

冬季东北冷涡多尺度特征及其季节内振荡

对东北-华北地区极端低温的影响

王辰¹ 高庆九¹ 徐祺辉¹ 方紫璇²

1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心/大气科学学院,
南京 210044

2 淮南市气象台, 淮南 232007

摘要 东北冷涡作为东亚中高纬大气环流的重要成员, 对我国东北、华北地区气温和降水具有重要的影响。采用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的 ERA5 逐日再分析数据集, 本文对 1979-2020 年冬季东北冷涡展开客观识别, 探讨其生命期、强度、空间分布以及活动日数等气候特征, 定义冷涡指数分析冷涡活动多尺度特征, 并基于该指数使用 SVD 和回归分析讨论东北冷涡在季节内尺度对我国东北-华北地区 (39°N - 54°N , 115°E - 135°E) 冬季温度的影响。结果发现, 42 年间冬季在识别区内 (35°N - 60°N , 115°E - 145°E) 共出现 266 次东北冷涡活动过程, 主要位于识别区的北部 (45°N - 60°N , 115°E - 145°E), 平均生命期为 4.3d; 冬季东北冷涡强度和冷涡指数均反映出 1 月和 2 月冷涡强度在前后 21 年发生转折, 在 2000 年以前 1 (2) 月冷涡强度较强 (弱), 2000 年以后 1 (2) 月冷涡强度较弱 (强); 冷涡活动存在明显的年际变化特征, 冷涡指数的变化周期为 2-3a, 季节内振荡周期则以 10-40 d 为主。时滞回归分析表明, 在低频冷涡发展阶段, 北半球中高纬度地区存在两支低频波列, 至第 0d 时, 乌拉尔山地区至东北亚到日本以东地区上空存在一支纬向“+、-、+”的低频波列, 而东亚高纬度地区与极地地区经向波列完成了类似 AO 从正位相到负位相的转变, 其上游乌拉尔山地区以及下游鄂霍次克海至日本以东太平洋地区形成低频双阻塞形势, 使得低频冷涡在此能够长久维持, 造成东北、华北地区持续的降温, 且东北-华北地区低频低温的发生落后于低频东北冷涡 3-5d 左右。

关键词 东北冷涡 冬季 多尺度 极端低温

中图分类号 P434

文献标志码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2411.24078

The Multiscale Features of Boreal Winter Northeast Cold Vortex and Its Intraseasonal oscillations' Influence on Extreme Low Temperatures in the Northeast-North China Region

收稿日期 2024-7-18; **网络预出版日期**

作者简介 王辰, 男, 1999 年 2 月出生, 硕士研究生, 主要从事极端低温事件和季节内振荡研究。E-mail: wchen990223@163.com

通讯作者 高庆九, E-mail: gaoqj@nuist.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 42075032

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 42075032)

Wang Chen¹, Gao Qingjiu¹, Xu Qihui¹, Fang Zixuan²

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD)/ College of Atmospheric Sciences, Nanjing 210044

2 Huainan Meteorological Observatory, Huainan 232007

Abstract The Northeast Cold Vortex (NECV), as an important component of the East Asian mid- to high-latitude atmospheric circulation, has a significant impact on temperature and precipitation in Northeast and North China. Utilizing the ERA5 daily reanalysis dataset provided by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), an objective identification is carried out to obtain the Northeast Cold Vortex (NECV) during the winter season from 1979 to 2020 and the life cycle, intensity, spatial distribution, and number of active days of NECV are explored. Furthermore, an Index of Northeast Cold Vortex (NECVI) is defined to analyze the multiscale features of NECV activity. Based on NECVI, Singular Value Decomposition (SVD) and regression analyses were performed to examine the influence of NECV on winter temperatures in Northeast and North China on intraseasonal scale. Results showed that over the 42 years, there were a total of 266 occurrences of NECV activity during the winter season within the identification area (35°N -60°N, 115°E -145°E), mainly located in the northern part of the identification area (45°N-60°N, 115°E-145°E), with an average life cycle of 4.3 days. The intensity of the winter NECV and the NECVI both indicate a reversal in cold vortex strength in January and February over the past 21 years, before 2000, the cold vortex intensity in January was stronger and in February weaker, while after 2000, the intensity in January was weaker and in February stronger. There is significant interannual variability in cold vortex activity, with a change period of 2-3 years for the cold vortex index, while the intraseasonal oscillation period for the winter NECV mainly ranges from 10 to 40 days. Time-lag regression indicates that during the development phase of the low-frequency cold vortex, two low-frequency wave trains are present in the mid-to-high latitudes of the Northern Hemisphere. At day 0, a zonal low-frequency wave train with a “+,-,+” configuration is located in the upper atmosphere from the Ural Mountains across Northeast Asia to areas east of Japan. Simultaneously, a transition resembling a shift in the Arctic Oscillation (AO) from a positive to a negative phase occurs between the high-latitude regions of East Asia and the polar regions. This pattern establishes a low-frequency double-blocking structure, with blocking features over the Ural Mountains upstream and over the Sea of Okhotsk and the western North Pacific downstream. This configuration enables the low-frequency cold vortex to persist, leading to sustained cooling in Northeast and North China. And the occurrence of low-frequency cold temperatures in the Northeast and North China region lags the low-frequency NECV by about 3-5 days.

Keywords Northeast Cold vortex (NECV), Boreal Winter, Multiscale, Extreme low temperature

64 引言

65 切断低压 (cut-off low) 是高空西风气流波动加深期间, 纬向气流向低纬度方向分离成
66 孤立、闭合的冷性低压系统, 一般可以维持数天甚至长达两周之久, 其中频发于东北亚区
67 (Nieto et al., 2005; 石晨等, 2020) 的切断低压对我国天气有重要影响。一般将出现在我国
68 东北地区 (35°N - 60°N , 115°E - 145°E) 的切断低压称之为东北冷涡 (孙力等, 1994)。

69 东北冷涡活动一年四季均可发生, 主要发生在春末夏初, 冬季次之 (Hu et al., 2010; Fang
70 et al., 2022; 郝立生等, 2023)。王迪等 (2018) 通过定义夏季冷涡指数来探讨冷涡活动的
71 变化, 发现初夏东北冷涡强度表现出明显的年代际变化特征, 2000 年前, 冷涡活动总体偏
72 强, 之后总体减弱。阎琦等 (2022) 通过对近 41 年冷涡活动进行分析, 发现全年冷涡频次
73 存在 17a、9、5a 以及 3a 的变化周期。东北冷涡活动不但会造成东北-华北地区夏季低温,
74 降水异常和对流性天气, 给人民生活 and 农业生产带来重大影响, 还会对江淮梅雨以及华南前
75 汛期降水造成影响 (何金海等, 2006; 王丽娟等, 2010; Liu et al., 2019; Fang et al., 2021;
76 李玥瑶等, 2024), 气候效应明显。孙力 (1997) 指出, 500 hPa 等压面上东北冷涡活动的
77 主要区域是大气准双周振荡较活跃的地区, 而刘慧斌等 (2012) 发现夏季东北冷涡季节内振
78 荡周期以 10-30 d 为主, 与东北冷涡活动相关的大气环流的 10-30d 振荡和我国东部夏季降水
79 异常具有明显的锁关系。

