

吉林省扶余市短小时内接连两次暴雪过程对比分析

李欣¹, 张志远², 单岩超³, 王 晗⁴

¹吉林省扶余市气象局, 吉林 松原

²吉林省四平市气象局, 吉林 四平

³吉林省前郭尔罗斯蒙古族自治县气象局, 吉林 松原

⁴吉林省气象灾害防御技术中心, 吉林 长春

收稿日期: 2026年8月5日; 录用日期: 2026年9月4日; 发布日期: 2026年9月10日

摘 要

本文基于吉林省扶余市2023年11月6日和11月8日两次降雪过程的逐小时观测资料、ERA5与GDAS再分析数据, 结合HYSPLIT后向轨迹模型和水汽收支诊断方法, 探讨两次降雪过程的水汽输送特征及动力-水汽配置差异。结果表明, 11月6日强暴雪过程累计降雪量达16.6 cm, 受高纬冷湿气流与海洋暖湿水汽共同影响, 500 hPa层西北冷湿输送明显, 700 hPa层日本海暖湿气流持续北上, 形成深厚水汽耦合结构; 边界水汽收支呈强辐合特征, 为暴雪发展提供充足水汽。11月8日过程降雪量为8.4 cm, 以近源内陆水汽补给为主, 高低层输送距离较短, 海洋暖湿水汽贡献不足, 水汽辐合及收支强度均明显减弱。对比发现, 水汽来源范围、输送路径及收支强度差异是造成两次降雪强度差异的主要原因。

关键词

扶余市, 后向轨迹, 水汽收支, 暴雪, 物理机制

Comparative Analysis of Two Consecutive Snowstorm Events in Fuyu County, Jilin Province

Xin Li¹, Zhiyuan Zhang², Yanchao Shan³, Han Wang⁴

¹Fuyu Meteorological Bureau, Songyuan Jilin

²Siping Meteorological Bureau, Siping Jilin

³Qian Gorlos Mongol Autonomous County Meteorological Bureau, Songyuan Jilin

⁴Jilin Provincial Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Changchun Jilin

Received: August 5, 2026; accepted: September 4, 2026; published: September 10, 2026

文章引用: 李欣, 张志远, 单岩超, 王晗. 吉林省扶余市短小时内接连两次暴雪过程对比分析[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(5): 993-1001. DOI: 10.12677/ccrl.2026.155106

Abstract

This article is based on hourly observation data from two snowfall events in Fuyu City, Jilin Province, on November 6 and 8, 2023, as well as ERA5 and GDAS reanalysis data. Using the HYSPLIT backward trajectory model and moisture budget diagnostic methods, it explores the moisture transport characteristics and differences in dynamic-moisture configurations between the two snowfall events. The results show that the heavy snow on November 6 accumulated 16.6 cm, influenced by both high-latitude cold and wet air and warm, moist air from the ocean. At the 500 hPa level, northwestern cold and wet transport was obvious, while at 700 hPa, warm and moist flow from the Sea of Japan continued advancing north, forming a deep moisture-coupled structure. The boundary layer moisture budget showed strong convergence, providing ample moisture for the snowstorm. The November 8 event accumulated 8.4 cm of snow and was mainly supported by nearby inland moisture, with shorter-distance transport in both high and low levels. Oceanic warm and moist air contributed less, and both moisture convergence and budget intensity were significantly weaker. Comparisons reveal that differences in the range of moisture sources, transport paths, and budget intensity were the main reasons for the difference in snowfall intensity between the two events.

