

中国冷暖冬季节内交替的时空特征及其与北极极涡振荡的关系

宋雨佳, 张涵, 黄昊, 黄菲*

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

收稿日期: 2024年6月2日; 录用日期: 2024年7月3日; 发布日期: 2024年7月9日

摘要

近年来, 中国冬季气温除了全国性增暖或降温的年际与年代际变化, 其季节内的差异也逐渐明显。本文利用1980~2020年台站及再分析资料, 运用时时矩阵的多变量正交经验函数(Multivariable Empirical Orthogonal Function, MV-EOF)分解并结合功率谱分析法, 分析了主要反映我国冬季气温在前冬和后冬呈反相变化的主模态特征。结果表明, 由白令海-阿拉斯加、北欧和北美区域构成的冬季北极三叶型极涡振荡与我国冬季前后冬的冷暖交替存在密切联系。当冬季北极涛动处于正位相且北极“三叶型”极涡振荡为正位相时, 北欧高压脊在前冬加强且异常偏北而后冬位置偏南, 引起北极极涡在前冬向极收缩而后冬向赤道扩张, 进而影响北极冷空气南下入侵我国, 造成我国冬季呈前冬暖后冬冷的特征; 而当冬季北极涛动为负位相且“三叶型”极涡振荡为负位相时, 北极极涡主要受到白令海-阿拉斯加脊在后冬异常增强的影响, 北极极涡横轴由前冬的向南扩张转为后冬向北收缩, 对应于我国前冬冷后冬暖的特征。

关键词

冷暖冬交替, 季节内振荡, 中国, 北极极涡

Spatial-Temporal Characteristics of Chinese Warm and Cold Intraseasonal Alternation in Winter and Its Linkage with Arctic Vortex Oscillation

Yujia Song, Han Zhang, Hao Huang, Fei Huang*

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

*通讯作者。

文章引用: 宋雨佳, 张涵, 黄昊, 黄菲. 中国冷暖冬季节内交替的时空特征及其与北极极涡振荡的关系[J]. 气候变化研究快报, 2024, 13(4): 839-849. DOI: 10.12677/ccrl.2024.134096

Abstract

In recent years, in addition to the inter-annual and inter-decadal variations of national warming or cooling, the intra-seasonal variations of winter temperatures in China have also become more and more obvious. In this paper, using the 1980~2020 station and reanalysis data, we apply the multi-variate orthogonal empirical function (MV-EOF) of the temporal-temporal matrix and combine it with the power spectrum analysis method so as to divide China's winters into early winter and last winter, in which the temperatures change inversely. It is found that the Arctic "trilobal" vortex oscillation index in winter, which is composed of the Bering Sea-Alaska, Northern Europe and North America, is closely related to the alternation of cold and warm temperatures in winter in China. When the Arctic Oscillation (AO) is in positive phase and the Arctic "trilobal" vortex oscillation is in positive phase, the high pressure ridge of Northern Europe is anomalously to the north in the early winter but to the south in the late winter, which causes the Arctic vortex to narrow down inwardly in the early winter but to expand outwardly in the late winter, and then affects the Arctic cold air to invade China southward, resulting in China's winters to be characterized by the warmth in the early winter and the coldness in the last winter. When the Arctic Oscillation (AO) is in negative phase and the "trilobal" vortex oscillation is in negative phase, the Arctic vortex is mainly affected by the anomalous enhancement of the Bering Sea-Alaska Ridge in the late winter, and the transverse axis of the Arctic vortex changes from expanding southward in the early winter to contracting north-ward in the late winter, which corresponds to the coldness in the early winter and the warmth in the late winter in China.

Keywords

Warm and Cold Alternation in Winter, Intraseasonal Oscillation, China, Arctic Vortex

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

由于人类大量使用矿物燃料并过度排放二氧化碳和其他污染物所产生的温室效应使得全球变暖，而在近百年全球气候显著变暖的特征之中，冬季变暖最为明显[1]-[4]。针对我国冬季平均气温的主要模态所展开的研究已有许多十分有意义的成果[5]-[10]。大多数研究发现我国冬季平均气温主要呈全国一致性变化，即一致偏冷或偏暖。

然而，对于我国冬季气温的研究，大多数是针对我国冬季三个月或五个月平均气温的年际与年代际变化或长期趋势展开分析[11] [12] [13]。然而从该角度分析我国冬季气温可能会平滑掉冬季气温在季节内尺度的变化[14]。已有一些观测事实和研究指出，我国冬季气温在季节内尺度具有显著变化的特征[15] [16]。一些观测事实表明，前冬和后冬频繁出现冷暖交替的现象：如2014/2015年冬季气温呈前冷后暖现象，而2015/2016年冬季上和月中旬为前暖转为后冷[17] [18]等。2020/2021年我国冬季为前冬冷转为后冬暖[19]，而之后2021/2022的冬季却为前冬暖转为后冬冷。如果对于气温的研究仅仅考虑传统的冬季季节平均，则会掩盖掉其中的次季节变化信号。为了更准确地认识我国冬季气温的变化特征，对其季节内变化的研究是非常必要的。

前人对于前、后冬气温反转的成因及物理机制也有一些研究且尚未达成共识。韦炜等发现，前冬和后冬

温度反向演变受到了大气定常波和瞬变波的影响[20], 即当我国处于前冬偏暖、后冬偏冷的反向演变模态时, 环流异常及定常波的传播、瞬变波的反馈作用也与该情形相对应。黄嘉佑等指出中国冬季的环流系统及近地面气温年际和年代际变化在前冬和后冬的不同致使前、后冬的气温反向变化[16]。有研究认为, 中国及欧亚大陆的气温存在显著的季节内转变, 并且中国气温的主要年际变化与欧亚大陆更大范围的高纬-中低纬气温的反号变化有关[14]。Lü 等人研究结果表明, 秋季北极海冰在前冬和后冬通过不同机制影响西伯利亚高压使得其强度在冬季季节内发生反向变化, 而西伯利亚高压的强度与我国冬季气温呈显著负相关, 从而使得我国冬季气温在季节内出现明显反向变化[21]。Geng 等人北大西洋涛动在强厄尔尼诺年的冬季前期出现明显的正负位相反转, 并且激发大气瞬变波异常活动, 通过大气遥相关影响我国冬季气温在冬季前期和后期出现冷暖交替[22]。由此可见, 冬季气温存在显著的前、后冬差异, 且造成反转的成因也各不相同。

