

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).

基于高分辨率资料的东北冷涡气候特征^{*}

刘玉莲^{1,2} 康恒元³ 赵 玲⁴

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 150030

3 哈尔滨市气象综合保障中心, 哈尔滨 150028

4 黑龙江省气象台, 哈尔滨 150030

提 要: 基于 ERA5 再分析大气环流场数据, 以位势高度场为主, 温度场为辅, 客观识别 1979—2023 年东北冷涡过程, 分析东北冷涡的气候特征。结果表明: 20 世纪 90 年代初期和 21 世纪 00 年代中期东北冷涡较多, 21 世纪 10 年代相对较少; 年内分布暖季多于冷季, 6 月最多, 3 月最少; 平均持续时间为 4 d, 4 月最短, 1 月最长。东北冷涡中心位置主要集中分布在 45°~55°N、115°~135°E, 多开始于西北部 45°~60°N、100°~120°E, 结束于东边界 140°E 附近的 40°~55°N 范围。以向东和向东南方向移动的东北冷涡居多。以 120°E 为界, 以东的东北冷涡强度平均偏强, 以西偏弱; 东北冷涡强度年内分布冷季强于暖季, 分析区域 3 月空间差异最大, 6 月最小。1979—2023 年年平均东北冷涡强度和东北冷涡环流呈明显减弱趋势。东北冷涡强度与我国东北地区大多数月份的气温呈显著负相关, 与 4 月和 6 月降水量呈显著正相关。

关键词: 东北冷涡, 高分辨率, 气候特征

中图分类号: P461, P466

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.041501

Climate Characteristics of Northeast Cold Vortex Based on High Resolution Data

LIU Yulian^{1,2} KANG Hengyuan³ ZHAO Ling⁴

1 Heilongjiang Climate Center, Harbin 150030

2 Wuying National Climatological Observatory, Heilongjiang, Yichun 153030

3 Harbin Meteorological Comprehensive Support Center, Harbin 150028

4 Heilongjiang Meteorological Observatory, Harbin 150030

Abstract: Based on ERA5 hourly reanalysis data of atmospheric circulation field with horizontal resolution of 0.25°×0.25°, geopotential height data and temperature, the northeast cold vortex process and its climate change characteristics from 1979 to 2023 are analyzed. The results reveal that there are more northeast cold vortexes in the early 1990s and mid-2000s, and relatively fewer in the 2010s. The frequency of northeast cold vortex shows higher in the warm season than in the cold season, with the highest in June and the lowest in March. Its average duration is 4 days, with the shortest duration in April and the longest duration in January. The northeast cold vortex is mostly generated in the range of 45°—60°N, 100°—120°E and dies out within 40°—55°N near 140°E. The center of the northeast cold vortex is mainly concentrated

^{*} 黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2019D013)、国家重点研发计划(2018YFA0605603)、国家自然科学基金项目(41771067)和黑龙江省气象局创新发展项目(HQZC2025023)共同资助

2024 年 6 月 6 日收稿; 2025 年 4 月 16 日收修定稿

第一作者: 刘玉莲, 主要从事区域气候变化研究. E-mail: Liuyul74@qq.com

通讯作者: 赵玲, 主要从事天气气候研究. E-mail: zhaoling1969@163.com

within 45° – 55° N and 115° – 135° E. The northeast cold vortex mainly moves towards the east and south-east. To the east of 120° E, the average intensity of the cold vortex is stronger and weaker to the west. The intensity distribution of the northeast cold vortex within the year is stronger in the cold season than in the warm season. The intensity difference between the grids in the analysis area is the largest in March, and the smallest in June. The annual average intensity and circulation of northeast cold vortex show a significant weakening trend from 1979 to 2023. There is a significant negative correlation between the intensity of the northeast cold vortex and the temperature in most months in Northeast China, but a significant positive correlation with precipitation in April and June.

Key words: northeast cold vortex, high resolution, climate characteristic

引言

东北冷涡是发生在中国东北及其邻近地区,具有持续性及准静止性的切断低压,是中国暴雨主要的大气环流形势之一(陶诗言,1980),常造成中国东北(齐铎等,2020;才奎志等,2022)、华北(郝立生等,2023)、江淮地区(杨吉等,2020)、华南(苗春生等,2006)暴雨、雷阵雨、冰雹(郑永光和宋敏敏,2021)、龙卷(郑永光等,2020)和雷暴大风(吴海英等,2023;曹艳察等,2024)。尽管东北冷涡是天气尺度系统,但是频繁的冷涡活动不仅会影响中期、短期和短时临近天气,也会对短期气候有较大影响,能引起月、季气温和降水异常,有显著的“气候效应”(何金海等,2006;He et al,2006;胡开喜等,2011;房一禾等,2022;石晨等,2023)。

东北冷涡识别主要分为主观和客观识别两大类。主观识别方法主要运用逐日(间隔 24 h 或 6 h)的高空天气图进行人工识别(杨旭等,2023),该识别方法难以完全重复且耗时费力。客观识别方法是基于等压面上位势高度、温度、风等数据,运用计算机技术进行自动识别,效率高,且易于修订,在近些年的东北冷涡研究中运用较多(黄璇和李栋梁,2020;Fang et al,2021;Lin et al,2023)。

东北冷涡气候研究主要关注气候特征、气候效应和影响因子(房一禾等,2022;范子琪等,2023),研究发现:东北冷涡过程年均 32.8 个,5—6 月最多,最长持续时间 13 d(阎琦等,2022);5—8 月冷涡活动主要位于 48° – 53° N、 121° – 131° E(刘刚等,2015);东北冷涡平均位置冬季以南北反相为主(刘德昊和朱伟军,2021),夏季为西北多东南少,年代际变化明显(黄璇和李栋梁,2020)。东北冷涡活动对梅雨(何金海等,2006)、华南降水(苗春生等,2006)和海河流域降水(郝立生等,2023)都有影响。东北

冷涡的强度变化可能与北大西洋涛动和西大西洋遥相关型的位相转换(刘德昊和朱伟军,2021)、贝加尔湖至鄂霍次克海阻塞高压(刘刚等,2015)有关,要素场高低空配置、高空急流强度和干侵入都可能影响东北冷涡的维持和加强(杨钊和王黎娟,2021)。

