

2024年7月辽宁极端降水水汽输送特征

夏佳琦¹, 周春晓^{1*}, 李冰倩², 张迪娅²

¹辽宁省气象台, 辽宁 沈阳

²辽宁省装备保障中心, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2025年4月24日; 录用日期: 2025年6月19日; 发布日期: 2025年6月30日

摘要

2024年7月24日至26日辽宁出现极端强降水, 暴雨覆盖面积近71%, 其中沈阳地区累计降水量556.6 mm, 为1951年以来最强降雨。文章利用欧拉方法分析水汽输送、辐合特征与局地水汽收支, 利用拉格朗日方法追踪水汽来源并量化。结果表明: 东北冷涡、台风“格美”、副高共同作用为暴雨的发生和维持提供了有利的环流背景, 该形势的稳定维持是降水长时间持续的原因; 南边界水汽输送量对降水增大起到关键作用, 辽河流域形成的强水汽辐合中心为极端降水创造了有利条件, 上升运动与深厚的湿层有利于高效降水; 不同高度水汽来源存在差异, 700 hPa来自南海、西太平洋、内陆的水汽贡献率相近, 850 hPa来自西太平洋的水汽贡献率总计85.7%, 南海占比14.3%; 850 hPa各水汽通道均受到台风影响, 台风外围水汽输送占比49.3%。

关键词

极端降水, 台风“格美”, 水汽收支, 水汽输送, 拉格朗日方法

Water Vapor Transport Characteristics of the Extreme Precipitation Event in Liaoning in July 2024

Jiaqi Xia¹, Chunxiao Zhou^{1*}, Bingqian Li², Diya Zhang²

¹Liaoning Meteorological Observatory, Shenyang Liaoning

²Liaoning Meteorological Equipment and Support Center, Shenyang Liaoning

Received: Apr. 24th, 2025; accepted: Jun. 19th, 2025; published: Jun. 30th, 2025

Abstract

From July 24 to 26, 2024, Liaoning experienced extreme heavy rainfall, with the area affected by

*通讯作者。

文章引用: 夏佳琦, 周春晓, 李冰倩, 张迪娅. 2024 年 7 月辽宁极端降水水汽输送特征[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(6): 944-954. DOI: 10.12677/ag.2025.156089

torrential rain covering nearly 71%. The cumulative precipitation of Shenyang reached 556.6 mm, marking the strongest rainfall since 1951. This article analyzes the moisture transport, convergence characteristics, and local moisture budget using the Eulerian method, and traces and quantifies the sources of moisture using the Lagrangian method. The results indicate that the combined influence of the Northeast cold vortex, Typhoon Gaemi, and the subtropical high created a favorable circulation background for the occurrence and persistence of the heavy rain, with the stable maintenance of this pattern being the reason for the prolonged duration of precipitation. The moisture transport from the southern boundary played a crucial role in increasing precipitation, and the strong moisture convergence center formed in the Liaohe River basin created favorable conditions for extreme rainfall. Upward motion and a deep moist layer facilitated efficient precipitation. There were differences in moisture sources at different altitudes: at 700 hPa, the contributions of moisture from the South China Sea, the Western Pacific, and inland areas were similar; while at 850 hPa, the contribution of moisture from the Western Pacific accounted for a total of 85.7%, while the South China Sea accounted for 14.3%. All moisture channels at 850 hPa were influenced by the typhoon, with moisture transport from the typhoon's periphery accounting for 49.3%.

Keywords

Extreme Precipitation, Typhoon Gaemi, Water Vapor Budget, Water Vapor Transport, Lagrangian Method

Copyright © 2025 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

暴雨是我国最主要的气象灾害之一，其引发的洪涝、山体滑坡等次生灾害会给人民的生命、财产安全带来巨大损失，暴雨一直是气象领域的研究重点[1]-[3]。前人对暴雨形成机理进行了深入研究，暴雨是多尺度系统相互作用的结果，不仅受到副高[4]、低涡[5]、锋面[6]等大尺度环流系统调整的影响，还会受到干线[7]、飑线[8]等中小尺度系统的热力、动力作用影响。

水汽是降水产生的基础，水汽的输送直接影响着降水的分布和强度，持久、充足的水汽供应是暴雨形成的必要条件[9][10]，尤其在极端降水中。2021年7月河南地区发生了一次极端强降水事件，台风“烟花”和副高影响下的东南气流与台风“查帕卡”和黄淮气旋影响下的西南气流在河南地区辐合，分别将西太平洋和南海水汽输送至河南地区，使河南地区可降水量异常偏高、湿层深厚，为高效降水提供了有利条件[11][12]。此次过程中在边界层以上还存在类似“大气河”特征，在河南以南建立了强的经向水汽通量带，是导致极端暴雨产生的重要原因之一[13]。2023年7月华北地区的极端暴雨事件中，在双台风的接力作用下，低层强盛的东风急流向华北地区输送了大量的水汽，使过程前期京津冀地区始终处于水汽的净流入状态，同时水汽辐合中心受太行山和燕山的阻挡在山前长期滞留，在持续的水汽输送与辐合作用下，大气整层可降水量异常偏高，为极端强降水创造了有利条件[14]-[16]。

常见的水汽输送研究方法有欧拉方法、拉格朗日方法、同位素追踪方法等。欧拉方法通过计算研究区域的水汽通量及其散度刻画水汽输送特征，被广泛应用于暴雨研究中[17]。同位素追踪法通过大气水汽同位素组成变化确定大气水汽来源，成本高且仅可对已标记同位素的事件进行分析，研究受限。拉格朗日方法通过对气团移动轨迹进行追踪得到水汽源地，并对不同源地水汽对研究地点水汽的贡献率进行量化，在淮河流域[18]、河南地区[19]、山西地区[20]均有应用。目前虽已有学者针对东北地区暴雨过程水