因此, 为了更加深入地了解我国冬季气温的变化特征及机理, 本文将重点分析我国冬季气温的前、后冬冷暖交替的变化特征并探究季节内冷暖交替的成因。

2. 数据与方法

文使用了中国气象局国家信息中心提供的 1648 站逐日平均温度和降水资料, 为保证研究期间气温和降水数据的连续性, 剔除有缺测及观测站点迁移的站点, 最后得到 426 个台站。以 35°N 为标准区分我国南、北方, 得到 187 个北方站点, 239 个南方站点。大气环流资料为欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)提供的第五代大气逐日平均再分析资料 ERA5, 水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。本文所用数据的时间段为 1980~2020 年冬季。上述变量的异常值均去除其对应时间段的气候平均和长期趋势。本文中的冬季指的是上一年的 12 月到此年的 2 月, 即 1980 年到 2020 年的冬季为 1979 年 12 月到 2020 年 2 月。

本文主要采用了多变量经验正交分解(MV-EOF), 回归分析, 合成分析等分析方法。

3. 中国冬季冷暖交替的主模态特征

3.1. 中国冷暖冬交替的年际振荡模态

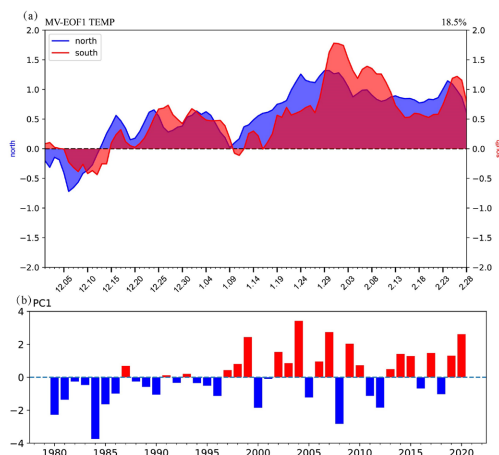


Figure 1. The first MV-EOF mode of the average daily temperature of southern and northern stations in China for the winters (December to February) during 1979/1980~2019/2020. (a) The first MV-EOF intraseasonal time series of the average daily temperature of southern station (unit: K; red shading) and the average daily temperature of northern station (unit: K; blue shading); (b) The normalized first principal component (PC1)

图 1. 我国 1979/1980~2019/2020 冬季(12、1、2 月)南方站点平均日气温和北方站点平均日气温的 MV-EOF 第一模态。(a) 南方站点平均的日气温(单位: K; 红色填色)和北方站点平均的日气温(单位: K; 蓝色填色)的 MV-EOF1 季节内时间序列; (b) 标准化的第一模态主分量年际时间序列(PC1)

将中国南、北方站点平均的日平均气温场进行上述改进的 MV-EOF 分析, 并对输出的特征向量进行了三点平滑处理, 从而得到我国冬季冷暖交替变化的前两个主要模态(如图 1, 图 2)。图 1 为 1980~2020 年我国冬季气温季节内振荡交替的年度变化的第一模态, 方差贡献为 18.5%。从图 1(a)中可以清楚地看到我国南、北方气温从每年的 12 月中旬开始表现为一致性的升温特征, 1 月中旬以后的后冬比前冬升温的振幅更大, 且南方气温的变化略微落后于北方约 3 d 左右, 可能体现了冬季寒潮冷空气从北向南逐步发展的天气过程特征。第一模态主成分(PC1)则主要体现了中国南北方一致性升温主要在 1990 s 中后期开始, 以变暖升温为主, 特别是 2003/04、2006/07、2019/20 和 1998/99 这几个冬季全国出现明显的暖冬特征(图 1(b))。

3.2. 中国前后冬冷暖交替的季节内振荡模态

图 2 为我国南北方站点区域平均的冬季日平均气温 MV-EOF2 结果, 其方差贡献为 11.6%。从图 2(a)可看出我国冬季存在季节内尺度的冷暖交替变化, 且我国北方地区的气温变化略早于南方地区。总体上看, 我国南、北方气温主要是在一月中旬发生冷暖位相的反转, 在二月上旬又发生一次较弱的位相反转。结合 PC2 的年度变化(图 2(b))特征综合分析, 可以发现, 在 PC2 的正位相年, 我国南方和北方从一月中旬前的暖冬转变为之后的冷冬为主, 而在 PC2 的负位相年则正好相反, 中国总体上表现为前冬冷后暖的季节内振荡特征。

为了进一步精确 MV-EOF2 中我国冬季季节内冷暖交替的时间转折点, 分别将 MV-EOF2 特征向量的中国南北方冬季气温季节内变化的时间序列进行了功率谱分析, 发现中国北方气温和南方气温在冬季季节内尺度上的主要周期为 40 天左右(图略)。结合图 2(a)的 MV-EOF2 季节内时间变化特征, 可以发现 1980 年到 2020 年中国冬季气温季节内冷暖交替的时间转折点为 1 月 13 日。因此将 12 月 1 日到 1 月 13 日定义为前冬, 而 1 月 14 日到 2 月 28 日定义为后冬。