较早的东北冷涡强度定义关注地面或近地面温度场。何金海等(2006)以东亚地区 1000 hPa 梅雨期平均气温第一模态时间系数的相反数表征梅雨期东北冷涡强度。苗春生等(2006)从中国 160 个台站中选取与东北地区 5—6 月地面温度变率一致的台站,定义其气温均值标准化时间序列的负数为前汛期东北冷涡强度指数。21 世纪 10 年代以来,对东北冷涡强度的研究更关注冷涡的位势高度。杨涵涌等(2012)计算东北冷涡过程每天的冷涡中心 30° – 30° 范围内逐格点位势高度均值,以位势高度均值偏离平均值的程度描述东北冷涡强度。刘刚等(2016)通过计算逐月东北冷涡在 500 hPa 场的平均态,以最外围闭合等值线高度值为阈值,圈内区域为选定区域,统计冷涡日低于阈值格点数的标准化值,定义为冷涡强度指数。胡鹏宇等(2021)定义东北冷涡强度为冷涡外围闭合等值线与中心位势高度差和两倍温度差的和。黄丽君和崔晓鹏(2023)以东北冷涡中心位势高度表达冷涡强度。受太阳辐射等影响,500 hPa 位势高度自身也有年内和日内变化,如果剔除因季节等造成的影响,东北冷涡强度的时空分布特征如何,目前尚未见到相关研究成果。

以往研究大多基于 2.5° – 2.5° 或 1° – 1° 网格点资料开展,缺少更高时空分辨率资料的分析结果(房一禾等,2022)。为更细致地判别和分析东北冷涡,并剔除因季节等造成的背景差异影响,增加不同时间东北冷涡强度的可比性,本文使用 ERA5 再分析数据识别东北冷涡,并定义能够剔除季节影响的冷涡强度指数,分析 1979—2023 年东北冷涡频数、活动范围、强度等特征及其对东北地区气温、降水的影

响,为东北冷涡天气气候研究和预报预测业务发展提供参考。

1 数据与方法

1.1 数据

东北冷涡的客观识别和气候特征统计分析,采用 ECMWF 提供的 ERA5 每日 24 次定时 500 hPa 高度场、温度场再分析资料,水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,时间分辨率为小时,时间为 1979—2023 年,空间范围为 $30^\circ \sim 80^\circ \text{N}$ 、 $90^\circ \sim 170^\circ \text{E}$ 。本文采用空间分辨率为 0.25° 、时间分辨率为小时的资料,对于识别和追踪冷涡更为客观和有效,不易发生冷涡系统遗漏或轨迹间断误判。月气温和降水数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),取自东北区域 40°N 以北、 120°E 以东的 20 个气象台站(图 1),区域平均为 20 个台站的算术平均。

1.2 东北冷涡识别方法

考查 1979—2023 年逐小时 500 hPa 位势高度场和温度场,发现持续 3 d 以上的低涡,仅有极少数是没有冷空气配合的低涡系统。因此本文主要基于位势高度场对东北冷涡进行识别,温度场作为辅助判别条件,例如利用温度场判别是否有暖中心配合以剔除台风等热带气旋系统。

东北冷涡的定义参考国家气候中心东北冷涡监测方法(<http://cmdp.ncc-cma.net>)和 Fang et al (2021)识别方法,冷涡中心活动区域取 $35^\circ \sim 60^\circ \text{N}$ 、

$100^\circ \sim 140^\circ \text{E}$,逐小时监测一次。低涡环流系统要求 500 hPa 天气图上至少存在一条闭合等高线(以 40 gpm 为间隔),最内圈闭合等高线上各点的纬度、经度平均值对应点为低涡中心,如果连续 6 h 内有低涡中心,两个低涡中心南北方向距离 < 7 个纬距,低涡中心西移 < 7 个经距或东移 < 10 个经距,并且中心 3 h 变温的绝对值小于 5°C ,认为是同一个系统。一次东北冷涡过程至少维持 3 d(第一次和最后一次监测到的时间间隔大于等于 72 个时次),间断时间不超过 6 h 判定为连续。监测连续低涡系统路径,如果有暖中心与 30°N 以南移来的系统配合,则判断其为热带气旋中心,剔除相应时次再予以识别。

1.3 东北冷涡生命期

以东北冷涡过程持续时间为生命期,东北冷涡第一次(最后一次)监测出来的时次时冷涡中心对应的位置为生成位置(结束位置)。若某月识别范围内有 n 个东北冷涡过程,则记当月东北冷涡个数为 n ;对于跨年东北冷涡,将其记入该东北冷涡日数较多的那个月,若该东北冷涡在两个月的日数相同,则记为前一个月,年统计同此方法。东北冷涡过程月(年)平均持续时间为月(年)内东北冷涡过程持续时间的平均值。

1.4 东北冷涡强度定义

东北冷涡生命期内,冷涡中心位置水平 10 个经(纬)距范围位势高度均值相对于气候期(1991—2020 年)位势高度距平的标准化值定义为东北冷涡强度指数,为便于理解,取标准化的负值为东北冷涡强度指数。强度指数越大,东北冷涡强度越强。月(年)东北冷涡强度为当月(年)全部东北冷涡强度指数的算术平均,计算步骤如下:(1)基于 500 hPa 逐小时位势高度场得到 1979—2023 年全部东北冷涡过程;(2)统计全部东北冷涡过程中涉及到的冷涡中心记录(时间分辨率为小时);(3)计算每个冷涡中心记录的水平 10 个经(纬)距范围位势高度均值;(4)计算气候期 1991—2020 年分析区域($35^\circ \sim 60^\circ \text{N}$ 、 $100^\circ \sim 140^\circ \text{E}$)每个格点逐小时水平 10 个经(纬)距范围位势高度均值;(5)计算 30 年平均,得到分析区域逐格点、逐小时,水平 10 个经(纬)距范围位势高度均值的气候平均值场,时间序列为 $366(\text{d}) \times 24(\text{h})$,1979—2023 年有 11 个闰年,计算气候平均时非闰年用 365 天代替 366 天;(6)将小时冷涡中心