80 相较于夏季, 尽管冬季冷涡活动相对较少, 但其生命期更长, 结构更为稳定, 对于东亚
81 地区局地的天气产生更长时间的影响 (黄丽君和崔晓鹏, 2023); 冬季的东北冷涡与全国大
82 部分地区的气温为显著负相关关系 (刘德昊和朱伟军, 2021), 我国北方地区冬季极端低温
83 发生时常伴随有很强的冷涡活动 (石晨等, 2020; 刘明歆等, 2021; 谭赢等, 2022)。不同
84 强度的东北冷涡对东亚地表气温的影响有所不同, 其活动持续时间越长, 强度越强, 则低温
85 事件越频发, 持续时间越长, 反之亦然 (胡开喜等, 2011; Xie and Bueh, 2015; Zhuo et al., 2022)。

86 以往对东北冷涡的研究大多集中在夏季。然而近年来全球变暖背景下, 由极端低温造成
87 的气象灾害更为凸显 (周波涛等, 2021; 朱万林等, 2022), 鉴于东北冷涡对温度变化的显
88 著影响, 本文利用近 42 年再分析数据, 对冬季东北冷涡进行客观的识别与追踪, 讨论冬季
89 东北冷涡活动的频数、持续时间、强度及其时空分布特征, 探讨冬季东北冷涡多时间尺度特
90 征及其对冬季温度的影响, 分析冬季冷涡所对应的季节内尺度环流特征及其对东北-华北地
91 区极端低温的影响。本文结构如下: 引言, 资料和方法, 冬季东北冷涡多尺度特征, 东北
92 冷涡低频变化与低温的关系, 结论与讨论。

93 1. 资料与方法

94 1.1. 资料

95 (1) 逐日最低气温 (Tmin): 来自中国地面最低气温日值 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 格点数据集 (V2.0),
96 该数据集是基于中国 2472 个国家级地面气象站基本气象要素得到的。

(2) 降水资料: 由吴杰和高学杰 (2013) 利用中国境内 2400 余站的观测资料, 使用距平逼近法, 由气候场和距平场分别插值后叠加得到的逐日观测数据, 水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。

(3) 环流场: 欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 提供的 ERA5 逐小时再分析资料 (Hersbach et al., 2020), 进一步处理成逐日数据, 水平空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, 所用物理量包括 500hPa 位势高度场和温度场以及 2m 气温。

冬季定义为当年 12 月-次年 2 月 (2 月取 28 天), 考虑到滤波在边界上产生的截断误差, 因此我们在更长的时间范围, 即对 1979-2021 年逐日数据进行滤波, 而后筛选出滤波后的冬季数据。本文中原始场资料的时间均为 1979 年 1 月-2021 年 12 月, 共 42 年。

1.2. 低温阈值的定义

本研究采用百分位法计算低温阈值, 由于研究的时间跨度较大, 冬季为当年 12 月-次年 2 月, 共 3 个月, 故采用日阈值的方法作为判定低温日 (当天最低气温-阈值 (TMSTH) ≤ 0) 的标准。

日阈值定义: 参考 Peng and Bueh (2011) 对阈值的定义, 将每个格点某日及其前后各 2 天 (共 5 天) 的日最低气温连起来, 得到样本数为 5 天 $\times$ 42 年的序列, 按升序排列, 取第 10 百分位值作为此网格点当天的极端低温阈值 (2 月取 28 天)。

1.3. 东北冷涡客观识别方法

依据孙力等 (1994) 提出的东北冷涡定义, 并参考 Hu et al. (2010) 提出的东北冷涡 (Northeast Cold Vortex, NECV) 客观识别方法, 考虑到所用再分析资料时空分辨率的差异及东北冷涡的水平尺度, 本文在 Hu et al. (2010) 的识别标准基础上, 对识别区 (35° - 60° N, 115° - 145° E) 范围内 500hPa 高度场的判断新增一条要求, 即冷涡中心向外递增的格点数至少为 2 个, 同时将冷涡移动速度改为小于 10 经度/d, 其余识别标准与 Hu et al (2010) 一致。

据此通过客观识别得到 1979-2020 年冬季东北冷涡数据 (表 1), 为了验证该冷涡客观识别结果, 将客观识别所得到的暖季 (5-9 月) 东北冷涡数据 (略) 与根据观测资料识别的暖季冷涡日历表进行对比。以 2008-2017 年暖季为例, 10 年暖季共识别出 724 d 东北冷涡活动, 冷涡日历表共计 614 d, 二者相同日期内的冷涡活动共计 402 d, 实际观测得到的冷涡日历表中超过 65% 的东北冷涡与客观识别的结果基本一致; 在日历表 129 次冷涡活动过程中共计重合 98 次, 超过 75% 的实际观测得到的冷涡活动被客观识别出来。尽管客观识别的冷涡与实际观测得到的冷涡存在少部分差异, 但考虑到实际观测与再分析资料的不同, 并且实际观测时间间隔为 12h, 而本文冷涡客观识别的时间间隔为 1d, 仍可以说明本法能够较好的客观识别东北冷涡。以 2008 年为例, 在同一时间段内客观识别所得到的冷涡中心经度 (纬度) 与实际观测得到的冷涡中心经度 (纬度) 二则相关系数为 0.82 (0.76), 均通过了 $\alpha=0.01$ 的统计检验。

进一步对客观识别所得冬季冷涡活动日数与中国同期 2m 气温、降水进行相关分析 (图 1), 结果表明, 当冬季冷涡频发时, 我国大部分地区表现为低温少雨, 尽管所选择的年份

有所差异，但整体相关性以及通过 90%信度水平的地区与胡开喜等（2011），刘德昊和朱伟军（2021）的研究结果基本一致。以上分析说明本文对东北冷涡客观识别结果合理。

表 1 1979-2020 年冬季东北冷涡数据（强度单位为：dagpm）

Table 1 Dataset of NECV of winter season from 1979 to 2020 (units: dagpm)

序号	出现时间	生成位置	中心强度	消失时间	结束位置	中心强度
1	1980/01/04	(55°N,132°E)	491	1980/01/13	(51°N,127°E)	498
2	1980/01/15	(50°N,123°E)	501	1980/01/20	(47°N,131°E)	507
3	1980/01/30	(56°N,141°E)	516	1980/02/03	(51°N,139°E)	502
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
264	2021/01/30	(58°N,124°E)	501	2021/02/02	(53°N,134°E)	486
265	2021/02/13	(56°N,122°E)	514	2021/02/15	(56°N,124°E)	509
266	2021/02/22	(57°N,128°E)	509	2021/02/25	(51°N,134°E)	515

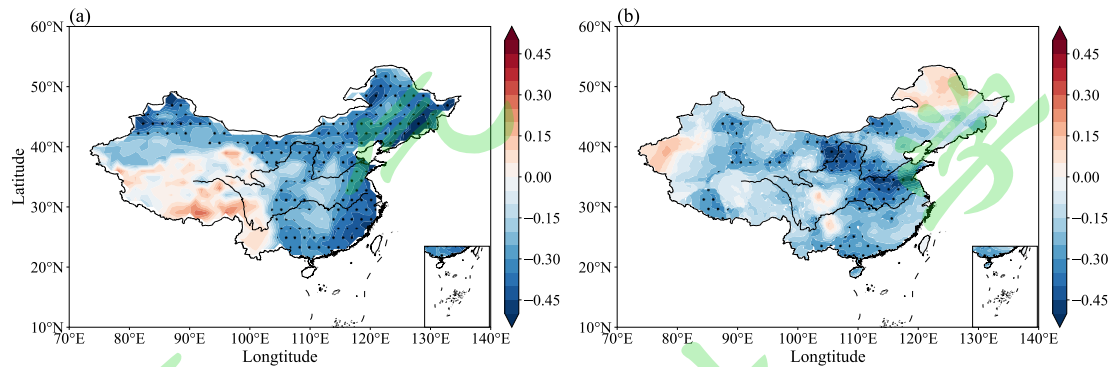


图 1 1979-2020 年冬季东北冷涡活动日数与同期 2m 气温（a）、降水（b）相关系数分布，（打点表示通过 90%的置信水平）。

Fig.1 Distribution of correlation coefficients between the number of NECV days and winter temperature (a) and precipitation (b) from 1979 to 2020. (Dotted areas denote pass the 90% confidence level.)

