

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).

## 高空切断冷涡研究进展\*

石 晨<sup>1,2,3,4</sup> 翟盘茂<sup>1</sup> 廉 毅<sup>3,4</sup>

- 1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081
- 2 中国科学院大学, 北京 100049
- 3 吉林省气象科学研究所, 长春 130062
- 4 中高纬度环流系统与东亚季风研究开放实验室, 长春 130062

**提 要:** 高空切断冷涡是中高纬度地区大气环流的重要组成部分, 高空切断冷涡的出现往往会产生对流不稳定, 导致各种高影响天气的发生发展。中国最常见的切断冷涡是东北冷涡, 其发生发展不仅能影响我国东北地区的天气气候异常, 也对中东部地区具有重要的影响。因此, 有必要关注高空切断冷涡的形成机理和预测理论与方法。基于此, 对近些年来国内外有关高空切断冷涡的形成机理和预测方法取得的主要研究进展进行了回顾, 简述了切断冷涡的定义、天气气候学特征、不同天气气候系统和大气外强迫因子对切断冷涡的影响, 最后指出了目前研究中仍然存在的不足和需要进一步深入研究的关键科学问题。

**关键词:** 切断低压, 切断冷涡, 东北冷涡, 自然变率, 外强迫

**中图分类号:** P461

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.021501

## Advances in Research of Upper Level Cut-Off Cold Vortex

SHI Chen<sup>1,2,3,4</sup> ZHAI Panmao<sup>1</sup> LIAN Yi<sup>3,4</sup>

- 1 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081
- 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049
- 3 Institute of Meteorological Sciences of Jilin Province, Changchun 130062
- 4 Laboratory of Research for Middle-High Latitude Circulation System and East Asian Monsoon, Changchun 130062

**Abstract:** The upper-level cut-off cold vortex is an important part of the atmospheric circulation in the middle and high latitudes, and usually can lead to the convective instability as well as the occurrence and development of various high impact weather. The most common cut-off cold vortex in China is the northeast cold vortex, which can not only affect the weather and climate anomalies in the northeastern China, but also have a profound impact on the central and eastern China. Therefore, it is necessary to pay attention to the formation mechanism and prediction theory of cut-off cold vortex. Based on this, this paper reviews the main research progress in the formation mechanism and prediction methods of upper-level cut-off cold vortex in recent years. Firstly, the definition of cut-off cold vortex and its weather and climate characteristics are summarized. Secondly, the impacts of different weather and climate systems as well as the external forcing factors on the cut-off cold vortex are reviewed. Finally, the gaps and unsolved problems in the previous researches are pointed out.

\* 国家自然科学基金联合基金项目(U2142205)、国家自然科学基金重点项目(41630424)、国家自然科学基金面上项目(41975101)和中国气象局沈阳大气环境研究所联合开放基金课题(2022SYIAEKFMS01)共同资助

2022 年 7 月 18 日收稿; 2022 年 11 月 31 日收修定稿

第一作者: 石晨, 主要从事极端天气气候事件变化和预测. E-mail: chen.shih@foxmail.com

通讯作者: 翟盘茂, 主要从事极端天气气候事件变化和预测. E-mail: pmzhai@cma.gov.cn

**Key words:** cut-off low, cut-off cold vortex, northeast cold vortex, natural variability, external forcing

## 引言

20世纪中叶,气象学家发现北半球中高纬高空西风气流向赤道方向加深期间有时会向低纬方向分离出一个闭合的冷性低压中心,并能维持相当长时间,称之为切断低压(cut-off low, COL),又称冷池(cold pool)、冷低压/气旋(cold low/cyclone)或冷心低压/气旋(cold-core low/cyclone)等(Crocker et al, 1947; Palmén, 1949)。这种高空低压的前身是一个冷槽,当冷槽被切断脱离对流层上部的极地源区,槽里冷气团强烈下沉,对流层上部的垂直伸长和水平辐合使得涡度加强,致使一般应具有“正弦波”形状的气流变形;在槽东,急流的南北走向更明显,在对流层中部绝对涡度近似守恒的情形下,气流势必在科氏参数较大的较高纬度上又做反气旋式弯曲(Crocker et al, 1947; Palmén, 1949; Palmén and Newton, 1969)。基于这种环流系统的冷性气旋式旋转涡旋的特性, Hsieh (1949)也在他的研究中将这种环流系统称为冷涡(cold vortex)。国外学者一般采用切断低压的概念,而我国学者则更多地将其称之为(东北/华北/蒙古)冷涡。前者主要强调的是冷低压的形成特征,后者的定义则更广义,更多地强调该系统对应的结构特征。此外,也有学者将这种高空低压称为切断冷涡(cut-off cold vortex) (Matsumoto and Ninomiya, 1965; Ninomiya, 1991; Shimada et al, 2014)。由于本文不仅仅着眼于我国冷涡的研究进展,为避免混淆,统一将这种环流系统称为切断冷涡。

切断冷涡是一种深厚的高空冷性低压,其强度在对流层上部最强(Palmén and Newton, 1969)。当切断冷涡到达中高纬度时,由于对流层中上层的冷空气使大气变得不稳定(郑秀雅等, 1992),在有利的下垫面条件下,经常会引发各种高影响天气。特别地,由于冷涡发展时对应的温压场结构不完全对称,其西部常有冷空气不断补充南下,叠加在低层暖湿气流上,形成“上干下湿”的不稳定层结,进而使得强对流天气更容易在切断冷涡的西部和东南部区域发生(Hsieh, 1949; Hoskins et al, 1985)。因此,切断冷涡的影响引起了国内外学者的广泛关注。近几十年来,国内外对于切断冷涡的研究,主要集中在三

个方面:一是切断冷涡影响中尺度对流性系统的规律与天气学机理以及相关的数值模拟研究(陈力强等, 2005; 张立祥和李泽椿, 2008; 杨吉等, 2020),如雷暴、冰雹、大风和短时性强降水等;二是切断冷涡的“气候效应”研究(何金海等, 2006a; 胡开喜等, 2011),主要包括冷涡的气候统计特征、冷涡异常活动对不同时间尺度(季节、年际)上温度与降水的影响以及冷涡异常成因机理的分析,尤其是其与中高纬不同天气系统(如阻塞高压、急流、副热带高压等)和大气外强迫因子(海温、海冰)的联系(Nieto et al, 2005, 2007, 2008; 何金海等, 2006b; 梁红等, 2009; 廉毅等, 2010; 刘刚等, 2012; Xie and Bueh, 2015; 赵俊虎等, 2022; 章大全等, 2023);三是切断冷涡影响平流层-对流层物质交换(stratosphere-troposphere exchange, STE)的物理机制,特别是其对臭氧浓度和大气污染的影响(Price and Vaughan, 1993; 杨健和吕达仁, 2003)。

中国最常见的切断冷涡就是东北冷涡,其不仅是影响东北地区的重要天气系统,也对中低纬度(华北、华东、华南等)地区有重要影响。东北地区作为我国重要的粮食生产基地,冷涡的异常活动对于东北地区防灾减灾具有重要意义。尤其是近些年来,切断冷涡事件频发,对我国中东部地区带来了很大影响。此外,东北冷涡虽然是区域性的特征,但是其作为中高纬地区重要的环流系统,需要在更大的尺度上去考虑其发生背景。基于此,本文将视野拓宽到了全球,主要回顾了近年来国内外有关切断冷涡的研究进展,总结了切断冷涡的天气气候学特征,梳理了冷涡的异常成因机理,并提出了一些亟待解决的关键科学问题,以更好地认识全球变暖背景下切断冷涡的演变特征及其对天气预报和气候预测的意义。

## 1 切断冷涡的天气气候学特征

### 1.1 切断冷涡的识别与定义

对于切断冷涡的形成, Petterssen (1950; 1955)指出存在三种可能的形成过程:(1)低压系统先在地面发展,接着在中纬度地区切断形成冷涡;(2)冷涡先在高纬地区发展形成;(3)冷涡在地面和高纬地区