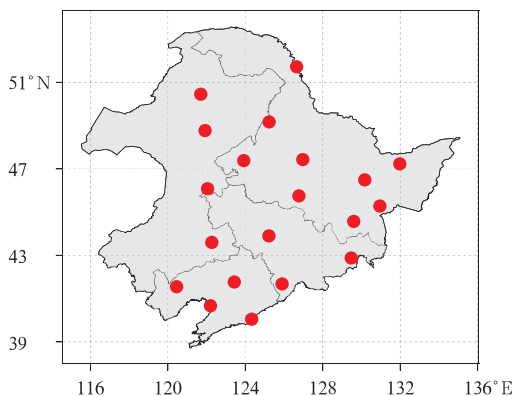


图 1 东北区域气象台站空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of meteorological stations in Northeast China

位势高度均值减去逐小时气候均值,得到冷涡中心位势高度距平值;(7)对全部冷涡中心位势高度距平值做标准化得到标准化值,标准化的负值即是冷涡中心强度指数。逐月东北冷涡强度为月内全部东北冷涡过程冷涡强度的平均值。

2 东北冷涡气候特征

2.1 东北冷涡频数变化

识别出 1979—2023 年东北冷涡 897 个,累计 4591 d;气候平均(1991—2020 年)的东北冷涡频数为每年 20 个,没有明显的变化趋势(图 2a)。20 世纪 90 年代初期和 21 世纪 00 年代中期东北冷涡过程较多,2005 年最多(31 个),其次是 1991 年(29 个)和 1993 年(27 个);21 世纪 00 年代前期和 2010 年代相对较少,2004 年最少(14 个),其次是 1987 年、1989 年和 2015 年,均为 15 个。年内分布暖季多于冷季(图 2b),其中 5—7 月较多(全年占比 40.0%),6 月最多(全年占比 14.8%),3 月最少(全

年占比 4.1%)。

2.2 生命期

东北冷涡过程多年平均(1991—2020 年)持续时间为 106 h,变化趋势不明显,但年际差异较大(图 3a),1992 年最长(126 h),1979 年最短(93 h)。月平均持续时间(图 3b)4 月最短,为 94 h;1 月最长,为 118 h。最长持续时间为 322 h,出现在 1980 年 1 月。

东北冷涡过程持续时间多在 1 周以内(图 4),其中在 80~90 h 的过程最多,超过 240 h 的极少,仅在 1980 年、1991 年、1993 年、2009 年和 2012 年出现过。

2.3 东北冷涡中心位置

东北冷涡中心位置高密度区集中分布在分析区域中部($45^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 、 $115^{\circ}\sim 135^{\circ}\text{E}$),即我国内蒙古东部和黑龙江省以及紧邻黑龙江省的俄罗斯部分区域(图 5)。东北冷涡开始时冷涡中心出现位置频数最多的区域在分析区域西北部($45^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 、 $100^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$),结束时冷涡中心出现位置在分析区域东边

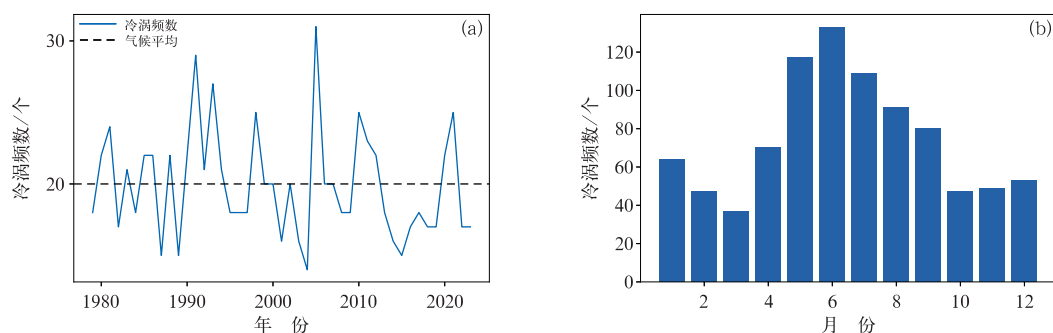


图 2 1979—2023 年东北冷涡频数(a)年、(b)月分布

Fig. 2 Distribution of (a) annual and (b) monthly northeast cold vortex frequencies from 1979 to 2023

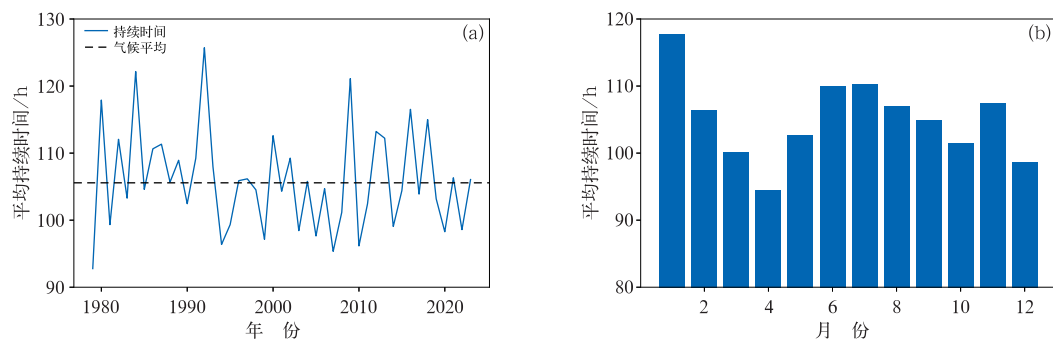


图 3 1979—2023 年东北冷涡过程(a)年、(b)月平均持续时间

Fig. 3 (a) Annual and (b) monthly average durations of northeast cold vortex process from 1979 to 2023

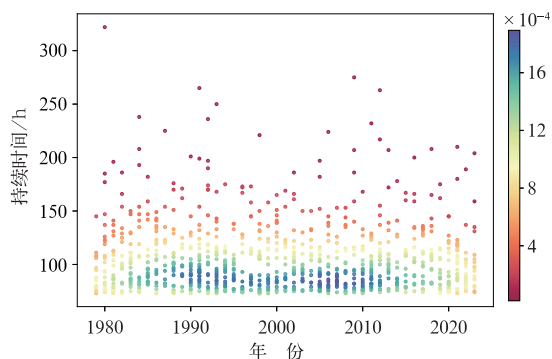


图 4 1979—2023 年东北冷涡持续时间的密度分布

Fig. 4 Density distribution of the duration time of northeast cold vortex from 1979 to 2023