2. 冬季东北冷涡活动气候特征

由上节冷涡客观识别方法，在 1979-2020 年冬季（12-2 月）共识别出 266 次东北冷涡活动过程，冷涡活动日数共计 1151 d。在此基础上，对识别区域冬季东北冷涡活动特征进行分析。

2.1. 冷涡生命期

近 42 年冬季，东北冷涡活动过程的平均持续时间约 4.3 d，81.6%的冷涡生命期为 3-5 d（图 2a），其中生命期为 3 d 的冷涡频次为 116 次，占比总冷涡频次 43.6%左右，只有约 10.5%左右的冷涡活动生命期为 7 d 及以上，说明东北冷涡属于天气尺度系统，具有一定的准静止性。除生命期为 9-10 d 的冷涡，整体来看冬季东北冷涡生命期越长，其发生频次越少，结论与黄丽君和崔晓鹏（2023）研究结果一致。最长生命期冷涡发生在 12 月，可达 12 d，仅出现一次。从月际变化来看（图 2b），1 月份冷涡发生频次最高，共计 101 次，12 月最少，

仅 81 次。此外 1 月生命期达 7 d 及以上的东北冷涡占比最高，共计 17 次，占 1 月份总冷涡频次的 16.8%，因此 1 月东北冷涡平均生命期最长，平均时长约 4.6 d。尽管 2 月生命期达 7 d 以上的东北冷涡（6 次）略高于 12 月（5 次），但由于最长生命期的冷涡出现在 12 月，因此 12 月冷涡平均生命期（4.20 d）略高于 2 月（4.17 d）。

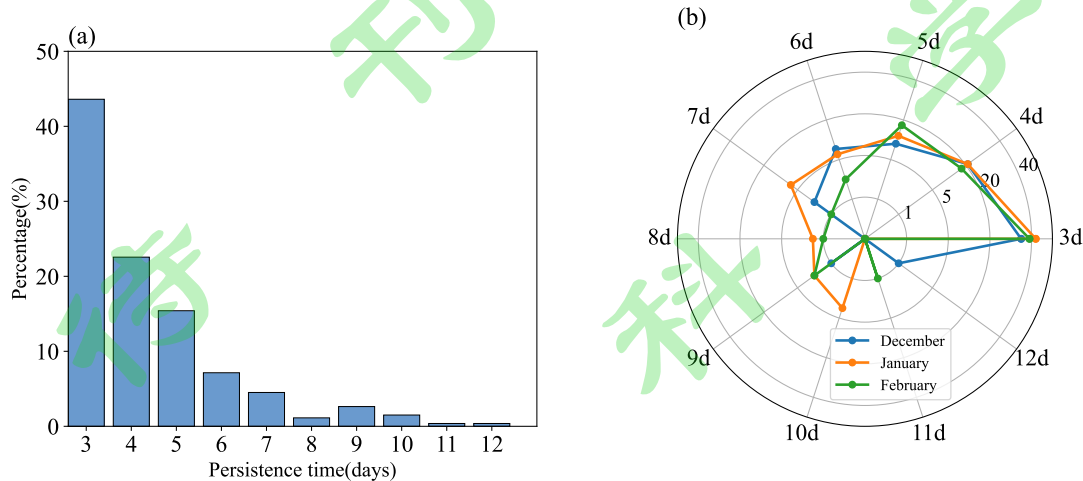


图 2 (a) 1979-2020 年冬季东北冷涡不同生命期的占比分布。(b) 不同生命期频次的月际变化。
Fig. 2 (a)Percentage of different lifetimes of winter NECV (b) Inter-monthly variation in the frequency of winter NECV with different lifetimes from 1979 to 2020.

2.2. 冷涡频次和活动日数

在 1979-2020 年冬季，冷涡频次和活动日数具有明显的年际变化特征。平均而言，每年冬季会出现约 6.3 次东北冷涡活动过程，活动日数大多在 20-35 d 之间，年平均活动日数约 27.4 d，冬季近 1/3 的天数受到东北冷涡的影响，表明东北冷涡是东北亚地区重要的环流系统之一。其中 1985 年冬季冷涡活动日数最多，共 50 d（12 次），1988 年冬季冷涡活动日数最少，仅 10 d（3 次）。

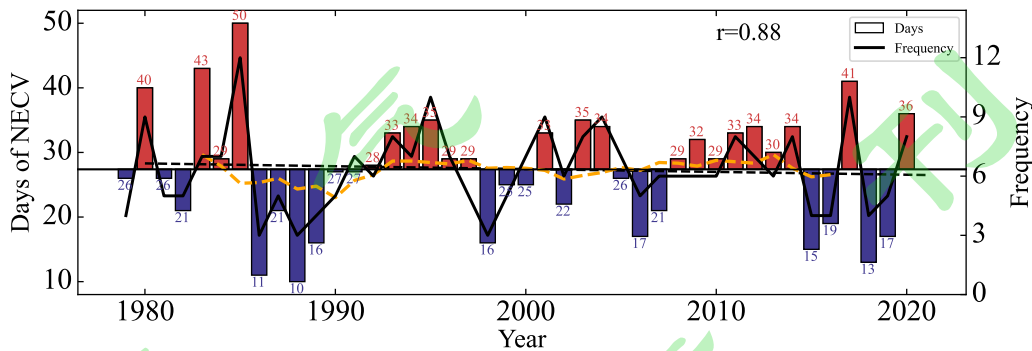


图 3 1979-2020 年冬季东北冷涡活动日数（柱状）及频次（黑色线）（黑色虚线：日数线性趋势；黄色虚线：日数的九年滑动平均）。
Fig. 3 The number of the winter NCEV activity days (bars) and frequency (black line) from 1979 to 2020. (black dashed line denotes the linear trend of the activity days; yellow dashed line denotes the 9-year moving average of the activity days).

冬季东北冷涡的出现频次和活动日数没有显著的长期变化趋势（图 3）；从 9 年滑动平均来看，仅 1992 年之前冷涡活动日数表现为明显的偏少，此后年代际特征不明显；冷涡活动日数与频次的标准差分别为 8.8、2.0，说明冷涡频次和活动日数呈现明显的年际变化特征，且两者的年际变化具有较好的一致性，相关系数为 0.88，置信水平超过了 99%，而图（1a）也表明冷涡日数与我国东部气温有存在明显的负相关关系，年际尺度上东北冷涡对低温事件有较大的影响。

2.3. 冷涡强度

将冷涡中心位势高度值定义为冷涡强度。可以发现随着季节的变化，一年之中冬季东北冷涡强度最强（图略）；1979-2020 年间，冬季东北冷涡最强为 478.3 dagpm，最弱为 540.3 dagpm，平均强度约为 507.4 dagpm，其中 75% 的冷涡强度超过 513.9 dagpm（图 4）。从月际变化来看，冷涡最强月份为 1 月，平均强度约为 506.6 dagpm。且冬季东北冷涡强度存在不满足正态分布的异常值，异常偏弱冷涡的数量要明显多于异常偏强冷涡数量，通过对异常偏弱冷涡活动过程逐个例检查，发现异常偏弱冷涡大部分发生在研究时段的后期，因此有可能全球变暖是影响原因之一。

