

# 对流层北极极涡强度和形态的年代际变化及其季节性特征

高文哲, 丁瑞昌, 黄菲\*

中国海洋大学深海多圈层与地球系统前沿科学中心和物理海洋教育部重点实验室, 山东 青岛

收稿日期: 2024年4月25日; 录用日期: 2024年5月24日; 发布日期: 2024年5月31日

## 摘要

基于1960~2020年的NCEP/NCAR再分析资料中500 hPa月平均位势高度场数据, 结合500 hPa描述北极极涡边界的特征等值线, 本文定义并计算了对流层描述北极极涡物理特征的范围指数、强度指数和综合指数, 并在此基础上分析了1960~2020年对流层北极极涡的季节变化以及年际年代际变化特征, 初步探究了全球变暖背景下北极极涡的强度和形态变化新特征及其与北极放大的关系。结果表明: 1) 北极极涡的范围和强度具有一致的季节变化特征, 夏季7月份极涡范围最小, 强度最弱, 极涡边界特征等值线(5560 gpm)呈四波结构; 冬季1月份极涡范围最大, 强度最强, 极涡特征等值线呈现三波结构。2) 北极极涡的综合指数与强度指数具有高度一致的年际年代际变化特征, 除夏季外, 其他季节二者之间的相关达0.99以上。北极极涡的变化主要体现在极涡强度的年代际减弱, 年代际转折时间发生在1995年前后, 秋季的年代际减弱最显著。3) 北极极涡的空间形态也发生了显著的年代际变化, 特别是在春季绕极非对称的北极极涡中心在后一年代时段分裂成东西半球的欧亚和北美两个中心。

## 关键词

北极极涡, 对流层, 环流指数, 年代际变化, 强度, 形态变化, 北极放大

# Seasonality and Interdecadal Variation of the Tropospheric Arctic Polar Vortex Intensity and Spatial Pattern

Wenzhe Gao, Ruichang Ding, Fei Huang\*

Frontiers Science Center for Deep Ocean Multispheres and Earth System and Key Laboratory of Physical Oceanography, Ocean University of China, Qingdao Shandong

Received: Apr. 25<sup>th</sup>, 2024; accepted: May 24<sup>th</sup>, 2024; published: May 31<sup>st</sup>, 2024

\*通讯作者。

文章引用: 高文哲, 丁瑞昌, 黄菲. 对流层北极极涡强度和形态的年代际变化及其季节性特征[J]. 气候变化研究快报, 2024, 13(3): 724-734. DOI: 10.12677/ccr.2024.133082

## Abstract

Based on the 500 hPa monthly reanalysis data during 1960~2020 from the National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR), combined with the characteristic contour line of 500 hPa describing the boundary of the Arctic polar vortex, this paper defines and calculates the polar vortex extent index, intensity index and comprehensive index describing the physical characteristics of the Arctic polar vortex. On this basis, the seasonal variation, interannual and interdecadal variation characteristics of the tropospheric Arctic polar vortex during 1960~2020 are analyzed, and the new characteristics of the intensity and spatial pattern changes of the polar vortex under the background of global warming and its relationship with the Arctic Amplification are preliminarily explored. The results show that: 1) the extent and intensity of the polar vortex have the same seasonal variation characteristics. The extent is the smallest and the intensity is the weakest in July, and the characteristic contour of the polar vortex boundary (5560 gpm) shows a four-wave structure in summer. The extent is the largest and the intensity is the strongest in January, and the characteristic contour of the polar vortex presents a three-wave structure in winter. 2) The composite index and intensity index of polar vortex have highly consistent interdecadal variation characteristics, and the correlation coefficient between them is more than 0.99 in other seasons except summer. The variation of the polar vortex is mainly reflected by the interdecadal weakening of the polar vortex intensity. The turning year occurs around 1995, and the interdecadal weakening is most significant in autumn. 3) The spatial pattern of the polar vortex also has significant interdecadal changes, especially in spring, the center of the polar vortex which is asymmetrical around the pole splits into two centers located in the eastern and western hemispheres of Eurasia and North America during the later decades.

## Keywords

Arctic Polar Vortex, Troposphere, Circulation Index, Interdecadal Variation, Intensity, Pattern Change, Arctic Amplification

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

北极极涡是北半球重要的环流系统,极涡的活动变化会对全球的大气环流、气候变化产生重要影响。极涡一般是指位于对流层中上层且中心在极区的大尺度气旋性环流系统,也称绕极涡[1]。贯穿平流层和对流层,是大规模极冷空气的源地和象征[2]。

对于北极极涡的位置和强度等特征量的表述,目前有许多不同的定义方法。Laseur 首次定义并计算了描述极涡的面积大小、位置的物理量[3],对于极涡特征量的研究主要基于天气图进行[4]。到了 20 世纪 90 年代,除 Angell 以外[5],其他研究者多借助位势高度场对极涡的大小进行定义和相应的计算[6] [7]。从 20 世纪 80 年代开始,我国极涡与气温长期预报课题协作组开展了对描述极涡特征的物理量及其与我国气温变化关系的研究,对描述极涡的各个物理量用不同的方法进行定义和分析,最终确定了一套能够反映极涡的环流变化特征参数方案[8]。

在过去几十年里,北极地区的地表气温正在以几乎是全球平均速度两倍以上速度明显变暖,这种现象被称为北极放大(Arctic Amplification, AA) [9] [10]。北极放大可以引发一系列气候效应,导致北极海

冰减少, 永久冻土融化等[11] [12] [13] [14], 引起了人们极大的关注。在全球不断变暖的大背景下, 北极地区的海冰融化加剧、不断减少, 北极、中纬度地区环流特征也有许多新的变化[15]。对极涡的研究不仅有利于进一步探究极区与全球大气环流的作用机理, 而且对我国极端天气气候事件的研究与预报也很重要。