同时发展。Nieto et al(2005)将理想状态下切断冷涡的生命周期分为了四个阶段:(1)高空槽出现阶段:位势扰动伴随着温度扰动,同时温度场落后于高度场。(2)分离阶段:冷涡不断发展分离,高空槽不断向南加深,位势高度场呈倒 $\Omega$ 型。(3)切断阶段:高层大气呈现明显的气旋式闭合环流,并且伴随着冷中心。(4)最终阶段:由于非绝热过程(如潜热释放)冷涡逐渐消亡并重新融合到西风气流中。另外,还有部分切断冷涡是由不同系统合并形成的。例如,在中国,当华北/黄海气旋或北上台风等与东北地区已有的低压合并时,会使得高空槽加深,也可以形成切断冷涡。但是,这种情况比较少见并且主要集中在夏季。

根据切断冷涡的形成特征,国内外不同研究采取了不同方法对其进行识别(表1)。目前来看,主要有两种方法:第一种方法是基于某一等压面(如200/300/500 hPa等)上的位势高度确定(孙力等,1994; Nieto et al, 2005; 2007; 2008; 刘刚等, 2015; Muñoz et al, 2020),该方法有利于研究天气尺度上冷涡的发展和消亡。第二种方法是基于等熵位涡的

概念。例如, Bell and Bosart(1993)、van Delden and Neggers(2003)和 Nieto et al(2005)研究表明切断冷涡发生时伴随着高位涡异常,高位涡空气往往会侵入到对流层中层。由于位涡在绝热无摩擦的条件下是守恒的(Hoskins et al, 1985),该方法的优势在于能更好地表示导致冷涡发展的反气旋式 Rossby 波破碎的过程,也能够根据平流层高纬冷涡的源地向低纬进一步追踪(Muñoz et al, 2020)。这种方法一般以2 PVU( $1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ K} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )为阈值识别切断冷涡(Wernli and Sprenger, 2007; Portmann et al, 2018; 2021)。对于东北冷涡的识别,目前国内业务上主要采用第一种方法,参照的是孙力等(1994)的定义,即:(1)在500 hPa天气图上至少能分析出一条闭合等高线,并有冷中心或明显冷槽配合;(2)冷涡出现在 $35^{\circ} \sim 60^{\circ} \text{N}$ 、 $115^{\circ} \sim 145^{\circ} \text{E}$ 范围内;(3)冷涡持续时间在3 d或3 d以上。值得注意的是,由于目前尚缺乏统一的识别标准,不同分辨率的数据与不同的定义和识别方法得到的结果可能有所不同。因此,如何建立东北冷涡定义行业标准和量化指标是研究中一个重要的问题。

表1 不同研究采取的冷涡识别方法

Table 1 Different methods used in previous researches

分类	作者	层次	研究区域	研究时段/年	资料
位势高度	孙力等(1994)	500 hPa	$35^{\circ} \sim 60^{\circ} \text{N}$ 、 $115^{\circ} \sim 145^{\circ} \text{E}$	1956—1990	业务资料
	Nieto et al(2005)	200 hPa	$20^{\circ} \sim 70^{\circ} \text{N}$	1958—1998	NCEP/NCAR-I
	胡开喜等(2011)	500 hPa	$30^{\circ} \sim 65^{\circ} \text{N}$ 、 $115^{\circ} \sim 135^{\circ} \text{E}$	1958—2006	NCEP/NCAR-I
	谢作威和布和朝鲁(2012)	500 hPa	$35^{\circ} \sim 55^{\circ} \text{N}$ 、 $110^{\circ} \sim 140^{\circ} \text{E}$	1965—2007	NCEP/NCAR-I
	Muñoz et al(2020)	200和500 hPa	$50^{\circ} \sim 20^{\circ} \text{S}$ 、 $20^{\circ} \sim 70^{\circ} \text{N}$	1960—2017	NCEP/NCAR-I
位势涡度	Wernli and Sprenger (2007)	320~350 K	北半球	1979—1993	ERA-15
	Portmann et al(2021)	290~350 K	全球	1979—2018	ERA-Interim

## 1.2 切断冷涡的主要特征

一般而言,切断冷涡的空间分布随着纬度的变化而变化。在副热带地区,由于地形作用和海陆热力的差异,大部分切断冷涡发生在大陆和邻近海洋上空,并且产生于风暴轴的事件较少(Nieto et al, 2005; 2008; Fuenzalida et al, 2005; Reboita et al, 2010; Pinheiro et al, 2017; Muñoz et al, 2020)。具体而言,在南半球,切断冷涡更易在大陆附近出现,如澳大利亚南部、南美洲南部和非洲南部地区(Fuenzalida et al, 2005; Pinheiro et al, 2017; Reboita et al, 2010)。对于北半球,南欧—大西洋东岸、中国东北—东西伯利亚、北太平洋东部和北美西部是切断冷涡的频发区(Bell and Bosart, 1993; Nieto et al,

2005; 2008; 石晨等, 2020)。

切断冷涡一年四季均可出现,但有着明显的季节变化,并且不同层次上切断冷涡的季节分布不同,并且这种特性受不同识别方法的影响不大。例如, Bell and Bosart (1993)和 Oakley and Redmond (2014)发现北美地区500 hPa切断冷涡在夏季出现最少,而 Nieto et al(2005)则发现该地区200 hPa冷涡在夏季出现最多。这种现象一方面可能是由于夏季对流层中层产生了没有延伸到对流层顶的反气旋,另一方面则可能是极锋急流和副热带急流对不同层次 Rossby 波破碎事件的贡献不同导致的(Muñoz et al, 2020)。全球来看,200 hPa切断冷涡在夏季和秋季最频繁,而500 hPa冷涡在各季的分布相较之下更为均匀,不过不同区域冷涡的季节性

不同(Muñoz et al, 2020)。在我国,东北冷涡一般在春末夏初最为活跃,而在冬季出现较少。由于东北冷涡是从西风气流中经向偏移形成,它的移动速度要比西风气流中的开放式气旋要慢得多,因此往往具有一定的阶段性和准静止性。东北冷涡一般能持续 3~5 d,有部分冷涡甚至能持续 10 d 以上,并具有一定的准双周振荡特征(孙力等,1994;孙力,1997;刘慧斌等,2012;刘刚等,2015;2017;杨鏊和王丽娟,2021)。

国内外不少研究根据切断冷涡的位置、对应的冷空气路径和峰值日的阻塞环流型等,对其进行分类(表 2),并指出不同类型的切断冷涡对应的特征也不同。例如,基于等熵位涡的方法,Portmann et al(2021)对全球范围内的切断冷涡进行了识别,并给出了冷涡相对于急流的位置的分类和特征:(1)赤道型:由副热带地表反气旋上方的反气旋式 Rossby 波破碎形成并且很难产生降水;(2)两急流中间型:产生于伴有急流分支的中纬度地区的反气旋式 Rossby 波破碎事件,经常导致地面气旋的产生并具有显著降水现象;(3)极地型:主要是由于风暴轴区域内温带气旋内的气旋式 Rossby 波破碎产生。东北冷涡活动位置的不同也会对相关区域产生不同的影响,如 2017 年冷涡位置的异常偏东导致了我国北方及黄淮区域的大范围干旱(张宇等,2017)。因此,基于冷涡的发生位置,我国学者郑秀雅等(1992)、孙力等(1994)和阎琦等(2022)将东北冷涡分为北涡(50°~60°N)、南涡(35°~40°N)和中涡