将 PC2 年度变化的时间序列(图 2(b))绝对值大于一倍标准差的年份进行筛选, 得到 8 个 PC2 高值年份的冬季, 即 1988/89 年、1989/90 年、1992/93 年、1997/98 年、1999/2000 年、2007/08 年、2015/16 年、2016/17 年; 以及 7 个低值年份, 即 1984/85、1991/92、2002/03、2009/10、2012/13、2013/14、2018/19 年。

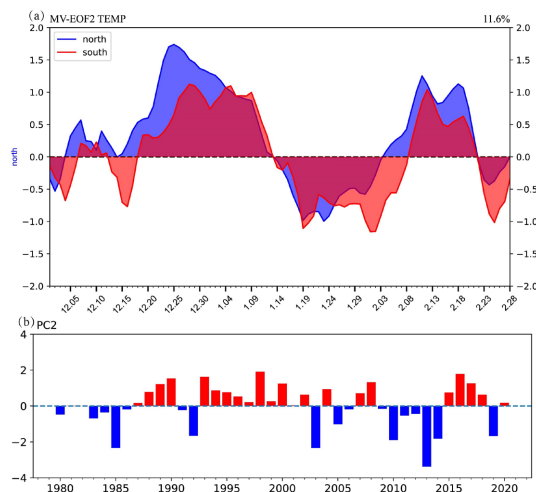


Figure 2. The second MV-EOF mode of the average daily temperature of southern and northern stations in China for the winters (December to February) during 1979/1980~2019/2020. (a) The second MV-EOF intraseasonal time series of the average daily temperature of southern station (unit: K; red shading) and the average daily temperature of northern station (unit: K; blue shading); (b) The normalized second principal component (PC2)

图 2. 我国 1979/1980~2019/2020 冬季(12、1、2 月)南方站点平均日气温和北方站点平均日气温的 MV-EOF 第二模态。(a) 南方站点平均的日气温(单位: K; 红色填色)和北方站点平均的日气温(单位: K; 蓝色填色)的 MV-EOF2 季节内时间序列; (b) 标准化的第二模态主分量年度时间序列(PC2)

为了验证 MV-EOF 第二模态是否真实表征了中国冬季冷暖气节内交替的主模态特征, 分别在 PC2 的高值年和低值年对全国前、后冬平均的冬季气温距平场进行合成(图 3)。可以发现, 在 PC2 的高值年里, 中国冬季总体上呈现出前冬暖后冬冷的前后冬反转特征, 空间上前冬异常偏暖的区域主要从新疆沿河西走廊到青藏高原以东的中国东部大部分地区, 后冬异常偏冷的区域主要分布在中国东部地区; 在 PC2 低值年正好相反, 即为前冬冷后冬暖的反转变化, 但后冬暖异常的振幅变化较前冬的冷异常更显著。值得注意的是, 中国冬季前后冬反转的特征并不包含青藏高原、蒙古北部和东北大部分地区。综上所述, 1980~2020 年我国冬季气温在季节内尺度上存在着冷暖交替的振荡特征, 主要表现为前、后冬的冷暖反转变化特征。

对 PC2 的高、低值年分别合成中国北方和南方区域平均的站点气温距平序列(图 4)也很好验证了 MV-EOF2(图 2)的结果, 即在 1 月中旬前后, 无论是南方还是北方, 在 PC2 的高值年份, 主要体现了前冬暖后冬冷的季节内冷暖交替反转特征, 北方和南方区域平均的气温距平序列与相应的 MV-EOF2 时间序列的相关系数分别为 0.72 和 0.71。在 PC2 的低值年份, 南北方区域平均的气温总体上仍然反映了前冬冷后冬暖的特征, 但前冬还出现更高频的季节内振荡, 使得前冬平均的气温冷异常并不十分显著, 与图 3(c)的结果相一致, 同时后冬从 2 月中旬开始也出现了一次非常强的由暖变冷的反转过程, 与图 2(a)中的二次反转结果相一致, 但这种更高频的冷暖反转信号不足以抵消后冬总体上变暖的事实。在这种总体上前冬冷后冬暖的年份里, 北方和南方区域平均的气温距平序列与相应的 MV-EOF2 时间序列的相关系数分别为-0.88 和-0.85。