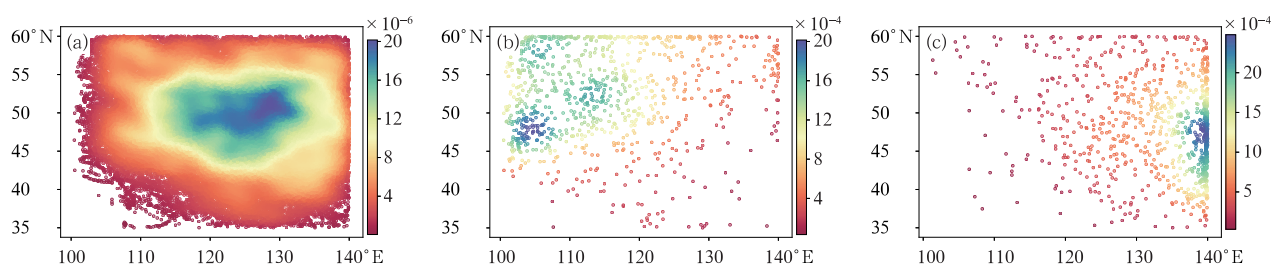


图 5 1979—2023 年分析区域内东北冷涡(a)过程中及(b)生成、(c)结束时逐小时冷涡中心位置密度分布

Fig. 5 Density distribution of center position of northeast cold vortex (a) during the process, and (b, c) at the time of (b) generation and (c) end in the study area from 1979 to 2023

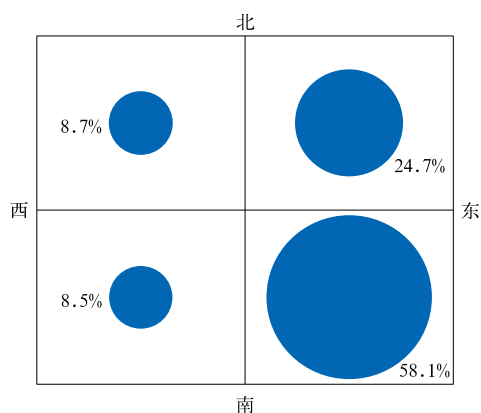


图 6 1979—2023 年东北冷涡结束位置相对生成位置的方向分布

Fig. 6 Azimuth distribution of the end position of northeast cold vortex relative to the generation position from 1979 to 2023

的角度代表东北冷涡逐时移动方向。以东向为 0° , 45° 为间隔(如偏东向, 即 0° 左右各 22.5° 范围), 统计东北冷涡中心移动方向占比为: 偏东向 22.1%, 东北向 6.7%, 偏北向 4.8%, 西北向 7.5%, 偏西向

界附近, 其中在 $40^\circ \sim 55^\circ \text{N}$ 频数最多。

2.4 东北冷涡移动方向和强度

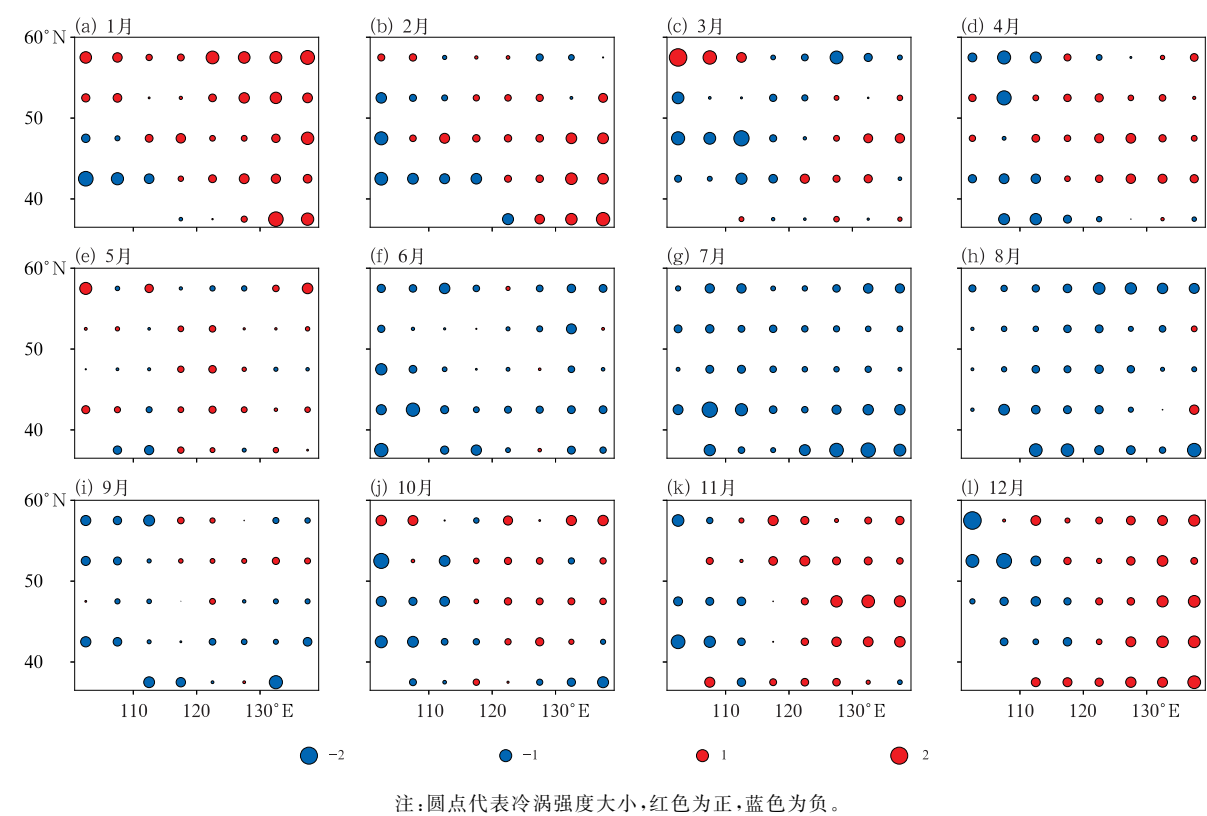
以东北冷涡结束位置相对生成位置的方向表示东北冷涡的移动方向, 如图 6 所示, 分别以第一、二、三、四象限代表东北冷涡向东北、西北、西南和东南方向移动。1979—2023 年, 东北冷涡以向东移动为主, 占比 82.8%, 其中 58.1% 是向东南方向移动, 24.7% 向东北方向移动; 向西移动的东北冷涡占比 17.2%, 其中 8.7% 是向西北方向移动, 8.5% 向西南方向移动。