Keywords

Fuyu County, Backward Trajectory, Moisture Budget, Snowstorm, Physical Mechanism

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

降雪作为中高纬地区重要的灾害性天气过程,其形成机制及水汽来源一直是气象学研究的重点问题[1]。近年来,随着全球变暖背景下极端天气事件频发,东北地区冬季降雪的强度与频次变化受到广泛关注[2]。国内外研究普遍认为,降雪过程的发生不仅依赖于低层水汽条件,还与中高层环流结构、冷暖空气配置及水汽输送路径密切相关[3]。国外学者基于再分析资料与轨迹模型研究指出,中纬度暴雪往往由西风带槽前暖湿输送与槽后冷空气共同作用形成,其中海洋性水汽输送(如北太平洋、日本海)对强降雪具有重要贡献[4][5]。与此同时,拉格朗日后向轨迹方法已广泛应用于极端降水水汽来源识别,并成为揭示水汽输送路径的重要工具[6]。国内方面,近年来针对东北及华北地区降雪的研究逐渐增多,研究表明我国冬季强降雪多由西风带扰动、蒙古气旋及东北冷涡共同作用形成,水汽主要来源于西南暖湿气流、黄海及日本海输送,同时内陆再循环水汽亦具有一定贡献[7][8]。尤其在 ERA5 等高分辨率再分析资料应用之后,结合 HYSPLIT 等轨迹模型对降雪水汽来源的定量分析成为研究热点,然而,现有研究多针对单次强降雪事件开展分析,对于短时间内连续发生且具有相似天气背景的降雪过程,其水汽输送调整机制及强度差异成因仍缺乏深入认识。已有研究多关注环流形势和水汽总量变化,而对水汽来源多样性、输送路径长度以及水汽收支效率等关键因素的综合作用探讨不足。因此,本文针对连续降雪过程中,决定降雪强度差异的关键并非单纯取决于水汽含量,而在于水汽输送结构与动力条件的协同配置,通过对两次连续降雪过程的对比分析,旨在揭示该机制对降雪强度差异的控制作用。

基于此,本文选取吉林省扶余市 2023 年 11 月 6 日与 11 月 8 日两次连续降雪过程为研究对象,利用逐小时观测资料、GDAS 再分析数据,结合 HYSPLIT 后向轨迹与水汽收支诊断方法,从多层次、多边界

角度分析两次过程的水汽输送特征及其差异机制，以期揭示不同强度降雪过程的水汽动力学控制因素，为东北地区暴雪预报及机理研究提供参考依据。

2. 资料与方法

2.1. 资料来源

本研究所用数据主要来源于吉林省扶余市国家基本地面气象观测站点的逐小时降雪观测资料，用于获取两次典型降雪过程的发生时间、强度变化及累计降雪量特征。在水汽输送路径追踪方面，利用 ERA5 再分析数据进行水汽收支计算，采用 HYSPLIT 拉格朗日后向轨迹模型进行诊断分析，模型所使用的气象驱动数据来自美国国家环境预报中心提供的 $1^\circ \times 1^\circ$ GDAS1 再分析资料[9]。该数据集提供了较为完整的三维大气风场、温度及湿度信息，能够支持对水汽运动轨迹的连续回溯计算。

2.2. 后向轨迹聚类

HYSPLIT 模型是一种广泛应用于大气污染物扩散及气团输送研究的拉格朗日轨迹模型，在水汽来源追踪分析中也具有重要应用价值[10]。该模型主要包括前向与后向轨迹两种计算方式，其中后向轨迹用于追踪气团在抵达研究区域之前的运动路径，从而识别潜在水汽源地及输送通道。HYSPLIT 模型基于拉格朗日方法，其核心思想是假定气团由一系列质点组成，这些质点随三维风场运动，其空间位置随时间变化通过数值积分逐步计算得到轨迹路径[11]。在平流输送计算中，模型利用输入的再分析资料提供的风场数据，模拟气团在大气中的输送过程，同时考虑一定程度的湍流扩散效应，以更真实地反映大气运动特征。本研究水汽追踪选取扶余市基本站(44.988°N, 126.049°E)为起始点，两次模拟起始时间分别为 2023 年 11 月 6 日 08 时、8 日 10 时，模拟时间 48 小时，分别选取 500 hPa、700 hPa 两层模拟高度，每一小时输出一水汽轨迹点位置。

2.3. 水汽收支计算

通过计算整层大气水汽通量评估水汽输送对目标区域降雪的影响，计算公式如下：

$$Q = \frac{1}{g} \int_{p_s}^{300\text{hPa}} q \vec{V} d_p$$

式中： Q 为水汽通量； q 为比湿； g 为重力加速度； p_s 为地表气压； $\vec{V}$ 为水平风速矢量。在实际计算过程中，由于高层大气水汽含量极低，对整体水汽输送贡献有限，因此在垂直积分时将上限设定为 300 hPa，自地面向上积分，以更合理地表征整层水汽输送过程及其对降水事件的影响强度[12]。