由于 500 hPa 等压面大体上代表了地球整层大气的平均层, 又接近对流层大气的无辐散层, 该层上的大气环流对地面天气系统有很好的引导气流作用, 因此本文选取 500 hPa 极涡南界的特征等值线来表征对流层北极极涡边界, 进而计算极涡的面积指数、强度指数和综合指数, 分析极涡面积和强度的时空变化规律, 为深入理解北极极涡的变化规律并提高其预报水平提供了重要基础。

## 2. 研究区域与观测数据

### 2.1. 数据来源

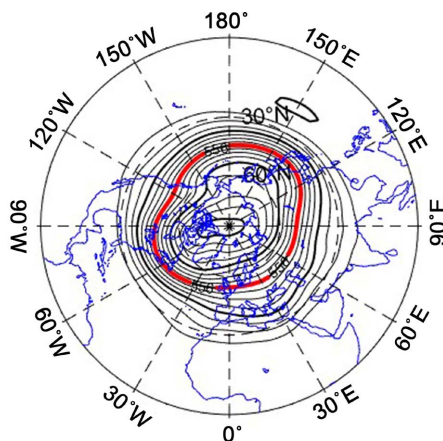
本研究使用的大气资料来自美国国家环境预报中心和大气研究中心(National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research, NCEP/NCAR)的逐月再分析数据集, 分辨率为  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ , 包含位势高度、温度等数据。

### 2.2. 极涡环流指数定义

#### 2.2.1. 极涡范围的确定

对长周期的预报来讲, 可以把北半球(大部分地区)的天气气候变化归因于北极极涡和副热带高压两个环流系统的相互作用[16]。因此, 可以把北半球极涡外围边界定义在极涡和副热带高压的交界区域上, 也就是中纬度( $30^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$  之间)西风急流的急流轴上(或者可以看成位势高度场上经向梯度最大的区域), 近似选取最接近位势高度最大梯度的特征等高线作为极涡的南界。从气候态的 500 hPa 位势高度场出发, 计算位势高度场的经向梯度, 选取急流轴在各个经度上对应的点, 该点确定为极涡在该经度上的最南界, 以此类推, 求出所有经线上急流轴对应的点处的位势高度均值, 即北极极涡的特征等高线, 特征等值线包围的区域我们将其定义为极涡。通过对各月、各季节的极涡特征线的分布变化, 结合功率谱分析等方法, 我们可以得到极涡范围的季节变化等特征。

根据上述定义, 计算 500 hPa 描述北极极涡南界的特征等值线, 即 5560 gpm 等高线(图 1)。



**Figure 1.** 500 hPa climatology geopotential height (the interval is 4 m; red contour line is 5560 gpm which represents the characteristic contour of the south boundary of the Arctic polar vortex)

**图 1.** 500 hPa 气候态位势高度场(等值线间隔为 4 m; 红色实线为 5560 gpm 等值线代表极涡南界特征等高线)

### 2.2.2. 极涡环流指数定义

北极极涡的范围就是 500 hPa 特征等值线以北所包围的区域, 本文将特征等值线 5560 gpm 以北包围的格点数定义为极涡的范围指数(Polar Vortex extent, PVE)。

从逐日位势高度数据出发, 北半球极涡综合指数(Polar Vortex Comprehensive Index, PVC)的计算公式如下:

$$PVC = -\sum_{i=1}^n (hgt_i - \overline{hgt}),$$

其中  $hgt_i$  为某格点 500 hPa 的位势高度,  $\overline{hgt}$  为气候态的极涡范围内位势高度均值,  $n$  为极涡范围内格点总数, 也即 PVE 指数。该指数综合考虑了极涡范围和强度对极涡变化的贡献, 极涡面积越大, 极涡区域位势高度越低, 则 PVC 越大, 代表极涡越强。

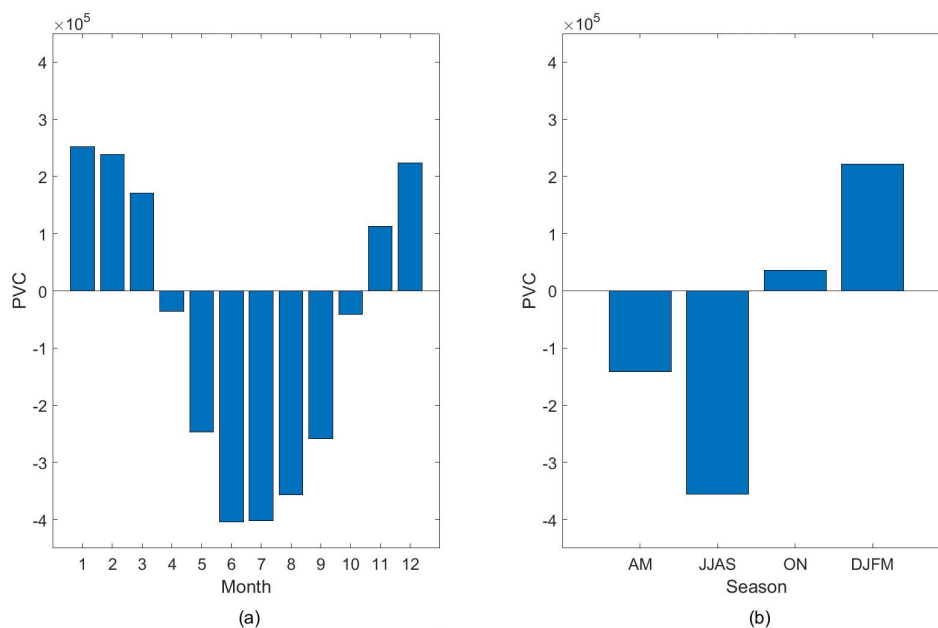
北半球极涡强度指数(Polar Vortex Intensity, PVI)的计算公式如下:

