娄德君，王昊，李永生，等，2026. 2024 年 11 月黑龙江极端降水特征与成因分析[J]. 气象，52(11)：1398-1407. Lou D J，Wang H，Li Y S，et al，2026. Characteristics and possible causes of the extreme precipitation in Heilongjiang Province in November 2024[J]. Meteor Mon，52(11)：1398-1407(in Chinese).

2024 年 11 月黑龙江极端降水特征与成因分析*

娄德君[1,2] 王 昊[1,2] 李永生[1,2] 班 晋[1,2] 王 营[1,2]
魏思灼[1,2] 王姝彦[3] 李蔓莹[3]

1 黑龙江省气候中心，哈尔滨 150030
2 五营国家气候观象台，黑龙江 伊春 153000
3 黑龙江省尚志市气象局，尚志 150600

提 要：2024 年 11 月，黑龙江降水量达 31.5 mm，居 1961 年以来历史同期第四多，其中 25—29 日的极端降水事件贡献了全月降水的 73%，5 d 累计降水量达历史同期平均的 13.5 倍。环流演变分析表明，11 月欧亚中高纬环流呈现明显的阶段性变化：前期(1—24 日)受“西负东正”位势高度距平场控制，降水偏少；后期(25—29 日)环流调整为“倒 Ω”型分布，乌拉尔山和鄂霍次克海双阻塞高压与东北冷涡形成稳定配置。该配置引导极地冷空气南下，并与低空急流输送的暖湿气流在黑龙江上空强烈交汇，加剧了水汽辐合与动力抬升。受双阻塞高压影响，该系统在黑龙江上空滞留，最终引发持续性大范围强降水。统计显示，1961 年以来黑龙江 11 月降水量位列前 10 的年份中，有 4 年均由单次极端降水事件主导，这揭示了天气尺度系统调整对降水异常的关键作用。研究结果深化了对黑龙江 11 月极端降水成因的认识，为降水预报提供重要参考。

关键词：极端降水，环流成因，天气尺度，东北冷涡
中图分类号：P466 **文献标志码**：A **DOI**：10.7519/j.issn.1000-0526.2026.060401

Characteristics and Possible Causes of the Extreme Precipitation in Heilongjiang Province in November 2024

LOU Dejun[1,2] WANG Hao[1,2] LI Yongsheng[1,2] BAN Jin[1,2]
WANG Ying[1,2] WEI Sizhuo[1,2] WANG Shuyan[3] LI Manying[3]

1 Heilongjiang Climate Center, Harbin 150030
2 Wuying National Climatological Observatory, Heilongjiang, Yichun 153000
3 Shangzhi Meteorological Station of Heilongjiang Province, Shangzhi 150600

Abstract: In November 2024, the precipitation in Heilongjiang Province reached 31.5 mm, ranking as the 4th most in the same period since 1961. Specially, an extreme precipitation event during 25−29 November contributed 73% of the total monthly precipitation, with its 5-day accumulated precipitation being 13.5 times of the climatological average for the same period. Analysis of the circulation evolution reveals a clear two-phase variation in the mid- to high-latitude circulation over Eurasia in November. In first 24 days (1−24 November), precipitation was below normal due to a “negative in the west, positive in the east” geopotential height anomaly pattern. However, from 25 to 29 November, the circulation changed to an “inverted Ω” pattern, characterized by the establishment of dual blocking highs over the Ural Mountains and the Sea

* 中国气象局复盘总结专项(FPZJ2025-037)和中国气象局沈阳大气环境研究所联合开放基金课题(2024SYIAEKFMS09)共同资助
2025 年 9 月 28 日收稿； 2026 年 6 月 4 日收修定稿
第一作者：娄德君，主要从事气候预测研究. E-mail：ldj7308@163.com
通讯作者：李永生，主要从事气候预测与气候变化研究. E-mail：liyongsheng330@163.com

of Okhotsk, and a stable configuration with the northeast cold vortex was formed. This configuration guided the southward intrusion of polar cold air, which intensely converged with the warm and moist air transported by a low-level jet over Heilongjiang, intensifying moisture convergence and dynamic lifting. Influenced by the dual blocking highs, this weather system remained stagnant over the Heilongjiang Region, ultimately triggering a persistent, widespread severe precipitation event. Statistics show that 4 of the 10 wettest Novembers in Heilongjiang since 1961 were dominated by single extreme precipitation events, revealing the critical role of synoptic scale system adjustments in causing November precipitation anomalies. These findings enrich our understanding of the causes of extreme precipitation in November in Heilongjiang Province and provide important references for its prediction.

Key words: extreme precipitation, cause of circulation, synoptic scale, northeast cold vortex

引　言

在全球变暖背景下,我国冬季降水和极端降水均呈现增多趋势,且对气候变暖的响应程度高于全球平均水平(孙建奇和敖娟,2013;Sun and Ao,2013)。东北地区作为中高纬冰雪关键区,其气候变化的响应尤为突出,冬季降水呈现明显的年代际增多趋势,极端降水事件发生频率和强度也显著上升(王会军和贺圣平,2013;Wang and He,2013;刘玉莲等,2013;Zhang et al,2020)。研究表明,自 2002 年以来,秋季北极海冰持续偏少,其引发的纬向风减弱与北大西洋涛动(NAO)负位相异常,增强了经向环流,更有利于极地冷空气南下。南下的冷空气与暖湿水汽交汇,造成东北地区冬季极端降水事件在年代际尺度上显著增多(陈海山等,2019)。此外,冬季北大西洋北部(30°～50°N、10°～40°E)和西北太平洋海温异常、2001 年以后秋季热带北大西洋海温异常,均是导致东北地区冬季降水显著增加的重要因素(李多等,2012;李永生等,2023;Xu et al,2023)。除了海冰、海温等外强迫因子外,东亚冬季风强度的年代际减弱,也为东北地区冬季降水增多提供了重要的大尺度气候背景(王会军和贺圣平,2013;Wang and He,2013;邹旭东等,2013)。在上述气候背景下,中高纬环流系统随之调整,北极涛动(AO)和 NAO 负位相活动增强,并导致欧亚中高纬地区槽脊活动增强,其中乌拉尔山阻塞高压和贝加尔湖低槽的建立与发展,为冷空气积聚和爆发提供了重要条件(张若楠等,2015;翟盘茂等,2017;王遵娅和周波涛,2018;周波涛等,2025;Zhou et al,2025)。来自热带西北太平洋、日本海及中国近海的异常偏南或偏东水汽输送,为东北地区降水的发生提供了关键的水汽来源(王冀等,2010;任丽等,2016;范可等,2024;杜晓丹等,2024)。此外,东北冷涡的活动及其与温带气旋的相互作用,也是引发东北地区冬季极端降水的重要中尺度机制(何立富等,2022;阎琦等,2024;Xu et al,2024;刘玉莲等,2025)。