以东北冷涡中心位置相对前一个时次中心位置

8.4%, 西南向 7.0%, 偏南向 11.8%, 东南向 31.7%。可见, 从东北冷涡逐小时移动方向看, 冷涡中心向偏东、东南、东北方向移动的占比为 60.5%, 向偏南、东南、西南方向移动的占比 50.5%, 而向西、向北移动的冷涡频数则较少。

在 120°E 以东、 40°N 以北区域, 即我国东北和俄罗斯远东地区东部, 属于东亚大槽活跃区, 东北冷涡强度平均偏强, 120°E 以西则偏弱。东北冷涡在分析区域刚出现时, 强度较弱, 随着冷涡东移, 强度逐渐增强。

图 7 为逐月不同网格平均冷涡强度分布。可以看出, 夏季(6—8 月)整个分析区域一致偏弱, 9 月分析区域中部向东北方向延伸偏强, 10 月偏强范围扩大; 11—1 月大部区域偏强, 1 月只有西南部、11—12 月只有西北部偏弱; 2 月西南部强度偏弱范围扩大, 3 月偏弱范围向北部、东部延伸, 4 月又缩小, 5 月东北冷涡强度分布均匀, 分析区域均较强。在空间分布差异方面, 3 月分析区域空间差异最大, 其次是 12 月和 1 月; 6 月空间差异最小, 其次是 5 月和 8 月。



注:圆点代表冷涡强度大小,红色为正,蓝色为负。

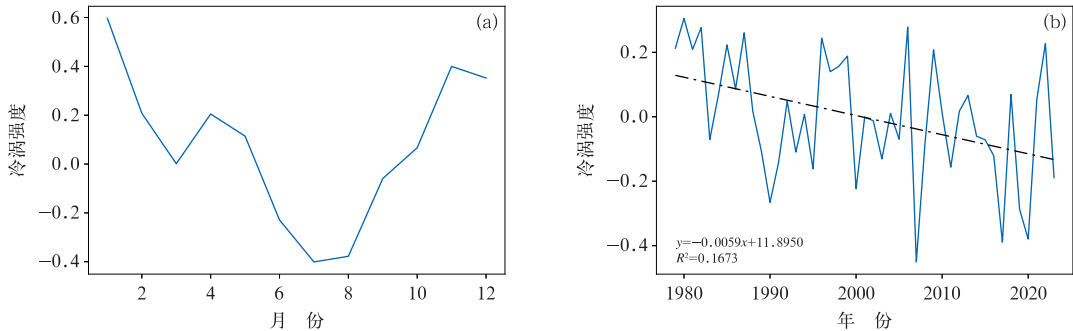
图 7 1979—2023 年逐月东北冷涡强度分布

Fig. 7 Monthly distribution of northeast cold vortex intensity from 1979 to 2023

东北冷涡强度年内分布冷季强于暖季(图 8a),其中 7 月、8 月最弱,其次是 6 月;1 月最强,其次是 11 月、12 月、2 月。1979—2023 年东北冷涡强度呈波动性减弱趋势(图 8b)。从逐月东北冷涡强度趋势系数(图 9)可以看出,3 月、6 月、7 月、9 月、10 月东北冷涡强度表现出减弱趋势,其中 10 月减弱趋势显著,通过 0.05 显著性水平检验[临界值 $P(\alpha = 0.05, n = 45) = 0.2875$];8 月、12 月表现出弱的加

强,其他月份无明显趋势。

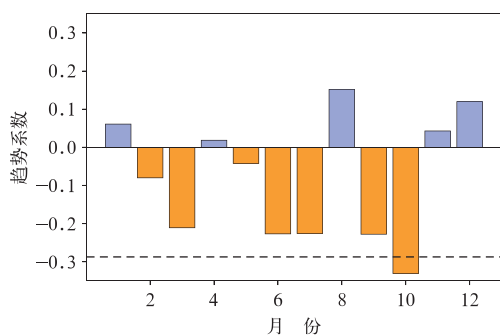
分析东北冷涡环流变化趋势,统计 1979—2023 年东北冷涡 500 hPa 中心位置水平 10 个经纬距范围位势高度梯度、温度梯度和风速大小,结果如图 10 所示,可以看出,年平均的东北冷涡中心位势高度梯度、温度梯度和风速都为显著减小趋势(通过 0.05 显著性水平检验),这进一步表明东北冷涡呈明显减弱趋势。



注:图 b 中虚线为趋势线,通过 0.05 显著性水平检验。

图 8 1979—2023 年东北冷涡强度逐(a)月、(b)年演变

Fig. 8 (a) Monthly and (b) annual evolution of northeast cold vortex intensity from 1979 to 2023



注:虚线为 0.05 显著性水平检验。

图 9 1979—2023 年东北冷涡强度逐月趋势系数

Fig. 9 Monthly trend coefficient of northeast cold vortex intensity from 1979 to 2023

2.5 东北冷涡对东北区域气温和降水的影响

统计东北区域(40°N 以北、 120°E 以东)气象站月降水量、气温与东北冷涡强度的相关系数。东北区域月平均气温与东北冷涡强度相关性较好(图 11),除 5 月和 10 月东北区域月平均气温与东北冷涡强度相关不显著外,其他月份都是显著负相关,东北冷涡强度越强,月平均气温越低。东北区域月平均气温与东北冷涡频数在 1 月、4 月、7 月、12 月负相关显著(图略),东北冷涡活动越频繁,相应月平均气温越低;东北区域月平均气温与东北冷涡日数在月际尺度上无显著相关(图略)。

月平均降水量与东北冷涡强度的相关性较气温偏低(图 12),仅 4 月和 6 月降水量与东北冷涡强度正相关显著,当 4 月或 6 月东北冷涡强度较强时,东北区域降水量易偏多。另外,东北区域 2 月、8 月和 9 月平均降水量与东北冷涡频数正相关显著(图略);各月降水量与东北冷涡日数都无明显相关(图略)。