汽来源开展研究[21][22],但缺乏对极端降水水汽来源的追踪,本文结合欧拉方法与拉格朗日方法,对2024年7月辽宁一次极端降水过程水汽输送特征进行研究,加深对极端降水形成机理的认识,为提高东北地区极端降水可预报性提供一定支撑。

2. 资料与方法

2.1. 资料

本文使用的数据时间为2024年7月24日至7月26日。逐小时的降水观测资料来自辽宁的国家和区域气象观测站,共计1807个;天气形势分析以及欧拉方法计算水汽收支使用的再分析资料为欧洲中期天气预报中心ERA5数据,时间分辨率为1h,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,垂直方向共37层;拉格朗日方法水汽追踪使用的再分析资料为美国国家环境预报中心的GDAS数据,时间分辨率为6h,空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,垂直方向共24层。

2.2. 方法

2.2.1. 轨迹计算

HYSPLIT模式耦合了拉格朗日粒子追踪方法[23],可用于计算气团运动轨迹,快速确定气团的来向。该方法主要是气流的移动轨迹是其在时间和空间上位置矢量的积分,假设气块随风飘动,已知初始位置(P)和第一猜测位置(P')之间的平均速度计算最终位置,公式如下:

$$P'(t+\Delta t) = P(t) + V(P, t)\Delta t \quad (1)$$

$$P(t+\Delta t) = P(t) + 0.5[V(P, t) + V(P', t+\Delta t)]\Delta t \quad (2)$$

本研究以沈阳市(123.25°E , 41.48°N)为模拟受点,计算1500 m(850 hPa)和3000 m(700 hPa)高度上168 h的后向气流轨迹来源,可以充分反映中低层水汽来源及其差异。欧氏距离能够直观地反映出轨迹点之间的空间直线距离差异,为更加清晰得到水汽的各个通道,采取欧氏距离的方法对计算出的轨迹进行聚类分析。为保证聚类结果既能有效区分不同特征的水汽通道,同时不过度聚类导致分析的复杂性和物理意义的模糊,定义每类的空间方差为该条轨迹与该类所有平均轨迹对应点的距离平方和,合并后所有类的空间方差之和为总空间方差(TSV),选取随着类别数的增加TSV变化量最大的类别数作为最后的聚类数。以上方法被广泛应用于水汽和大气污染物的传输路径与来源识别研究[19][24]。

2.2.2. 水汽贡献率

利用某一通道下所有轨迹到达受体点的比湿之和与研究期间所有轨迹到达受体点的比湿之和的比值,作为该类轨迹对受体点水汽的贡献率[18]。具体计算公式如下:

$$Q_s = \frac{\sum_1^m q_{\text{last}}}{\sum_1^n q_{\text{last}}} \quad (3)$$

2.2.2. 水汽通量

大气的整层水汽输送通量即为从地面至大气层顶的水汽通量的垂直积分[19],计算公式为:

$$\bar{Q} = -\frac{1}{g} \int_{P_b}^{P_t} \bar{V} q dP \quad (4)$$

其中, q 为比湿; P_t 与 P_b 分别为大气顶部与底部的气压,本研究分别取200 hPa和1000 hPa; g 为重力加速度; $\bar{V}$ 为各层大气水平风速。

各边界的水汽收支计算公式为:

$$M = -\frac{1}{g} \int_{P_b}^{P_t} \int_{\Gamma} v_n q d\Gamma dp \quad (5)$$

Γ 为水平边界, v_n 为垂直于边界的法向速度。 M 为正时表示有流入, 负值时表示有流出。

3. 研究结果

3.1. 降水概况

2024 年 7 月 24 日至 26 日(20 时~20 时)辽宁省出现持续性强降水天气, 图 1 绘制了过程累计降水量, 全省暴雨覆盖面积近 71%, 大暴雨覆盖面积 40%。强降水中心主要出现在辽河流域, 有 107 个站出现 250 mm 以上的特大暴雨, 其中沈阳地区出现 1951 年有观测记录以来最强降雨, 单站最大累计降雨量 556.6 mm, 出现在辽中朱家房镇。沈阳市国家气象站 25 日、26 日降水量(20 时~20 时)分别为 139.1、119.4 mm, 均达到了大暴雨量级, 期间出现 4 时次 20 mm 以上短时强降水, 最高为 46.7 mm, 朱家房镇 25 日、26 日降水量分别为 136.8 mm、419.8 mm, 期间出现 13 时次 20 mm 以上短时强降水, 最高为 71 mm。此次降水过程影响范围广、持续时间长、降水强度大、累计雨量大, 具有显著的极端性, 是一次极端降水过程。

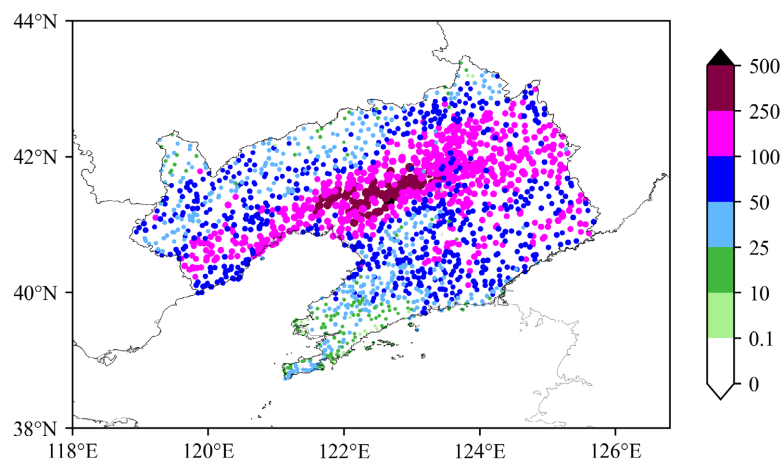


Figure 1. Distribution of process cumulative precipitation (Unit: mm)
图 1. 过程累计降水量分布(单位: mm)