在此基础上，进一步对研究区域四个边界(东、西、南、北)的水汽通量进行分量计算，以刻画水汽的进出结构特征。其中，区域水汽净收支定义为：西侧边界输入量减去东侧边界输出量，再加上南侧边界输入量减去北侧边界输出量。该方法能够从区域尺度上定量反映水汽的净汇聚或净散失状况，从而为分析降雪过程中的水汽来源及其输送机制提供重要依据。

3. 结果与讨论

如图 1、图 2 分别为吉林省扶余市 2023 年 11 月 6 日、8 日短小时内接连两次降雪过程逐小时雪量及累积雪量分布，11 月 6 日降雪过程 1 累积雪量 16.3 cm，11 月 8 日降雪过程 2 累积降雪量 8.4 cm，对比两次降雪过程逐小时雪量及累计演变可以看出，对比两次降雪过程可见，11 月 6 日过程明显强于 11 月 8 日过程。11 月 6 日逐小时雪量整体偏大，8:00~14:00 为主要降雪时段，11:00 达峰值 3.0 cm，且连续多小时维持在 2 cm 左右，累计雪量快速增加，最终达到 16.3 cm。而 11 月 8 日过程整体强度较弱，逐小时雪量

大多低于 1.5 cm，仅 19:00 增至 1.9 cm，累计雪量为 8.4 cm，不足前者的一半。总体来看，11 月 6 日表现为降雪强度大、持续性强、累积增长快的典型暴雪过程；11 月 8 日则呈现前期平稳、后期短时增强、总体偏弱的特征。

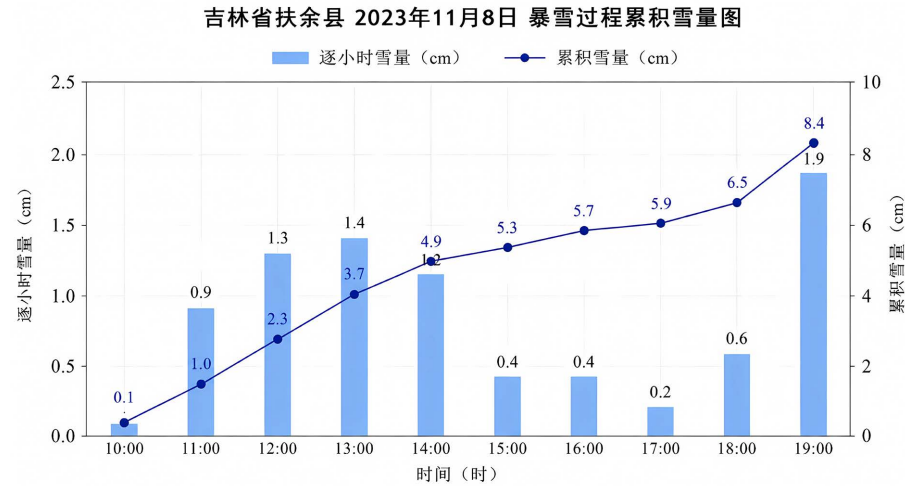


Figure 1. Snowfall distribution during the snow event on November 6
图 1. 11 月 6 日降雪过程雪量分布

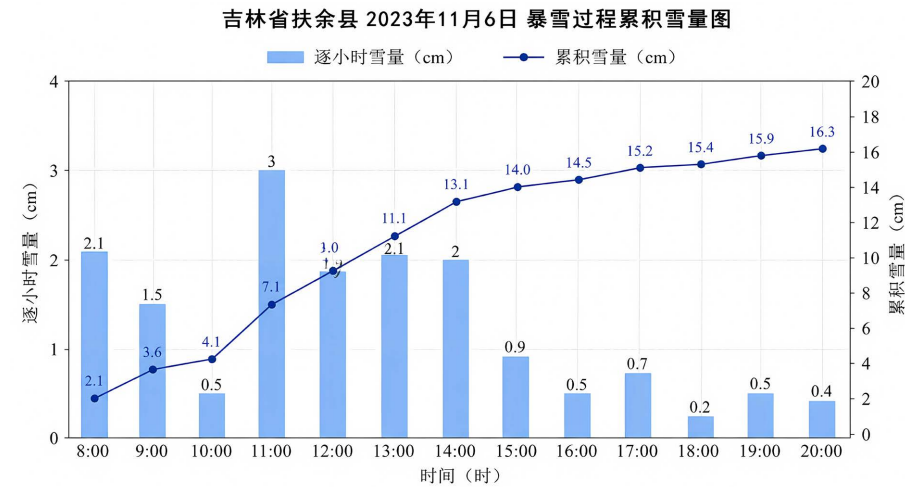


Figure 2. Snowfall distribution during the snow event on November 8
图 2. 11 月 8 日降雪过程雪量分布