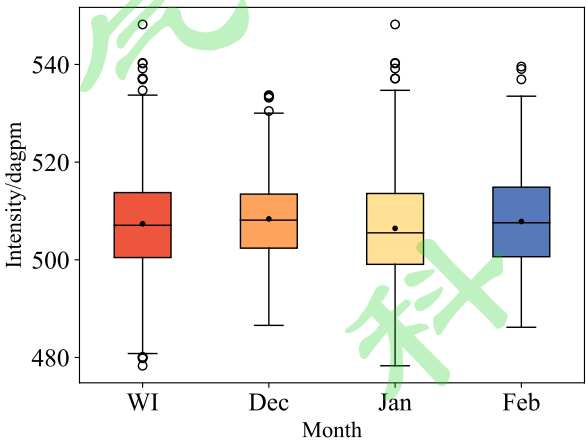


图 4 1979-2020 年冬季东北冷涡强度（单位：dagpm）箱形图分布。图中最上（下）的横线表示估计最（小）值，矩形框上（下）边界表示 75（25）百分位，矩形框外圆点表示异常值，矩形框中间横线（圆点）表示中位数（平均值）。

Fig. 4 Box plot distribution of the intensity of the winter NCEVs (units: dagpm) from 1979 to 2020. The top (bottom) horizontal line indicates the estimated maximum (minimum) value, the upper (lower) boundary of the rectangle represents the 75th (25th) percentile, the dots outside the rectangle signify outliers, and the horizontal line (dot) inside the rectangle denotes the median (mean) value.

表 2 1979-2020 年冬季东北冷涡强度均值（单位：dagpm）

Table 2 Averaged intensity of winter NECVS from 1979 to 2020 (units: dagpm).

	1979-2020 年均值	1979-1999 年均值	2000-2020 年均值
冬季	507.3	507.6	507.2
12 月	508.4	510.0	507.0
1 月	506.6	503.6*	509.6*
2 月	507.3	511.2**	503.6**

注：*、**分别代表通过百分之 90、95 的置信水平

1979-2020 年冬季及其各月东北冷涡强度具有明显的年际变化特征（图略），其中 1992 年平均冬季冷涡强度最弱（513.9 dagpm），1998 年平均冬季强度最强（499.7 dagpm）。42 年平均而言，1 月冷涡强度最强，这与前文的研究结果一致。有意思的是，在 1979-2020 年冬季的前后 21 年里，1 月和 2 月冷涡强度发生了转折，即在 1979-1999 年冬季期间 1（2）月冷涡强度较强（弱），2000-2020 年冬季期间 1（2）月冷涡强度较弱（强）（表 2），而冬季冷涡强度和 12 月冷涡强度则无此明显差异。由于冬季各月均存在无冷涡过程的年份，这个特征还有待进一步验证。

2.4. 冷涡中心位置频数分布及冷涡指数的定义

与夏季不同（刘慧斌等，2012），随着季节变化，冬季冷涡中心大部分位于识别区的北部（45°N-60°N，115°E-145°E），且主要分布在识别区的东北象限（45°N-60°N，130°E-145°E）（图 5），40°N 以南地区几乎没有冷涡中心的生成，冬季各月冷涡中心位置无明显差异（图略）。

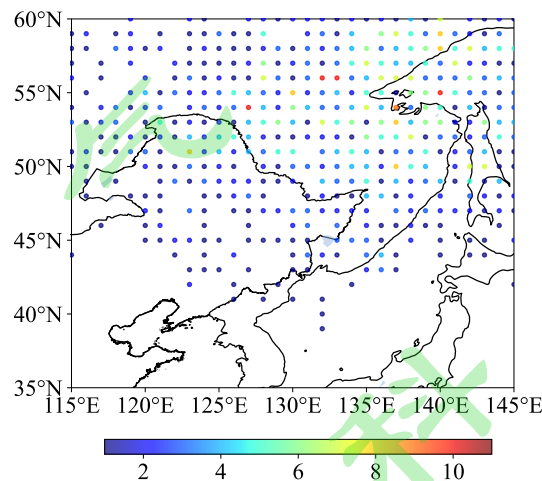


图 5 1979-2020 年冬季东北冷涡中心频数空间分布（单位：次）。

Fig. 5 Spatial distribution of the frequency of winter NCEV centers from 1979 to 2020 (units: times).

由于东北冷涡并不具备时间上连续和空间上固定的特征，因此为了能够定量描述冬季东北冷涡多尺度活动特征，需定义一个时间上连续的冬季冷涡活动指数来表征冷涡活动。根据图 5 结果，我们定义（45°N-60°N，115°E-145°E）区域平均的 500 hPa 位势高度为冬季东北冷涡活动指数（Northeast Cold Vortex Index，NECVI）。

考虑到东北冷涡是一个冷性低压系统，因此参考刘慧斌等(2012)的方法，统计 1979-2020 年冬季冷涡指数以及相同范围内区域平均的 500 hPa 温度的变化与东北冷涡的关系来检验冷涡指数在表征冬季东北冷涡活动特征方面的合理性。图 6 为 1990 年冬季 NECVI 和 500 hPa 温度时间序列以及该年冬季发生的冷涡活动过程示意图。可以发现，大部分东北冷涡发生在 NECVI 和温度序列振荡的波谷以及低值时期，对少数出现在高值阶段的冷涡活动通过逐个例分析发现，之所以出现在高值阶段是由于冷涡在发生发展过程中未经过 NECVI 定义区，又或者相对于低值类冷涡而言，此类冷涡的强度较弱。最终对 1979-2020 年冬季统计得到出

现在 NECVI 振荡低值区的冷涡活动过程共计 229 次，而出现在高值区的仅 37 次，这进一步说明该 NECVI 指数能够较好的表征冬季东北冷涡活动特征，因此下文将用 NECVI 来探讨冬季东北冷涡活动特征。

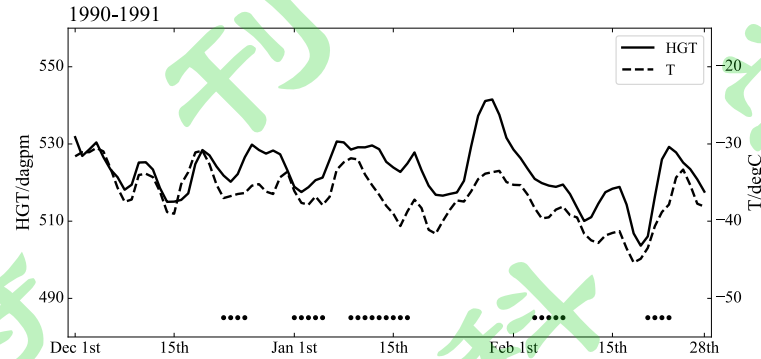


图 6 1990 年 12 月 1 日-1991 年 2 月 28 日 (45°N-60°N, 115°E-145°E) 区域平均的 500 hPa 位势高度 (黑色线)、温度 (虚线) 与冷涡活动 (点) 示意图。

Fig. 6 Schematic diagram of the averaged 500 hPa geopotential height (black line) and temperature (dashed line) over the (45°N-60°N, 115°E-145°E), and NECV activity (dots) from December 1, 1990 to February 28, 1991.