黑龙江地处东北地区北部,是我国冬季最长、气温最低的省份,其冬季极端降水事件的年代际变化特征及物理机制,与东北地区整体基本一致,其中,11 月是其秋冬季节转换的关键期。近年来,黑龙江 11 月极端降水事件呈频发、强发态势,如 2021 年、2023 年和 2024 年的 11 月均遭遇强降雪及降温天气,引发高速公路封闭,城市交通中断及基础设施受损等严重后果,表明此类极端事件已由异常渐趋新常态。尤其 2024 年 11 月全省降水量达 31.5 mm,为 1961 年以来历史同期第四多,其中 25—29 日极端降水过程是导致降水异常的主因。因此,深入探究 11 月极端降水的形成原因,对提升预报预警能力、强化防灾减灾措施、保障人民生命财产安全具有重要现实意义。

与东北地区夏季降水已开展的较为深入的研究相比(高辉和高晶,2014;高晶和高辉,2015;房一禾等,2016;赵俊虎等,2020;Ding and Gao,2021),目前针对黑龙江冬季极端降水事件的研究仍相对不足,且现有研究多集中于气候统计和环流分型层面(寿佳慧,2022;杨艺萍等,2023)。因此,本文以 2024 年 11 月黑龙江极端降水事件为切入点,重点分析其降水阶段性异常的环流特征、极端降水事件的环流配置及水汽输送特征(张峰等,2025;张芳华等,2023;汪小康等,2022;李超等,2022),最终通过与历史个例对比,揭示其共性规律和差异性特征,从而深化对高纬地区极端降水形成机制的理解,为黑

龙江 11 月降水预测提供科学依据。

1 数据和方法

所用资料为黑龙江气象数据中心提供的 1961—2024 年黑龙江 62 个地面气象观测站逐日降水资料；1961—2024 年美国国家环境预报中心/大气研究中心（NCEP/NCAR）逐日再分析的位势高度场、风场、垂直速度等资料，水平分辨率为2.5°×2.5°，垂直方向为 17 层。文中气候态取 1991—2020 年平均。采用天气学诊断方法分析 2024 年 11 月两个阶段的欧亚中高纬环流特征及极端降水过程的环流配置，并对比历史相似年的环流场特征。

2 降水及大气环流异常特征分析

2.1 降水异常特征

2024 年 11 月，黑龙江平均降水量为 31.5 mm，较常年同期（12.5 mm）偏多 152%，为 1961 年以来历史同期第四多。其中，漠河、呼玛、黑河、孙吴、嫩江、北安、克山、富裕 8 个站的降水量刷新历史纪录，23 个站降水量位列历史同期前三。25—29 日极端降水事件是全月降水异常偏多的直接原因，该次降水过程具有降水量大、雨雪混合的显著特征。

2024 年 11 月，黑龙江降水呈现显著的时空分布不均特征，降水总体呈现由西南向东北逐渐递增的趋势。其中，西南部的齐齐哈尔南部、大庆、绥化部分地区和哈尔滨部分地区降水量不足 20 mm，中部大部分地区在 20～50 mm，而东北部的黑河、鹤岗西部、佳木斯部分地区和牡丹江东部则超过 50 mm。与常年同期相比，除东南部的少数县（市）外，全省大部分地区降水量偏多 1 倍以上，其中，大兴安岭、黑河大部、鹤岗大部和齐齐哈尔、伊春、佳木斯部分地区偏多幅度更是达到 3 倍以上（图 1）。

从时间分布来看，2024 年 11 月黑龙江共出现 5 次降水过程，但降水主要集中在 25—29 日（图 2），该时段全省平均降水量为 22.9 mm，占全月降水总量的 73%。全省共有 46 个站在此次过程中的降水量超过其全月降水总量的 70%，其中大部地区降水量超过 10 mm，33 个站超过 20 mm，11 个站超过 30 mm，3 个站超过 50 mm，充分体现了此次降水过程的极端性特征（图 2）。

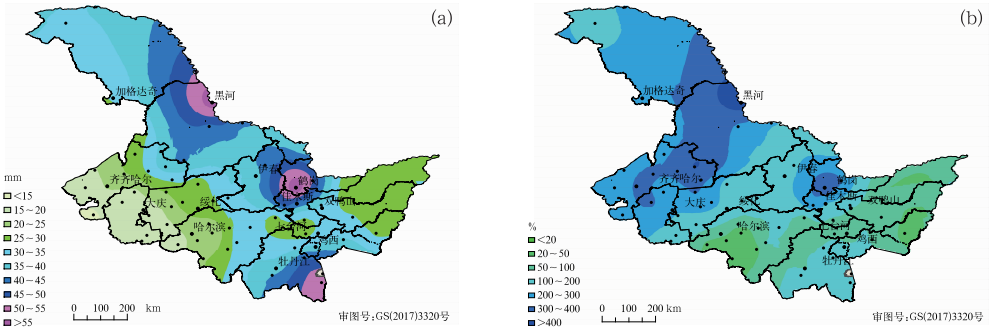


图 1 2024 年 11 月黑龙江(a)降水量和(b)降水量距平百分率分布

Fig. 1 Distribution of (a) precipitation and (b) its anomaly percentage in Heilongjiang Province in November 2024