(40°~50°N),发现冷涡主要以中涡和北涡的形式出现,并且强北涡更易在春末和秋初出现,而夏季则更易出现弱中涡(杨鏊和王丽娟,2021)。由于极地是东北冷涡冷空气的重要源地,闫玉琴等(1995)根据冷空气的移动路径将其分为北方型、西北方型、西方型和南方型,其中西北方型和北方型出现次数较多。不同季节东北冷涡的活动路径也不同,4 月冷涡的活动路径主要有三条:西北路径、偏西路径和超极地路径,6 月则与东北地区大地形走向一致,而 8 月冷涡路径与 4 月类似,但是超极地路径冷涡很少(孙力等,1994)。基于东北冷涡的阻塞型环流特征,谢作威和布和朝鲁(2012)利用旋转 EOF 将其分为:叶尼塞河型、贝加尔湖型、乌拉尔-雅库斯克型和鄂霍次克海-北冰洋型,发现鄂霍次克海-北冰洋型低温效应最明显。

一些研究还关注了冷涡垂直结构的气候特征。对于北半球,Nieto et al(2007)发现有 47.1% 的切断冷涡与地面气旋相联系。Porcù et al(2007)根据冷涡的高低空配置将其分为深厚冷涡和浅薄冷涡,发现深厚冷涡占地中海地区冷涡总数的 54%,并且在深厚冷涡中心的南部更易产生影响范围广的强降水事件,而浅薄冷涡产生的对流降水很弱或者根本没有降水。类似地,对于东北冷涡,蒋大凯等(2012)发现深厚冷涡占 36%,呈现自西北向东南方向递减的特征,而浅薄冷涡约占 64%,在 46°N 分布最多,并且深厚冷涡更容易影响低温。

表 2 切断冷涡的不同分类

Table 2 Different classifications of cut-off cold vortex

作者	分类依据	类型
Portmann et al(2021)	相对于急流位置	赤道型、两急流中间型、极地型
郑秀雅等(1992)、孙力等(1994)	发生位置	北涡(50°~60°N)、南涡(35°~40°N)、中涡(40°~50°N)
闫玉琴等(1995)	冷空气移动路径	北方型、西北方型、西方型、南方型
谢作威和布和朝鲁(2012)	阻塞环流型	叶尼塞河型、贝加尔湖型、乌拉尔-雅库斯克型、鄂霍次克海-北冰洋型
Porcù et al(2007)、蒋大凯等(2012)	垂直结构	深厚冷涡、浅薄冷涡

## 2 切断冷涡的形成机理

自 20 世纪 40 年代以来,国内外不少学者探究了切断冷涡的形成机理。Palmén(1949)首先分析了一次高空槽变形和放大使得极地冷空气切断的过程,并详细说明了对流层顶降低与对流层上层辐合及相关的上升下沉运动如何导致了相对涡度的增加

和高层气旋的发展。Hsieh(1949)对切断冷涡形成过程的研究指出,冷涡的发展和增强依赖于上游的能量供给,环境风的增强将使得冷涡的旋转运动增强,进而可能延伸到地面并形成从一个从地表直到平流层低层的近乎垂直的系统。Barnes et al(2021)也指出切断冷涡经常在闭合低压已存在的区域发展,先前存在的地面气旋为冷涡提供了斜压环境并使得冷涡更容易延伸到地面。作为中高纬地区重要的环

流系统,切断冷涡的发展变化都离不开大气内部变率和外强迫因子的影响。基于此,2.1 节和 2.2 节分别回顾了天气气候系统和大气外强迫对切断冷涡的影响机理,并归纳了影响东北冷涡的主要因子(图 1)。

### 2.1 天气气候系统对切断冷涡的影响

切断冷涡其主要是由反气旋式 Rossby 波破碎(Ndarana and Waugh, 2010)或平流层极地冷空气向下侵入到中纬度地区形成(Wernli and Sprenger, 2007),急流的变化对切断冷涡系统的高低空配置和垂直运动有着显著影响。例如,朱其文等(1997)分析了东北冷涡活动期间的环流特点,发现 500 hPa 高度场上 40°N 附近是否存在明显的西风急流是后期形成东北冷涡的关键。孙力等(2000)发现在冷涡活跃年夏季,高空西风急流伴有明显的分支现象,亚洲中纬西风急流位置偏南。谢作威和布和朝鲁(2012)指出随着夏季东亚急流的减弱和北进,东北冷涡天数逐渐增加,在 6 月 6 日左右达到峰值,但在入梅后冷涡频数减少,并随着梅雨期结束进一步降低;在急流轴逐渐北移的过程中,其北侧纬向风梯度加大,正涡度加强,有利于冷涡的生成和维持。此外,东北冷涡往往处于高空急流的北侧,其东侧位于急流左侧出口区,有利于高空辐散,进而促使冷涡进一步发展(杨 罇和王丽娟, 2021)。Muñoz et al (2020)发现北半球不同等压面层次上极锋急流和副

热带急流对 Rossby 波破碎事件的贡献不同导致了不同层次上切断冷涡的不同季节分布。但是, Muñoz et al(2020)给出的是初步的结果,引起这种现象的机理还有待进一步分析。同时,全球变暖背景下急流不断向极地移动(Archer and Caldeira, 2008),急流的这种变化对北半球切断冷涡尤其是东北冷涡有什么影响还不得而知。

国内外不少研究都发现切断冷涡的出现常常伴随着阻塞高压,这是由于上层大气中与急流相关的短波向大尺度气流输送能量,这会使得低压槽上游的高压脊增强(Bell and Bosart, 1993)。阻塞高压的出现会使得急流发生分支,有利于冷涡在西风带较弱的地区出现(Fuenzalida et al, 2005)。Nieto et al (2007)发现冬春季欧洲切断冷涡的出现主要与阻塞高压有关,阻塞高压的存在有利于冷涡的发展维持。郑秀雅等(1992)指出暖性阻塞高压稳定在雅库茨克和贝加尔湖附近是对东北冷涡有利的背景环流形势。孙力等(1994)发现有大约 77% 的东北冷涡与东亚地区特别是贝加尔湖以东区域的阻塞高压有关,并且阻塞高压的出现会使得冷涡的维持时间更长。沈柏竹等(2008)和廉毅等(2010)通过谐波分析研究了初夏东北冷涡的低频特征,发现冷涡活动异常年前期在乌拉尔山至东亚和北太平洋分别存在稳定的阻塞形势和超长波槽。刘刚等(2012;2015)对亚洲阻塞高压进行统计发现,夏季中高纬阻塞高压活动与同期东北冷涡活动天数呈显著正相关,东北

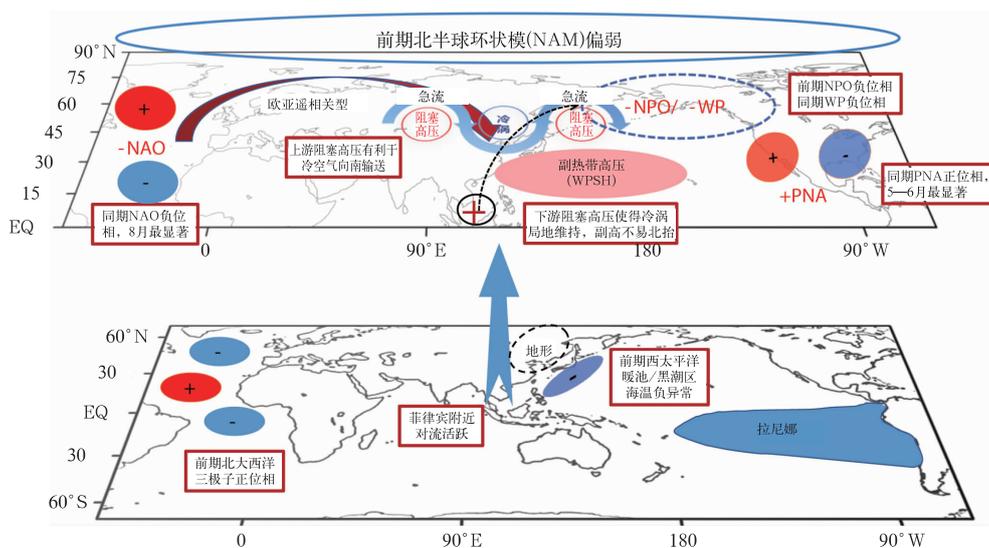


图 1 影响夏季东北冷涡的主要大气和外强迫因子

Fig. 1 Schematic diagram of main atmospheric and external forcing factors affecting the Northeast China cold vortex in summer