$$PVI = PVC/n = PVC/PVE,$$

代表极涡区域单位面积(格点)上的低涡强度。从逐月的极涡强度指数出发, 我们可以从多个尺度分析北极极涡强度的时间、空间变化规律。

## 3. 北极极涡的季节变化

极涡综合指数是一个既可以表示极涡强度, 又可以反映极涡面积的综合性指数。从逐月的极涡综合指数出发, 我们可以得到极涡综合指数的逐月分布(图 2)。结合北极海冰范围的季节变化特征和极涡综合指数在不同月份的差异, 12 月~3 月这四个月的极涡综合指数最大, 我们将其定义为冬季(DJFM); 6~9 月这几个月极涡综合指数最小, 我们将其定义为夏季(JJAS); 4~5 月、10~11 月为两个过渡季节, 我们将其分别定义为春季(AM)和秋季(ON)。后文中的季节变化特征均以此作为季节划分的标准。

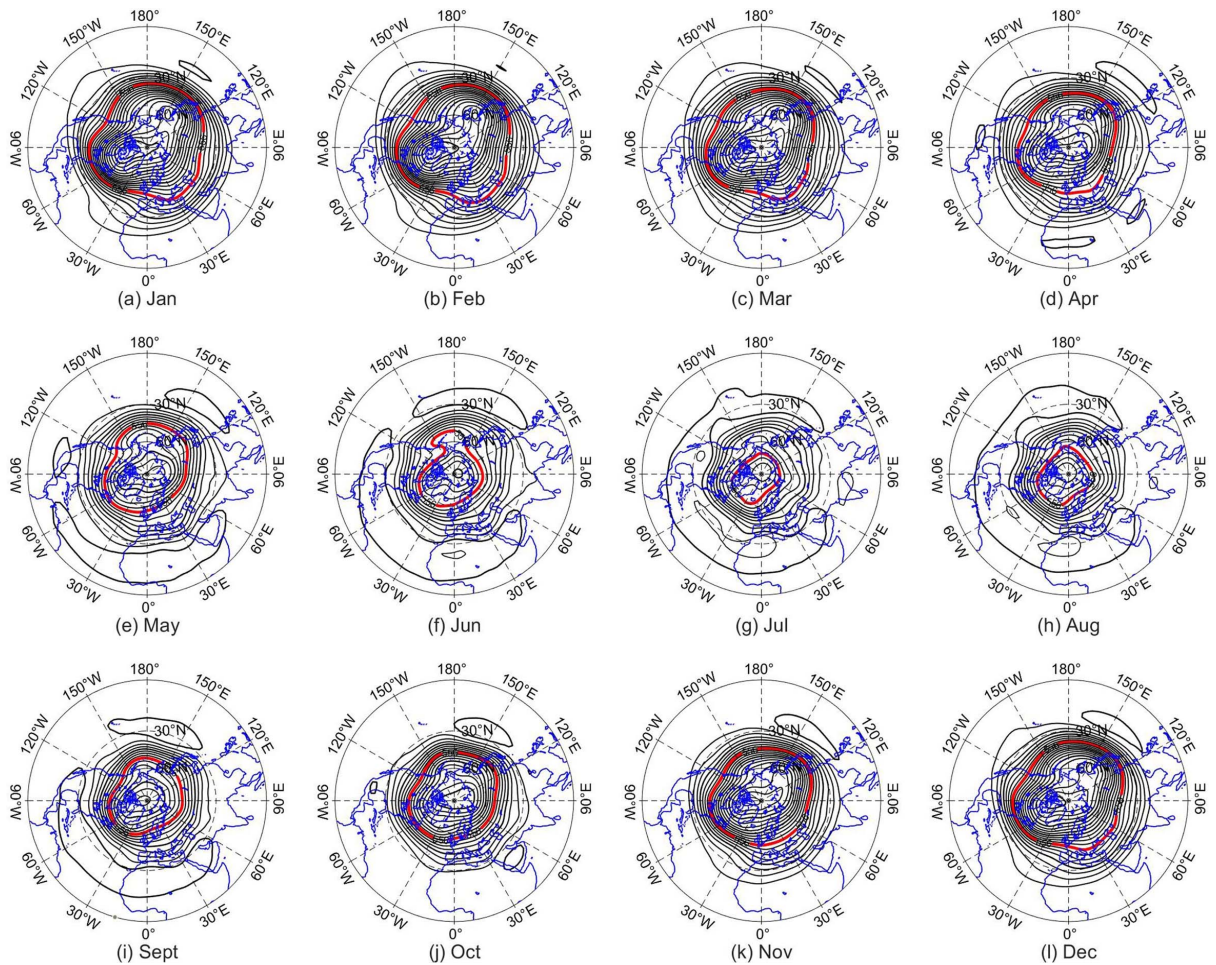


**Figure 2.** Seasonal variation characteristics of polar vortex composite index. (a) Month-to-month variation; (b) Four seasons variation

**图 2.** 极涡综合指数的季节变化特征。(a) 逐月变化; (b) 四季变化

### 3.1. 极涡南界和空间形态的季节变化

分析 5560 gpm 这条特征等高线逐月的分布, 我们可以得到北极极涡南界的季节变化(图 3)。可以看出, 极涡范围随季节变化显著, 7 月份极涡范围最小, 极涡南界最偏北, 大约在 75°N 的位置; 1 月份极涡范围达到最大, 极涡南界达到最南端的 32°N。从极涡南界在四个季节的分布特征来看(图 4), 春、夏、秋、冬四个季节极涡南界的平均位置分别位于 50°N、62.5°N、47.5°N、42.5°N, 极涡南界包围的极涡范围也分别从冬、秋、春、夏季依次递减。