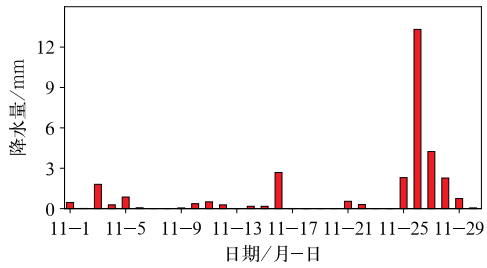
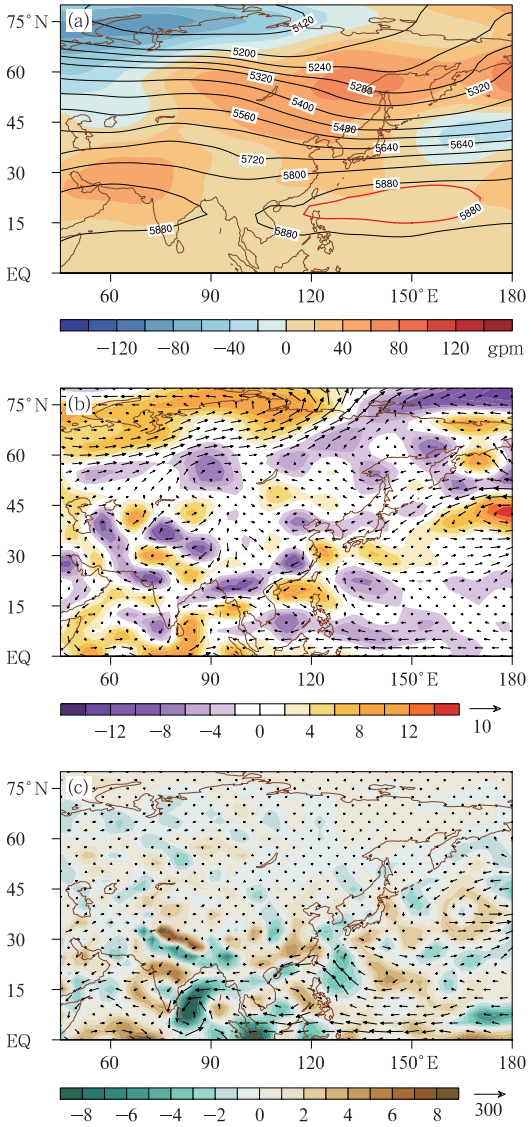


图 2 2024 年 11 月黑龙江逐日降水量

Fig. 2 Daily precipitation in Heilongjiang Province in November 2024

2.2 大气环流异常特征

2024 年 11 月，欧亚中高纬地区位势高度距平场呈“西负东正”异常分布（图 3a），乌拉尔山地区和贝加尔湖至我国东北地区分别受负距平、正距平控制，正距平中心位于黑龙江北部至鄂霍次克海一带，月平均位势高度场表现为平直的偏西风气流。低层 850 hPa 风场显示，黑龙江受弱东南风控制，并伴随弱的正涡度（图 3b）。水汽通量场上，整层水汽输送



注:图 a 中红色等值线为气候平均 5880 gpm 线,下同。

图 3　2024 年 11 月(a)500 hPa 位势高度(等值线,单位:gpm)及其距平(填色),(b)850 hPa 风场距平(箭矢,单位:m·s^{-1})及相对涡度距平(填色,单位:10^{-6} s^{-1})和(c)整层水汽通量距平(箭矢,单位:kg·m^{-1}·s^{-1})及其散度距平(填色,单位:10^{-5} kg·m^{-2}·s^{-1})的空间分布

Fig. 3　Spatial distributions of (a) 500 hPa geopotential height (contour, unit: gpm) and its anomaly (colored), (b) 850 hPa wind field anomaly (arrow, unit: m·s^{-1}) and relative vorticity anomaly (colored, unit: 10^{-6} s^{-1}), and (c) vertically integrated water vapor flux anomaly (arrow, unit: kg·m^{-1}·s^{-1}) and its divergence anomaly (colored, unit: 10^{-5} kg·m^{-2}·s^{-1}) in November 2024

均较弱,黑龙江东部存在弱水汽通量辐合,中西部呈现水汽通量辐散(图 3c)。在这种环流配置下,中高纬地区环流经向度小,纬向环流占主导地位,冷空气活动明显减弱,通常不利于系统性降水的形成。然而,由于 11 月 25—29 日的极端降水事件,黑龙江当月降水量却异常偏多。

11 月 1—24 日,欧亚中高纬环流呈“西负东正”型异常分布。新地岛及其以南的大范围区域受位势高度负距平控制,贝加尔湖至我国东北地区维持正距平,其中心位于东北地区中南部(强度≥80 gpm)。低层 850 hPa 风场显示,黑龙江处于反气旋环流中心控制下,整层水汽通量偏弱,且全省大部表现为水汽通量辐散(图略)。在此干暖下沉背景下,黑龙江降水整体偏少,累计降水量为 8.6 mm,较常年同期(10.5 mm)偏少 18%。

11 月 25—29 日,欧亚中高纬环流发生明显调整,500 hPa 位势高度场环流演变为典型的“倒 Ω”型分布,60°E 乌拉尔山附近和 150°E 鄂霍次克海上空形成两个强大的阻塞高压,而两者之间深厚的东北冷涡是造成本次极端降水的直接天气系统。冷涡中心强度低于 5280 gpm,其对应的强负距平区(中心强度达−140 gpm)覆盖了我国东部大范围地区(图 4a)。冷涡与乌拉尔山阻塞高压共同引导极地冷空气南下,在 850 hPa 于黑龙江西侧形成≤−12℃的冷舌(图略)。相应地,黑龙江全省受强气旋性环流控制,其西部存在强度为 4.1×10^{-5} s^{-1} 的正涡度中心(图 4b)。同时,水汽输送显著增强,源自日本海的 850 hPa 低空急流将水汽通量提升至 130 kg·m^{-1}·s^{-1},较气候态增强 300%。低空急流输送的暖湿气流与冷空气交汇后,在黑龙江东北部形成中心值为−5.2×10^{-4} kg·m^{-2}·s^{-1} 的强水汽辐合中心(图 4c)。冷空气沿冷涡西侧侵入,增强低层辐合,并与 500 hPa 冷涡垂直叠置形成深厚的正压结构,从而进一步强化上升运动。沿 120°~135°E 的平均垂直速度剖面显示,40°~60°N 存在明显的上升运动,中心强度达−9.3×10^{-2} Pa·s^{-1}(图 4d),这表明黑龙江上空存在持续的强上升气流,为降水提供了稳定的动力抬升条件。受双阻塞高压影响,东北冷涡移动缓慢,导致冷暖空气在黑龙江地区长时间交汇。最终,动力抬升与水汽供应协同增强,共同引发了大范围极端降水。

11 月 25—29 日黑龙江降水过程平均累计降水量达 22.9 mm,为历史同期均值(1.7 mm)的 13.5 倍,是 1961 年以来黑龙江 11 月下半月最强的单次降水过程,位列 11 月全月最强单次降水过程历史第三