冷涡特多年较盛行贝加尔湖阻塞高压和鄂霍次克海阻塞高压,而冷涡特少年则较盛行贝加尔湖阻塞高压。东北冷涡上游乌拉尔山至贝加尔湖的阻塞形势,有利于极地冷空气不断向东北地区输送,使得上游东移的槽加深,为东北冷涡的形成和加强提供了动力条件。而下游阻塞型环流的存在,则阻止了冷涡的规律性东移,有利于冷涡在东北地区稳定和发展(郑秀雅等,1992;梁红等,2009)。布和朝鲁和谢作威(2013)将东北冷涡的动力学特征总结为三点:一是东北亚阻塞形势和副热带异常环流能产生向东北地区传播的 Rossby 波;二是与阻塞形势有关的对流层中低层冷空气使得东北地区出现强迫上传的 Rossby 波;三是上游地区的瞬变强迫与下游环流相配合,使得冷涡环流型维持。

作为影响夏季东亚天气气候异常的重要天气系统,西太平洋副热带高压(以下简称副高)和东北冷涡有着密切的联系。在夏季,副高与鄂霍次克海阻塞高压存在着较好的负相关。当鄂霍次克海阻塞高压盛行时,其与东北冷涡相互配置,有利于冷空气南下,使得副高不易北抬,位置偏南(梁红等,2009)。此时,中涡出现可能性大;反之,副高偏北时,北涡出现机会大(孙力等,1994),冷涡更易在东北西北部生成(黄璇和李栋梁,2020)。冷涡和副高也会相互影响使得对流层中上层气压梯度力做功,导致动能增加并向下输送产生西南低空急流,进而引导南部的暖湿气流向北输送与冷涡带来的干冷空气相互作用形成梅雨锋。对于华南前汛期,当同期东北冷涡活动偏强(弱)时,副高位置也往往偏南(北)(苗春生等,2006a;2006b)。

北上台风是影响我国北方夏季降水的重要天气系统之一,当其与东北冷涡相互作用时,往往会对局地天气产生深远影响。例如,2004 年台风蒲公英、2005 年台风麦莎和 2020 年台风美莎克等。两者相互作用主要表现为冷涡与台风远距离相互作用和台风北上变性并入冷涡两种形式(梁钊明和王东海,2015),其中台风与东北冷涡远距离相互作用是台风远距离暴雨发生的主要形式之一(丛春华等,2011)。孙建华等(2005)对 20 世纪 90 年代影响华北夏季暴雨的系统进行了研究,指出在远距离暴雨过程中,台风东侧东南低空急流为东北冷涡提供了水汽输送,此时冷涡位于华北或东北,槽线一般在  $110^{\circ} \sim 120^{\circ} \text{E}$ ,副高一般西伸偏北,暴雨区处于冷涡和副高之间。梁钊明和王东海(2015)分析了台风蒲公英变

性并入东北冷涡过程的热动力结构及其机理,发现冷涡冷空气的不断侵入以及台风移动形成的相对冷平流使得台风暖心结构消亡,在台风并入冷涡后,高空冷涡槽底的正垂直涡度平流促进气旋由中层直接向高层发展,而高空冷涡槽底急流促进正垂直涡度平流的维持;气旋高空环流的发展反过来削弱了东北冷涡的高层环流,导致高空冷涡中心出现北撤。

除了上述的环流系统,前期与同期的遥相关型也能够影响切断冷涡的发生发展。由于阻塞高压和冷涡都与对流层上层的急流息息相关,当前冬北太平洋涛动(North Pacific Oscillation, NPO)处于负(正)位相时,东北冷涡活动偏强(弱)(刘宗秀等,2002;沈柏竹等,2011)。同期西太平洋遥相关型(western Pacific teleconnection pattern, WP)处于负位相时东北冷涡易于生成,5—6 月和 8 月东北冷涡活动分别与太平洋-北美型(Pacific-North American teleconnection, PNA)和北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation, NAO)密切联系(谢作威和布和朝鲁,2012)。对于冬季冷涡的研究表明,东北亚和北美区域冷涡与 NAO 正位相密切相联,北太平洋区域冷涡则与 NPO 正位相有关,而欧洲区域的冷涡则与 NAO 和 NPO 负位相密切相关(石晨等,2020)。由于上述大气活动中心是北半球环状模(Northern Hemisphere annual mode, NAM)在局地的体现,因此切断冷涡也往往伴随着 NAM 的异常。NAM 和北半球切断冷涡的发生次数有着很好的负相关(Muñoz et al, 2020),当 NAM 偏弱时,极地附近的西风带往往较弱,使得极地冷空气更易向赤道方向输送(何金海等,2006b;苗春生等,2006a;2006b;Nieto et al, 2007;万晓敏等,2013;尹姗等,2013;王遵娅等,2013)。此外,也有研究指出大气准两年振荡(quasi-biennial oscillation, QBO)和切断冷涡的频率也存在一定的关联(Nieto et al, 2008)。

上述的研究结果表明,不同天气气候系统对冷涡有着不同影响。对于东北冷涡,极锋急流的强弱与位置变化会影响冷涡的分布,副高、北上台风和冷涡的相互配置也会影响冷涡的分布和相关的水汽输送。阻塞高压对东北冷涡的发展维持有着重要的影响,其中上游的乌拉尔阻塞高压或贝加尔湖阻塞高压和下游的鄂霍次克海阻塞高压是影响东北冷涡的两个重要天气系统。前冬 NPO 处于负位相,同期 WP 或 NAO 处于负位相等,是东北冷涡有利的遥相关型。

## 2.2 大气外强迫对切断冷涡的影响

不少研究表明切断冷涡的发生发展受下垫面动力条件的影响。Boyer et al(1987)发现切断冷涡在落基山脉附近呈现不同的特征,当冷涡向落基山脉移动时会减速及减弱,而当它越过山脉后又会加速并增强。Pinheiro et al(2017)发现由于切断冷涡和山脉波的相互作用,冷涡在安第斯山脉附近衰减,使得较弱的冷涡在安第斯山脉消亡,而较强的冷涡则将越过山脉并增强。Omar and Abiodun(2021)基于数值敏感性试验模拟了地形对南非切断冷涡的影响,发现地形促进了暖湿空气的抬升并激发了深对流,这可能减弱了西风急流的纬向强度,进而有利于切断冷涡的形成。类似地,东北冷涡往往出现在东北平原和三江平原。一方面,当大气长波经过大兴安岭时,其有关的温度场在迎风坡会降温并减速,而对应的流场则会减弱并加速。由于东北地区大部分位于背风坡,因此低压槽在东北地区上空将超前于温度槽,有利于气旋式涡度在该地区发展;另一方面,小兴安岭和长白山脉的存在阻挡了下游大气长波的西退,也有利于该地区超长波槽的发展(陈秋士,1980;Lian et al,2014)。同时,在地形影响下,背风坡更容易出现“填塞—再生”的过程(陈秋士,1980)。因此,冷涡在东移出海后可能再发展加强,在日本海西部还存在一个大值中心(孙力等,1994)。数值模拟试验证明,长白山地区的地形可以通过使气流绕流、爬坡及产生背风波而影响东北冷涡(刘志杰,2014)。

下垫面热力性质的差异也会对切断冷涡产生重要的影响,其中海陆热力对比可能是冷涡更易在临海地区生成的一个重要原因(布和朝鲁和谢作威,2013)。例如,Porcù et al(2007)发现夏季冷的海面温度抑制了地中海区域对流的发展,因而有利于切断冷涡在该地区维持。以东北冷涡为例,一般而言,夏季海陆热力差异有助于东北冷涡的形成。这是由于夏季东亚大陆是热源,而北太平洋海温往往偏低,明显的海陆热力差异会使得低层东亚大陆和西北太平洋间产生东风异常,导致东亚中高纬地区和中低纬地区间热力差异加大,进而促使高空西风急流增强并在低层激发东亚-太平洋遥相关型(East Asia-Pacific teleconnection pattern, EAP),加强了东亚中高纬地区的上升运动(何金海等,2006a;刘慧斌等,2012;孙燕等,2015)。对于冬季,情况则往往相