3.2. 环流特征

图 2 绘制了降水最强时刻前(26 日 2 时)的高低空环流形势。在对流层上层(200 hPa), 东亚地区建立起“两槽一脊”的环流形势, 在蒙古地区和鄂霍次克海各有一低压槽, 高压脊从我国东北地区延伸到贝加尔湖附近。在我国东北地区存在明显的高空急流, 风速最高超过 40 m/s, 辽宁地区位于高空急流入口区南侧, 有强的高空辐散, 利于低层气流的辐合上升运动以及对流系统的发生发展。

500 hPa 等压面上副高与贝加尔湖附近高压同位相叠加, 形成高压坝, 受其影响, 东北冷涡在蒙古国中部稳定维持。台风“格美”沿着副高外围西移北进但移速缓慢, 辽宁地区始终处于低涡前部西南气流和台风与副高外围偏南气流的辐合区内。“北高南低”“东高西低”的稳定环流形势[16]导致了此次降水的长时间持续, 是出现极端强降水的重要原因之一。

700 hPa 上低涡切变线一直延伸至陕西南部, 影响了我国北方的大部地区切变线前侧的西南气流和台风“格美”与副高作用下的偏南气流在山东、河北、辽宁一带辐合, 积累大量的水汽。与 500 hPa 相似受

高压阻挡,过程期间,低涡中心位置在 46°N , 110°E 附近维持,底部切变线不断东移北上,但移速缓慢。

850 hPa 位于蒙古地区的低涡依然存在,但底部切变线弱于 700 hPa,副高后部与台风“格美”外围的偏南风急流已经建立。

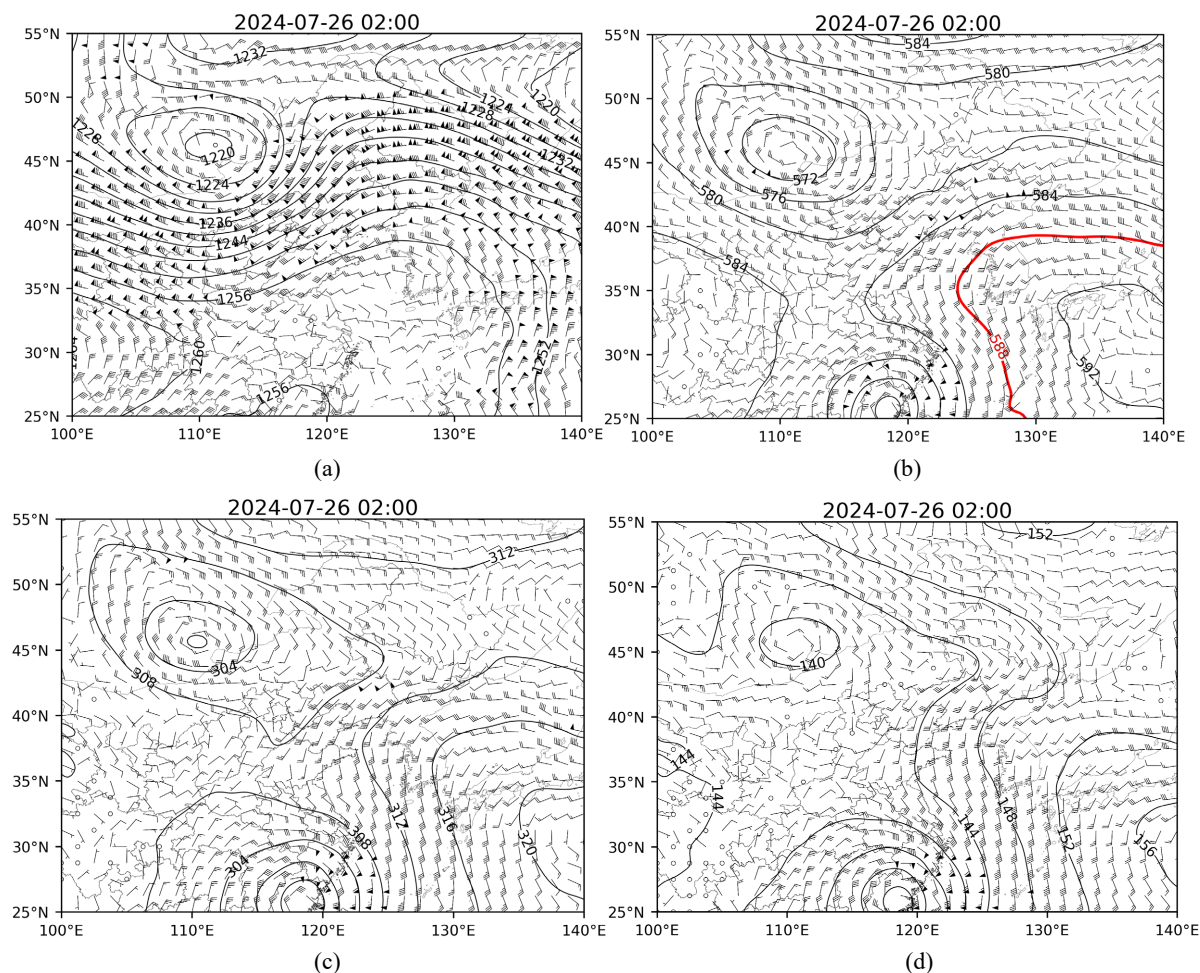


Figure 2. Circulation pattern characteristics at 02:00 on the 26th (Contour lines represent the geopotential height field, unit: dagpm; wind barbs indicate the wind field, unit: m/s)