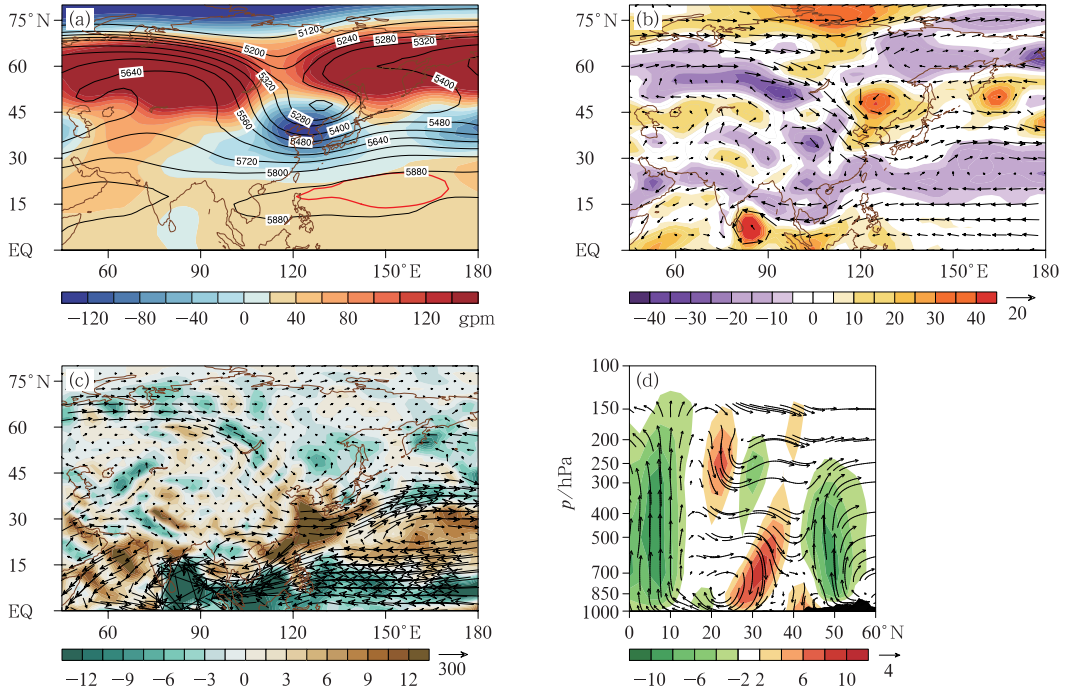


图 4 2024 年 11 月 25—29 日(a)500 hPa 位势高度(等值线,单位:gpm)及其距平(填色),(b)850 hPa 风场(箭矢,单位:m·s^{-1})及相对涡度(填色,单位:10^{-6} s^{-1}),(c)整层水汽通量(箭矢,单位:kg·m^{-1}·s^{-1})及其散度(填色,单位:10^{-5} kg·m^{-2}·s^{-1})和(d)垂直速度(填色,单位:10^{-2} Pa·s^{-1})以及与经向风合成量(箭矢,单位:m·s^{-1})沿 120°～135°E 平均的垂直剖面

Fig. 4 Spatial distributions of (a) 500 hPa geopotential height (contour, unit: gpm) and its anomaly (colored), (b) 850 hPa wind field (arrow, unit: m·s^{-1}) and relative vorticity (colored, unit: 10^{-6} s^{-1}), and (c) vertically integrated water vapor flux (arrow, unit: kg·m^{-1}·s^{-1}) and its divergence (colored, unit: 10^{-5} kg·m^{-2}·s^{-1}), and (d) vertical profile of vertical velocity (colored, unit: 10^{-2} Pa·s^{-1}) and the synthetic meridional wind (arrow, unit: m·s^{-1}) averaged along 120°—135°E in 25—29 November 2024

位,仅次于 2023 年(27.1 mm)和 2021 年(23.0 mm)。

3 历史相似个例对比分析

分析 1961 年以来黑龙江 11 月降水位列前 10 位的年份全月逐日降水量发现,除 2024 年外,2012 年(排名第 5)、2018 年(排名第 8)和 2020 年(排名第 6)11 月也均表现出单次极端降水过程主导全月降水异常的特征,单次极端降水过程(2012 年 11 月 11—14 日降水量为 21.4 mm,2018 年 11 月 8—10 日为 18.0 mm,2020 年 11 月 17—20 日为 15.6 mm)对全月降水的贡献率分别达到 73%、89%和 71%。从空间分布上,这 3 次过程呈现出明显的区域差异:2012 年降水过程影响范围最广,全省大部地区降水量超过 10 mm,其中哈尔滨、鹤岗西部、佳木斯西部、双鸭山西部和七台河部分地区降水量超过 25 mm;2018 年降水过程主要影响中东部地区,东部的鹤岗部分地区、佳木斯大部、双鸭山、七台河、牡丹江和鸡西降水量超过 25 mm;2020 年降水过程则集中在南部,哈尔滨、牡丹江、七台河南部和鸡西异常偏多,超过 25 mm,其他地区不足 10 mm(图略)。

对比 2012 年、2018 年、2020 年、2024 年的 11 月环流场可以发现,除 2012 年 11 月 500 hPa 高度场黑龙江处于宽广的槽区,以位势高度负距平为主外,其余 3 年 11 月黑龙江上空的月平均环流场均为位势高度正距平,且整层水汽通量普遍偏弱,伴有弱的水汽通量辐合或辐散,整体不利于月尺度降水偏多(图略)。然而,极端降水过程及其最强降水日的环流配置与月平均场存在显著差异(图 4,图 5):2012 年 11 月 12 日黑龙江南部受深厚东北冷涡控制,东北侧阻塞高压引导偏东、东南急流输送日本海和西北太平洋的水汽,形成强水汽通量辐合中心,并伴随