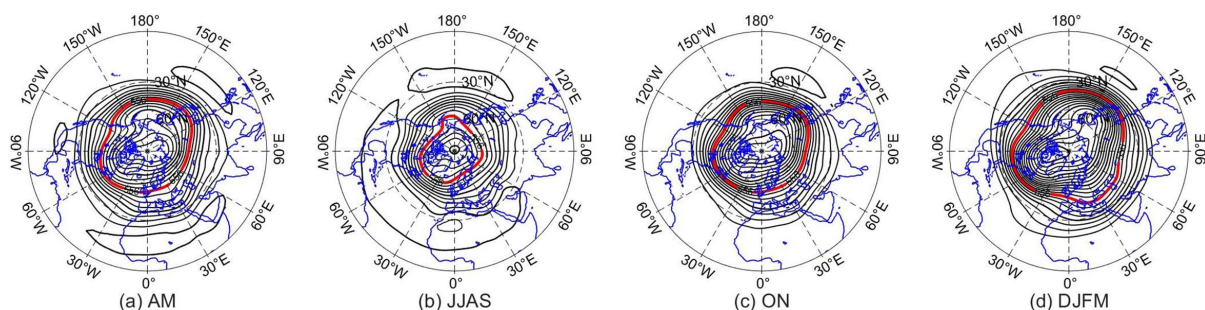


**Figure 3.** Month-to-month variation of 500 hPa climatology geopotential height (the interval is 4 m; red contour denotes the characteristic contour of the south boundary of the polar vortex; (a)~(l) The geopotential height field from January to December)

**图 3.** 500 hPa 气候态位势高度场的逐月变化(等值线间隔为 4 m; 红色实线为极涡南界特征等高线; (a)~(l) 1~12 月的位势高度场)

从不同季节极涡范围内等值线的形态分布特征可以发现(图 4), 夏季(图 4(b))极涡范围最小, 极涡呈现出绕极型的分布特征, 极涡南界特征等高线表现出四波结构, 最强的波槽出现在北太平洋白令海区域, 可能与 6 月阿留申上空的极涡南伸有关(图 3(f))。冬季(图 4(d))极涡南界最偏南, 主要呈现出绕极的三波结构, 极涡中心则主要表现为双涡的非对称结构, 极涡分别偏向北美和东亚一侧, 分别对应东亚大槽和北美大槽这两支定常波, 其中偏向北美的极涡中心强度更强(图 3(a)~(c), 图 3(l))。春季(图 4(a))和秋季(图

4(c))北极极涡主要表现为绕极的非纬向对称结构,极涡中心呈椭圆型分布,长轴分别在北美和欧亚中部地区。

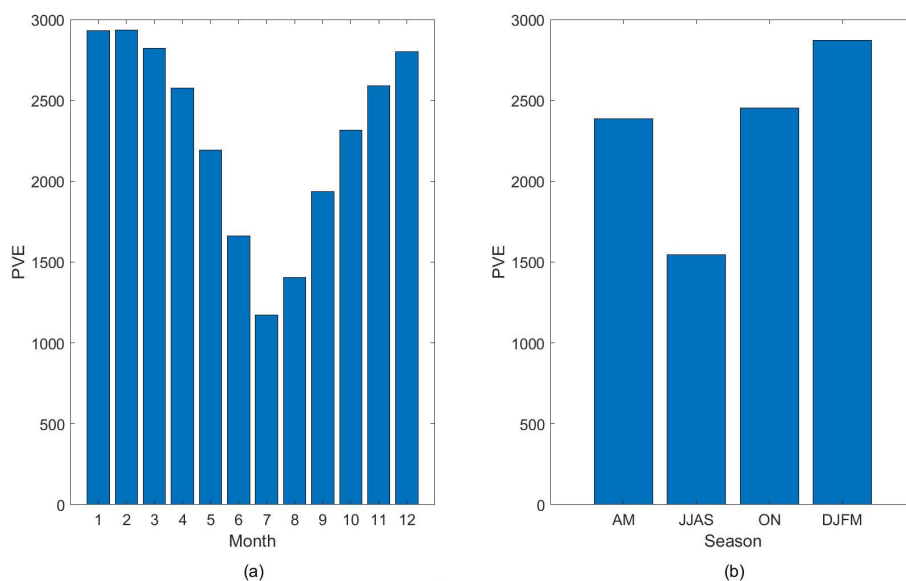


**Figure 4.** Seasonal changes of 500 hPa climatology geopotential height in (a) Spring (AM); (b) Summer (JJAS); (c) Autumn (ON) and (d) Winter (DJFM). (The interval is 4 m; red contour denotes the characteristic contour of the south boundary of the polar vortex)

**图 4.** 500 hPa 气候态位势高度场的季节变化。(a) 春季(AM); (b) 夏季(JJAS); (c) 秋季(ON); (d) 冬季(DJFM) (等值线间隔为 4 m; 红色实线为极涡南界特征等高线)

### 3.2. 极涡范围的季节变化

北极极涡范围指数的季节变化(图 5)可以近似地代表极涡面积的季节变化。极涡范围指数的逐月变化(图 5(a))表明,从夏到冬的 7~12 月,极涡面积逐渐增大,极涡向南扩张;其中 9 月极涡面积增幅最大,扩张速度最快。从冬到夏的 1~7 月,极涡面积逐渐减小,极涡收缩;其中 6~7 月极涡收缩幅度最大。极涡面积最小值出现在 7 月份,极涡面积收缩到一年中最小;极涡面积在 2 月达到最大,极涡面积扩张到一年中最大。四个季节的极涡范围变化(图 5(b))表明,极涡的范围指数与综合指数(图 2(b))呈现相同的位相变化,总体表现为冬季极涡面积最大,夏季极涡面积最小,春季和秋季范围居中,秋季的面积略大于春季的。