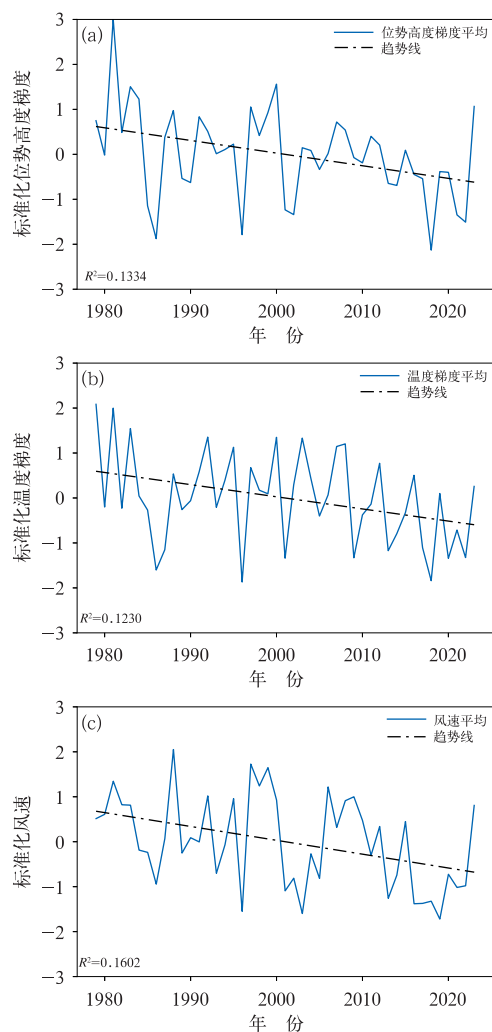
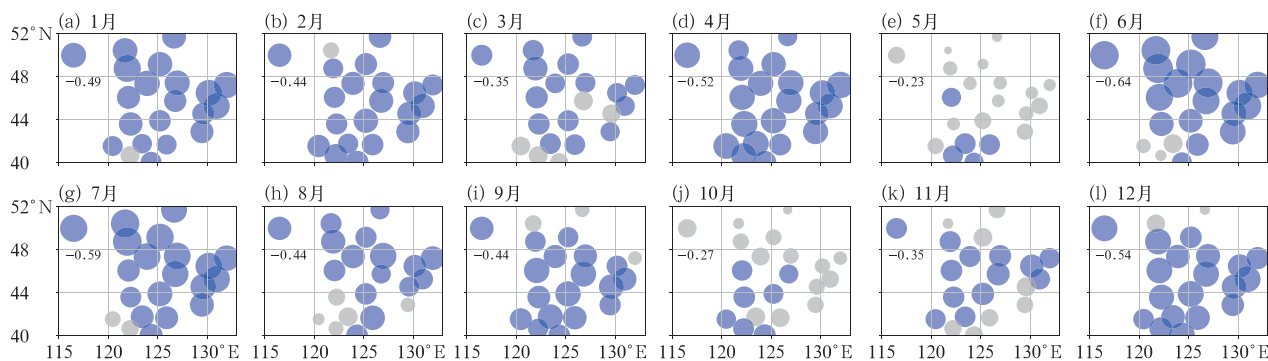


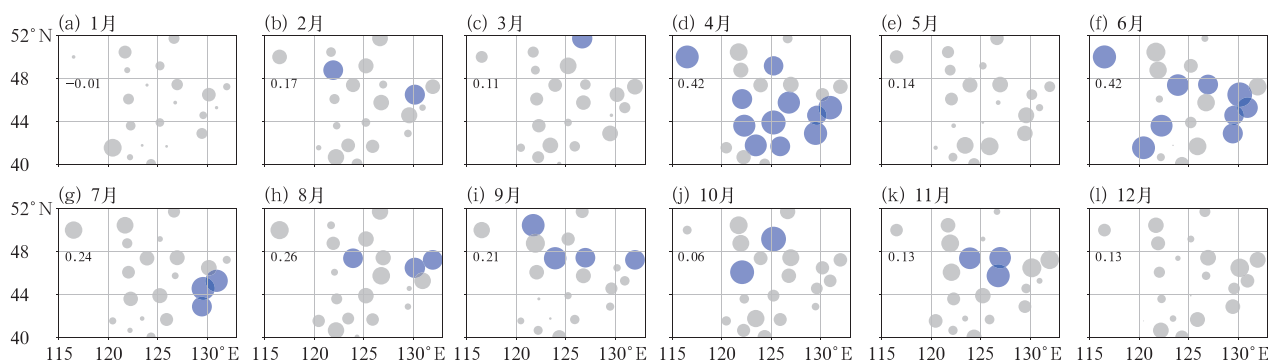
图 10 1979—2023 年东北冷涡中心标准化 (a) 位势高度梯度, (b) 温度梯度和 (c) 风速的变化
Fig. 10 Changes in standardized (a) geopotential height gradient, (b) temperature gradient and (c) wind speed at the northeast cold vortex center from 1979 to 2023



注:灰色圆点为相关不显著,蓝色圆点为负相关显著(通过 0.05 显著性水平检验)。

图 11 1979—2023 年东北区域月平均气温与冷涡强度的相关系数

Fig. 11 Correlation coefficient between monthly average temperature and northeast cold vortex intensity in Northeast China from 1979 to 2023



注:灰色圆点为相关不显著,蓝色圆点为正相关显著(通过0.05显著性水平检验)。

图12 1979—2023年东北区域月平均降水量与冷涡强度的相关系数

Fig. 12 Correlation coefficient between monthly average precipitation and northeast cold vortex intensity in Northeast China from 1979 to 2023

3 讨论

Fang et al(2021)在1979—2018年6月期间识别出118个东北冷涡过程,本文同期识别119个,仅有1个东北冷涡过程的差异,说明东北冷涡的水平尺度较大,使用高分辨率资料并不一定会得到更多的东北冷涡个数,1°和0.25°分辨率造成的差异几乎可以忽略不计,可能在过程开始、结束时间以及开始、结束位置方面会有些差异。

本文分析的东北冷涡年内分布特征,与前人研究的东北冷涡在5月、6月最多以及3月最少的结论(刘刚等,2015;房一禾等,2022)一致。东北冷涡过程持续时间多在1周以内,其中在80~90 h(3~4 d)的过程最多,与已有研究结果(阎琦等,2022;郝立生等,2023)一致。

东北冷涡中心位置频数最多的区域为45°~55°N、115°~135°E,阎琦等(2022)统计指出45°~55°N、120°~130°E区域东北冷涡中心相对密集,刘刚等(2015)统计5—8月东北冷涡活动集中在48°~53°N、121°~131°E,孙力等(2002)研究指出东北冷涡密集区位于大兴安岭背风坡东北平原北部和三江平原,都在本文研究的冷涡频数最多范围内。