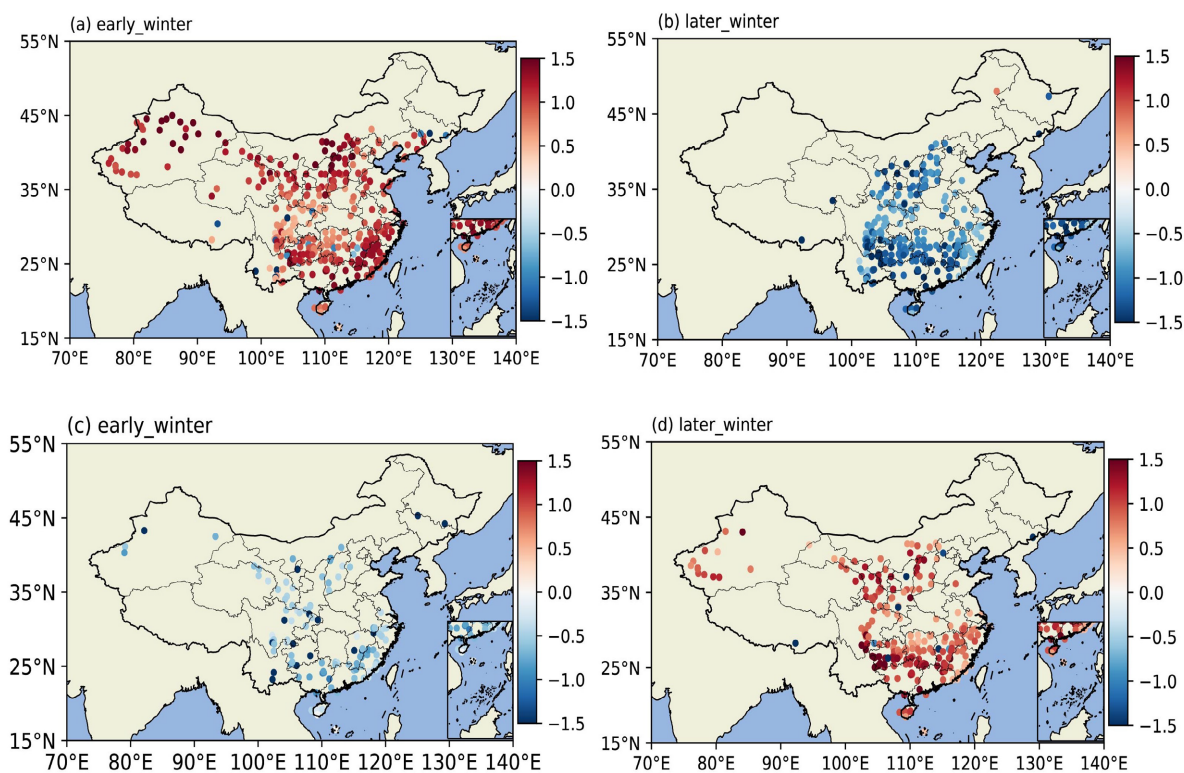


Figure 3. Composed plots of high-value years for our early-winter mean (a) and late-winter mean (b) temperatures (unit: K); and low-value years for early-winter (c) and late-winter mean (d) temperatures (unit: K). All stations shown in the plots have passed the 90% significance test

图 3. 我国前冬 (a) 和后冬 (b) 平均气温(单位: K) 的高值年合成图; 前冬 (c) 和后冬 (d) 平均气温(单位: K) 的低值年合成图。图中显示的所有站点已过 90% 显著性检验

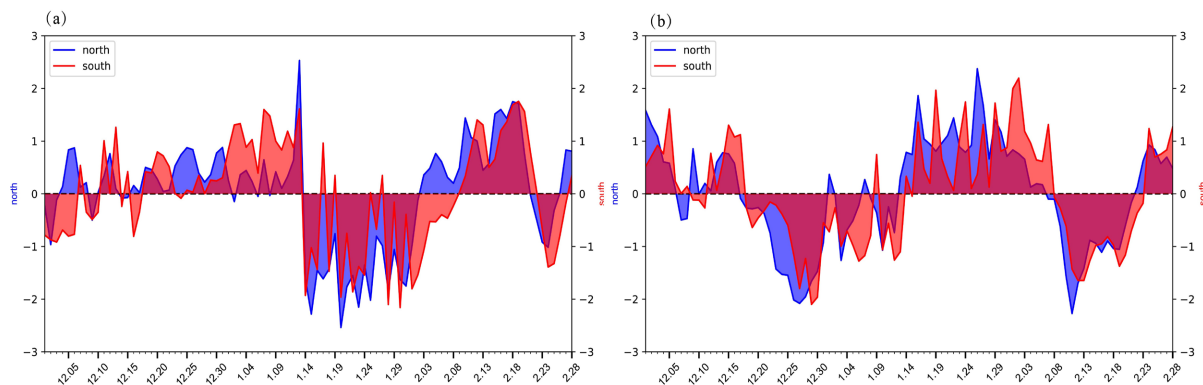


Figure 4. High- and low-value of PC2 annual composites of the temperature anomaly series of mean stations in southern and northern China. (a) Composed of high-value years for PC2; (b) Composed of low-value years for PC2

图 4. 中国南方、北方平均站点气温距平序列的 PC2 高、低值年合成图。(a) PC2 高值年份的合成图；(b) PC2 低值年份合成图

4. 中国前后冬冷暖交替与北极极涡振荡的关系

由于中纬度天气变化与北极冷空气活动关系密切，而北极冷空气的向南爆发往往与北极极涡的变化相联系，因此本文将从北极极涡变化的角度探究中国冬季气温前后冬冷暖交替的成因。分别对 PC2 高、低值年的前冬和后冬 100 hPa 位势高度及其异常场的合成(图 5)分析，可以发现，对于中国冬季发生冷暖交替季节内振荡的模式，北极极涡均表现为纬圈非对称的“纺锤型”形态特征，极涡长轴分别向北美和欧亚大陆两侧伸展，短轴两侧分别对应北欧和北太平洋区域。在前暖后冷年(图 5(a)~(c))，无论前冬还是后冬，北极极涡总体上异常加强，后冬比前冬极涡更强(图 5(c))，极区为位势高度负异常，周围中纬度为位势高度正异常，体现了北极和中纬度之间跷跷板式反位相振荡的类北极涛动(Arctic Oscillation, AO)正位相的特征。极涡边界以 4 波结构为主，且主要受到北欧高压脊和阿拉斯加高压脊的影响。前冬(图 5(a))，北欧高压脊向北入侵北极，使得极涡形态相对狭长，而后冬(图 5(b))北欧高压脊位置偏南，入侵北极程度减少，极涡“纺锤型”的短轴相对于前冬更加向中纬度扩张。从图 5(c)的 100 hPa 位势高度差值场也能清楚地看到北欧偏北极处有显著的正位势高度异常，即前冬的北欧高压脊强于后冬，且位置偏北。在前冷后暖年(图 5(d)~(f))，北极极涡在前、后冬均异常减弱，呈现出 AO 负位相的异常空间分布特征，且后冬 AO 负位相异常分布更强，极涡减弱也更强(图 5(f))。中纬度极涡边界主要呈 2 波结构，纬圈非对称的极涡“纺锤型”形态结构更加明显，同样是受到北欧高压脊和阿拉斯加高压脊向北入侵的影响，特别是在后冬阿拉斯加高压脊的明显增强且向北入侵使得极涡受到挤压后形态内缩且呈狭长偏心形状。