反,这也可能是夏季东北冷涡多于其他季节的原因之一。暖季东亚区域明显的海陆热力差异,也很容易导致西风带的减弱和行星波的后退。此外,西亚春季陆面异常增暖能引起初夏贝加尔湖附近地区反气旋性异常环流,导致初夏东北冷涡活动偏弱,使得东北初夏降水减弱(王迪等,2018)。

作为重要的热力外强迫因子,不同大洋海表温度的异常对大气环流系统起着关键作用。何金海等(2006a;2006b)、苗春生等(2006a;2006b)的研究发现东北冷涡的活动与中国近海和北太平洋海温存在显著的负相关。王晓芳等(2013)指出前期西太平洋暖池热含量负异常激发了EAP并存在沿西风急流传播的遥相关波列,从而使得东北冷涡增强。前期黑潮区海温负异常会在夏季低层形成反气旋式风场距平环流,使得副高西北侧出现东北风距平并在东北冷涡东南侧出现西南风距平,导致在副高区和冷涡区均形成气旋式距平环流系统,从而减弱副高并增强东北冷涡(高辉和高晶,2014;Fang et al,2018)。当前期副热带东南太平洋海温偏低时,能通过一系列气旋—反气旋式环流使得副高位置偏强偏西,也使得东北冷涡偏强(高晶和高辉,2015)。除太平洋外,前期北大西洋海温位相的变化也能影响东北冷涡的强度。当前冬和前春北大西洋海温呈现南北“—+—”正位相时,夏季往往会在东北地区出现负位势异常,而在日本和雅库茨克地区出现位势正异常,同期副高位置较往年偏北。这种形势有利于冷空气输送到东北地区并维持,也有利于暖湿气流沿着副高外围向北输送,导致北方降水异常偏多(赵俊虎等,2014)。

对于不同位相 ENSO 事件的影响,Nieto et al(2007)认为当 ENSO 处于负位相时,北大西洋阻塞高压往往更容易发生,这会使得大西洋上空的急流减弱,从而有利于欧洲地区切断冷涡的发生,不过 ENSO 对欧洲切断冷涡的影响在统计意义上并不显著。Muñoz et al(2020)也发现 ENSO 和南北半球切断冷涡年发生数在统计意义上并不显著,不过他们在统计这种关系的时候并没有分区域,而是将北半球作为一个整体考虑。相反地,苗春生等(2006a;2006b)研究东北冷涡对华南前汛期降水期的影响发现,当东北冷涡异常强(弱)时,其前期对应着拉尼娜(厄尔尼诺)的成熟或发展阶段,由此可见东北冷涡的特殊性。此外,也有研究指出前冬欧亚雪盖面

积偏小时,春季东北冷涡强度偏弱(尹姗等,2013)。

从上述研究可以看到,下垫面的动力和热力作用往往对切断冷涡的形成发展有着重要的影响。对于东北冷涡而言,前期黑潮区、西太平洋暖池、北大西洋和赤道中东太平洋等关键区域的海温异常往往能通过激发一系列 Rossby 波列进而影响东北冷涡的发展。同时,东北地区独特的地形分布也使得切断冷涡更易在该地区生成。不过,有关地形对东北冷涡影响的研究还较少,地形不同分布对冷涡发生位置、发生发展和降水分布等的影响机理还有待进一步探究。此外,有关气候模式对东北冷涡的模拟和改进的研究还较少,在这方面只有一些简单的尝试,这也是今后短期气候预测的一个重要问题。

### 3 切断冷涡对中国天气气候的影响

东北冷涡是一个覆盖范围广、持续时间长、深厚冷性的大气涡旋系统,它的出现往往会在局地引起低温连阴雨、暴雨洪涝、突发性强对流天气、低温冷害、暴(风)雪等高影响天气。同时,频繁发生的冷涡活动不仅影响中、长期的天气,而且能引起季节尺度上气温和降水的异常,具有显著的“气候效应”(何金海等,2006a;胡开喜等,2011)。东北冷涡活动越频繁、强度越强,低温事件也越频发,累积低温时间也越长,进而导致东北冷涡影响区域季节平均气温偏低;反之当东北冷涡活动较少,强度较弱时,东北冷涡影响区域季节平均气温高(孙力,1997)。

夏季东北冷涡与东北地区的降水有着显著的正相关关系,频繁的东北冷涡活动会导致“冷涡雨季”的出现,使得东北地区夏季降水偏多;而东北冷涡偏弱时,东北地区夏季降水则偏少(何金海等,2006b;刘刚等,2017)。如1998年夏季松嫩流域百年一遇的持续性特大强降水(孙力和安刚,2001)。特别地,2021年黑龙江和嫩江流域发生了严重汛情,也与东北冷涡的频繁活动密切相关。东北冷涡的天气、气候效应也具有非局地的特征,冷涡可引导高纬的冷空气南下影响中低纬度(华北、华东、华南等)地区,冷涡越强(弱)很可能导致江淮梅雨量或华南降水偏多(少)(苗春生等,2006a;2006b;孙燕等,2015)。弱的东北冷涡活动还可能造成中国夏季异常高温和北方区域干旱等(Ding et al,2019)。

## 4 结论与讨论

目前,对于切断冷涡的研究取得了明显的进步,主要集中在切断冷涡的时空分布变化特征、冷涡活动异常对不同区域温度和降水的影响机制、不同天气气候系统和大气外强迫因子对于冷涡的异常影响机理等。但是,在近几十年全国夏季降水预测技巧显著提升的背景下,近几年东北地区夏季降水的预测技巧偏低(赵俊虎等,2020;Ding and Gao,2021)。作为影响东北乃至我国中东部夏季降水的重要天气系统,东北冷涡的影响不可忽视。还存在以下一些有待进一步解决的关键科学问题。

(1)加强东北冷涡与北上台风的相互作用及其对东北夏季降水的影响机理研究。当东北冷涡与其他天气系统(如台风、气旋等)相互作用时能够产生暴雨甚至特大暴雨(王东海等,2007)。虽然目前有部分基于天气学个例的研究,但是东北冷涡与北上台风相互作用及台风变性的机理还不是很清晰,这种相互作用下产生暴雨的热动力机制和地形等外强迫作用机制也有待进一步探究。

(2)加强东北冷涡对我国中东部降水影响机理的研究。东北冷涡具有10~30 d的振荡周期,并且其与我国中东部夏季降水明显相关(刘慧斌等,2012),其中EAP型遥相关很可能是一个重要的因子(翟盘茂等,2016)。目前东北冷涡对我国中东部降水的影响机理还不清晰,特别是东北冷涡强度、频次、路径对中东部地区降水异常的影响及其与中低纬天气系统(如西风槽、副高、热带低压系统等)相互作用的机制还有待进一步研究。此外,相关关键因子的数值模拟试验和检验评估也有待进一步开展,这对短期气候预测是一个十分重要的问题。

(3)加强冷涡如何影响暴风雪的物理机制研究。冬季切断冷涡出现次数相对较少,但冷涡的发生发展对局地天气也存在很大影响。国外不少研究指出,切断冷涡是造成北美冬季风暴(Palmén and Newton,1969;Wallace and Hobbs,2006)和欧洲寒冬(Lejenäs,1989)的重要天气系统。胡开喜等(2011)也发现冬季东北冷涡活动的强弱与东亚冬季风密切相关,东北冷涡活动强(弱)的年份,东亚冬季风往往也偏强(弱)。冬季东北冷涡活动对我国冬季持续性极端低温和北方暴风雪都有显著影响(秦华锋和金荣花,2008;石晨等,2020)。特别地,2021年