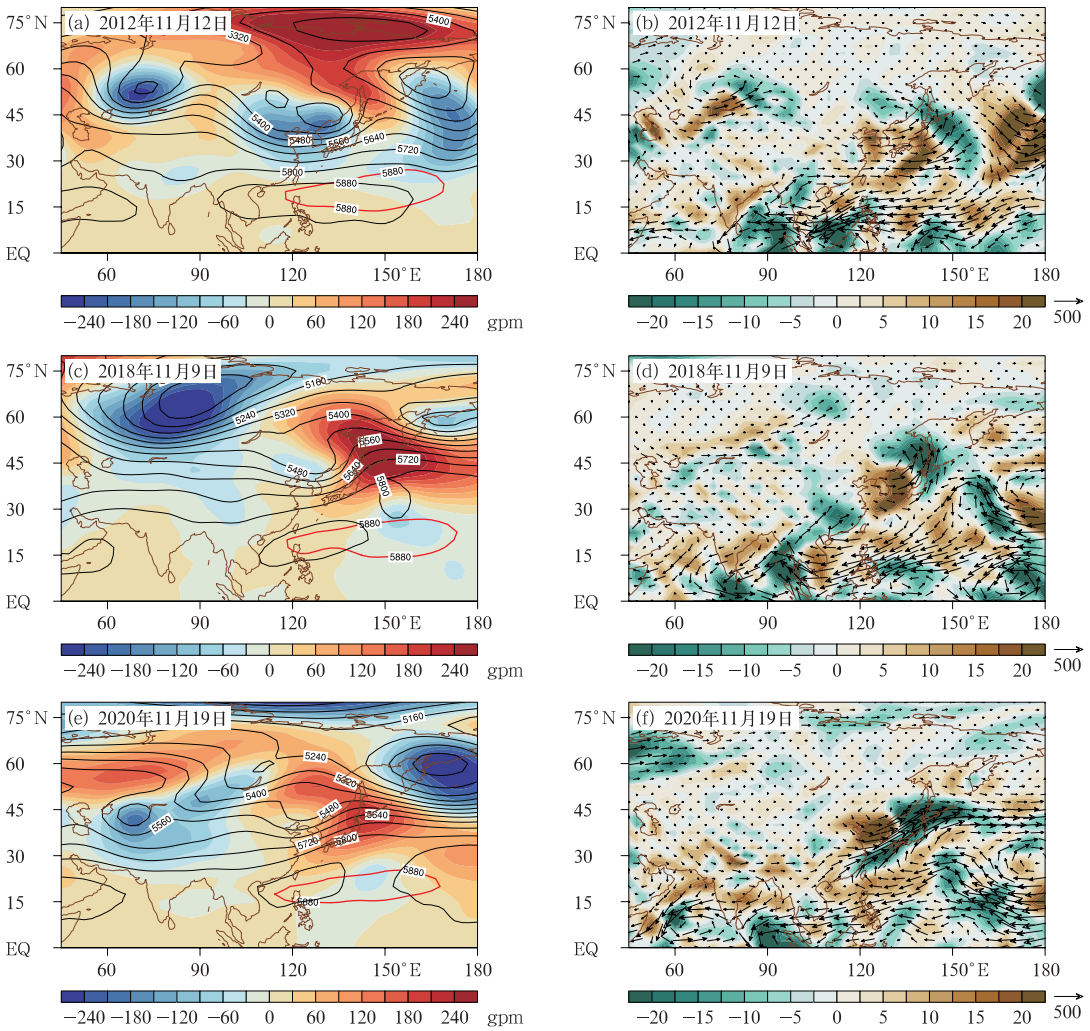


图 5　(a,b)2012 年,(c,d)2018 年和(e,f)2020 年的 11 月黑龙江最强降水日的环流与水汽配置空间分布
(a,c,e)500 hPa 位势高度(等值线,单位:gpm)及其距平(填色),(b,d,f)整层水汽通量
(箭矢,单位:kg·m^{-1}·s^{-1})及其散度(填色,单位:10^{-5} kg·m^{-2}·s^{-1})

Fig. 5　Spatial distributions of circulation and moisture configuration on days with heaviest precipitation in Heilongjiang Province in November of (a, b) 2012, (c, d) 2018 and (e, f) 2020
(a, c, e) 500 hPa geopotential height (contour, unit: gpm) and its anomaly (colored),
(b, d, f) vertically integrated water vapor flux (arrow, unit: kg·m^{-1}·s^{-1})
and its divergence (colored, unit: 10^{-5} kg·m^{-2}·s^{-1})

强烈的垂直上升运动;2018 年 11 月 9 日日本至鄂霍次克海高压脊与黑龙江南部浅槽系统相配合,低层气旋式环流中心位于黑龙江中东部,引导偏南急流将水汽来源扩展至日本海、西北太平洋及南海和孟加拉湾地区;2020 年 11 月 19 日对流层中层黑龙江上空呈现北脊南槽形势,低层黑龙江北部及其东南侧的日本附近均受反气旋环流控制,黑龙江南部处于这两个反气旋之间的过渡区,形成强气旋性切变,强盛的西南急流将中国近海、热带北太平洋、南海—孟加拉湾和日本海等多个海域的水汽向东北方向输送;2024 年 11 月 26 日受鄂霍次克海和乌拉尔山双阻塞高压与东北冷涡共同影响,黑龙江低层维持显著的气旋式环流,偏东南急流主要输送东海和日本海的水汽。

上述天气尺度系统的环流配置,直接决定了其水汽输送路径的差异。对 4 次极端降水过程的水汽收支演变进行综合分析(图 6)发现,该过程发生期间,总水汽大部分时间为净收入,且通常会出现显著峰值,这与强降水发生时区域水汽强烈辐合的特征一致。2012 年、2018 年和 2024 年 11 月的过程水汽