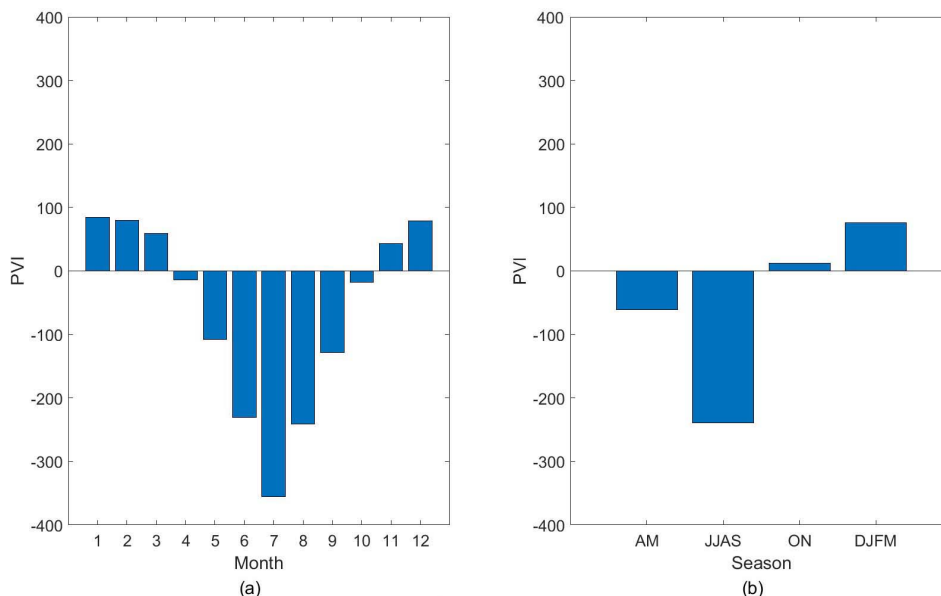


**Figure 5.** Seasonal variation characteristics of polar vortex extent index. (a) Month-to-month variation; (b) Seasonal variation

**图 5.** 极涡范围指数的季节变化特征。(a) 逐月变化; (b) 四季变化

### 3.3. 极涡强度的季节变化

极涡强度指数的逐月变化(图 6(a))表明, 平均每年 1~7 月, 为极涡的减弱阶段, 极涡强度的极小值出现在 7 月份; 其中 4~7 月即春季和初夏极涡强度减弱的幅度最大, 与极涡面积收缩幅度最大的时期相对应。7~12 月进入极涡的增强阶段, 7~10 月即夏末和初秋极涡增强幅度较为明显, 极涡强度的极大值出现在 1 月。极涡在冬季强度最强, 极涡外扩; 夏季其强度最弱, 极涡收缩; 秋季比春季略强(图 6(b))。



**Figure 6.** Seasonal variation characteristics of polar vortex intensity index. (a) Month-to-month variation; (b) Four seasons variation