11月中上旬,受高空切断冷涡的影响,中国北方出现了暴风雪天气过程,对多地造成了不小的经济损失。但是,目前国内对于冬季切断冷涡影响的研究关注还较少,对于冷涡如何导致暴风雪的物理机制还有待进一步探究。

(4)加强气候变化对东北亚冷涡的影响研究。随着全球变暖,急流不断向极地移动(Hu and Fu, 2007; Archer and Caldeira, 2008; Pena-Ortiz et al, 2013),同时副热带急流也在不断减弱(Archer and Caldeira, 2008),而急流对 Rossby 波破碎事件的产生具有重要影响。未来气候变化背景下,急流及相关的影响系统该如何变化?目前,国外一些研究基于模式模拟分析了未来气候背景下各敏感区(如地中海区域)切断冷涡的变化,发现切断冷涡对这些区域的影响将增加(Ferreira, 2021)。但是,目前国内这方面的研究还很少。未来东北亚区域切断冷涡的分布、频次、强度、趋势、持续性和季节性等特征、相关的发生机理及冷涡对降水的影响是否会发生变化?这样的变化是由自然变率主导还是受人类活动的影响还不得而知。

## 参考文献

- 布和朝鲁,谢作威,2013. 东北冷涡环流及其动力学特征[J]. 气象科技进展, 3(3): 34-39. Bueh C, Xie Z W, 2013. Northeastern China cold vortex circulation and its dynamical features[J]. Adv Meteor Sci Technol, 3(3): 34-39(in Chinese).
- 陈力强,陈受钧,周小珊,等,2005. 东北冷涡诱发的一次 MCS 结构特征数值模拟[J]. 气象学报, 63(2): 173-183. Chen L Q, Chen S J, Zhou X S, et al, 2005. A numerical study of the MCS in a cold vortex over Northeastern China[J]. Acta Meteor Sin, 63(2): 173-183(in Chinese).
- 陈秋士,1980. 地形对长波和超长波不稳定发展的影响[J]. 气象学报, 38(1): 1-15. Chen Q S, 1980. The mountain effects on the baroclinic instability of the long and ultra-long waves in the atmosphere[J]. Acta Meteor Sin, 38(1): 1-15(in Chinese).
- 丛春华,陈联寿,雷小途,等,2011. 台风远距离暴雨的研究进展[J]. 热带气象学报, 27(2): 264-270. Cong C H, Chen L S, Lei X T, et al, 2011. An overview on the study of tropical cyclone remote rainfall[J]. J Trop Meteor, 27(2): 264-270(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).
- 何金海,吴志伟,江志红,等,2006a. 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, 2006a. “Climate effect” of the northeast cold vortex and its influences on Meiyu[J]. Chin Sci Bull, 51(23): 2803-2809(in Chinese).
- 何金海,吴志伟,祁莉,等,2006b. 北半球环状模和东北冷涡与我国东北夏季降水关系分析[J]. 气象与环境学报, 22(1): 1-5. He J H, Wu Z W, Qi L, et al, 2006b. Relationships among the Northern Hemisphere annual mode, the northeast cold vortex and the summer rainfall in Northeast China[J]. J Meteor Environ, 22(1): 1-5(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).
- 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).
- 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 D K, Wang J S, Yan Q, 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]. J Meteor Environ, 28(2): 5-9(in Chinese).
- 廉毅,布和朝鲁,谢作威,等,2010. 初夏东北冷涡活动异常与北半球环流低频变化[J]. 大气科学, 34(2): 429-439. Lian Y, Bueh C, Xie Z W, et al, 2010. The anomalous cold vortex activity in Northeast China during the early summer and the low-frequency variability of the Northern Hemispheric atmosphere circulation[J]. Chin J Atmos Sci, 34(2): 429-439(in Chinese).
- 梁红,王元,郭正强,2009. 夏季东北冷涡与副高、鄂海阻高的遥相关关系[J]. 气象科学, 29(6): 793-796. Liang H, Wang Y, Guo Z Q, 2009. The teleconnection relationship between the northeast cold vortex and the subtropical high, the Ohotstk high in summer[J]. J Meteor Sci, 29(6): 793-796(in Chinese).
- 梁钊明,王东海,2015. 一次台风变性并入东北冷涡过程的动力诊断分析[J]. 大气科学, 39(2): 397-412. Liang Z M, Wang D H, 2015. A diagnostic study of a typhoon transitioning and merging into the northeast cold vortex[J]. Chin J Atmos Sci, 39(2): 397-412(in Chinese).
- 刘刚,封国林,秦玉琳,等,2017. 初夏东北地区冷涡降水“累积效应”[J]. 大气科学, 41(1): 202-212. Liu G, Feng G L, Qin Y L, et al, 2017. “Cumulative effect” of cold vortex precipitation in Northeast China in early summer[J]. Chin J Atmos Sci, 41(1): 202-212(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,沈柏竹,廉毅,等,2012. 亚洲阻塞高压分类及其与东北冷涡活动和东北夏季低温的联系[J]. *地理科学*, 32(10):1269-1274.
- Liu G, Shen B Z, Lian Y, et al, 2012. The sorts of 500 hPa blocking high in Asia and its relations to cold vortex and aestival low temperature in northeast of China[J]. *Sci Geogr Sin*, 32(10):1269-1274(in Chinese).
- 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 H B, Wen M, He J H, et al, 2012. Characteristics of the northeast cold vortex at intraseasonal time scale and its impact[J]. *Chin J Atmos Sci*, 36(5):959-973(in Chinese).
- 刘志杰,2014. 长白山地形和日本海海温对东北冷涡的影响[D]. 青岛:中国海洋大学.
- Liu Z J, 2014. Impact of Changbai Mountain and SST in the Japan Sea on northeast cold vortex[D]. Qingdao: Ocean University of China(in Chinese).
- 刘宗秀,廉毅,高枫亭,等,2002. 东北冷涡持续活动时期的北半球500hPa环流特征分析[J]. *大气科学*, 26(3):361-372.
- Liu Z X, Lian Y, Gao Z T, et al, 2002. Analyses of the Northern Hemisphere circulation characters during northeast cold vortex persistence[J]. *Chin J Atmos Sci*, 26(3):361-372(in Chinese).
- 苗春生,吴志伟,何金海,2006a. 北半球环状模(NAM)、东北冷涡与前汛期华南旱涝[J]. *热带气象学报*, 22(6):593-599.
- Miao C S, Wu Z W, He J H, 2006a. Relationship among the Northern Hemisphere annual mode, the Northeast China cold vortex and precipitation during the first yearly rainy period in South China[J]. *J Trop Meteor*, 22(6):593-599(in Chinese).
- 苗春生,吴志伟,何金海,等,2006b. 近50年东北冷涡异常特征及其与前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, 2006b. 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]. *Chinese J Atmos Sci*, 30(6):1249-1256(in Chinese).
- 秦华锋,金荣花,2008. “0703”东北暴雪成因的数值模拟研究[J]. *气象*, 34(4):30-38.
- Qin H F, Jin R H, 2008. Numerical simulation study of the cause of snowstorm process in northeast of China on March 3-5 of 2007[J]. *Meteor Mon*, 34(4):30-38(in Chinese).
- 沈柏竹,李尚锋,廉毅,2008. 初夏东北冷涡活动的谐波分析[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 38(S1):204-208.
- Shen B Z, Li S F, Lian Y, 2008. The harmonic analysis of cold vortex of the North-East China in early summer[J]. *J Jilin Univ (Earth Sci Ed)*, 38(S1):204-208(in Chinese).
- 沈柏竹,刘实,廉毅,等,2011. 2009年中国东北夏季低温及其与前期海气系统变化的联系[J]. *气象学报*, 69(2):320-333.
- Shen B Z, Liu S, Lian Y, et al, 2011. An investigation into 2009 summer low temperature in Northeast China and its association with prophase changes of the air-sea system[J]. *Acta Meteor Sin*, 69(2):320-333(in Chinese).
- 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 C, Lian Y, Yang X, et al, 2020. The relationship between winter cut-off cold vortexes in Northeast Asia and Northern Hemisphere as well as their connections with extreme low temperature events in China[J]. *Acta Meteor Sin*, 78(5):778-795(in Chinese).
- 孙建华,张小玲,卫捷,等,2005. 20世纪90年代华北大暴雨过程特征的分析研究[J]. *气候与环境研究*, 10(3):492-506.
- Sun J H, Zhang X L, Wei J, et al, 2005. A study on severe heavy rainfall in North China during the 1990s[J]. *Clima Environ Res*, 10(3):492-506(in Chinese).
- 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 L, 1997. A study of the persistence activity of northeast cold vortex in China[J]. *Sci Atmos Sin*, 21(3):297-307(in Chinese).
- 孙力,安刚,2001. 1998年松嫩流域东北冷涡大暴雨过程的诊断分析[J]. *大气科学*, 25(3):342-354.
- Sun L, An G, 2001. A diagnostic study of northeast cold vortex heavy rain over the Songhuajiang-Nenjiang River Basin in the summer of 1998[J]. *Chin J Atmos Sci*, 25(3):342-354(in Chinese).
- 孙力,安刚,廉毅,等,2000. 夏季东北冷涡持续性活动及其大气环流异常特征的分析[J]. *气象学报*, 58(6):704-714.
- Sun L, An G, Lian Y, et al, 2000. A study of the persistent activity of northeast cold vortex in summer and its general circulation anomaly characteristics[J]. *Acta Meteor Sin*, 58(6):704-714(in Chinese).
- 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 L, Zheng X Y, Wang Q, 1994. The climatological characteristics of northeast cold vortex in China[J]. *Quart J Appl Meteor*, 5(3):297-303(in Chinese).
- 孙燕,韩桂荣,李超,2015. 夏季东北冷涡异常对淮河流域降水影响机制的数值模拟[J]. *高原气象*, 34(4):1149-1157.
- Sun Y, Han G R, Li C, 2015. Numerical studies of affection of northeast cold vortex abnormal on rainfall over Huaihe River Valley in summer[J]. *Plateau Meteor*, 34(4):1149-1157(in Chinese).
- 万晓敏,付遵涛,胡永云,2013. 平流层NAM异常对东北冷涡活动影响的研究[J]. *北京大学学报:自然科学版*, 2013(3):417-425.
- Wan X M, Fu Z T, Hu Y Y, 2013. The influence of stratospheric anomalies on the northeast cold vortex[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2013(3):417-425(in Chinese).
- 王迪,陈海山,赵昶昱,2018. 春季西亚地表热力异常与初夏东北冷涡活动年代际变化的联系[J]. *大气科学*, 42(1):70-80.
- Wang D, Chen H S, Zhao C Y, 2018. Connection between spring land surface thermal anomalies over West Asia and decadal variation of early summer cold vortex in Northeast China[J]. *Chin J Atmos Sci*, 42(1):70-80(in Chinese).
- 王东海,钟水新,刘英,等,2007. 东北暴雨的研究[J]. *地球科学进展*, 22(6):549-560.
- Wang D H, Zhong S X, Liu Y, et al, 2007. Advances in the study of rainstorm in Northeast China[J]. *Adv Earth Sci*, 22(6):549-560(in Chinese).
- 王晓芳,何金海,廉毅,2013. 前期西太平洋暖池热含量异常对中国东北地区夏季降水的影响[J]. *气象学报*, 71(2):305-317.
- Wang X F, He J H, Lian Y, 2013. Effect of the previous anomalous heat