图 2. 26 日 2 时环流形势特征(等值线为位势高度场, 单位: dgpm, 风场风羽, 单位: m/s)

3.3. 水汽输送和收支

充足的水汽供应是形成暴雨的必要条件,尤其在北方,大范围暴雨离不开暖湿气流的输送。西太平洋副高与台风“格美”之间形成一支较为宽广的东南风气流,到达陆地后逐渐转为南风-西南风气流,由于副高和台风的稳定维持,该东南-南-西南水汽通道稳定维持,源源不断地将西太平洋的水汽向辽宁地区输送。同时,在过程前半段,还有一支途经河北的水汽通道,明显弱于东南风水汽通道,该水汽通道主要受到我国北方的低压槽的影响。

降水的发生和持续不仅与稳定的水汽输送有关,还与局地水汽辐合有关[19]。24 日 20 时辽宁西部地区已经有水汽辐合,但此时水汽通量散度较小,在 $0 \sim -2 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,25 日凌晨开始随着低层南风急流的建立,辽宁地区的水汽通量不断增大,水汽辐合加强,25 日夜間在辽河流域建立起水汽辐合中心,水汽辐合最强时水汽通量散度接近 $-8 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,此时水汽辐合中心位于辽河流域中部的沈阳地

区，与沈阳南部极端降水落区相对应。26 日傍晚开始水汽辐合中心移出辽宁地区，辽宁转为水汽辐散，降水过程趋于结束(图 3)。

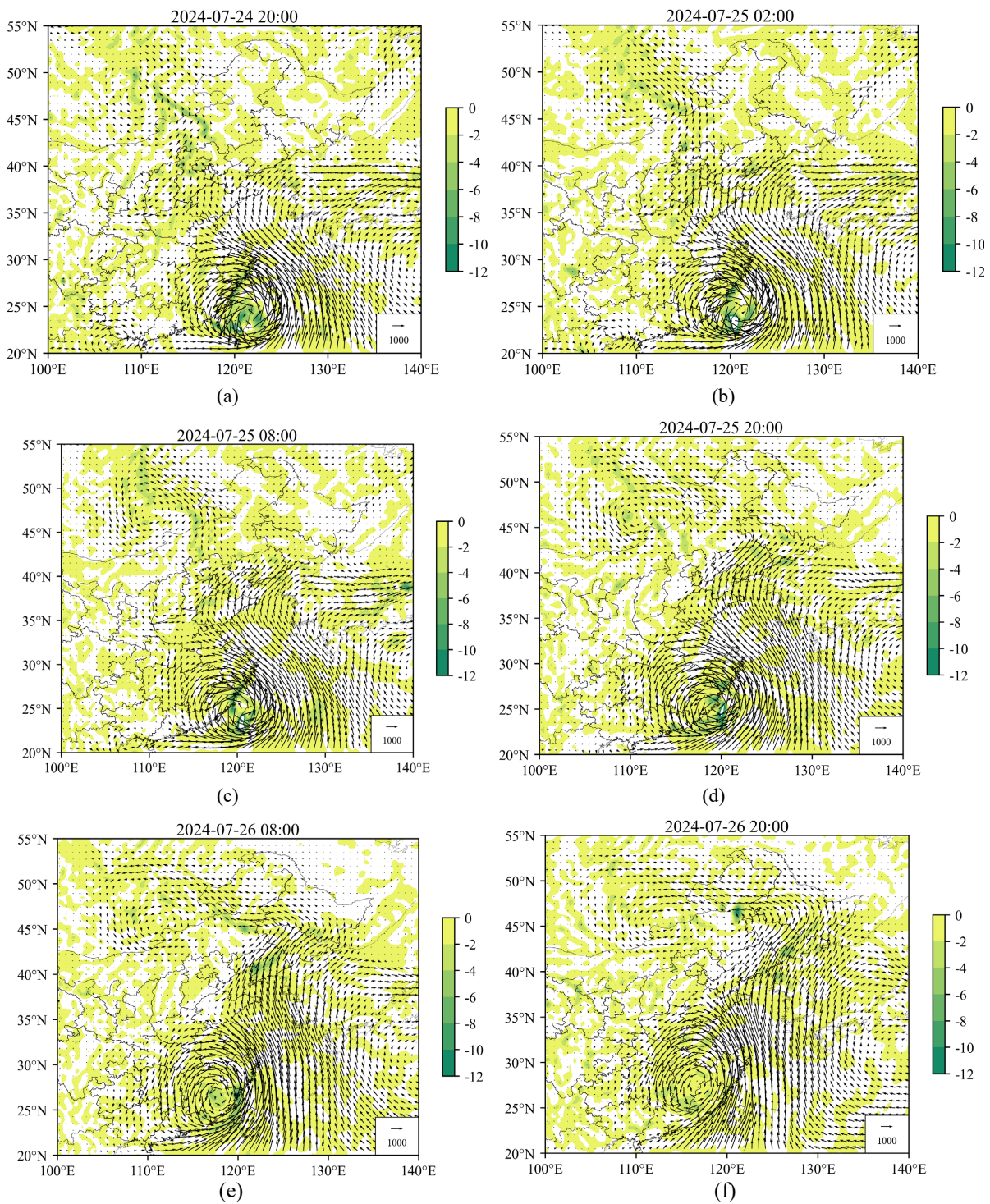


Figure 3. Integrated water vapor flux and water vapor flux divergence (The shaded area represents the water vapor flux divergence, unit: $10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; wind barbs indicate the water vapor flux, unit: $10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \text{ s}^{-1}$)

图 3. 整层水汽通量及水汽通量散度(填色为水汽通量散度，单位： $10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，风羽为水汽通量，单位： $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \text{ s}^{-1}$)