前文的分析可以发现，中国冬季气温季节内冷暖交替的振荡变化不仅与北极极涡的强度异常(AO 的正负位相)有关，还与极涡在前后冬的形态变化有关。为了探究冬季北极极涡的形态变化是否存在前后冬反转的季节内振荡，分别对前暖后冷年和前冷后暖年北方和南方区域平均气温距平序列(图 4)与 100 hPa 位势高度异常场进行回归分析。结果表明(图 6)，北极极涡区域主要出现三个位势高度异常显著的区域，分别位于北欧、白令海 - 阿拉斯加地区和北美地区，呈“三叶型”异常分布，其中北欧和白令海 - 阿拉斯加地区的位势高度异常与北美区域符号相反。因此采用白令海 - 阿拉斯加(130°E~130°W, 50°~90°N) (区域 1)、北欧(0°~60°E, 50°~90°N) (区域 2)和北美(110°W~50°W, 40°~75°N) (区域 3)三个区域的 100 hPa 位势高度异常定义“三叶型”极涡振荡指数： $Index = 0.25 \times h100_1 + 0.25 \times h100_2 - 0.5 \times h100_3$ ，其中 h100_1、h100_2 和 h100_3 分别代表区域 1、区域 2 和区域 3 平均的 100 hPa 位势高度异常。

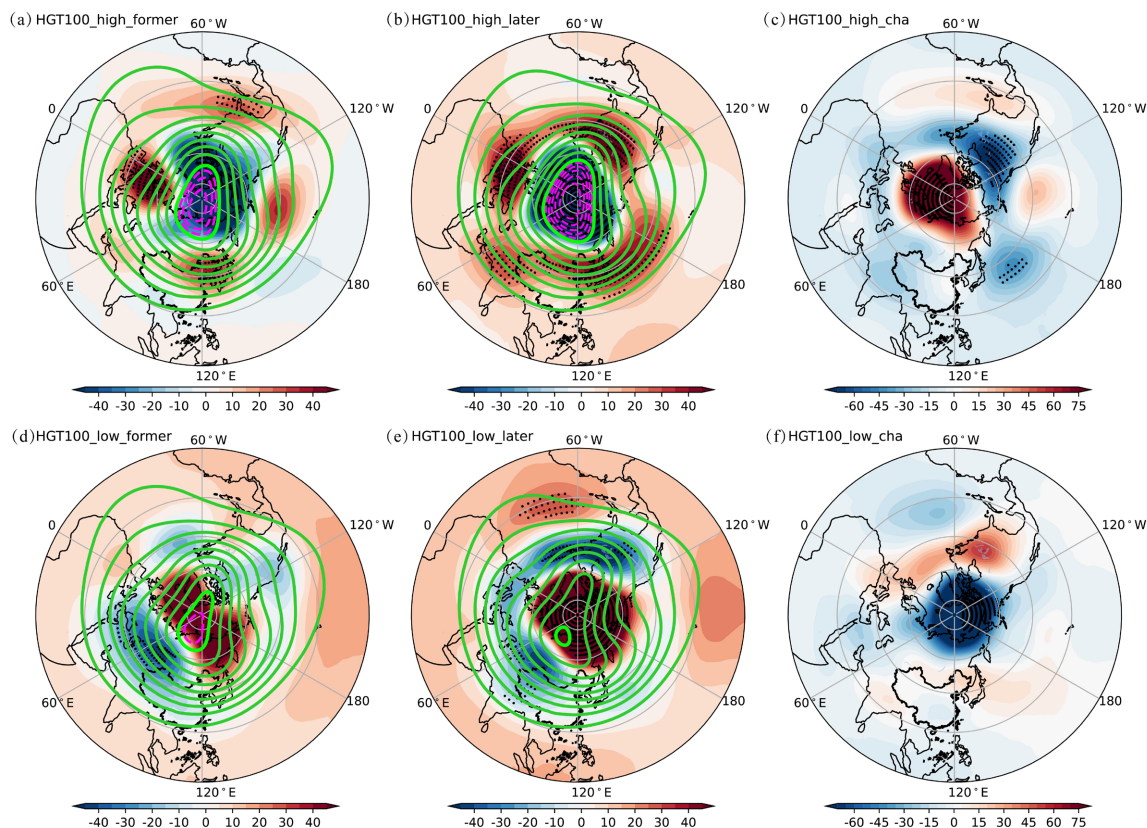


Figure 5. High- and low-value annual composites of 100 hPa geopotential height anomalies and polar vortex anomalies (unit: gpm) in the early and late winter. (a)~(c) are high-value year composites and (d) (e) are low-value year composites; (a) (d) are early winter averages, (b) (e) are late winter averages, and (c) (f) are difference fields (pre-post). Filled colors are 100 hPa geopotential height anomalies, and contours are 100 hPa polar vortex anomalies (100 hPa geopotential height (0~360°, 65°N~90°N) regionally averaged 100 hPa geopotential height). Black dots indicate that the 90% significance level was passed

图 5. 前、后冬 100 hPa 位势高度异常及极涡异常(单位: gpm)的高、低值年合成图。(a)~(c)为高值年合成, (d) (e)为低值年合成图; (a) (d)为前冬平均, (b) (e)为后冬平均, (c) (f)为差值场(前-后)。填色为 100 hPa 位势高度异常, 等值线为 100 hPa 极涡异常(100 hPa 位势高度——(0~360°, 65°N~90°N)区域平均的 100 hPa 位势高度)。打点表示通过 90% 的显著性水平的检验