- content in the western Pacific warm pool on the summer rainfall over Northeast China[J]. *Acta Meteor Sin*, 71(2): 305-317 (in Chinese).
- 王遵娅,周兵,王艳姣,等,2013. 2013年春季我国气候异常特征及其可能原因[J]. *气象*, 39(10): 1374-1378. Wang Z Y, Zhou B, Wang Y J, et al, 2013. Climatic features and possible causes for spring 2013[J]. *Meteor Mon*, 39(10): 1374-1378(in Chinese).
- 谢作威,布和朝鲁,2012. 东北冷涡低频活动特征及背景环流[J]. *气象学报*, 70(4): 704-716. Xie Z W, Bueh C, 2012. Low frequency characteristics of northeast China cold vortex and its background circulation pattern[J]. *Acta Meteor Sin*, 70(4): 704-716(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).
- 闫玉琴,韩秀君,毛贤敏,1995. 东北冷涡的环流形势分类及其谱特征[J]. *辽宁气象*, (4): 3-6. Yan Y Q, Han X J, Mao X M, 1995. Classification of circulation situation and spectral characteristics of northeast cold vortex[J]. *Liaoning Qixiang*, (4): 3-6 (in Chinese).
- 杨钊,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 northeast cold vortex from May to September[J]. *Trans Atmos Sci*, 44(5): 773-781(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).
- 杨健,吕达仁,2003. 东亚地区一次切断低压引起的平流层、对流层交换数值模拟研究[J]. *大气科学*, 27(6): 1031-1044. Yang J, Lü D R, 2003. A simulation study of stratosphere-troposphere exchange due to cut-off-low over Eastern Asia[J]. *Chin J Atmos Sci*, 27(6): 1031-1044(in Chinese).
- 尹姗,冯娟,李建平,2013. 前冬北半球环状模对春季中国东部北方地区极端低温的影响[J]. *气象学报*, 71(1): 96-108. Yin S, Feng J, Li J P, 2013. Influences of the preceding winter Northern Hemisphere annular mode on the spring extreme low temperature events in the north of eastern China[J]. *Acta Meteor Sin*, 71(1): 96-108(in Chinese).
- 翟盘茂,李蕾,周佰铨,等,2016. 江淮流域持续性极端降水及预报方法研究进展[J]. *应用气象学报*, 27(5): 631-640. Zhai P M, Li L, Zhou B Q, et al, 2016. Progress on mechanism and prediction methods for persistent extreme precipitation in the Yangtze-Huai River Valley[J]. *J Appl Meteor Sci*, 27(5): 631-640 (in Chinese).
- 章大全,袁媛,韩荣青,2023. 2022年汛期气候预测效果评述及先兆信号分析[J]. *气象*, 49(3): 365-378. Zhang D Q, Yuan Y, Han R Q, 2023. Overview of climate prediction for the summer 2022 in China and its precursors [J]. *Meteor Mon*, 49(3): 365-378 (in Chinese).
- 张立祥,李泽椿,2008. 短波辐射对东北冷涡强对流影响的模拟分析[J]. *气象*, 34(12): 3-10. Zhang L X, Li Z C, 2008. Numerical analysis of solar shortwave radiation affecting severe convection in cold vortex over Northeastern China [J]. *Meteor Mon*, 34(12): 3-10(in Chinese).
- 张宇,张良,王素萍,等,2017. 2017年夏季全国干旱状况及其影响与成因[J]. *干旱气象*, 35(5): 899-905. Zhang Y, Zhang L, Wang S P, et al, 2017. Drought events and its influence in summer of 2017 in China[J]. *J Arid Meteor*, 35(5): 899-905(in Chinese).
- 赵俊虎,陈丽娟,章大全,2022. 2021年夏季我国气候异常特征及成因分析[J]. *气象*, 48(1): 107-121. Zhao J H, Chen L J, Zhang D Q, 2022. Characteristics and causes for the climate anomalies over China in summer 2021[J]. *Meteor Mon*, 48(1): 107-121(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).
- 赵俊虎,支蓉,申茜,等,2014. 2012年我国夏季降水预测与异常成因分析[J]. *大气科学*, 38(2): 237-250. Zhao J H, Zhi R, Shen Q, et al, 2014. Prediction of the distribution of the 2012 summer rainfall in China and analysis of the cause for anomaly[J]. *Chin J Atmos Sci*, 38(2): 237-250(in Chinese).
- 郑秀雅,张廷治,白人海,1992. 东北暴雨[M]. 北京:气象出版社, Zheng X Y, Zhang T Z, Bai R H, 1992. Rainstorm over Northeast China [M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 朱其文,黄秀娟,刘实,1997. 东北冷涡大型环流演变特征以及系统配置关系的研究[C]//东北冷涡研究文集. 沈阳:辽宁出版社: 14-29. Zhu Q W, Huang X J, Liu S, 1997. The evolution characteristics of large-scale circulation and system configuration relations in cold vortex over Northeast China[C]//The Study Series of Cold Vortex over Northeast China. Shenyang: Liaoning Press: 14-29(in Chinese).
- Archer C L, Caldeira K, 2008. Historical trends in the jet streams [J]. *Geophys Res Lett*, 35(8): L08803.
- Barnes M A, Ndarana T, Landman W A, 2021. Cut-off lows in the Southern Hemisphere and their extension to the surface[J]. *Climate Dyn*, 56(11): 3709-3732.
- Bell G D, Bosart L F, 1993. A case study diagnosis of the formation of an upper-level cutoff cyclonic circulation over the eastern United States[J]. *Mon Wea Rev*, 121(6): 1635-1655.
- Boyer D L, Chen R, Davies P A, 1987. Some laboratory models of flow past the Alpine/Pyrenees mountain complex[J]. *Meteor Atmos Phys*, 36(1): 187-200.
- Crocker A M, Godson W L, Penner C M, 1947. Frontal contour charts[J]. *J Atmos Sci*, 4(3): 95-99.
- 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.