图 4 绘制了 7 月 24 日至 26 日沈阳地区各边界的水汽收支演变, 24 日, 东边界水汽输送始终为负值, 其他三个边界输送为正值, 水汽净通量在 0 值附近, 没有明显的水汽输送。25 日凌晨开始, 随着南边界、西边界水汽输送量的增加, 水汽净通量转为正值, 西边界水汽输送量增长略滞后于南边界。总的水汽收支受南边界影响在 25 日 6 时、26 日 11 时达到两个峰值, 分别为 353、566 ($10^7 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)。从 25 日早晨至过程结束, 沈阳朱家房镇降水持续 34 h, 期间 3 个时段降水量超过 40 mm, 这三个时段均对应着南边界水汽输送量的增加。

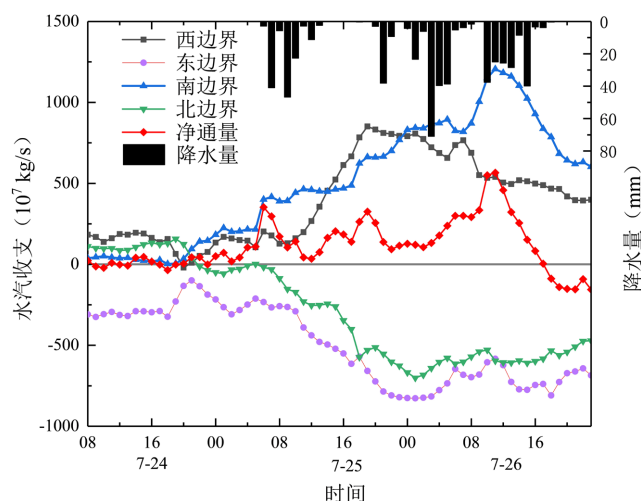


Figure 4. Evolution of water vapor budget at the boundaries of Shenyang (Unit: 10^7 kg/s) and hourly variation of precipitation at Zhujiatang, Shenyang (Unit: mm/h)

图 4. 沈阳各边界水汽收支(单位: 10^7 kg/s)演变与沈阳朱家房降水(单位: mm/h)逐时变化

3.4. 水汽源地追踪及贡献量化

利用 HYSPLIT 模式对 7 月 24 日 20 时至 6 日 20 时到达辽宁地区的气团进行回溯追踪, 700 hPa 和 850 hPa 高度上的气团轨迹分别在 4 类和 3 类时 TSV 变化最大(图 5), 因此将 700 hPa 聚为 3 类, 850 hPa 轨迹聚为 4 类。

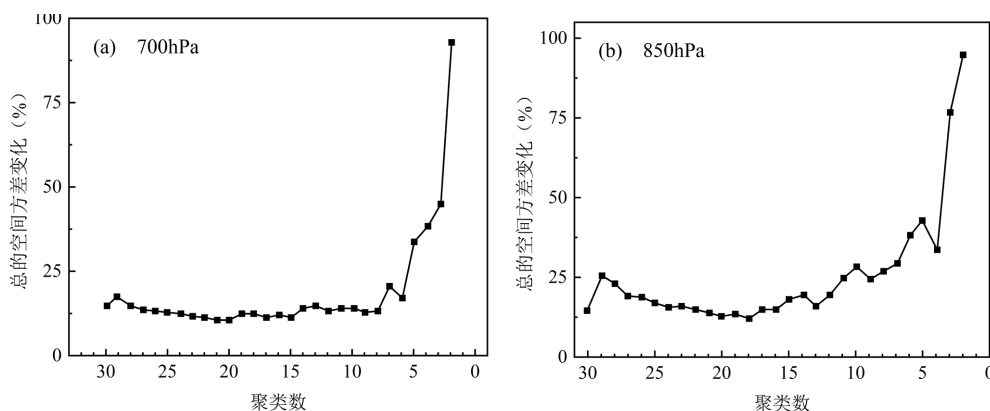


Figure 5. Variation of total spatial variance (Unit: %)

图 5. 总空间方差变化(单位: %)

结合图 6 和图 7, 700 hPa 上水汽通道 1 起源欧亚大陆内部, 经过蒙古地区, 由内蒙古进入我国境内,

随后经过河北,从偏西方向进入辽宁,该通道主要体现了东北冷涡造成的水汽输送。通道2来自西太平洋的菲律宾海,向西北方向输送水汽,到达大陆后一路向北,在山东、渤海向东偏转,从西南方向输送至辽宁,此通道对应台风“格美”影响下的水汽通道。通道3源地较远,从南海-菲律宾海-东海-黄海-渤海一路输送至辽宁地区,该通道受副高影响明显。结合图7各通道高度、比湿、相对湿度随时间的变化特征,通道1的气团轨迹高度在3000 m高度左右,该通道来源内陆,比湿和相对湿度处于较低水平,当气团流经低涡中心附近时,气团轨迹高度抬升至4000 m左右高度,比湿无明显变化,但相对湿度随气团高度的升高也随之增大。通道2、3气团运行高度相对较低,通道2的气团在进入陆地后水汽损耗,比湿降低,到达辽宁前的48 h左右受到台风“格美”的水汽补充,比湿明显增大。通道3基本均位于海洋洋面上,水汽损耗较小,比湿始终保持较高水平。各通道进入辽宁后受辐合上升运动影响,气团高度明显升高、相对湿度迅速增加,达到或接近饱和状态。

850 hPa的水汽通道1与700 hPa上的通道2比较相似,均源自菲律宾海,但850 hPa通道进入大陆后,路径较700 hPa更偏西,该通道同样主要体现了台风“格美”的水汽输送影响,该通道与欧拉方法中水汽通量中台风“格美”外围的东南风-南风-西南风水汽输送通道相一致。通道2、3分别起源于西太平洋不同位置,主要为副高后偏南气流的水汽输送,两者的路径差异,主要和台风、副高的移动有关。通道4为来自南海的水汽经由副高后部输送至辽宁。