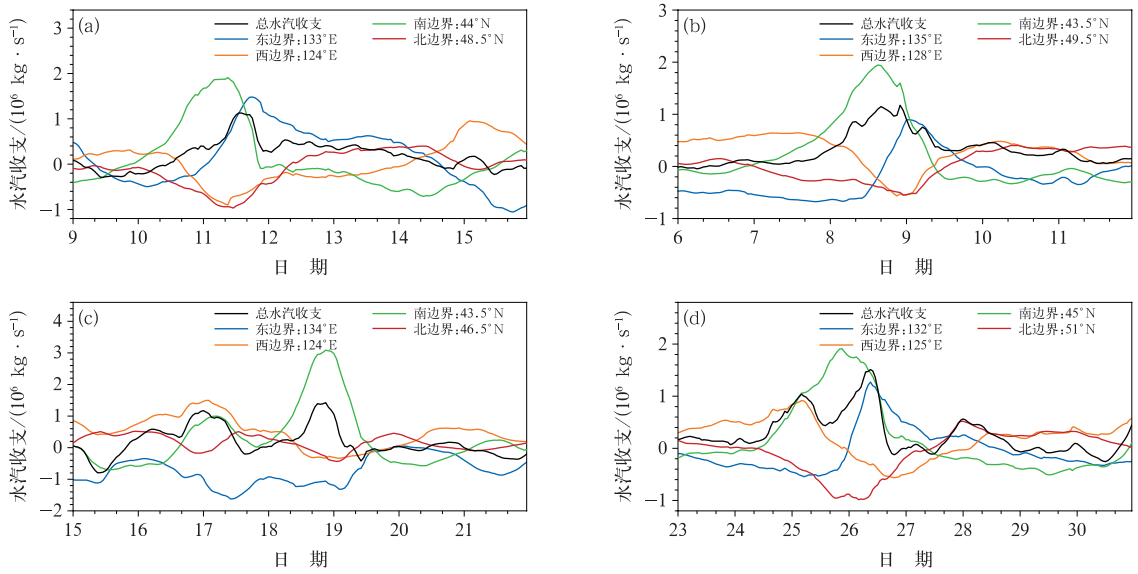


图 6 (a)2012 年,(b)2018 年,(c)2020 年和(d)2024 年的 11 月黑龙江 4 次极端降水个例中各边界整层水汽收支的时间演变

Fig. 6 Time-series of the vertically integrated moisture transport across each boundary for the four extreme precipitation events in Heilongjiang Province in November of (a) 2012, (b) 2018, (c) 2020, and (d) 2024

收支演变较为相似:在过程初期,南边界作为主要水汽来源,率先出现显著的净流入峰值,峰值强度超过区域总水汽收入,高值状态通常可维持约 24 h,为强降水的启动提供了充沛的水汽条件;进入过程中后期,水汽主导通道发生转换,东边界成为主要的净流入通道,其峰值接近区域总收入但衰减较快。这一水汽输送通道的转换过程,与天气系统(如东北冷涡)东移过程中低层环境风场由偏南风向偏东风的转变完全吻合。北边界通常在过程期间由初期的净流出转为中后期的净流入。西边界在 2012 年表现为净流出,2018 年和 2024 年则呈现由净流入转为净流出再为净流入的变化。2020 年的水汽收支特征与其余 3 年差异明显,这可能与强降水中心位置偏南有关。在过程初期,西、南和北边界共同构成净收入,随着过程发展至中后期,则转变为仅由南边界维持强劲的净流入,其峰值异常突出,持续约 8 h 的高值达到区域总收入峰值的 2 倍,显示出极端集中的水汽供应。东边界在整个降水期间始终为稳定的净流出。从 4 次极端降水的水汽贡献来看,2018 年、2020 年和 2024 年均表现为南边界贡献最大,东边界或西边界次之,2012 年则为东边界贡献最突出,其次是南边界。综上分析可知,2012 年、2018 年和 2024 年 11 月的极端降水主要表现为东南风水汽输送的接力,而 2020 年则主要由南方暖湿气流驱动。

尽管 4 次过程的环流配置和水汽输送路径存在上述个性差异,但其得以发生并维持的共同物理基础在于均具备了极端降水所需的动力和水汽条件。具体而言,由这 4 次极端降水过程中最强降水日 35°～60°N、120°～145°E 范围内的动力和水汽参数(表 1)可知,过程中均存在低空急流(850 hPa 最大风速＞18 $m \cdot s^{-1}$)、强涡旋(850 hPa 相对涡度＞6.5×10^{-4} s^{-1})、强水汽输送(水汽通量峰值超过 250 $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$)、强辐合(水汽通量辐合中心强度＜$-4.2\times10^{-4}$ $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)以及强上升运动(垂直速度均≤$-1.8\times10^{-1}$ $Pa \cdot s^{-1}$)。

综合分析表明,这 4 次极端降水过程在环流与水汽条件上存在明显差异。2012 年和 2024 年过程受东北冷涡控制,而 2018 年和 2020 年主要是受浅槽影响,其中 2020 年过程低层还伴有强烈的风场切变。水汽收支演变进一步表明,2012 年、2018 年和 2024 年过程具有东南风水汽输送的接力特征,2012 年和 2024 年主要来源于日本海和西北太平洋的水汽,2018 年水汽来源更广泛,还包括来自南海和孟加拉湾地区的水汽。2020 年过程则主要由强盛的南方暖湿气流驱动,水汽来源涵盖中国近海、热带北

太平洋、南海—孟加拉湾和日本海等多个海域。降水范围上,2012 年和 2024 年影响范围较大,2018 年和 2020 年则分别主要以中东部、南部为主。尽管存在上述差异,这 4 次降水过程也表现出关键的共性特征:受西低东高环流型(东北冷涡、低槽和阻塞高压、高压脊)影响;伴随着低空急流和强上升运动;依赖偏南或东南方向的强水汽输送。这种环流-水汽-动力的协同作用导致降水强度显著增强。

表 1　黑龙江 4 次 11 月极端降水过程最强降水日的动力和水汽参数

Table 1　Statistics of dynamic and moisture parameters on days with the heaviest precipitation during the four November extreme events in Heilongjiang Province

最强降水日	850 hPa 最大风速/($m \cdot s^{-1}$)	850 hPa 最大相对涡度/($10^{-4}\ s^{-1}$)	水汽通量峰值/($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$)	水汽通量辐合中心强度/($10^{-4}\ kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	垂直速度中心值/($10^{-1}\ Pa \cdot s^{-1}$)
2012 年 11 月 12 日	21.0	7.0	265.0	−5.0	−1.8
2018 年 11 月 9 日	23.1	6.5	521.8	−4.2	−2.4
2020 年 11 月 19 日	25.2	8.2	891.4	−4.2	−2.9
2024 年 11 月 26 日	18.6	7.0	463.7	−5.6	−3.1

4　结论和讨论

本文利用站点降水和 NCEP 再分析环流场资料,对 2024 年 11 月黑龙江极端降水的环流成因开展诊断分析,并与历史相似年份进行对比,主要结论如下。

2024 年 11 月,黑龙江降水量达 31.5 mm,为 1961 年以来历史第四多。其中 25—29 日极端降水事件 5 d 累计降水量达 22.9 mm,占全月降水总量的 73%,达历史同期平均的 13.5 倍,是导致该月降水异常偏多的直接原因。此次极端降水事件源于欧亚中高纬环流的阶段性调整。前期(1—24 日)受“西负东正”位势高度距平场控制,降水偏少;后期(25—29 日)环流演变为“倒 Ω”型,乌拉尔山和鄂霍次克海双阻塞高压与东北冷涡形成稳定配置,引导极地冷空气南下,并与低空急流输送的暖湿气流在黑龙江上空强烈交汇,加剧了水汽辐合与动力抬升。受双阻塞高压影响,该系统在黑龙江上空滞留,最终引发持续性大范围强降水。统计显示,1961 年以来黑龙江 11 月降水量位列前 10 的年份中,有 4 年均由单次极端降水事件主导,进一步揭示了天气尺度系统调整对降水异常的关键作用。尽管各年环流配置和水汽条件存在差异,但极端降水的发生关键在于“西低东高”环流型,低空急流,强上升运动和偏南、东南向强水汽输送的协同配置。