- Ding T, Yuan Y, Zhang J M, et al, 2019. 2018: The hottest summer in China and possible causes[J]. *J Meteor Res*, 33(4): 577-592.
- Fang Y H, Chen K Q, Chen H S, et al, 2018. The remote responses of early summer cold vortex precipitation in northeastern China to the precedent sea surface temperatures[J]. *Atmos Res*, 214: 399-409.
- Ferreira R N, 2021. Cut-off lows and extreme precipitation in eastern Spain: current and future climate[J]. *Atmosphere*, 12(7): 835.
- Fuenzalida H A, Sánchez R, Garreaud R D, 2005. A climatology of cutoff lows in the Southern Hemisphere[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 110(D18): D18101.
- He J H, Wu Z W, Jiang Z H, et al, 2007. "Climate effect" of the northeast cold vortex and its influences on Meiyu[J]. *Chin Sci Bull*, 52(5): 671-679.
- Hoskins B J, McIntyre M E, Robertson A W, 1985. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 111(470): 877-946.
- Hsieh Y P, 1949. An investigation of a selected cold vortex over North America[J]. *J Meteor*, 6(6): 401-410.
- Hu Y, Fu Q, 2007. Observed poleward expansion of the Hadley circulation since 1979[J]. *Atmos Chem Phys*, 7(19): 5229-5236.
- Lejenäs H, 1989. The severe winter in Europe 1941-42: the large-scale circulation, cut-off lows, and blocking[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 70(3): 271-281.
- Lian Y, Zhao B, Shen B Z, et al, 2014. Numerical experiments on the impact of spring North Pacific SSTA on NPO and unusually cool summers in Northeast China[J]. *Adv Atmos Sci*, 31(6): 1305-1315.
- Matsumoto S, Ninomiya K, 1965. On the analysis of a cold vortex with steady eastward movement[J]. *Papers in Meteor, and Geophys*, 16(1): 1-8.
- Muñoz C, Schultz D, Vaughan G, 2020. A midlatitude climatology and interannual variability of 200- and 500-hPa cut-off lows[J]. *J Climate*, 33(6): 2201-2222.
- Ndarana T, Waugh D W, 2010. The link between cut-off lows and Rossby wave breaking in the Southern Hemisphere[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 136(649): 869-885.
- Nieto R, Gimeno L, de La Torre L, et al, 2005. Climatological features of cutoff low systems in the Northern Hemisphere[J]. *J Climate*, 18(16): 3085-3103.
- Nieto R, Gimeno L, de la Torre L, et al, 2007. Interannual variability of cut-off low systems over the European sector: the role of blocking and the Northern Hemisphere circulation modes[J]. *Meteor Atmos Phys*, 96(1): 85-101.
- Nieto R, Sprenger M, Wernli H, et al, 2008. Identification and climatology of cut-off lows near the tropopause[J]. *Ann NY Acad Sci*, 1146(1): 256-290.
- Ninomiya K, 1991. Polar low development over the east coast of the Asian continent on 9-11 December 1985[J]. *J Meteor Soc Japan Ser II*, 69(6): 669-685.
- Oakley N S, Redmond K T, 2014. A climatology of 500-hPa closed lows in the Northeastern Pacific Ocean, 1948-2011[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 53(6): 1578-1592.
- Omar S A, Abiodun B J, 2021. Simulating the influence of topography on cut-off lows over Southern Africa[J]. *Int J Climatol*, 41(S1): E2231-E2243.
- Palmén E, 1949. Origin and structure of high-level cyclones south of the; maximum westerlies[J]. *Tellus*, 1(1): 22-31.
- Palmén E H, Newton C W, 1969. *Atmospheric Circulation Systems: Their Structure and Physical Interpretation*[M]. New York: Academic Press.
- Pena-Ortiz C, Gallego D, Ribera P, et al, 2013. Observed trends in the global jet stream characteristics during the second half of the 20th Century[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 118(7): 2702-2713.
- Petterssen S, 1950. Some aspects of the general circulation of the atmosphere[C]//Centenary Proceedings of the Royal Meteorological Society. London: Royal Meteorological Society, 120: 155.
- Petterssen S, 1955. A general survey of factors influencing development at sea level[J]. *J Meteor*, 12(1): 36-42.
- Pinheiro H R, Hodges K I, Gan M A, et al, 2017. A new perspective of the climatological features of upper-level cut-off lows in the Southern Hemisphere[J]. *Climate Dyn*, 48(1): 541-559.
- Porcù F, Carrasi A, Medaglia C M, et al, 2007. A study on cut-off low vertical structure and precipitation in the Mediterranean region[J]. *Meteor Atmos Phys*, 96(1): 121-140.
- Portmann R, Crezee B, Quinting J, et al, 2018. The complex life cycles of two long-lived potential vorticity cut-offs over Europe[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 144(712): 701-719.
- Portmann R, Sprenger M, Wernli H, 2021. The three-dimensional life cycles of potential vorticity cutoffs: a global and selected regional climatologies in ERA-Interim (1979-2018)[J]. *Wea Climate Dyn*, 2(2): 507-534.
- Price J D, Vaughan G, 1993. The potential for stratosphere-troposphere exchange in cut-off-low systems[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 119(510): 343-365.
- Reboita M S, Nieto R, Gimeno L, et al, 2010. Climatological features of cutoff low systems in the Southern Hemisphere[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 115(D17): D17104.
- Shimada U, Wada A, Yamazaki K, et al, 2014. Roles of an upper-level cold vortex and low-level baroclinicity in the development of polar lows over the Sea of Japan[J]. *Tellus A*, 66(1): 24694.
- van Delden A, Neggers R, 2003. A case study of tropopause cyclogenesis[J]. *Meteor Appl*, 10(2): 187-199.
- Wallace J M, Hobbs P V, 2006. *Atmospheric Science: An Introductory Survey*[M], 2nd ed. Amsterdam: Elsevier.
- Wernli H, Sprenger M, 2007. Identification and ERA-15 climatology of potential vorticity streamers and cutoffs near the extratropical tropopause[J]. *J Atmos Sci*, 64(5): 1569-1586.
- Xie Z W, Bueh C, 2015. Different types of cold vortex circulations over Northeast China and their weather impacts[J]. *Mon Wea Rev*, 143(3): 845-863.