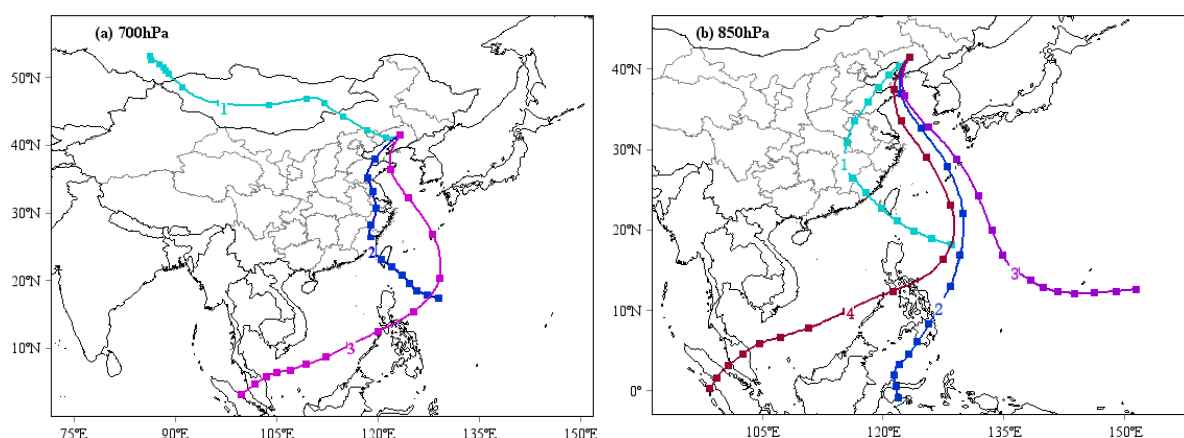
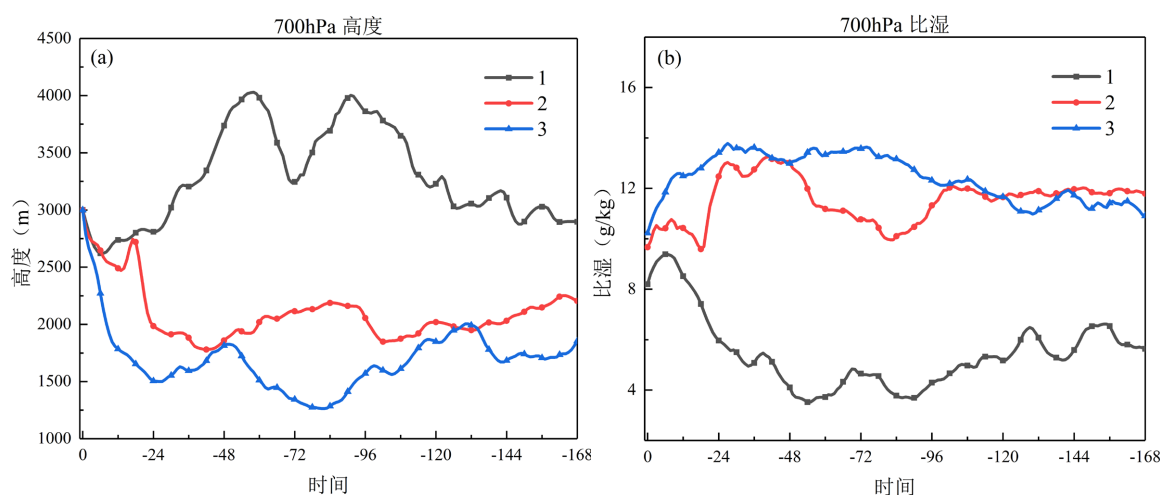


Figure 6. Distribution of water vapor channels at different heights
图6. 不同高度水汽通道分布



