小时降水强度更强; 影响范围更广, 覆盖全市。

(2) 500 hPa 主要受中纬度浅槽、副热带高压、台风“梅花”和台风“南玛都”共同影响。海上双台风活动, 强度均较强, 导致副热带高压东退, 特别是台风“南玛都”的迅速发展, 北上过程中直接导致副热带高压整体东退, 有利于台风“梅花”沿着副热带高压后部西南引导气流快速北上。

(3) 整层水汽深厚。一是台风倒槽携带大量水汽, 偏东南急流沿副热带高压底后部气流向西北偏北输送。二是台风登陆北上, 台风主体从海上携带大量水汽, 东南急流头部在暴雨区形成强烈的水汽辐合区, 产生大暴雨。

(4) 850 hPa 上存在低空急流, 急流由前期的东南风急流转为偏东风急流, 能够把大量水汽和不稳定能量向降水区输送, 也有利于对流不稳定层结的建立和维持, 触发不稳定能量释放, 产生强降水; 同时低层东南风急流正好位于高空急流入口区右侧, 低层辐合、高层辐散, 高低空急流耦合抽吸作用, 也为降水产生提供了有利动力条件。

(5) 由水汽条件和动力条件对比发现, 台风“梅花”降水有水汽先行、东南急流滞后的特征: 15 日 08 时, 当东南急流还位于东海海面上时, 将海上大量水汽向西北方向输送, 导致此时的水汽辐合中心已位于烟台上空, 为强降水提供充足的水汽条件。而至 20 时, 东南急流移动到烟台上空, 水汽辐合中心已移动到其西北方向, 烟台上空水汽条件有所减弱。

(6) 随着台风北上, 由于冷空气的作用破坏了热带气旋的对称结构, 造成变性, 使降水由稳定性降水(时段 1)向对流性降水转变(时段 2)。干冷空气由台风西侧侵入台风环流内部, 弱的冷空气有利于斜压锋生, 产生不稳定能量, 对降水有利。

10. 存在的问题

- (1) 本文只从有限的几个物理量角度讨论台风降水的多尺度特征，可能存在本文未讨论的其他影响因素。
- (2) 本文讨论了台风“梅花”一次台风天气过程的特征，由于台风过程的多样性，一次天气过程的代表性较差。

参考文献

- [1] 陈联寿, 丁一汇. 西北太平洋台风概论[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 491.
- [2] 官晓军, 潘宁, 黄待静, 等. 基于降水极端预报指数的福建台风极端降水预报研究[J]. 气象学报, 2021, 79(3): 414-427.
- [3] 孙兴池, 吴炜, 孙莎莎. 登陆北上山东台风暴雨非对称分布的成因对比分析[J]. 海洋气象学报, 2019, 39(3): 55-63.
- [4] 刁秀广, 孟宪贵, 张立, 等. 台风“摩羯”与“温比亚”环流中龙卷小尺度涡旋特征及可预警性分析[J]. 海洋气象学报, 2019, 39(3): 19-28.
- [5] 周雪松, 孙兴池. 台风“达维”(1210)非对称性结构及其对风雨分布的影响分析[J]. 海洋气象学报, 2017, 37(4): 58-64.
- [6] 丛春华, 陈联寿, 雷小途, 等. 热带气旋远距离暴雨的研究[J]. 气象学报, 2012, 70(4): 717-727.
- [7] 高晓梅, 江静, 刘畅, 等. 近 67a 影响山东台风频数的变化特征及其与若干气候因子的关系[J]. 气象科学, 2018, 38(6): 749-758.
- [8] 高留喜, 刘畅, 丛春华, 等. 两个相似路径台风造成山东降水明显差异的成因分析[J]. 海洋气象学报, 2020, 40(4): 60-68.
- [9] 周淑玲, 王科, 闫淑莲, 等. 山东半岛两次秋季台风远距离大暴雨的特征分析[J]. 海洋气象学报, 2019, 39(2): 84-93.
- [10] 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.