从 500 hPa 高度 48 h 后向轨迹及其聚类占比对比来看(图 3、图 4)，两次降雪过程在水汽输送结构上存在显著差异，并直接决定了降雪强度的差异性。11 月 6 日过程以高纬远距离输送为主导，轨迹 I 与轨迹 III 合计占比达 78.2%，分别对应西北长距离冷空气输送与北路高纬冷湿气流南下，说明该过程受中高纬大尺度环流深度控制明显，冷空气势力强、范围广，同时具备一定高纬水汽补给，使扶余上空形成稳定的冷暖耦合与持续辐合上升条件，为 16.6 cm 强降雪提供了充足动力与水汽基础。具体来看，轨迹 I 起源于欧亚大陆高纬内陆西部，沿西北 - 东南方向长距离输送，路径最长，代表中高纬西风带槽后冷空气快速东移过程。该类气流虽水汽含量有限，但具有显著冷平流与动力抬升作用，可显著增强中层不稳定性，是暴雪形成的重要大尺度背景。轨迹 III 则来自西伯利亚东部至鄂霍次克海附近，沿东北 - 西南方向

南下,属于典型北路冷湿输送,不仅补充高纬水汽,还进一步加深中层冷空气厚度,与西北路径共同构建有利于冰晶增长与降雪发展的环境。轨迹 II 虽仅占 21.8%,但作为近源补充型气流,在扶余附近与两支高纬气流汇合,显著增强局地辐合与上升运动,使降雪效率进一步提高。因此,11月6日过程呈现出远源主导配合多通道汇聚,以及强冷暖配置的典型暴雪结构特征。相比之下,11月8日过程则明显偏向近源输送主导结构。轨迹 II 占比最高(37.1%),主要来自内蒙古东部至吉林西部的近距离西路输送,路径较短,水汽主要来自局地再循环与边界层补给,远源海洋输送显著不足。轨迹 III (35.7%)虽具有东北高纬冷湿特征,但输送距离有限;轨迹 I (27.2%)虽为西北远源路径,但强度明显减弱,对整体水汽贡献有限。综合来看,11月8日过程表现为近源补给为主的结构特征,虽然仍存在冷空气背景,但缺乏持续强暖湿输送支撑,导致降雪效率较过程 1 偏低,形成 8.4 cm 较强积雪。对比而言,11月6日属于典型高纬远源输送主导型暴雪,水汽路径长、动力强、辐合显著;而 11月8日则为近源输送主导型强降雪,水汽依赖局地补给,系统强度相对过程 1 偏弱。