分别合成 PC2 高值年(图 7(a))和低值年(图 7(b))的“三叶型”极涡振荡指数, 可以发现, 无论是 PC2 的高值年还是低值年份, 该极涡指数均存在季节内振荡和在一月中旬前后的反转特征。在 PC2 的高值年份, 白令海-阿拉斯加区域的振荡大约从 1 月 12 日开始转折, 其后依次为北欧区域(1 月 15 日)和北美区域(1 月 19 日); 在 PC2 的低值年份, “三叶型”极涡振荡中仍为白令海-阿拉斯加区域最先开始振荡, 而北欧区域和北美区域近乎同时发生振荡。这些结果表明, 在中国发生前后冬冷暖交替现象时, 无论是前冬暖转变为后冬冷, 还是前冬冷转变为后冬暖, 极涡总是呈现出纬向不对称的“纺锤”状形态。当冬季前暖后冷时, 极涡形态由前冬的短轴狭窄型转变为后冬的短轴变宽型(图 5), 反映了极涡形态从前冬的短轴向北收缩到后冬的短轴向南扩张的前后冬振荡特征, 这种极涡形态的前后冬振荡变化主要由“三叶型”极涡振荡指数所表征, 且总是在前冬北欧和白令海-阿拉斯加地区先后有中纬度长波脊的向北极入侵, 进而挤压北极极涡中心向北美一侧加强, 形成两个正异常中心和一个北美负异常中心的“三叶型”极涡异常结构; 在后冬该振荡指数为负位相(图 7(a)), 表明北欧和白令海-阿拉斯加脊异常减弱, “纺锤”形极涡短轴同时向南扩张, 这样就构成了北极极涡从前冬向极收缩到后冬向南扩张的极涡季节内振荡特征。而前冷后暖的冬季里, “三叶型”极涡振荡指数由前冬整体为负位相转为后冬的正位相(图 7(b))表征北欧

和白令海 - 阿拉斯加脊异常在后冬强度增强, 使得极涡从前冬的短轴向南扩张到后冬的短轴向北收缩。

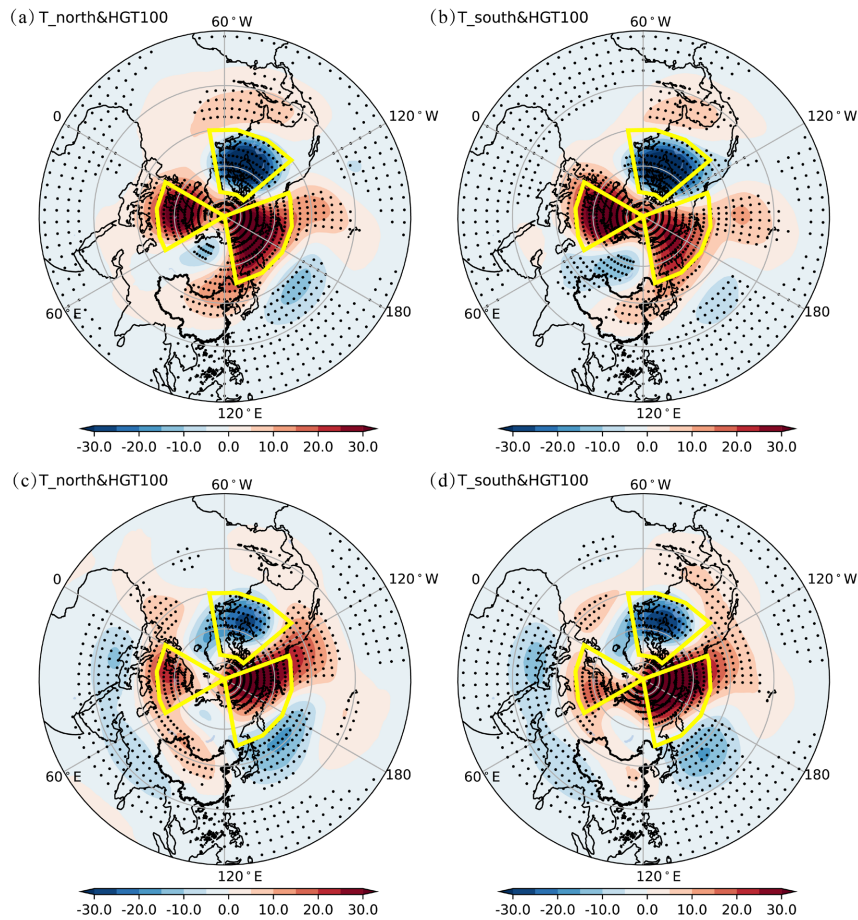


Figure 6. Regression plots of northern and southern temperature series composited for high- and low-value years of PC2 against 100 hPa geopotential height anomalies (unit: gpm). (a) (b) are composited for high-value years and (c) (d) for low-value years; black dots indicate tests that pass the 90% significance level

图 6. PC2 高、低值年合成的北方和南方温度序列与 100 hPa 位势高度异常(单位: gpm)的回归图。(a) (b)为高值年合成, (c) (d)为低值年合成; 打点表示通过 90%的显著性水平的检验

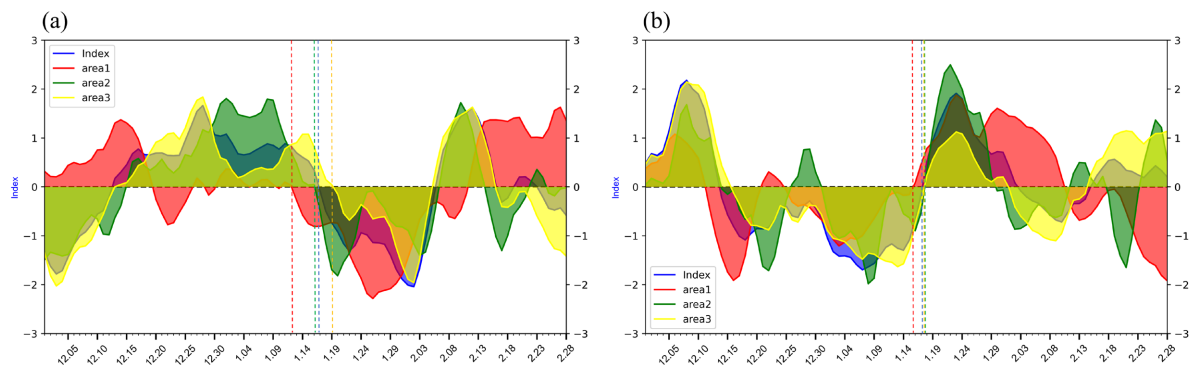


Figure 7. Composites of the Arctic “trilobal” vortex oscillation indices and their three regions indices in high- (a) and low-value (b) years of PC2