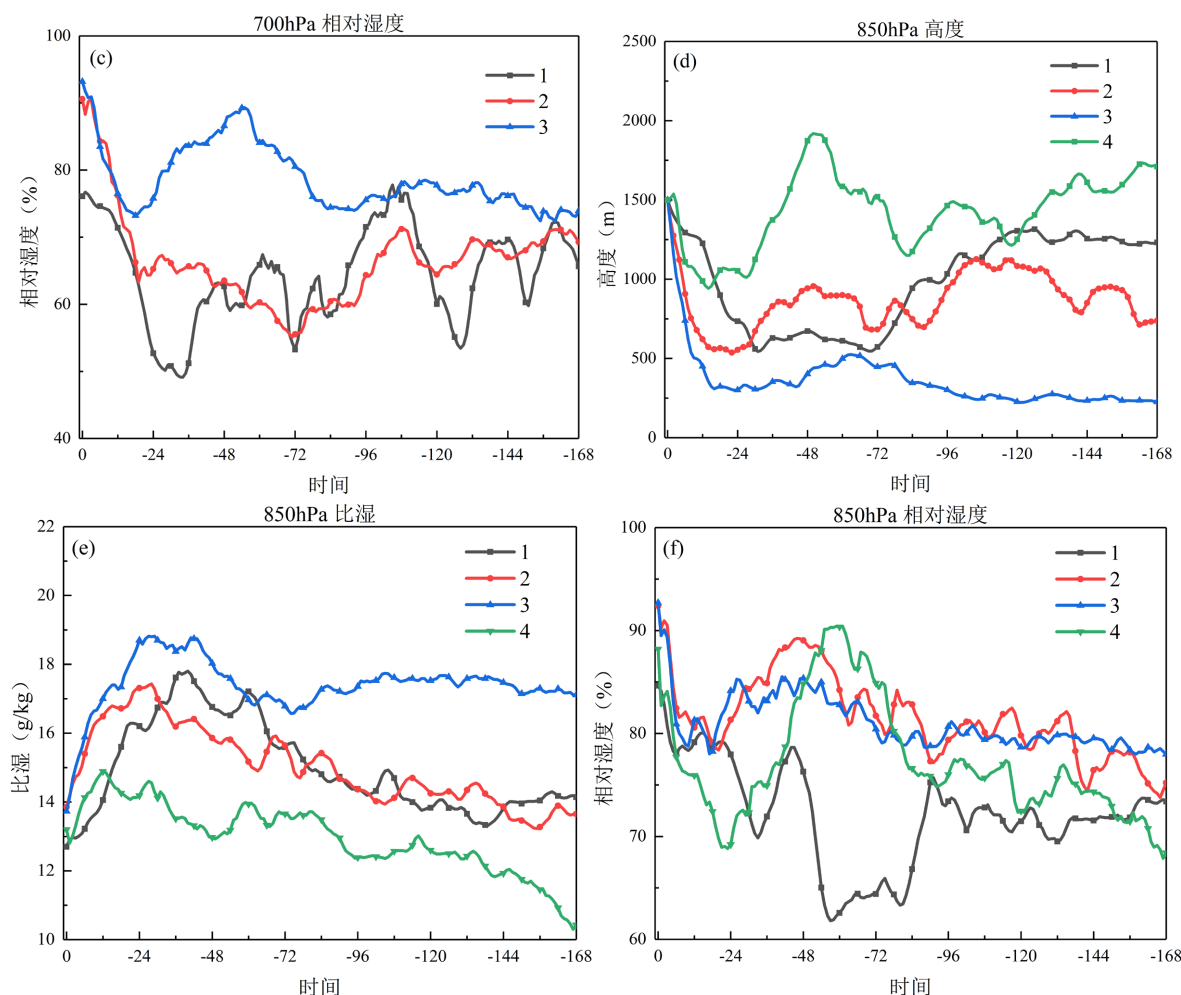


Figure 7. Evolution of channel heights (Unit: m), Specific Humidity (Unit: g/kg), and Relative Humidity (Unit: %)
图 7. 各通道高度(单位: m)、比湿(单位: g/kg)、相对湿度(单位: %)演变图

850 hPa 上水汽来源较 700 hPa 更加复杂。通道 1、2、3 气团运动高度较低,基本均在 1000 m 左右或以下,通道 4 由于来源最远,气团运动高度较高,在 1500 m 左右,气团运动速度更快,水汽损耗较大,比湿始终为 4 条通道中最低。通道 3 在进入辽宁前基本全部轨迹均位于西太平洋洋面,且轨迹相对较短,水汽损耗少,比湿最高。通道 1 起始于 1100 m 左右的菲律宾海海面上,进入陆地后气团高度降低,但比湿持续上升,台风“格美”对水汽的输送补充影响远超过水汽损耗。各通道在运动至“格美”附近前比湿特征存在一定差异,但气团靠近“格美”后各通道比湿均有明显上升,但由于各通道轨迹出现时间不同,比湿增加的时间节点存在一定差异。这说明台风“格美”对于低层水汽输送起到关键作用。各通道相对湿度和高度进入辽宁境内后与 700 hPa 类似,迅速上升到 90% 左右,说明此时辽宁地区存在明显的上升运动,同时湿层较为深厚,700 hPa 与 850 hPa 有显著湿区,有利于提高降水效率。

为对比各通道水汽输送对辽宁地区水汽的贡献计算得到表 1。700 hPa 上三条通道的水汽贡献率分别为 29.0%、34.8%、36.2%,来自南海沿副高后部偏南气流输送的水汽贡献最大,其次为来自西太平洋受台风“格美”影响的通道 2,但两者间差异并不显著,来自陆地的水汽通道贡献率最小。在 850 hPa 上各通道的水汽贡献率差异明显,分别为 49.3%、21.5%、14.9%、14.3%,台风“格美”影响最大的通道 2 水汽贡献率接近 50%,其余三个通道贡献率较为相差不大,通道 1、2、3 气团均起始于西太平洋,总计 85.7%。

Table 1. Contribution rates of water vapor from each channel at 700 hPa and 850 hPa
表 1. 700 hPa 和 850 hPa 高度上各通道水汽贡献率

通道	700 hPa	850 hPa
1	29.0%	49.3%
2	34.8%	21.5%
3	36.2%	14.9%
4	\	14.3%

4. 结论与讨论

本文利用欧拉方法和拉格朗日方法对 2024 年 7 月辽宁地区的一次极端强降水过程的水汽特征进行了详细分析，结果表明：

1) 在对流层高层，辽宁位于高空急流入口区右侧，有强的高空辐散，中低层受副高阻挡，台风“格美”向西北方向缓慢移动，东北冷涡稳定维持，三个系统共同作用下在华北至东北形成了较为稳定、宽广的气流辐合带，为辽宁此次极端降水提供了有利的环流形势以及充足的水汽供应。

2) 过程期间在辽河流域出现强的水汽辐合中心，此时水汽通量散度为 $-8\cdot10^{-3}\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ ，为极端降水的发生提供了有利条件。对比过程中各边界的水汽收支情况，降水量的激增均对应着南边界水汽输送量的增大，南边界的水汽收支对降水增大起到关键作用。

3) 由于水汽源地不同以及传输路径受到不同天气系统的影响，各高度水汽通道存在差异。700 hPa 来自南海、西太平洋和内陆的水汽贡献率分别为 36.2%、34.8%、29.0%。850 hPa 来自西太平洋的水汽贡献率总计 85.7%，来自南海的水汽贡献率占比 14.3%。受台风“格美”的水汽补充作用，850 hPa 各通道途经“格美”时比湿均有增加，其中台风外围水汽通道水汽贡献率达 49.3%，台风对低层水汽输送至关重要。