3. 冷涡指数多尺度特征

将逐日 NECVI 处理为冬季及其各月平均 (图 7a-c)，可以发现冬季 NECVI 平均为 518.6 dagpm，标准差为 2.46 dagpm，线性趋势结果显示，NECVI 没有明显的长期变化趋势 (冬季及各月 NECVI 的线性趋势均没有通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验)，九年滑动平均结果显示冬季 NECVI 仅在 1980 年代后期到 1990 年代后期之间偏弱，之后其年代际变化特征亦不明显，但有明显的年际变化特征，12 月 NECVI 变化与冬季的类似 (图略)；42 年间 1 月和 2 月冷涡指数均显示在 2000 年前后发生变化，即在 2000 年以前 1 (2) 月冷涡强度较强 (弱)，2000 年以后 1 (2) 月冷涡强度较弱 (强)，这种年代际的变化与表 2 的结论基本一致，这也说明冷涡强度在季节内有发生变化，并且这种变化具有年代际特征。对冬季 NECVI 的功率谱分析结果 (图 7d) 显示，冷涡指数存在明显的年际振荡周期，2-3 a 周期通过了 90% 的白噪声检验 (由于自相关系数 $r(1)=-0.17$ ，因此采用白噪声检验)，其中 2.3 a 时存在一个明显的峰值，表明其年际变化的主要周期为 2-3 a。

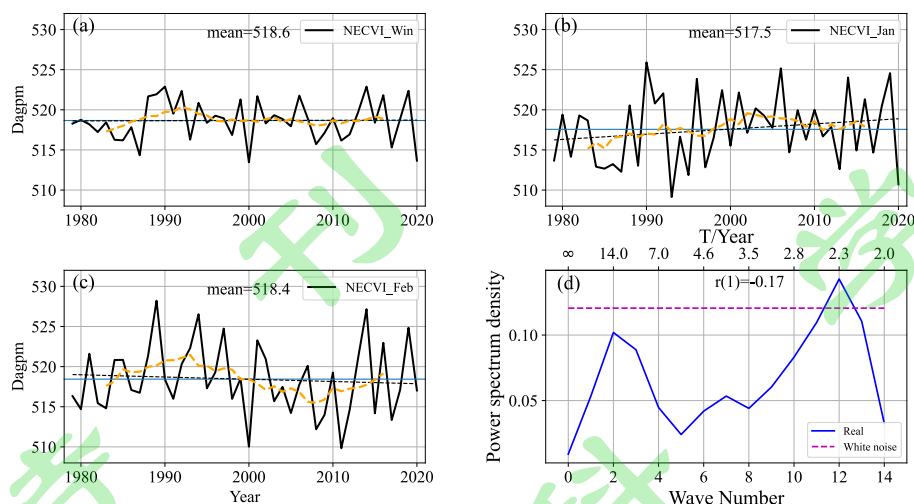


图 7 1979-2020 年冬季及 1、2 月 (a) - (c) NECVI (黑色线) 及其九年滑动平均 (黄色虚线) 和线性趋势 (黑色虚线), (d) 冬季 NECVI 功率谱分析。

Fig. 7 (a)-(c) NECVI (black line) and its 9-year moving average (yellow dashed line) and linear trend (black dashed line) of winter, January and February from 1979 to 2020. (d) Power spectrum analysis of the winter NECVI.

表 3 为冷涡指数与华北-东北地区冬季最低气温-阈值(Tmin subtract threshold, TMSTH)及识别出的冷涡频次, 日数和强度等的相关系数(。由表 3 可知, 冷涡指数可以较好的反应出冬季东北冷涡的活动特征。

对逐日冷涡指数 NECVI 去除年循环并进行 5d 滑动平均处理, 滤除掉天气尺度的影响后进行功率谱分析, 结果表明尽管各年 NECVI 季节内振荡周期有所不同, 但平均而言在 10-40d 区间内通过了 95%红噪声检验(图 8a), 并且在 30d 时有明显的峰值。因此, 可以认为 10-40d 振荡是冬季东北冷涡活动季节内变率的主要周期。

对冬季冷涡识别区 10-40d 滤波后的 500hPa 位势高度场进行 EOF 分解(图 8b), 其中第一模态方差贡献率达到 47.78%。其特征向量表现为全区一致的负值, 其中负值中心位于 45°N 以北地区, 这与冬季冷涡指数所筛选的范围一致。由于 PC1 值越大表明冷涡活动越强, 而 NECVI 反之, 因此对 PC1 及前文研究得到的 10-40d 滤波后的 NECVI $\times (-1)$ 进行相关分析, 发现二者相关系数达到 0.97 (通过了 99%的置信水平), 近乎一致, 进一步验证了所选冷涡指数的合理性与适用性, 其季节内尺度分量可用于表征东北冷涡季节内变化。

表 3 冬季冷涡指数与各物理要素序列的相关关系

Table 3 Correlation coefficients between the Winter NECVI and various physical element sequences.

	冷涡日数/d	冷涡频次/次	冷涡强度/dagpm	TMSTH/°C
NECVI/dagpm	-0.26*	-0.27*	0.67**	0.60**

注: *, **分别代表通过百分之 90、95 的置信水平

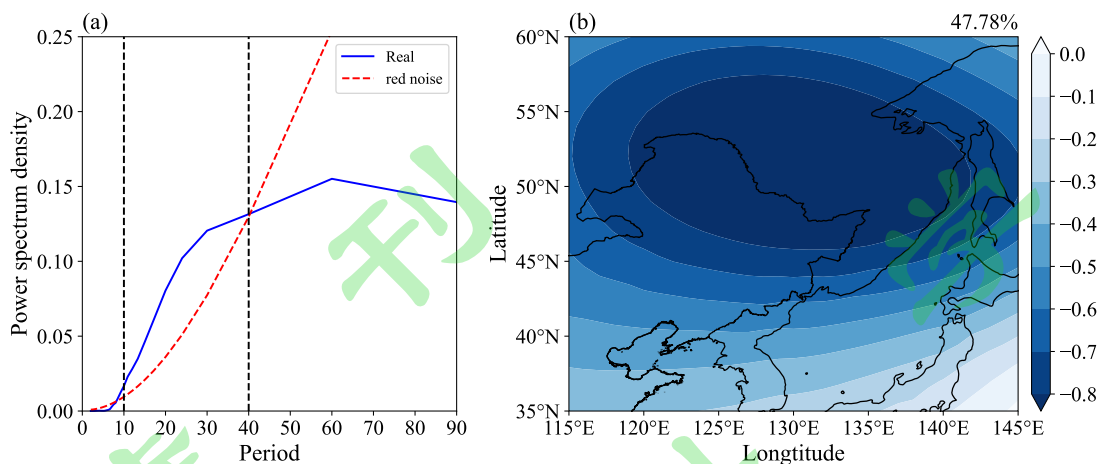


图 8 1979-2020 年冬季 (a) NECVI 平均功率谱分析 (b) 10-40d 滤波后的 500 hPa 位势高度 EOF 分解的第一模态空间分布。
Fig. 8 (a) Averaged power spectrum analysis of winter NECVI from 1979 to 2020. (b) Spatial distribution of the first mode of EOF decomposition of the 10-40d filtered 500 hPa geopotential height.