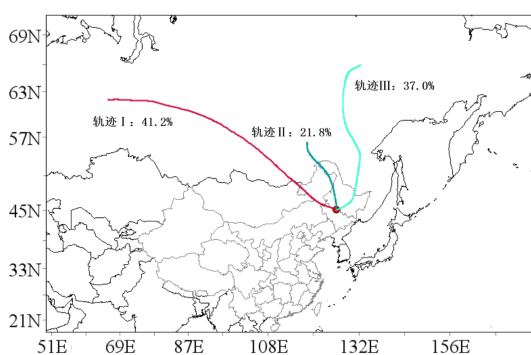


Figure 3. Water vapor trajectory at 500 hPa during the snowfall on November 6

图 3. 11 月 6 日降雪过程 500 hPa 水汽轨迹

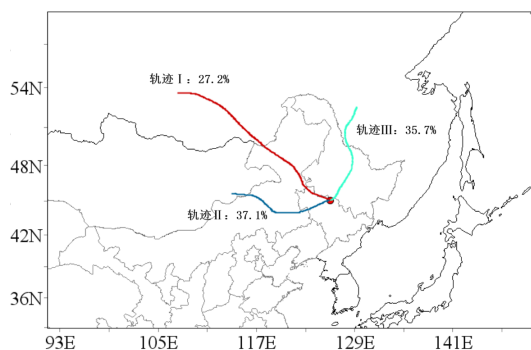


Figure 4. Water vapor trajectory at 500 hPa during the snowfall on November 8

图 4. 11 月 8 日降雪过程 500 hPa 水汽轨迹

从 700 hPa 高度 48 h 后向轨迹及其聚类占比对比来看(图 5、图 6),2023 年 11 月 6 日与 11 月 8 日两次降雪过程在中层水汽输送结构上存在显著差异,并直接决定了降雪强度的明显不同。11 月 8 日过程以内陆近源输送为主,轨迹 II 占 40.8%,轨迹 III 为 31.1%,轨迹 I 为 28.1%,整体表现为西南-东北向内陆水汽补给结构。水汽主要来源于华北北部、内蒙古中南部及东北近区,再循环特征明显,输送距离较短,海洋性水汽贡献有限,导致中层水汽供给不足,仅形成 6.5 cm 较强降雪过程。相比之下,11 月 6 日过程在 700 hPa 层呈现显著的海陆联合暖湿输送结构,水汽来源更广、通道更长、强度更高。轨迹 II 占 44.5%,为日本海方向的东南暖湿输送,是最主要水汽来源;轨迹 III 占 37.6%,来自华北东部至黄河北

部的南路暖湿气流；轨迹 I 仅占 17.9%，为西路内陆补充输送。两条暖湿轨迹合计占比达 82.1%，说明中层存在持续稳定的暖湿水汽输入通道，为强降雪提供了充足水汽支撑。从动力配置来看，11 月 6 日过程不仅具有明显的暖湿气流北上特征，还伴随西风槽前后的强上升运动，使冷暖空气在扶余上空形成持续辐合，构建了典型上冷下湿的结构，有利于冰晶增长与降雪效率提升。而 11 月 8 日过程虽然仍存在冷空气背景，但暖湿输送明显减弱，中层水汽主要依赖近源补给，缺乏持续外来输送支撑，导致辐合强度与降雪效率较过程 1 均明显偏低。11 月 6 日属于“海洋-半岛暖湿输送主导型暴雪过程”，其特点是水汽来源广、输送路径长、暖湿气流占绝对优势，动力与水汽高度耦合；而 11 月 8 日则为内陆近源补给型强降雪过程，水汽输送距离短、结构分散、海洋贡献不足。两者在 700 hPa 层水汽结构上的差异，是导致降雪量从 16.6 cm 降至 8.4 cm 的关键原因，也从动力-水汽耦合角度揭示了此次两次降雪强度差异的物理机制。

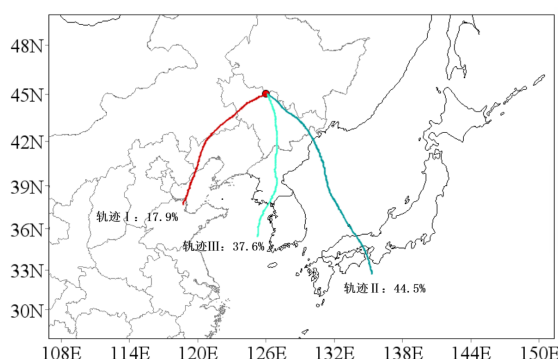


Figure 5. Water vapor trajectory at 700 hPa during the snowfall on November 6
图 5. 11 月 6 日降雪过程 700 hPa 水汽轨迹

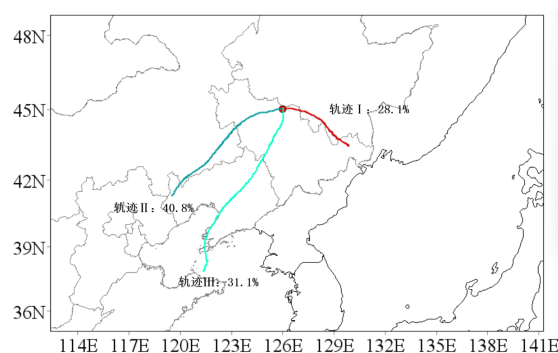


Figure 6. Water vapor trajectory at 700 hPa during the snowfall on November 8
图 6. 11 月 8 日降雪过程 700 hPa 水汽轨迹