4) 700 和 850 hPa 各通道气团在进入辽宁后，高度与相对湿度均明显升高，表明上升运动及深厚的湿层有利于高效降水的产生和维持。

前人[25]对东北地区暴雨水汽来源研究表明，东北地区水汽可以分为海上和陆地两支，一支海上的水汽输送，比湿较大，主要集中在近地层，对降水起主要作用；另一支是西北气流的水汽输送，比湿较小，一般集中在对流层中层或以上。这与本文的研究结果相近，在 700 hPa 上可以明显看到受冷涡影响来自内陆的水汽输送和在副高、台风等影响下的海上水汽输送。马梁臣等[25]的研究中，来自海上的水汽占比在 50%以上，胡鹏宇等[22]对副高边缘下辽宁短时强降水的水汽进行追踪，主体来自欧亚中高纬的水汽贡献率占比高达 76.93%，而本研究中 700 hPa 海上水汽贡献率 71%，850 hPa 海上水汽贡献率为 100%，说明在副高、东北冷涡、台风的多重作用下，加剧了海上水汽的输送，促成了此次极端降水的特殊性、极端性。但此次极端降水中，多系统交互作用如何影响水汽输送的机制，还需要进一步挖掘，未来将通过数值模拟的方式，结合动力和热力过程，分析冷涡、台风对水汽输送路径和强度的影响机制。

基金项目

中国气象局复盘总结专项(FPZJ2025-26)，环渤海区域海洋气象科技协同创新项目(QYXM202302)。

参考文献

[1] 侯奇奇, 景华, 高宇俊, 等. 基于概率统计的河北省暴雨致灾风险评估[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(5): 178-184.

- [2] 王佳津, 王皓, 王春学, 等. 四川省汛期小时极端降水精细化特征[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(10): 167-176.
- [3] 罗玉, 陈超, 马振峰, 等. 1961-2015 年四川省汛期极端降水指数时空变化研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2018, 40(9): 133-141.
- [4] 冉令坤, 李舒文, 周玉淑, 等. 2021 年河南“7.20”极端暴雨动、热力和水汽特征观测分析[J]. 大气科学, 2021, 45(6): 1366-1383.
- [5] 史月琴, 高松影, 孙晶, 等. 辽宁一次区域性暴雨的特征条件与成因分析[J]. 高原气象, 2022, 41(3): 630-645.
- [6] 汪玲瑶, 谌芸, 肖天贵, 等. 夏季江南地区暖区暴雨的统计分析[J]. 气象, 2018, 44(6): 771-780.
- [7] 吴翠红, 王晓玲, 王珊珊. 受两次干线影响的湖北大暴雨过程成因分析[J]. 热带气象学报, 2013, 29(2): 262-270.
- [8] 邓承之, 周国兵, 李强, 等. 四川盆地一次西南低涡影响下的飑线天气特征及其成因[J]. 气象, 2024, 50(7): 777-790.
- [9] 丁一汇. 中国暴雨理论的发展历程与重要进展[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(5): 395-406.
- [10] 陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [11] 崔晓鹏, 杨玉婷. “21·7”河南暴雨水汽源地追踪和定量贡献分析[J]. 大气科学, 2022, 46(6): 1543-1556.
- [12] 李超, 崔春光, 徐慧燕, 等. 河南“21·7”特大暴雨水汽输送、收支和转化特征对局地强降水的影响机制研究[J]. 气象, 2022, 48(12): 1497-1511.
- [13] 布和朝鲁, 诸葛安然, 谢作威, 等. 2021 年“7.20”河南暴雨水汽输送特征及其关键天气尺度系统[J]. 大气科学, 2022, 46(3): 725-744.
- [14] 张芳华, 杨舒楠, 胡艺, 等. “23·7”华北特大暴雨过程的水汽特征[J]. 气象, 2023, 49(12): 1421-1434.
- [15] 姚秀萍, 黄逸飞, 包晓红, 等. “23·7”华北极端强降水特征和水汽条件研究[J]. 气象学报, 2024, 82(5): 585-399.
- [16] 陈涛, 谌芸, 方翀, 等. “23·7”华北极端暴雨精细特征和天气学成因分析[J]. 气象学报, 2024, 82(5): 600-614.
- [17] 周冠博, 柳龙生, 李兴宇. 水汽通量散度分解在一次台风暴雨中的应用[J]. 气象, 2023, 49(6): 671-681.
- [18] 江志红, 梁卓然, 刘征宇, 等. 2007 年淮河流域强降水过程的水汽输送特征分析[J]. 大气科学, 2011, 35(2): 361-372.
- [19] 闫玮, 欧阳智, 王泳棋, 等. 2021 年“7·20”河南特大暴雨水汽输送特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2024, 60(2): 143-150.
- [20] 孙颖姝, 周玉淑, 邓国, 等. 2021 年 10 月 2-6 日山西持续性极端降水过程低空急流及水汽输送特征分析[J]. 高原气象, 2025, 44(2): 407-420.
- [21] 马梁臣, 李倩, 于月明, 等. 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, 2023, 43(3): 316-325.
- [22] 胡鹏宇, 徐爽, 杨磊, 等. 副高边缘辽宁短时强降水过程的水汽特征分析[J]. 暴雨灾害, 2024, 43(5): 532-541.
- [23] Draxler, R.R. and Hess, G.D. (1998) An Overview of the HYSPLIT_4 Modelling System for Trajectories. *Australian Meteorological Magazine*, 47, 295-308.
- [24] 夏佳琦, 陈强, 刘晓, 等. 乌海市臭氧传输特征与潜在源区[J]. 环境科学学报, 2021, 41(8): 3012-3020.
- [25] 马梁臣, 孙力, 王宁, 等. 东北地区典型暴雨个例的水汽输送特征分析[J]. 高原气象, 2017, 36(4): 960-970.