本文以逐小时冷涡中心10个经(纬)距范围位势高度相对气候态偏差表征东北冷涡强度,得出冷涡强度冷季强于暖季的结论,黄丽君和崔晓鹏(2023)及阎琦等(2022)研究结果虽然与此结论一致,但相关定义不同。本文通过计算冷涡中心逐小时位势高度相对气候平均值的偏差,去除了500 hPa

背景场时空分布差异的影响,使得东北冷涡强度在时间和空间尺度上有可比性,结果更客观。

4 结论

(1)1979—2023年,东北冷涡频数没有明显的变化趋势,20世纪90年代初期和21世纪00年代中期东北冷涡过程较多,21世纪10年代相对较少。年内分布6月最多,3月最少。东北冷涡平均持续时间4 d,4月最短,1月最长。

(2)东北冷涡开始出现时多位于分析区域的西北部(45°~60°N、100°~120°E),最后出现时多位于分析区域东边界140°E附近的40°~55°N,东北冷涡中心位置主要集中分布在45°~55°N、115°~135°E。东北冷涡以向东和向东南方向移动为主。

(3)以120°E为界,以东的东北冷涡强度平均偏强,以西偏弱;东北冷涡强度年内分布冷季强于暖季,分析区域3月空间差异最大,6月最小。1979—2023年东北冷涡强度减弱趋势显著,年平均东北冷涡中心位势高度梯度、温度梯度和风速减小,即冷涡环流也表现出显著的减弱趋势。

(4)东北冷涡强度与东北区域大多数月份的气温呈显著负相关,东北冷涡强度越强,月平均气温越低;与4月和6月降水量呈显著正相关,东北冷涡强度较强时,东北区域降水量易偏多。2月、8月和9月东北冷涡频数与降水量正相关显著;1月、4月、7月、12月东北冷涡频数与气温负相关显著。

参考文献

才奎志,姚秀萍,孙晓巍,等,2022.冷涡背景下辽宁龙卷气候特征和

- 环境条件[J]. 气象学报, 80(1): 82-92. Cai K Z, Yao X P, Sun X W, et al, 2022. Climatic characteristics and environmental conditions of tornadoes in Liaoning under the background of cold vortex[J]. Acta Meteor Sin, 80(1): 82-92(in Chinese).
- 曹艳察, 郑永光, 孙继松, 等, 2024. 东北冷涡背景下三类区域性强对流天气过程时空分布和环境特征对比分析[J]. 气象学报, 82(1): 22-36. Cao Y C, Zheng Y G, Sun J S, et al, 2024. Spatiotemporal distributions and environmental characteristics of three types of regional severe convective weather processes associated with the Northeast China cold vortex[J]. Acta Meteor Sin, 82(1): 22-36(in Chinese).
- 范子琪, 朱科锋, 薛明, 2023. 4—9月东北大陆型冷涡消亡方式及其统计特征[J]. 气象学报, 81(5): 727-740. Fan Z Q, Zhu K F, Xue M, 2023. Decay processes and statistical characteristics of continental Northeast China cold vortex from April to September[J]. Acta Meteor Sin, 81(5): 727-740(in Chinese).
- 房一禾, 赵春雨, 李杨, 等, 2022. 东北冷涡气候研究进展及展望[J]. 气象与环境学报, 38(1): 92-99. Fang Y H, Zhao C Y, Li Y, et al, 2022. A review on climatological research of cold vortex in Northeast China[J]. J Meteor Envir, 38(1): 92-99(in Chinese).
- 郝立生, 何丽烨, 马宁, 2023. 东北冷涡气候特征及其对海河流域夏季降水的影响[J]. 气象学报, 81(4): 559-568. Hao L S, He L Y, Ma N, 2023. Climatic characteristics of northeast cold vortex and its impact on summer precipitation in the Haihe River Basin[J]. Acta Meteor Sin, 81(4): 559-568(in Chinese).
- 何金海, 吴志伟, 江志红, 等, 2006. 东北冷涡的“气候效应”及其对梅雨的影响[J]. 科学通报, 51(23): 2803-2809. He J H, Wu Z W, Jiang Z H, et al, 2006. “Climate effect” of the northeast cold vortex and its influences on Meiyu[J]. Chin Sci Bull, 51(23): 2803-2809(in Chinese).
- 胡开喜, 陆日宇, 王东海, 2011. 东北冷涡及其气候影响[J]. 大气科学, 35(1): 179-191. Hu K X, Lu R Y, Wang D H, 2011. Cold vortex over Northeast China and its climate effect[J]. Chin J Atmos Sci, 35(1): 179-191(in Chinese).
- 胡鹏宇, 陈传雷, 林海峰, 等, 2021. 东北冷涡强度定义及特征分析[J]. 气象与环境学报, 37(6): 100-105. Hu P Y, Chen C L, Lin H F, et al, 2021. Definition and characteristics analysis of the intensity of northeast cold vortex[J]. J Meteor Envir, 37(6): 100-105(in Chinese).
- 黄丽君, 崔晓鹏, 2023. 2000—2019年东北冷涡统计特征及其影响期间的降水分布[J]. 大气科学, 47(6): 1925-1938. Huang L J, Cui X P, 2023. Statistical characteristics of the Northeast China cold vortex and its impact on precipitation distribution from 2000 to 2019[J]. Chin J Atmos Sci, 47(6): 1925-1938(in Chinese).
- 黄璇, 李栋梁, 2020. 1979—2018年5—8月中国东北冷涡建立的客观识别方法及变化特征[J]. 气象学报, 78(6): 945-961. Huang X, Li D L, 2020. Objective identification method and variation characteristics of the Northeast China cold vortex from May to August of 1979—2018[J]. Acta Meteor Sin, 78(6): 945-961(in Chinese).
- 刘德昊, 朱伟军, 2021. 冬季东北冷涡的时空变化特征[J]. 气象科学, 41(3): 331-338. Liu D H, Zhu W J, 2021. Temporal and spatial variation characteristics of northeast cold vortex in winter[J]. J Meteor Sci, 41(3): 331-338(in Chinese).
- 刘刚, 廉毅, 颜鹏程, 等, 2015. 5—8月东北冷涡客观识别分类及北半球大气环流特征分析[J]. 地理科学, 35(8): 1042-1050. Liu G, Lian Y, Yan P C, et al, 2015. The objective recognition and classification of northeast cold vortex and the Northern Hemisphere atmospheric circulation characters in May to August[J]. Sci Geogr Sin, 35(8): 1042-1050(in Chinese).
- 刘刚, 王宁, 秦玉琳, 等, 2016. 5—6月东北冷涡持续活动及强度特征[J]. 应用气象学报, 27(1): 47-55. Liu G, Wang N, Qin Y L, et al, 2016. Characteristics of persistent activity and strength of cold vortex during May and June in Northeast China[J]. J Appl Meteor Sci, 27(1): 47-55(in Chinese).
- 苗春生, 吴志伟, 何金海, 等, 2006. 近50年东北冷涡异常特征及其与汛期华南降水的关系分析[J]. 大气科学, 30(6): 1249-1256. Miao C S, Wu Z W, He J H, et al, 2006. The anomalous features of the northeast cold vortex during the first flood period in the last 50 years and its correlation with rainfall in South China[J]. Chin J Atmos Sci, 30(6): 1249-1256(in Chinese).
- 齐铎, 袁美英, 周奕含, 等, 2020. 一次东北冷涡过程的结构特征与降水关系分析[J]. 高原气象, 39(4): 808-818. Qi D, Yuan M Y, Zhou Y H, et al, 2020. Analysis of the relationship between structures of a cold vortex process and rainfall over the Northeast China[J]. Plateau Meteor, 39(4): 808-818(in Chinese).
- 石晨, 翟盘茂, 廉毅, 2023. 高空切断冷涡研究进展[J]. 气象, 49(5): 513-524. Shi C, Zhai P M, Lian Y, 2023. Advances in research of upper level cut-off cold vortex[J]. Meteor Mon, 49(5): 513-524(in Chinese).
- 孙力, 安刚, 高枫亭, 等, 2002. 1998年夏季嫩江和松花江流域东北冷涡暴雨的成因分析[J]. 应用气象学报, 13(2): 156-162. Sun L, An G, Gao Z T, et al, 2002. A composite diagnostic study of heavy rain caused by the northeast cold vortex over Songhuajiang-Nenjiang River Basin in summer of 1998[J]. J Appl Meteor Sci, 13(2): 156-162(in Chinese).
- 陶诗言, 1980. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社: 225. Tao S Y, 1980. Rainstorm in China[M]. Beijing: Science Press: 225(in Chinese).
- 吴海英, 孙继松, 慕瑞琪, 等, 2023. 一次强对流过程中两种不同类型风暴导致的极端对流大风分析[J]. 气象学报, 81(2): 205-217. Wu H Y, Sun J S, Mu R Q, et al, 2023. Analysis of extreme convective gusts caused by two types of weather storms during a strong convection event[J]. Acta Meteor Sin, 81(2): 205-217(in Chinese).
- 阎琦, 李爽, 陆井龙, 等, 2022. 1979—2019年持续性东北冷涡过程特征分析[J]. 气象与环境学报, 38(2): 40-45. Yan Q, Li S, Lu J L, et al, 2022. Characteristics of the continuous cold vortex over Northeast China from 1979 to 2019[J]. J Meteor Environ, 38(2): 40-45(in Chinese).
- 杨铸, 王黎娟, 2021. 5—9月不同类型东北冷涡的统计特征及成因[J]. 大气科学学报, 44(5): 773-781. Yang B, Wang L J, 2021.