4. 冬季东北冷涡的季节内变化与温度的关系

上述研究表明, 东北冷涡与我国东北、华北地区的气温有着密切联系 (图 1, 表 3)。去趋势后冬季冷涡指数与 TMSTH 呈现为全区域的显著正相关 (图 9), 说明冷涡越强, 华北-东北气温越低, 冬季东北冷涡与华北-东北低温有重要的关系, 而已有研究 (石晨等, 2020; 谭赢等, 2022) 指出, 低温频发年, 冷涡活动较强。

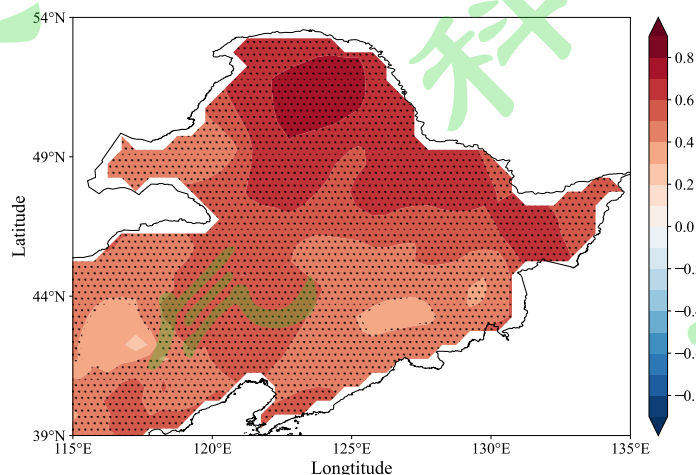


图 9 1979-2020 年冬季去趋势 NECVI 与 TMSTH 相关分布 (打点表示通过 99%信度的置信水平区域)。
Fig. 9 Correlation coefficients distribution between the detrended winter NECVI and TMSTH from 1979 to 2020 (the dotted areas represent regions passing the 99% confidence level).

前人的研究发现, 季节内振荡是中高纬大气内部的一个重要过程, 会引起东亚地区气温的显著负异常 (李艳等, 2018), Gao et al. (2022) 研究发现东北-华北区域平均冬季逐日地面最低气温具有 10-30d 的低频周期, 在对流层中层影响东北-华北地区极端低温过程的关

键环流系统之一就是位于东北地区的低频冷涡。作为中高纬大气环流的组成部分，对冬季东北冷涡的分析可以发现其同样具有季节内振荡的特征（图 8）。考虑到季节内振荡是延伸期预报的一个重要的预报性来源，从季节内尺度考虑冬季东北冷涡对我国东北-华北地区局地温度的影响是很有必要的。因此，接下来将通过 NECVI 在 10-40d 季节尺度上与我国东北-华北（39°N-54°N，115°E-135°E）地区温度的关系，讨论低频东北冷涡对我国东北-华北地区持续性冬季低温过程发生发展过程的影响。

1979-2020 年 10-40d 滤波后的冬季东北-华北地区日最低气温-阈值（TMSTH）与同期北半球低频 500hPa 位势高度场 SVD 分解的第一对异类空间分布如图 10 所示，其方差贡献率为 44.53%，二者时间系数的相关为 0.52 且通过了 95% 的置信水平。由图可以看出当东北-华北地区出现大范围低频低温时，中高纬度地区从欧洲西部到欧亚大陆东部存在一支自西向东的“+、-、+、-、+”低频波列，中心分别位于欧洲西部，新地岛以西，乌拉尔山-贝加尔湖地区，东北亚到日本海及鄂霍次克海-北太平洋地区，其中东北亚到日本海上空为负中心。结合时间系数可知，当东北亚到日本海上空有低频 500hPa 位势高度负异常中心时，与之伴随的在乌拉尔山-贝加尔湖地区以及鄂霍次克海-北太平洋地区有低频正异常中心。这表明低频东北冷涡的发生发展常常伴随乌拉尔山-贝加尔湖地区以及鄂霍次克海-北太平洋地区的低频阻塞高压形成，低频阻塞与东北冷涡的协同作用对我国东北-华北地区低频低温发生发展有重大影响。

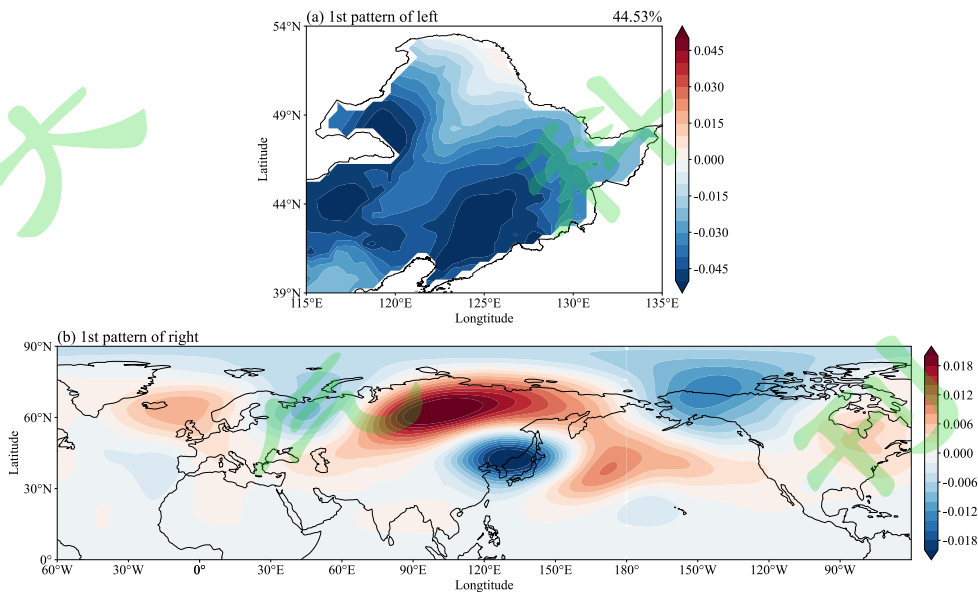


图 10 1979-2020 年冬季 10-40d 滤波后的冬季东北-华北地区 TMSTH（左场，a）与同期北半球 500 hPa 位势高度场（右场，b）SVD 分解的第一对异类空间分布型。
Fig. 10 Heterogeneous spatial mode of the first pair of SVD decomposition for 10-40d filtered (a) TMSTH over the Northeast and North China region and (b) the 500 hPa geopotential height over the Northern Hemisphere from 1979 to 2020 winter.

进一步将 10-40d 滤波后的 500hPa 位势高度和 2m 气温（填色，单位℃）回归到 NECVI×(-1)（图 11 a1-c1），发现在超前 5d 时，欧亚大陆自西欧高纬度地区至东北亚上空存在一

支纬向“+、-、+、-、+”的低频波列，此外，从极地至东北亚到日本以东地区还存在一支经向的“-、+、-”的低频波列，这种极地负异常与中高纬度正异常的分布类似于 AO（北极涛动）正位相。通过逐日回归分析发现（图略），经向偶极子结构与从北美西海岸至阿拉斯加、鄂霍茨克海最终到东北亚地区存在一支向西传播的低频波列有关。第 0d 时，低频负异常向东南移动至冷涡识别区内，其上游乌拉尔山地区以及下游鄂霍茨克海至日本以东地区形成低频双阻塞形势，使得低频冷涡在此能够长久维持，并携带冷空气入侵东北、华北地区，至 5d 时，北半球整体环流形势与-5d 时几乎相反，东亚高纬度地区与极地地区完成了类似 AO 从正位相到负位相的转变，而欧亚大陆纬向的低频波列也发生了转变。

在此过程中，我国东北-华北地区地面气温也由正转负，而将东北-华北地区 10-40d 带通滤波后的 TMSTH 回归到 $NECVI \times (-1)$ 的结果表明（图 11 a2-c2），超前低频冷涡 5d 时，东北-华北地区表现为全区一致的低频低温正异常，随着低频冷涡的进一步发展并逐渐南下，造成东北-华北地区大面积的低频降温，值得注意的是，并非在第 0d 时对东北-华北地区造成降温的负异常最大值，而是在 3-5d 形成气温负异常最大值且面积最大。这表明对于冬季东北-华北地区局地而言，日最低气温的季节内分量落后于低频东北冷涡 3-5d，东北-华北地区极端强降温的低频变化受到了低频冷涡的影响。