**图 6.** 极涡强度指数的季节变化特征。(a) 逐月变化; (b) 四季变化

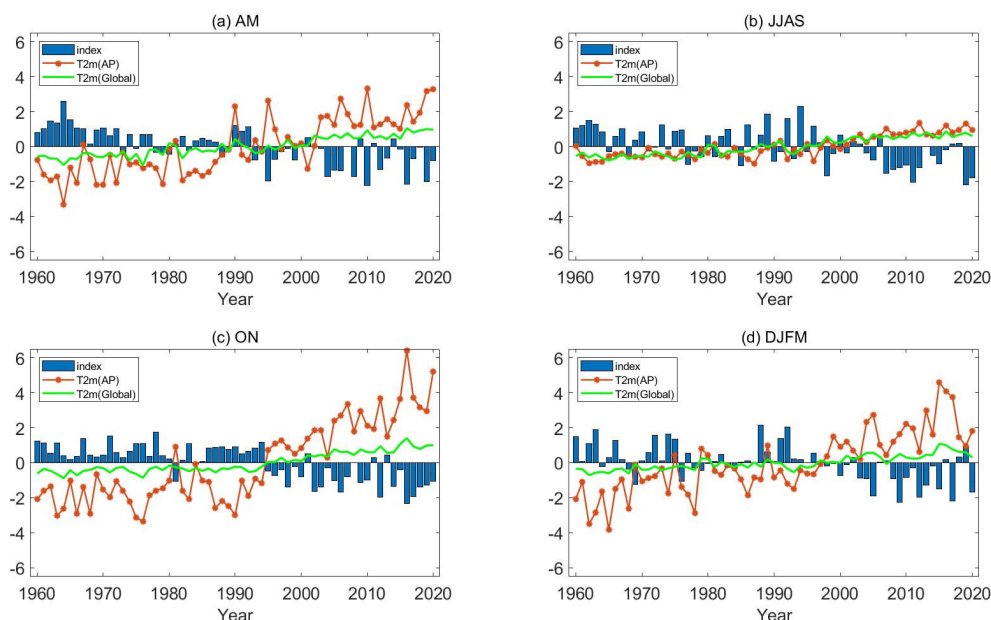
## 4. 北极极涡的年代际减弱及原因分析

### 4.1. 极涡环流指数的年代际变化特征

1960~2020 年北极极涡的环流指数(范围、强度)在不同季节均表现出显著的代际减弱的特征(图略), 即近几十年来北极极涡范围向北收缩, 强度减弱, 这在极涡综合指数的时间序列图上清晰可见(图 7)。极涡综合指数既能反映极涡面积的变化, 也能反映极涡强度的变化, 从表 1 可以发现, PVC 在四个季节都与 PVE 和 PVI 具有显著的正相关关系, 都表征了北极极涡范围退缩、强度减弱的一致变化特征, PVC 分别与 PVE 和 PVI 在夏季和秋季达到最大正相关, 相关系数分别为 0.805 和 0.999。极涡综合指数主要反映了极涡强度的变化, 其与 PVI 之间的相关除了夏季的 0.768 以外, 其余季节都超过 0.99。而 PVC 与 PVE 的相关只有在夏季比较高, 春、秋季节二者之间的相关系数接近 0.5, 在冬季二者之间的相关性较弱, 相关系数只有 0.25。这些结果表明夏季极涡范围北缩到极区附近  $62.5^{\circ}\text{N}$  (图 4(b)), 极涡强度与极涡面积变化呈高度正相关, 极涡越强, 向中纬度扩张得范围越大; 而冬季由于极涡南边界太偏南包含了中纬度罗斯贝波活动区域, 长波脊的入侵会减弱北半球极涡的低压环流, 使得极涡强度与极涡面积之间的正相关关系大大降低。

总体来看, 各个季节的极涡均呈现出振荡下降的特征, 从 20 世纪 90 年代中期之前的强极涡环流指数变为其后的弱环流指数, 突变检验结果(图略)表明北极极涡的年代际转折大体发生在 1994/1995 前后。这种极涡的年代际减弱特征在秋季最强(图 7(c)), 夏季最弱(图 7(b)), 与北极放大在秋季最强、夏季不显

著的特征相一致，表明北极极涡近二十多年来的年代际减弱可能与全球变暖背景下北极海冰加速融化，从而造成北极放大增暖的正反馈机制有关[11]。空间上相比于 1995 年之前，近二十年来 500 hPa 位势高度场在各个季节均有显著的异常升高(图 8)，表明北极极涡在四个季节均有显著的年代际减弱特征，特别是北半球秋季，北极区域出现最强的位势高度正异常(图 8(c))，极涡的减弱信号最显著，这可能由于夏秋季北极海冰范围最小，开阔水域增加，冰雪反照率正反馈使得上层海洋吸收储存的热量增加，在秋季释放加热大气进而导致气柱受热膨胀位势高度异常升高，极涡减弱。



**Figure 7.** Regionally-averaged time series of surface temperature anomalies during 1960~2020 over the Arctic Pole (AP) and the global means (Global) and polar vortex composite index in (a) Spring (AM); (b) Summer (JJAS); (c) Autumn (ON) and (d) Winter (DJFM)

**图 7.** 1960~2020 年不同季节北极极涡综合指数(柱状)与全球平均(绿线 T2m (Global))和北极地区平均(橙色线 T2m (AP))地表温度异常的时间序列。(a) 春季(AM);(b) 夏季(JJAS);(c) 秋季(ON);(d) 冬季(DJFM)

**Table 1.** Pearson correlation coefficient between polar vortex composite index (PVC) and polar vortex intensity index (PVI), polar vortex extent index (PVE) of the same period, respectively

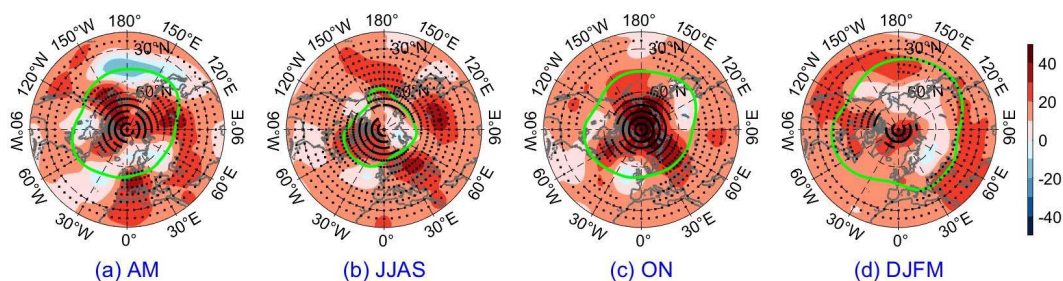
**表 1.** 北极极涡综合指数(PVC)分别与极涡强度指数(PVI)、极涡范围指数(PVE)之间在不同季节的同期相关系数

R	AM	JJAS	ON	DJFM
强度 PVI	0.996	0.768	0.999	0.997
范围 PVE	0.475	0.805	0.469	0.247

## 4.2. 北极极涡的年代际减弱与北极放大

前面的结果表明，北极极涡的年代际减弱可能与全球变暖背景下北极放大相关的海-冰-气耦合的正反馈作用有关。为了研究北极极涡变化与全球变暖、北极放大效应的关系，分别计算了全球、北极(66.5°N 以北的区域)的区域平均的表面温度异常，代表全球变暖和北极放大指数(图 7 中的绿线和橙色线)。可以发现，除夏季外，伴随着北极极涡在 20 世纪 90 年代中期以后的年代际转折，北极极区表面气温的





**Figure 8.** The decadal difference field (1995~2020 minus 1960~1994) of 500 hPa geopotential height field in (a) Spring (AM); (b) Summer (JJAS); (c) Autumn (ON) and (d) Winter (DJFM). The green contour in each panel denotes the characteristic contour of the south boundary of the polar vortex and the area with black points denotes passing the significance test at 95%.