- Statistical characteristics and causes of different types of north-east cold vortex from May to September[J]. *Trans Atmos Sci*, 44(5):773-781(in Chinese).
- 杨涵涌,封国林,沈柏竹,等,2012. 中国夏季东北冷涡强度的定量分析[J]. *大气科学*, 36(3):487-494. Yang H W, Feng G L, Shen B Z, et al, 2012. The quantitative research on cold vortex in summer over Northeast China[J]. *Chin J Atmos Sci*, 36(3):487-494(in Chinese).
- 杨吉,郑媛媛,夏文梅,等,2020. 东北冷涡影响下江淮地区一次飑线过程的模拟分析[J]. *气象*, 46(3):357-366. Yang J, Zheng Y Y, Xia W M, et al, 2020. Numerical analysis of a squall line case influenced by northeast cold vortex over Yangtze-Huaihe River Valley[J]. *Meteor Mon*, 46(3):357-366(in Chinese).
- 杨旭,涂钢,李尚锋,等,2023. 基于人工识别的1961—2020年东北冷涡活动特征分析[J]. *气象灾害防御*, 30(1):25-30. Yang X, Tu G, Li S F, et al, 2023. Analysis of activity characteristics of northeast cold vortex based on artificial recognition from 1961 to 2020[J]. *Meteor Dis Prev*, 30(1):25-30(in Chinese).
- 郑永光,蓝渝,曹艳察,等,2020. 2019年7月3日辽宁开原EF4级强龙卷形成条件、演变特征和机理[J]. *气象*, 46(5):589-602. Zheng Y G, Lan Y, Cao Y C, et al, 2020. Environmental conditions, evolution and mechanisms of the EF4 tornado in Kaiyuan of Liaoning Province on 3 July 2019[J]. *Meteor Mon*, 46(5):589-602(in Chinese).
- 郑永光,宋敏敏,2021. 冷涡影响中国对流性大风与冰雹的分布特征[J]. *热带气象学报*, 37(5/6):710-720. Zheng Y G, Song M M, 2021. Analysis of influence of cold vortexes on distribution of convective high winds and hail in China[J]. *J Trop Meteor*, 37(5/6):710-720(in Chinese).
- Fang Y H, Chen H S, Lin Y, et al, 2021. Classification of Northeast China cold vortex activity paths in early summer based on k-means clustering and their climate impact[J]. *Adv Atmos Sci*, 38(3):400-412.
- He J H, Wu Z W, Jiang Z H, et al, 2006. "Climate effect" of the northeast cold vortex and its influences on Meiyu[J]. *Chin Sci Bull*, 52(5):671-679.
- Lin Y T, Fang Y H, Zhao C Y, et al, 2023. The coordinated influence of Indian Ocean sea surface temperature and Arctic sea ice on anomalous Northeast China cold vortex activities with different paths during late summer[J]. *Adv Atmos Sci*, 40(1):62-77.

(本文责编:侯翠梅)