从图中东、西、南、北四个边界水汽收支的时间演变来看(图 7、图 8)，2023 年 11 月 6 日与 11 月 8 日两次降雪过程在水汽来源强度与输送结构上存在显著差异，反映出不同环流背景下水汽供给机制的本质不同。在 11 月 6 日暴雪过程(16.6 cm)中，南边界始终维持显著正通量并持续增强，是最主要水汽输入通道，表明来自华北-黄海及日本海方向的暖湿气流持续向扶余输送水汽；西边界同样表现为稳定正值，说明中纬度西风带水汽输送持续补给。相比之下，北边界与东边界多为负值，表现为水汽输出或弱消耗，但北边界负值对应冷空气南下过程，反而增强了低层辐合抬升，有利于降雪发展。整体呈现南强西补、北冷东弱的强水汽辐合结构，收支差值大、汇聚效率高。而 11 月 8 日过程(6.5 cm)中，各边界水汽通量整体减弱，南边界显著下降，说明暖湿输送明显不足；西边界虽仍为正值但强度偏弱；北、东边界接近

零或弱负值,水汽交换有限,系统辐合能力明显减弱,整体趋于弱平衡状态。对比来看,11月6日过程具有南支强输入、西支持续补给以及强辐合增强的特征,是暴雪形成的关键;而11月8日则表现为“南弱西弱、边界收支趋稳”,水汽条件不足,导致降雪明显偏弱。这一差异与前述轨迹分析一致,是两次降雪强度量级差异的核心原因。

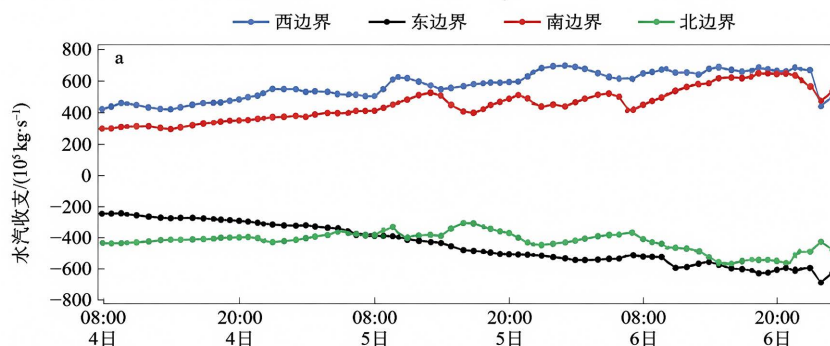


Figure 7. Water vapor budget for the 48 hours following the blizzard in Fuyu City, Jilin Province on November 6, 2023

图 7. 吉林省扶余市 2023 年 11 月 6 日暴雪过程后向 48 小时水汽收支

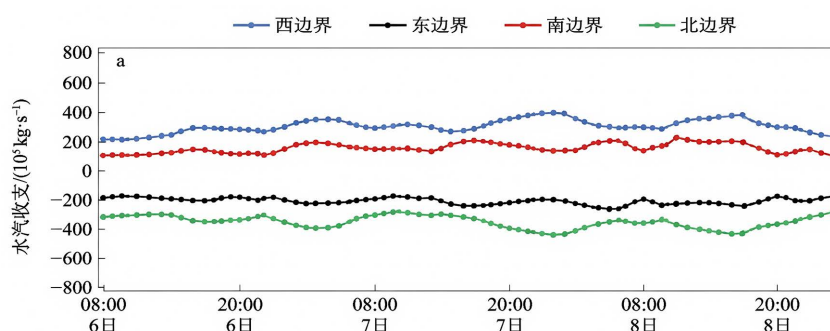


Figure 8. Water vapor budget for the 48 hours following the blizzard in Fuyu City, Jilin Province on November 8, 2023