图 7. PC2 高值年(a)和低值年(b)合成的“三叶型”极涡振荡指数及其三个区域的指数变化

北极极涡形态在前、后冬的这种收缩 - 扩张的振荡与中国冬季前后冬冷暖交替的变化特征密切相关。在前暖后冷年, “三叶型”极涡振荡指数与中国南、北方区域平均的气温距平序列之间的相关系数分别为 0.62 和 0.52, 与 MV-EOF2 的南、北方特征向量序列的相关性分别高达 0.78 和 0.76 (表 1), 均远远超过 95% 的显著性水平。“三叶型”极涡振荡的三个关键区中, 北欧区域指数与中国冬季气温冷暖交替振荡的相关性最高, 其与北方和南方 MV-EOF2 特征向量序列的相关性分别为 0.64 和 0.69 (表 1), 表明北极极涡形态的前后冬振荡可能通过北极极涡强度和形态的变化影响极区冷空气向南爆发的强度和范围, 进而影响中国气温在前后冬的冷暖交替振荡。其中北欧地区中纬度阻塞高压异常向极入侵和南撤造成的极涡振荡起着主要贡献。对于前冷后暖年, “三叶型”极涡振荡指数与中国南北方气温的冷暖交替振荡依然存在显著的相关关系, 但相关系数均较前暖后冷年有所降低。极涡振荡指数与中国北方和南方区域平均的气温距平序列之间的相关系数分别为 0.4 和 0.38, 与北方和南方 MV-EOF2 的特征向量序列之间的相关性分别为 -0.54 和 -0.52。与前暖后冷年不同的是, 在前冷后暖年, 白令海 - 阿拉斯加区域的季节内振荡与我国冬季气温冷暖交替变化的关系最密切, 其分别与南、北方区域平均气温距平序列的相关系数为 0.36 和 0.32, 与南、北方 MV-EOF2 特征向量序列的相关性分别为 -0.42, -0.44 (表 1), 表明造成中国冬季前冷后暖年的极涡振荡主要是由白令海 - 阿拉斯加区域的异常高压脊的南退 - 北进的前后冬振荡影响的。

Table 1. Correlation of the “trilobal” polar vortex oscillation index and its three key regions with the winter temperature series in the south and north of China in the high- and low-value years of PC2

表 1. PC2 高、低值年“三叶型”极涡振荡指数及其三个关键区与中国冬季南、北方气温序列的相关性

年份	振荡指数	北方温度序列	南方温度序列	MV-EOF2 北方	MV-EOF2 南方
PC2 高值年	Index	0.52	0.62	0.76	0.78
	h100_1	0.58	0.44	0.38	0.33
	h100_2	0.41	0.47	0.64	0.69
	h100_3	0.29	0.43	0.63	0.64
PC2 低值年	Index	0.40	0.38	-0.54	-0.52
	h100_1	0.32	0.36	-0.44	-0.42
	h100_2	0.31	0.23	-0.48	-0.41
	h100_3	0.32	0.29	-0.45	-0.44

5. 总结与讨论

本文利用站点观测资料和再分析资料, 从次季节时间尺度上探究了 1980~2020 年我国冬季气温变化的时空特征, 并从北极极涡振荡的角度解释了我国冬季气温冷暖交替的成因, 现得结论如下:

(1) 通过改进的 MV-EOF 时时矩阵分解的第二模态结果, 发现 1980~2020 年中国冬季气温存在季节内的冷暖交替现象, 前冬和后冬季节内冷暖交替的时间转折点为 1 月 13 日, 即前冬为 12 月 1 日至 1 月 13 日; 后冬为 1 月 14 日至 2 月 28 日。

(2) 本文从北极极涡振荡的角度解释了 1980~2020 年中国冬季季节内冷暖交替的成因。通过回归分析等方法定义了“三叶型”极涡振荡指数, 从而发现“三叶型”极涡振荡与我国冬季气温前后冬反转存在密切联系。冬季极涡主要受到北欧区域、白令海 - 阿拉斯加区域以及北美区域的振荡影响, 使得中国前、后冬气温出现季节内振荡的反转特征。前暖后冷年, 北极涛动处于正位相, 北极极涡总体上异常加强, 前冬比后冬极涡更弱。北极极涡呈“三叶型”极涡振荡正位相, 即前冬向极收缩后冬向南扩张, 前冬北欧高压脊向北入侵北极, 使得极涡形态相对狭长, 从而减少了极地冷空气对中国的影响, 前冬气温升温。而后冬北欧高压脊的强度减弱且南退, 极涡短轴向南扩张, 极地冷空气南下入侵中国, 导致后冬

降温。而前冷后暖年则是相反情况，北极涛动呈负位相，北极极涡总体上异常减弱，后冬比前冬极涡更弱。“三叶型”极涡振荡为负位相，即前冬极涡向南扩张后冬极涡向极收缩，极涡主要受到后冬白令海-阿拉斯加脊异常增强的影响，使得极涡横轴由前冬的向南扩张转为后冬向北缩小，对应中国的前冬降温转为后冬升温。