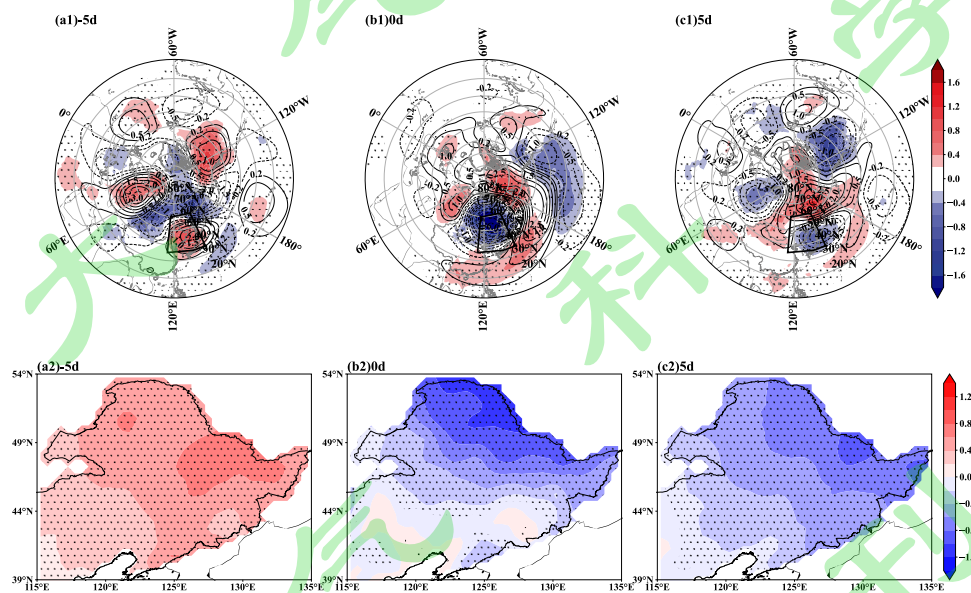


图 11 超前 5d (a1)、0d (b1) 和滞后 5d (c1) 10-40d 滤波后的 500hPa 位势高度（等值线，单位 dagpm）和 2m 气温（填色，单位 $^{\circ}\text{C}$ ）超前滞后回归到 $NECVI \times (-1)$ 的结果；a2-c2 同 a1-c1 但为 10-40d 滤波后的 TMSTH（黑框代表冷涡识别区，打点表示通过 99%信度的置信水平区域）。

Fig. 11 Lead-lag regression results of the 10-40d filtered 500 hPa geopotential height (contours, units: dagpm) and 2-meter temperature (shaded, units: $^{\circ}\text{C}$) onto $NECVI \times (-1)$ for (a1) 5 days lead, (b1) 0 days, and (c1) 5 days lag. Panels (a2)- (c2) are the same as (a1)- (c1) but for the 10-40 day filtered TMSTH. (The black box indicates the cold vortex identification region, and the dotted areas represent regions passing the 99% confidence level).

5. 总结与讨论

作为影响东亚地区天气和气候的重要环流系统之一, 针对冬季冷涡的识别、冬季冷涡多尺度特征及其季节内振荡相关的研究相对较少。已有研究指出 (Gao et al., 2022) 当东北-华北地区大范围低频低温事件发生时, 常伴随有很强的低频冷涡活动。因此本文对 1979-2020 年冬季东北冷涡进行客观识别, 并对其强度、空间分布以及活动日数的进行统计分析, 探讨冬季东北冷涡活动的不同时间尺度变化特征, 并着重对其在季节内尺度上与东北-华北地区极端低温的关系进行了初步的探讨。结论如下:

(1) 近 42 年冬季, 在识别区内 ($45^{\circ}\text{--}60^{\circ}\text{N}$, $125^{\circ}\text{--}145^{\circ}\text{E}$) 共出现 266 次东北冷涡活动过程, 共计 1151 d, 年均发生约 6.3 次, 27.4 d; 冬季东北冷涡的平均生命期为 4.3 d, 80.7% 的冷涡生命期为 3-5 d, 最长可达 12 d; 冬季东北冷涡平均强度约为 507.4 dagpm, 其中 1 月东北冷涡平均生命期最长, 强度最强。冬季冷涡中心密集区主要分布在识别区域的东北象限 ($50^{\circ}\text{N--}60^{\circ}\text{N}$, $125^{\circ}\text{E--}145^{\circ}\text{E}$)。

(2) 冬季东北冷涡发生频次、活动日数以及强度的长期变化趋势不明显, 冬季东北冷涡强度和 NECVI 指数均反映出 1 月和 2 月冷涡强度在 2000 年前后 21 年发生转折; 冷涡发生频次、活动日数, 强度和 NECVI 指数存在明显的年际变化特征, 冷涡频次和活动日数的年变化具有较好的一致性, 二者之间相关系数为 0.88。NECVI 指数存在明显的 2-3a 周期变化, 而冬季东北冷涡季节内振荡周期则以 10-40 d 为主。

(3) 在年际尺度, 冬季东北冷涡与东北、华北地区极端低温存在正相关, 冷涡越强日最低气温越低; 在季节内尺度上, 当东北、华北地区发生大范围极端低温时, 北半球中高纬度地区存在两支低频波列, 其中东北亚上空常伴随有很强的低频冷涡活动, 它与其两侧低频阻高一起促进了东北、华北地区大范围极端低温发生, 滞后低频冷涡 3-5d 在东北-华北地区温度负异常最强且面积最大。这表明对于冬季东北-华北地区局地而言, 低频低温的发生落后于低频东北冷涡 3-5d。

与对夏季冷涡季节内振荡研究相比 (刘慧斌等, 2012), 冬季东北冷涡具有周期为 10-40d 的季节内变化特征。冬季低频东北冷涡活动会造成东北-华北地区大范围的强降温。当低频冷涡发生时, 其上下游均存在低频阻高活动, 那么中高纬度其他的大气环流系统与低频东北冷涡的关系如何? 怎样协同影响东北-华北地区强降温事件的发生及持续? 与夏季 EAP 的经向波列使得低频反气旋性环流加强 (黄荣辉, 1990; 刘慧斌等, 2012) 不同, 冬季从北美西海岸至阿拉斯加、鄂霍茨克海最终到东北亚地区存在一个向西传播的低频波列, 两支波列使得在极区和欧亚大陆中部低频位势高度场存在反相分布, 是一种类 AO 模态, 这种模态和纬向波列是如何一起协同作用的? 这将是我們下一步将要探讨的问题。

参考文献 (References)