图 8. 吉林省扶余市 2023 年 11 月 8 日暴雪过程后向 48 小时水汽收支

从图 9、图 10 中可以看出,扶余两次降雪过程的水汽总收支均表现为明显的正值主导型结构,但强度与持续性存在显著差异。在 11 月 6 日暴雪过程(16.6 cm)中,总水汽收支整体呈现持续增强并维持高位震荡的特征。过程初期收支逐渐由弱正值快速上升,说明水汽输入迅速加强;在主要降雪时段(5 日前后)达到峰值,局地可超过 200 ($10^5 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$),表明水汽辐合极为强烈。随后虽有阶段性波动,但整体仍维持在较高正值区间,说明水汽持续输入能力强、补给稳定。结合前述轨迹分析可知,该过程受南支暖湿气流与西路中纬度输送共同作用,形成明显的多通道水汽汇聚,使得总收支长期保持显著正盈余,从而支撑了强降雪的持续发展。相比之下,11 月 8 日过程(6.5 cm)的总水汽收支虽仍以正值为主,但整体幅度较过程 1 偏弱,峰值约在 120~150 ($10^5 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)之间,且持续时间较短。过程表现为间歇性增强与快速回落交替,说明水汽输入缺乏稳定持续的强迫机制,辐合强度不足。尤其在后期阶段,总收支逐渐下降甚至接近零值,表明水汽供给趋于减弱,难以维持长时间降雪。对比两次过程可以发现,11 月 6 日暴雪的关键在于高强度、持续性的水汽正收支累积效应,其来源于南北多通道协同输送与强动力辐合;而 11 月 8 日过程则表现为弱正收支与间歇性波动结构,水汽输入虽存在但不稳定,缺乏持续支撑。结合后向轨迹结果可进一步验证:前者具有显著海洋-半岛暖湿输送参与,而后者以内陆近源输送为主。因此,总水汽收支差异是导致两次降雪强度显著不同的直接物理原因。

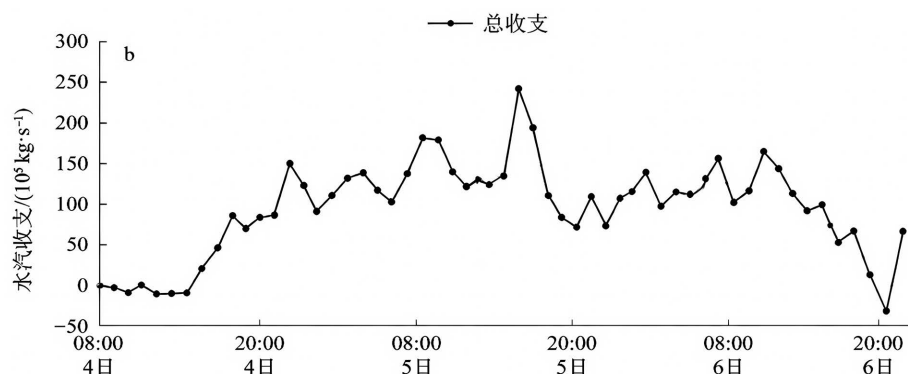


Figure 9. Total moisture budget for 48 hours after the blizzard in Fuyu City, Jilin Province on November 6, 2023
图 9. 吉林省扶余市 2023 年 11 月 6 日暴雪过程后向 48 小时水汽总收支

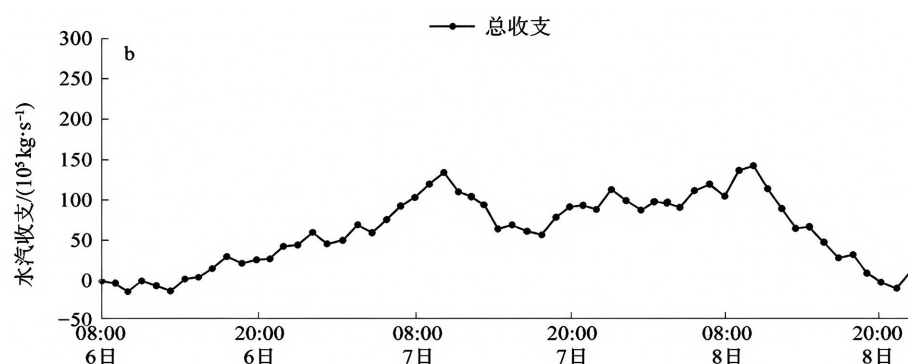


Figure 10. Total moisture budget for 48 hours after the blizzard in Fuyu City, Jilin Province on November 8, 2023
图 10. 吉林省扶余市 2023 年 11 月 8 日暴雪过程后向 48 小时水汽总收支