本研究表明,在月尺度环流形势整体不利的情况下,一次极端天气过程仍可导致黑龙江 11 月降水异常偏多,大大增加了该月降水预测的不确定性。不同个例在环流配置和水汽来源等方面存在明显差异,进一步增加了预报难度。现有次季节模式对这类过程的预测能力仍显不足,以 2024 年 11 月 25—29 日过程为例,CPSv3、CFSv2 和 ECMWF 模式在提前 15～45 d 的预报时效内均明显低估了该过程的降水量与极端性。鉴于此,未来研究应重点关注 11 月天气尺度系统的调整,并着力改进模式对极端降水过程的预报能力。

参考文献

陈海山,罗江珊,韩方红,2019. 中国北方暴雪的年代际变化及其与大气环流和北极海冰的联系[J]. 大气科学学报,42(1):68-77. Chen H S, Luo J S, Han F H, 2019. Interdecadal variation of heavy snowfall in northern China and its linkages with atmospheric circulation and Arctic sea ice[J]. Trans Atmos Sci, 42(1):68-77(in Chinese).

杜晓丹,赵宇,赵玲,2024. 2021 年 11 月两次黄淮气旋引发的东北地区暴雪过程对比分析[J]. 冰川冻土,46(6):1800-1815. Du X D, Zhao Y, Zhao L, 2024. Comparative analysis of two snowstorm events in Northeast China caused by Huang-Huai cyclones in November 2021[J]. J Glaciol Geocryol, 46(6): 1800-1815(in Chinese).

范可,杨洪卿,田宝强,等,2024. 中国东北极端持续大—暴雪事件的个例成因及可预测性[J]. 大气科学学报,47(2):201-215. Fan K, Yang H Q, Tian B Q, et al, 2024. Causes and prediction skill of a case study on persistent heavy snowfall events in Northeast China[J]. Trans Atmos Sci, 47(2):201-215(in Chinese).

房一禾,龚志强,陈海山,2016. 东北冷涡降水集中期的客观识别研究[J]. 气象,42(1):80-88. Fang Y H, Gong Z Q, Chen H S, 2016. Objective identification research on China northeast cold vortex precipitation period[J]. Meteor Mon, 42(1):80-88(in Chinese).

高辉,高晶,2014. 黑潮冬季海温对我国东北地区夏季降水预测信号的增强[J]. 海洋学报,36(7):27-33. Gao H, Gao J, 2014. Increased influences of the SST along the Kuroshio in previous winter on the summer precipitation in northeastern China[J].

Acta Oceanol Sin,36(7):27-33(in Chinese).

高晶,高辉,2015.副热带东南太平洋海温对东北夏季降水的影响及可能机制[J].大气科学,39(5):967-977. Gao J,Gao H,2015. Relationship between summer precipitation over northeastern China and sea surface temperature in the southeastern Pacific and the possible underlying mechanisms[J]. Chin J Atmos Sci,39(5):967-977(in Chinese).

何立富,齐道日娜,余文,2022.引发东北极端暴雪的黄渤海气旋爆发性发展机制[J].应用气象学报,33(4):385-399. He L F,Qi D R N,Yu W,2022. Development mechanisms of the Yellow Sea and Bohai Sea cyclone causing extreme snowstorms in Northeast China[J]. J Appl Meteor Sci,33(4):385-399(in Chinese).

李超,崔春光,徐慧燕,等,2022.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,48(12):1497-1511. Li C,Cui C G,Xu H Y,et al,2022. Characteristics associated with the transport,budget,conversion of water vapor and their impact on localized precipitation during the Henan severe torrential rain event on 20 July 2021[J]. Meteor Mon,48(12):1497-1511(in Chinese).

李多,肖子牛,李泽椿,2012.中国东部北方地区冬季降雪的时空特征及其与全球异常海温的联系[J].气象,38(4):411-418. Li D,Xiao Z N,Li Z C,2012. The spatial and temporal characteristics of winter snowfall in Northeast China and its relation with global sea surface temperature anomaly[J]. Meteor Mon,38(4):411-418(in Chinese).

李永生,陈晨,娄德君,等,2023.松花江流域冬季降雪的年际变化与西北太平洋海温的关系[J].高原气象,42(1):128-138. Li Y S,Chen C,Lou D J,et al,2023. Interannual variation in snowfall over Songhua River Basin and its relationship with west North Pacific sea surface temperature anomalies during boreal winter[J]. Plateau Meteor,42(1):128-138(in Chinese).

刘玉莲,康恒元,赵玲,2025.基于高分辨率资料的东北冷涡气候特征[J].气象,51(7):830-839. Liu Y L,Kang H Y,Zhao L,2025. Climate characteristics of northeast cold vortex based on high resolution data[J]. Meteor Mon,51(7):830-839(in Chinese).

刘玉莲,任国玉,于宏敏,等,2013.我国强降雪气候特征及其变化[J].应用气象学报,24(3):304-313. Liu Y L,Ren G Y,Yu H M,et al,2013. Climatic characteristics of intense snowfall in China with its variation[J]. J Appl Meteor Sci,24(3):304-313(in Chinese).

任丽,张桂华,周奕含,等,2016.引发黑龙江省暴雪爆发性气旋个例动力分析[J].气象与环境学报,32(2):28-36. Ren L,Zhang G H,Zhou Y H,et al,2016. Study on dynamic system of explosive cyclone causing a snowstorm in Heilongjiang Province[J]. J Meteor Environ,32(2):28-36(in Chinese).

寿佳慧,2022.黑龙江省冬季降雪的变化特征及其影响因子分析[J].中国农业文摘·农业工程,34(1):15-17. Shou J H,2022. Variation characteristics of winter snowfall in Heilongjiang Province and its influencing factiors[J]. Agric Sci Eng China,34(1):15-17(in Chinese).