本文改进的MV-EOF时时分解方法可以客观地区分出中国冬季季节内冷暖交替的主模态年际变化特征，这种冷暖冬交替的发生是否有前期预报因子还值得继续深入探究。本文做过初步尝试，用PC2分别回归了冬季之前的春、夏、秋季节的海表温度和北极海冰密集的变化特征，并没有发现非常显著的前期外强迫异常信号，这对寻找前期稳定的预报因子带来了困难，未来可能需要从大气内部的环流异常变化寻找前期预报因子。注意到PC2高、低值年合成的北极极涡形态均为非纬向对称的“纺锤形”特征，可能意味着极涡边缘中纬度大气长波呈现为2波结构时，易于产生极涡振荡，进而引起中国冬季前后冬冷暖交替的振荡特征。在未来全球变暖北极放大背景下，极涡形态的变化和中纬度Rossby波动力特征的变化机理，可能是未来研究中国冬季季节内冷暖交替机制的可能途径。

基金项目

国家自然科学基金(42075024); 国家重点研发计划(2019YFA0607004); 山东省自然科学基金重大基础研究项目(ZR2019ZD12)。

参考文献

- [1] 陈隆勋, 邵永宁, 张清芬, 等. 近四十年我国气候变化的初步分析[J]. 应用气象学报, 1991, 2(2): 164-174.
- [2] 王绍武, 叶瑾琳, 龚道溢, 等. 近百年中国年气温序列的建立[J]. 应用气象学报, 1998, 9(4): 392-401.
- [3] 梁苏洁, 丁一汇, 赵南, 等. 近50年中国大陆冬季气温和区域环流的年代际变化研究[J]. 大气科学, 2014, 38(5): 974-992.
- [4] Lo, Y.T.E., Mitchell, D.M., Watson, P.A.G. and Screen, J.A. (2023) Changes in Winter Temperature Extremes from Future Arctic Sea-Ice Loss and Ocean Warming. *Geophysical Research Letters*, **50**, e2022GL102542. <https://doi.org/10.1029/2022gl102542>
- [5] Wu, B. and Wang, J. (2002) Winter Arctic Oscillation, Siberian High and East Asian Winter Monsoon. *Geophysical Research Letters*, **29**, 3-1-3-4. <https://doi.org/10.1029/2002gl015373>
- [6] Jhun, J. and Lee, E. (2004) A New East Asian Winter Monsoon Index and Associated Characteristics of the Winter Monsoon. *Journal of Climate*, **17**, 711-726. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<0711:aneawm>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<0711:aneawm>2.0.co;2)
- [7] 康丽华, 陈文, 魏科. 我国冬季气温年代际变化及其与大气环流异常变化的关系[J]. 气候与环境研究, 2006, 11(3): 330-339.
- [8] Wang, B., Wu, R. and Li, T. (2003) Atmosphere-warm Ocean Interaction and Its Impacts on Asian-Australian Monsoon Variation. *Journal of Climate*, **16**, 1195-1211. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)16<1195:aoiaii>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)16<1195:aoiaii>2.0.co;2)
- [9] Wang, B., Wu, Z., Chang, C., Liu, J., Li, J. and Zhou, T. (2010) Another Look at Interannual-to-Interdecadal Variations of the East Asian Winter Monsoon: The Northern and Southern Temperature Modes. *Journal of Climate*, **23**, 1495-1512. <https://doi.org/10.1175/2009jcli3243.1>
- [10] 汪子琪, 张文君, 耿新. 两类ENSO对中国北方冬季平均气温和极端低温的不同影响[J]. 气象学报, 2017, 75(4): 564-580.
- [11] 丁一汇. 东亚冬季风的统计研究[J]. 热带气象, 1990, 6(2): 119-128.
- [12] 康丽华, 陈文, 王林, 等. 我国冬季气温的年代际变化及其与大气环流和海温异常的关系[J]. 气候与环境研究, 2009, 14(1): 45-53.
- [13] Huang, R., Chen, J., Wang, L. and Lin, Z. (2012) Characteristics, Processes, and Causes of the Spatio-Temporal Variabilities of the East Asian Monsoon System. *Advances in Atmospheric Sciences*, **29**, 910-942. <https://doi.org/10.1007/s00376-012-2015-x>
- [14] 韦玮, 王林, 陈权亮, 等. 我国前冬和后冬气温年际变化的特征与联系[J]. 大气科学, 2014, 38(3): 524-536.
- [15] Hu, Y., Tung, K.K. and Liu, J. (2005) A Closer Comparison of Early and Late-Winter Atmospheric Trends in the

-
- Northern Hemisphere. *Journal of Climate*, **18**, 3204-3216. <https://doi.org/10.1175/jcli3468.1>
- [16] 黄嘉佑, 胡永云. 中国冬季气温变化的趋向性研究[J]. 气象学报, 2007, 64(5): 614-621.
- [17] 司东, 马丽娟, 王朋岭, 等. 2015/2016 年冬季北极涛动异常活动及其对我国气温的影响[J]. 气象, 2016, 42(7): 892-897.
- [18] 聂羽, 孙冷, 王东阡, 等. 2015/2016 年前冬至隆冬北半球中高纬度暖冷急转及环流特征初析[J]. 气象, 2016, 42(10): 1223-1229.
- [19] 韩荣青, 石柳, 袁媛. 2020/2021 年冬季中国气候冷暖转折成因分析[J]. 气象, 2021, 47(7): 880-892.
- [20] 韦玮, 王林, 陈权亮, 等. 我国前冬和后冬的划分及其气温的年际变异[J]. 大气科学, 2020, 44(1): 122-137.
- [21] Lü, Z., He, S., Li, F. and Wang, H. (2018) Impacts of the Autumn Arctic Sea Ice on the Intraseasonal Reversal of the Winter Siberian High. *Advances in Atmospheric Sciences*, **36**, 173-188. <https://doi.org/10.1007/s00376-017-8089-8>
- [22] Geng, X., Zhang, W., Stuecker, M.F., Liu, P., Jin, F. and Tan, G. (2016) Decadal Modulation of the Enso-East Asian Winter Monsoon Relationship by the Atlantic Multidecadal Oscillation. *Climate Dynamics*, **49**, 2531-2544. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3465-0>