**图 8.** 500 hPa 位势高度场在不同季节 1995~2020 年减去 1960~1994 年的差值场。(a) 春季(AM); (b) 夏季(JJAS); (c) 秋季(ON); (d) 冬季(DJFM)。每幅子图中绿色实线代表极涡南界特征等高线, 打点区域为通过了 95%显著性检验的区域

变暖速率是全球的两倍以上(图 7)。北极放大指数与极涡综合指数在各个季节均存在显著的负相关(表 2), 总体表现为北极地区变暖, 极涡强度减弱, 极涡面积收缩。秋季北极异常增暖与极涡综合指数的相关性最高, 相关系数可达-0.85, 且极涡综合指数和北极气温均在 1995 年前后存在显著的年代际转折, 二者的变化趋势呈现负相关, 极涡综合指数的变化主要由极涡强度的年代际减弱所主导(表 1), 与图 8 的结果相一致。

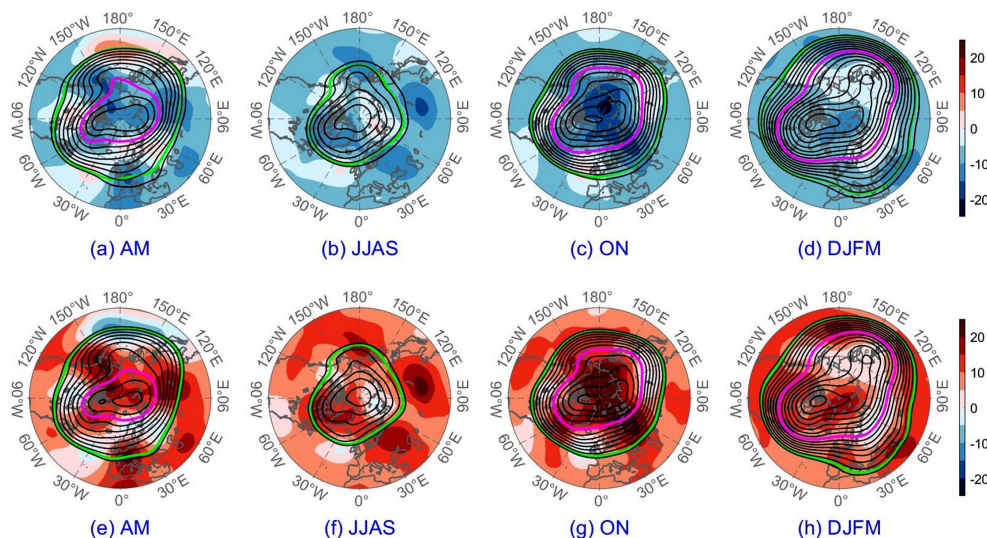
**Table 2.** Pearson correlation coefficient between Arctic Amplification index and polar vortex composite index of the same period

**表 2.** 北极放大指数与极涡综合指数在不同季节的同期相关系数

R	AM	JJAS	ON	DJFM
极涡综合指数(PVC)	-0.727	-0.642	-0.850	-0.559

#### 4.3. 北极极涡空间形态的年代际变化和季节差异

北极极涡指数在 1990s 中期发生的年代际减弱不仅主要体现在北极极涡强度的年代际减弱, 极涡的形态和强度变化在空间上也同样存在显著的年代际差异和季节差异。从图 9 中可以发现, 1960~1994 年期间, 四个季节的 500 hPa 位势高度距平均为负异常, 表明相对于气候平均态而言极涡加强; 而 1995~2020 年期间则正好相反, 北半球各季节几乎均为位势高度正异常, 北极极涡整体减弱。但极涡的这种年代际减弱在不同季节具有空间差异性。在极涡较强的秋季和冬季, 北极极涡主要呈现出偏心结构特征, 极涡中心偏离北极点主要集中在北美加拿大群岛附近, 秋季由于北极放大的增暖异常最强, 北极极涡中心整体呈年代际减弱变化特征(图 9(c), 图 9(g)); 冬季由于海冰融化北极增暖主要在大西洋扇区一侧, 因此北极极涡的年代际减弱也主要体现在极涡偏心在北美东部的极涡中心显著地减弱范围变小(图 9(d), 图 9(h))。夏季位势高度异常的显著变化主要发生在中纬度四个大值区, 位于极涡南边界附近(图 9(b), 图 9(f)), 因此夏季极涡主要呈现出绕极的结构, 但极涡边界范围在后一年代时段略向北收缩, 沿极涡边界依然呈四波结构特征。春季北极极涡形态的年代际变化最显著, 绕极非对称的极涡中心分裂成东西半球的欧亚和北美两个中心, 使极涡从单涡绕极型转变为双涡偶极型结构, 这可能是因为北极放大增暖改变了大气经向位涡梯度分布, 进而影响定常波临界波数和罗斯贝波破碎过程[17]所导致的。



**Figure 9.** Composite 500 hPa geopotential height anomaly field (shaded) and the composite geopotential height (contours) in the polar vortex region (minus the mean geopotential height value 5338 gpm averaged in the Arctic cap region) in (a)~(d) 1960~1994; (e)~(h) 1995~2020 in different seasons (The green contour denotes the southern boundary of the Arctic vortex, and the rose contour is the 0 contour)

**图 9.** 1960~1994 年(a)~(d)和 1995~2020 年(e)~(h)合成的不同季节 500 hPa 位势高度距平场(填色)和极涡范围内的等高线(减去了极涡范围内北极区域平均的位势高度值 5338 gpm)分布(图中绿色等值线代表北极极涡南边界, 粉色等值线为 0 线)

## 5. 结论

本文主要通过定义 500 hPa 描述北极极涡边界的特征等值线(5560 gpm), 计算了对流层描述北极极涡物理特征的范围指数、强度指数和综合指数, 分析了 1960~2020 年在全球变暖背景下对流层北极极涡强度和形态的年代际变化及其季节性特征, 初步探究了其于北极放大的关系。

从季节变化特征来看, 北极极涡的范围和强度具有一致的季节变化特征, 夏季 7 月份极涡范围最小, 强度最弱; 冬季 1 月份极涡范围最大, 强度最强。夏季极涡呈现出绕极型的分布特征, 极涡南界特征等高线表现出四波结构; 冬季, 极涡南界特征等高线主要呈现出绕极的三波结构, 极涡中心则主要表现为双涡的非对称结构, 极涡分别偏向北美和东亚一侧; 春季和秋季主要表现为绕极的非纬向对称结构, 极涡中心呈椭圆型分布, 长轴分别在北美和欧亚中部地区。