4. 结论

(1) 水汽输送结构差异主导降雪强度差异，两次降雪过程在 500 hPa 与 700 hPa 层水汽输送结构上存在显著差异，是导致降雪量级不同的关键原因。11 月 6 日过程以高纬远距离输送与海洋暖湿气流共同作用为特征，轨迹 I 与轨迹 III 占比高，形成“远源主导 + 多通道汇聚”的强水汽结构；而 11 月 8 日过程以内陆近源输送为主，海洋性水汽明显减弱，输送路径短且分散。整体上，11 月 6 日水汽来源更广、输送效率更高，而 11 月 8 日则受限于近源补给，水汽供给能力明显偏弱，从而直接导致降雪强度从 16.6 cm 降至 8.4 cm。

(2) 边界水汽收支反映强辐合与弱平衡差异，边界水汽收支结果表明，11 月 6 日过程呈现显著“南强西补、北冷东弱”的强辐合结构，南边界持续正输送且强度高，西边界提供稳定补给，而北、东边界虽为负值但增强了动力抬升条件，形成高效水汽汇聚机制。相比之下，11 月 8 日各边界通量整体减弱，南支输送不足，西支偏弱，系统趋于收支平衡甚至弱辐合状态，水汽交换效率显著下降。这种边界通量差异直接决定了水汽汇聚强度，是降雪强弱差异的重要动力基础。

(3) 总水汽收支累积效应决定降雪持续性与极值强度，两次过程总水汽收支均表现为正值，但强度与持续性差异显著。11 月 6 日过程表现为持续增强并维持高位震荡的正盈余结构，峰值超过 $200 (10^5 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1})$ ，反映出强而稳定的水汽输入与持续辐合，使降雪得以长时间维持并累积增强。11 月 8 日则表现为间歇性波动型正收支，峰值偏低且持续时间短，后期快速减弱甚至接近零值，说明水汽补给缺乏持续性。由此可见，总水汽收支的累积强度与持续时间，是决定降雪极值与过程持续性的核心控制因子。

参考文献

- [1] 李玉鹏, 李吉, 苏丽欣, 等. 2022 年北京一次回流强降雪过程诊断分析[J]. 暴雨灾害, 2026, 45(3): 349-360.
- [2] 徐庆喆, 徐爽, 金巍, 等. 辽宁两次极端雨转暴雪过程对比分析[J]. 干旱气象, 2025, 43(3): 450-459.
- [3] 阎琦, 谭政华, 苏雨萌, 等. 东北冷涡背景下辽宁省一次罕见暴雪过程不同阶段降雪成因分析[J]. 气象与环境学报, 2024, 40(4): 1-9.
- [4] Chen, G.X., Wang, W.C., Cheng, C.T., *et al.* (2021) Extreme Snow Events along the Coast of the Northeast United States: Potential Changes Due to Global Warming. *Journal of Climate*, **34**, 2337-2353. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-20-0197.1>
- [5] Quante, L., Willner, S.N., Middelani, R. and Levermann, A. (2021) Regions of Intensification of Extreme Snowfall under Future Warming. *Scientific Reports*, **11**, Article No. 16621. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95979-4>
- [6] 郭浩康, 于腾飞, 王江曼, 等. 山东半岛北部一次回流暴雪的地形作用分析[J/OL]. 海洋气象学报, 1-16. <https://doi.org/10.19513/j.cnki.hyqxxb.20260210001>, 2026-06-25.
- [7] 热孜瓦古·孜比布拉, 万瑜, 吾麦尔艾力·巴拉提, 等. 南疆西部一次寒潮天气过程成因及预报检验分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2026, 20(3): 107-114.
- [8] 苏涛, 陶雅琴, 陈静静, 等. 湖南大范围持续低温雨雪天气过程的关键影响因子[J]. 气象科学, 2025, 45(6): 851-863.
- [9] 付伟, 魏秋实, 邱学兴, 等. 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, 2024, 47(3): 486-497.
- [10] 胡万亭, 郭建英. 山东半岛 2023 年 12 月暴雪水汽来源与水汽条件分析[J]. 海洋预报, 2025, 42(1): 98-106.
- [11] 吕春艳, 等. 贵州铜仁一次持续性暴雨水汽收支定量分析[J]. 暴雨灾害, 2023, 42(6): 648-658.
- [12] 陈洁雯, 张金字, 麦哲宁, 等. 2023 年粤北地区一次极端强降水水汽追踪分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2026, 20(3): 123-130.