孙建奇,敖娟,2013.中国冬季降水和极端降水对变暖的响应[J].科学通报,58(8):674-679. Sun J Q,Ao J,2013. Changes in precipitation and extreme precipitation in a warming environment in China[J]. Chin Sci Bull,58(8):674-679(in Chinese).

王会军,贺圣平,2013.我国东北冬季降雪的年代际增多及其与冬季风减弱的关系[J].科学通报,58(8):629-633. Wang H J,He S P,2013. The increase of snowfall in Northeast China after the mid-1980s[J]. Chin Sci Bull,58(8):629-633(in Chinese).

王冀,赵春雨,娄德君,2010.东北地区冬季降雪的集中度和集中期变化特征[J].地理学报,65(9):1069-1078. Wang J,Zhao C Y,Lou D J,2010. Variations of winter snow concentration degree and snow concentration period in Northeast China[J]. Acta Geogr Sin,65(9):1069-1078(in Chinese).

汪小康,崔春光,王婧羽,等,2022."21·7"河南特大暴雨水汽和急流特征诊断分析[J].气象,48(5):533-544. Wang X K,Cui C G,Wang J Y,et al,2022. Diagnostic analysis on water vapor and jet characteristics of the July 2021 severe torrential rain in Henan Province[J]. Meteor Mon,48(5):533-544(in Chinese).

王遵娅,周波涛,2018.影响中国北方强降雪事件年际变化的典型环流背景和水汽收支特征分析[J].地球物理学报,61(7):2654-2666. Wang Z Y,Zhou B T,2018. Large-scale atmospheric circulations and water vapor transport influencing interannual variations of intense snowfalls in northern China[J]. Chin J Geophys,61(7):2654-2666(in Chinese).

阎琦,谭政华,苏雨萌,等,2024.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,40(4):1-9. Yan Q,Tan Z H,Su Y M,et al,2024. Causes analysis of snowfall during different stages of a rare heavy snowstorm event in Liaoning Province under the background of northeast cold vortex[J]. J Meteor Environ,40(4):1-9(in Chinese).

杨艺萍,张丽娟,王承伟,2023.1961—2017年黑龙江大-暴雪天气形势诊断及其变化特征[J].灾害学,38(4):211-218. Yang Y P,Zhang L J,Wang C W,2023. Diagnosis and variation characteristics of heavy snowstorm in Heilongjiang from 1961 to 2017[J]. J Catastrophol,38(4):211-218(in Chinese).

翟盘茂,廖圳,陈阳,等,2017.气候变暖背景下降水持续性与相态变化的研究综述[J].气象学报,75(4):527-538. Zhai P M,Liao Z,Chen Y,et al,2017. A review on changes in precipitation persistence and phase under the background of global warming[J]. Acta Meteor Sin,75(4):527-538(in Chinese).

张芳华,杨舒楠,胡艺,等,2023."23·7"华北特大暴雨过程的水汽特征[J].气象,49(12):1421-1434. Zhang F H,Yang S N,Hu Y,et al,2023. Water vapor characteristics of the July 2023 severe torrential rain in North China[J]. Meteor Mon,49(12):1421-1434(in Chinese).

张峰,杨舒楠,宫宇,2025.2024年11月大气环流和天气分析[J].气象,51(2):249-256. Zhang F,Yang S N,Gong Y,2025. Analysis of the November 2024 atmospheric circulation and weather[J]. Meteor Mon,51(2):249-256(in Chinese).

张若楠,张人禾,左志燕,2015.中国冬季积雪变异及其与北极涛动的联系[J].大气科学,39(3):634-642. Zhang R N,Zhang R H,Zuo Z Y,2015. Winter snow cover variability over China and its

relation to Arctic Oscillation[J]. Chin J Atmos Sci,39(3):634-642(in Chinese).

赵俊虎,熊开国,陈丽娟,2020.东北夏季降水预测技巧偏低的原因探讨[J].大气科学,44(5):913-934. Zhao J H,Xiong K G,Chen L J,2020. The causes of low predictive skills of precipitation in flood season in Northeast China[J]. Chin J Atmos Sci,44(5):913-934(in Chinese).

周波涛,郭楚儿,胡跃鹏,等,2025.2000 年以后北大西洋涛动对中国北方冬季降雪影响增强[J].中国科学:地球科学,55(4):1281-1289. Zhou B T,Guo C E,Hu Y P,et al,2025. Enhanced influence of the North Atlantic Oscillation on winter snowfall in northern China since 2000[J]. Sci China Earth Sci,55(4):1281-1289(in Chinese).

邹旭东,张飞民,王澄海,等,2013.我国东北地区冬季降水和东亚冬季风的关系研究[J].冰川冻土,35(6):1454-1461. Zou X D,Zhang F M,Wang C H,et al,2013. The relationship between winter precipitation and eastern Asian winter monsoon in Northeast China[J]. J Glaciol Geocryol,35(6):1454-1461(in Chinese).

Ding T,Gao H,2021. A feasible approach to improve forecast skill of summer precipitation in Northeast China by statistical regression of the Northeast China cold vortex in the multimodel ensemble [J]. Int J Climatol,41(14):6397-6414.

Sun J Q,Ao J,2013. Changes in precipitation and extreme precipitation in a warming environment in China[J]. Chin Sci Bull,58(12):1395-1401.

Wang H J,He S P,2013. The increase of snowfall in Northeast China after the mid-1980s[J]. Chin Sci Bull,58(12):1350-1354.

Xu S Q,Fang Y H,Lin Y T,et al,2023. Enhanced impact of autumn north tropical Atlantic sea surface temperature anomalies on subsequent winter snowfall in Northeast China after 2001[J]. J Climate,36(2):663-675.

Xu S Q,Gao H,Yang X Y,et al,2024. Rapid increase in extreme snowfall events over the last 40 years in Northeast China[J]. SOLA,20:177-183.

Zhang L J,Li Y S,Zhang F,et al,2020. Changes of winter extreme precipitation in Heilongjiang Province and the diagnostic analysis of its circulation features[J]. Atmos Res,245:105094.

Zhou B T,Guo C E,Hu Y P,et al,2025. Enhanced influence of the North Atlantic Oscillation on winter snowfall in northern China since 2000[J]. Sci China Earth Sci,68(4):1236-1244.

(本文责编:侯翠梅)