从年际年代际变化特征来看, 北极极涡的综合指数与强度指数具有高度一致的年际年代际变化特征, PVC 与 PVI 之间的相关除了夏季的 0.768 以外, 其余季节都超过了 0.99。而 PVC 与 PVE 的相关只有在夏季比较高(0.805), 春、秋季节二者之间的相关系数接近 0.5, 在冬季二者之间的相关性较弱, 相关系数只有 0.25。北极极涡的年际年代际变化主要体现为极涡强度的年代际减弱, 年代际转折时间发生在 1995 年前后, 其中秋季的年代际减弱最显著, 夏季最弱, 与北极放大在秋季最强、夏季不显著的特征相一致。

北极极涡的空间形态在 1995 年前后也发生了显著的年代际变化, 且季节性差异明显。秋、冬季节北极极涡的空间形态均表现为极涡中心偏向北美加拿大群岛附近的偏心结构, 北极极涡强度年代际减弱后偏心结构的极涡中心范围显著地减小。夏季, 绕极型的北极极涡形态年代际变化特征主要表现为极涡边界的向北收缩以及沿极涡边界四波结构长波槽的减弱。春季, 绕极非对称的北极极涡空间形态的年代际变化主要表现为极涡中心分裂成东西半球的欧亚和北美两个中心, 使极涡从单涡绕极型转变为双涡偶极型结构。

## 基金项目

国家自然科学基金(42075024); 山东省自然科学基金重大基础研究项目(ZR2019ZD12)。

## 参考文献

- [1] 顾思南, 杨修群. 北半球绕极涡的变异及其与我国气候异常的关系[J]. 气象科学, 2006, 26(2): 135-142.
- [2] 张婧雯, 李栋梁, 柳艳菊. 北半球极涡新特征及其对中国冬季气温的影响[J]. 高原气象, 2014, 33(3): 721-732.
- [3] La Seur, N.E. (1954) On the Asymmetry of the Middle-Latitude Circumpolar Current. *Journal of Atmospheric Sciences*, **11**, 43-57. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1954\)011<0043:OTAOTM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1954)011<0043:OTAOTM>2.0.CO;2)
- [4] Angell, J.K. and Korshover, J. (1977) Variation in Size and Location of the 300 mb North Circumpolar Vortex between 1963 and 1975. *Monthly Weather Review*, **105**, 19-25. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1977\)105<0019:VISALO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1977)105<0019:VISALO>2.0.CO;2)
- [5] Angell, J.K. (1992) Relation between 300-mb North Polar Vortex and Equatorial SST, QBO, and Sunspot Number and the Record Contraction of the Vortex in 1988-89. *Journal of Climate*, **5**, 22-29. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1992\)005<0022:RBMNPV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1992)005<0022:RBMNPV>2.0.CO;2)
- [6] Davis, R.E. and Benkovic, S.R. (1992) Climatological Variations in the Northern Hemisphere Circumpolar Vortex in January. *Theoretical and Applied Climatology*, **46**, 63-73. <https://doi.org/10.1007/BF00866086>
- [7] Davis, R.E. and Benkovic, S.R. (1994) Spatial and Temporal Variations of the January Circumpolar Vortex over the Northern Hemisphere. *International Journal of Climatology*, **14**, 415-428. <https://doi.org/10.1002/joc.3370140406>
- [8] 极涡与气温长期预报课题协作组. 描述极涡状态的物理参量及其气候特征的初步分析[C]//长期天气预报论文集. 北京: 气象出版社, 1990: 151-160.
- [9] Cohen, J., Zhang, X., Francis, J., et al. (2020) Divergent Consensuses on Arctic Amplification Influence on Midlatitude Severe Winter Weather. *Nature Climate Change*, **10**, 20-29. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0662-y>
- [10] Serreze, M.C. and Barry, R.G. (2011) Processes and Impacts of Arctic Amplification: A Research Synthesis. *Global and Planetary Change*, **77**, 85-96. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.03.004>
- [11] Screen, J.A. and Simmonds, I. (2010) The Central Role of Diminishing Sea Ice in Recent Arctic Temperature Amplification. *Nature*, **464**, 1334-1337. <https://doi.org/10.1038/nature09051>
- [12] Serreze, M.C., Maslanik, J., Scambos, T.A., et al. (2003) A Record Minimum Arctic Sea Ice Extent and Area in 2002. *Geophysical Research Letters*, **30**, 25. <https://doi.org/10.1029/2002GL016406>
- [13] Stroeve, J.C., Serreze, M.C., Holland, M.M., et al. (2012) The Arctic's Rapidly Shrinking Sea Ice Cover: A Research Synthesis. *Climatic Change*, **110**, 1005-1027. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0101-1>
- [14] Thackeray, C.W. and Hall, A. (2019) An Emergent Constraint on Future Arctic Sea-Ice Albedo Feedback. *Nature Climate Change*, **9**, 972-978. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0619-1>
- [15] Sun, L., Deser, C., Simpson, I., et al. (2022) Uncertainty in the Winter Tropospheric Response to Arctic Sea Ice Loss: The Role of Stratospheric Polar Vortex Internal Variability. *Journal of Climate*, **35**, 3109-3130. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0543.1>
- [16] 孙兰涛, 吴辉碁, 李响. 对北极极涡的认识[J]. 极地研究, 2006(1): 52-62.
- [17] Strong, C. and Magnusdottir, G. (2008) Tropospheric Rossby Wave Breaking and the NAO/NAM. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **65**, 2861-2876. <https://doi.org/10.1175/2008JAS2632.1>