- 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]. *Advances In Atmospheric Sciences*, 38(3): 400-412. doi:10.1007/s00376-020-0118-3
- Fang Y H, Hua J J, Yu Y Q, et al. 2022. The Climate Characteristics of the Northeast China Cold Vortex against the Background of Global Warming. *Sustainability*, 14(15): 8982. doi:10.3390/su14158982
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis[J]. *Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society*, 146(6):199-2049. doi:10.1002/qj.3803
- Hu K X, Lu R Y, Wang D H. 2010. Seasonal climatology of cut-off lows and associated precipitation patterns over Northeast China[J]. *Meteorology And Atmospheric Physics*, 106(1-2):37-48. doi:10.1007/s00703-009-0049-0
- Liu G, Qu M H, Feng G L, et al. 2019. Application study of monthly precipitation forecast in Northeast China based on the cold vortex persistence activity index[J]. *Theoretical And Applied Climatology*, 13(5): 1079-90. doi:10.1007/s00704-018-2399-3
- Nieto R, Gimeno L, de la Torre L, et al. 2005. Climatological features of cutoff low systems in the Northern Hemisphere[J]. *Journal Of Climate*, 18(16), 3085-3103. doi:10.1175/jcli3386.1
- Peng J B, Bueh C. 2011. The definition and classification of extensive and persistent extreme cold events in China[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 4(5): 281-286. doi:10.1080/16742834.2011.11446943
- Xie Z W, Bueh C. 2015. Different types of cold vortex circulations over Northeast China and their weather impacts[J] *Monthly Weather Review*, 143(3):845-63. doi:10.1175/MWR-D-14-00192.1
- Zhuo W Q, Yao Y, Luo D H, et al. 2022 Combined impact of the cold vortex and atmospheric blocking on cold outbreaks over East Asia and the potential for short-range prediction of such occurrences[J]. *Environmental Research Letters*, 17.084037. doi:10.1088/1748-9326/ac8362
- 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 Lisheng, He Liye, Ma Ning. 2023. Climatic characteristics of northeast cold vortex and its impact on summer precipitation in the Haihe riverbasin[J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 81(4):559-568. doi:10.11676/qxxb2023.20220196
- 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 Jinhai, Wu Zhiwei, Jiang Zhihong, et al. 2007. "Climate effect" of the Northeast cold vortex and its influences on Meiyu[J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 52(5):671-679. doi:10.1360/csb2006-51-23-2803
- 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 Kaixi, Lu Riyu, Wang Donghai. 2011. Cold vortex over Northeast China and its climate effect [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese)*, 35(1): 179-191. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.01.15
- 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 Lijun, Cui Xiaopeng. 2023. Statistical Characteristics of the Northeast China Cold Vortex

and Its Impact on Precipitation Distribution from 2000 to 2019[J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 47(6):1925-1938. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2203.21227

黄荣辉. 1990. 引起我国夏季旱涝的东亚大气环流异常遥相关及其物理机制的研究[J]. 大气科学, 14(1): 108-117. Huang Ronghui. 1990. Studies on the teleconnections of the general circulation anomalies of East Asia causing the summer drought and flood in China and their physical mechanism[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 14(1): 108-117. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1990.01.14

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 Xuan, Li Dongliang. 2020. Objective identification method and variation characteristics of the Northeast China cold vortex from May to August of 1979-2018[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 78(6): 945-961. doi:10.11676/qxxb2020.077

蒋大凯, 王江山, 阎琦, 等. 2012. 1961-2010 年 5-9 月东北冷涡气候特征及其对辽宁气温的影响[J]. 气象与环境学报, 28(2):5-9. Jiang Dakai, Wang Jiangshan, Yan Qi, et al. 2012. Climatic characters of Northeast cold vortex and its effect on air temperature in Liaoning Province from May to September during 1961-2010[J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 28(2): 5-9. doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2012.02.002

李艳, 张金玉, 李旭, 等. 2018. 两次典型极端低温过程低频特征分析 [J]. 高原气象, 37(5): 1341-1352. Li Yan, Zhang Jinyu, Li Xu, et al. 2018. Low-Frequency Features during the Two Typical Extreme Cold Events in China[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 37(5): 1341-1352. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00035

李玥瑶, 崔晓鹏, 李国平, 等. 2024. 2021 年 6 月东北冷涡暴雨水汽来源和源区贡献分析[J]. 大气科学, 48(3): 1261-1275. Li Yueyao, Cui Xiaopeng, Li Guoping, et al. 2024. Moisture Sources and Contributions of Source Regions to the Northeast Cold Vortex Rainstorm in June 2021 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 48(3): 1261-1275. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2210.22202

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(03):331-338. Liu Dehao, Zhu Weijun. 2021. Temporal and spatial variation characteristics of northeast cold vortex in winter[J]. Journal of Meteorological Sciences (in Chinese), 41(3) : 331-338. doi : 10.12306/2020jms.0036

刘慧斌, 温敏, 何金海, 等. 2012. 东北冷涡活动的季节内振荡特征及其影响[J]. 大气科学, 36(5): 959-973. Liu Huibin, Wen Min, He Jinhai, et al. 2012. Characteristics of the northeast cold vortex at intraseasonal timescale and its impact[J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 36 (5): 959-973. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11167

刘明歆, 李艳, 吕春艳. 2021. 中国冬季两类极端低温事件特征及其大气环流成因分析[J]. 高原气象, 40(3):603-620. Liu Mingxin, Li Yan, Lv Chunhua. 2021. Analysis of the Characterustucs and Atomsheric Circulation Causes of Two Types of Exreme Cold Events in Winter in China[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 40(3):603-620. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2020.00093

石晨, 廉毅, 杨旭, 等. 2020. 东北亚和北半球冬季高空切断冷涡与中国极端低温事件的联系[J]. 气象学报, 78(5): 778-795. Shi Chen, Lian Yi, Yang Xu, et al. 2020. The relationship between winter cut-off cold vortexes in Northeast Asia and northern hemisphere as well as their connection with extreme low temperature events in China[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 78(5): 778-795. doi:10.11676/qxxb2020.049

孙力. 1997. 东北冷涡持续活动的分析研究[J]. 大气科学, 21(3): 297-307. Sun Li. 1997. A Study of the Persistence Activity of Northeast Cold Vortex in China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 21(3): 297-307. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1997.03.06

孙力, 郑秀雅, 王琪. 1994. 东北冷涡的时空分布特征及其与东亚大型环流系统之间的关系[J]. 应用气象学报, 5(3): 297-303. Sun Li, Zeng Xiuya, Wang Qi. 1994. The Climatological Characteristics of Northeast Cold Vortex in China[J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 5(3): 297-303.

谭赢, 李丽平, 施春华, 等. 2022. 中国冬季大范围持续性低温事件低频特征及其与大气低频振荡的联系[J]. 高原气象, 41(06):1410-1424. Tan Ying, Li Liping, Shi Chunhua, et al. 2022. Low-Frequency Characteristics of Large-Scale Persistent Low Temperature Events in Winter in China and its Relation to Atmospheric Low-frequency Oscillation[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 41(06):1410-1424. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2021.00118

王丽娟, 何金海, 司东, 等. 2010. 东北冷涡过程对江淮梅雨期降水的影响机制[J]. 大气科学学报, 33(1):89-97. Wang Lujuan, He Jinhai, Si Dong, et al. 2010. Analysis of impacts of Northeast cold vortex processes on Meiyu rainfall period over Yangtze-Huaihe River Basin[J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33(1):89-97. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2010.01.012

吴佳, 高学杰. 2013. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比[J]. 地球物理学报, 56(4): 1102-1111. Wu Jia, Gao Xuejie. 2013. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets[J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 56(4):1102-1111. doi:10.6038/cjg20130406

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 Qi, Li Shuang, Lu Jinglong, et al. 2022. Characteristics of the continuous cold vortex over Northeast China from 1979 to 2019[J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 38(2): 40-45. doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2022.02.002

周波涛, 钱进. 2021. IPCC AR6 报告解读: 极端天气气候事件变化[J]. 气候变化研究进展, 17(6): 713-718. Zhou Botao, Qian Jin. 2021. Changes of weather and climate extremes in the IPCC AR6[J]. Climate Change Research (in Chinese), 17(6): 713-718. doi:10.12006/j.issn.1673-1719.2021.167

朱万林, 李清泉, 王遵娅, 等. 2022. 近 60 年中国冷空气过程的气候变率分析[J]. 气象, 48(1):1-13. Zhu Wanlin, Li Qingquan, Wang Zunya, et al. 2022. Climatological Variability of Cold Air Processes over China in Recent 60 Years[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 48(1):1-13. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2021.010401