

东亚冬季大范围长时间气温反相事件及成因探究

李雪妍¹, 祁莉^{1*}

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, 江苏 南京 210044

摘要 东亚冬季气温存在显著的季节内冷暖起伏, 给人民的生产生活带来了深远的影响。本文主要使用 1980-2022 年冬季逐日 NCEP-NCAR 再分析资料, 筛选 42 年冬季中最典型的“冷转暖”事件和“暖转冷”事件, 分析了东亚冬季大范围、长时间的气温反相事件的特征及其主要影响因子。结果表明: (1) 在 42 年冬季中存在典型的 21 个“冷转暖”事件及 6 个“暖转冷”事件, 偏暖 and 偏冷之间的气温差均高达 10℃ 以上, 维持时间超 30 天, 并且“冷转暖”事件和“暖转冷”事件均表现出全区一致的冷暖转相。(2) 无论是“冷转暖”事件还是“暖转冷”事件, 在温度转相前 2 天左右乌拉尔山地区的位势高度先发生位相转变。在暖转冷事件中, 伴随着乌拉尔山地区位势高度异常由负转正, 2 天后东亚气温将由偏暖转为偏冷, 反之亦然。(3) “暖转冷”事件中, 乌拉尔山地区位势高度异常的转向与北大西洋涛动(North Atlantic oscillation, NAO) 南中心密切相关, 在温度转向前 35 天 NAO 南中心在平流层已出现位势高度正异常信号, 并下传至对流层, 形成波作用通量向东传播至乌拉尔山地区, 使得其位势高度由负转正, 进而造成东亚气温反转。“冷转暖”事件则主要与 NAO 的北中心有关, 温度转向前 30 天位势高度负异常已出现在平流层, 并下传至对流层进一步造成乌拉尔山地区位势高度转向。NAO 南、北中心位势高度在平流层的信号变异与相应气温转向事件中气温的 30 天超前相关系数高达-0.8, 因此, 对它的监测和预测将有利于我们提前 30 天预测东亚冬季气温大范围、长时间的季节内转向。

关键词 冬季气温, 季内起伏, NAO 南北中心, 平流层

文章编号

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2000.19000

East Asia large scale temperature reversal events and the exploration of its cause in winter

Li Xueyan¹, Qi Li^{1*}

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education/Joint International Research Laboratory of

收稿日期 2023-12-08; **网络预出版日期**

作者简介 李雪妍, 女, 1998 年出生, 硕士研究生, 主要从事季风和海—陆—气相互作用研究。E-mail: 1281319589@qq.com

通信作者 祁莉, 女, 1981 年出生, 教授, 主要从事季风和海—陆—气相互作用研究。E-mail: qili@nuist.edu.cn

资助项目 国家重点研发计划项目 2022YFF0801602

Funded by National Key Research and Development Program on Monitoring (Grant 2022YFF0801602)

Abstract Winter temperatures in East Asia have significant subseasonal oscillation, which have a profound impact on people's production and life. Based on the reanalysis data of NCEP-NCAR during the period of 1980–2022, the most typical temperature reversal events in winter of 42 years were found and analyzed in terms of their characteristics and main influencing factors by using correlation analysis, power spectrum analysis, butterworth filter, Plumb wave activity flux analysis and other statistical methods. The results show that: (1) In the winter of 42 years, there are 21 typical "cold-to-warm" events (CTWE) and 6 "warm-to-cold" events (WTCE). In all events, the temperature difference between the warm and cold period was more than 10°C. Besides, the temperature reversal was observed over the whole region. (2) In all events, the geopotential height anomaly in 500hPa over the Ural Mountains has a phase transition 2 days before the reversal of the East Asian temperature. During the WTCE, the anomalous geopotential height of the Ural Mountains changes from negative to positive, 2 days later the temperature anomaly in East Asia changes from warm to cold, and vice versa. (3) Further analysis reveals that during the WTCE, the reversal of the anomalous geopotential height in the Ural Mountains region is closely related to the southern center of North Atlantic oscillation (NAO). 35 days before the reversal of East Asia temperature, positive geopotential height anomaly has been observed in the southern center of NAO in the stratosphere, then it propagates downward to the troposphere and excites wave flux propagating eastward to the Ural Mountains region, further leading to the anomalous geopotential height in Ural Mountains transition from negative to positive. However, the CTWE is mainly related to the northern center of NAO. Negative geopotential height has existed in the northern center of NAO in the stratosphere 30 days before the reversal of East Asian temperature anomaly. The 30-day leading correlation coefficient between the geopotential height of NAO centers and the corresponding temperature anomaly in different reversal events is as high as -0.8, exceeding 95% confidence level. Therefore, monitoring and prediction of the geopotential height of NAO south and north centers in stratosphere will help us to predict the subseasonal reversal of winter temperature in East Asia 30 days in advance.

Keywords: Winter temperature, Intraseasonal temperature oscillation, the Southern center and northern center of NAO, Stratosphere

1 引言

东亚气温的异常冷暖起伏, 不仅严重影响居民的日常生活, 还与交通运输、能源调度、双碳减排、农业生产、服装业、保险业等密切相关 (高辉等, 2008; 晏红明等, 2023)。因此, 对东亚冬季气温的正确预报预测不仅具有重要的科学意义, 也是冬季减灾防灾中不可或缺的重要一环。

在以往有关冬季气温的研究中, 较多关注于冬季平均 (12月-次年2月平均) 气温的变化。冬季的平均气温具有明显的年际变化特征 (Wallace et al., 1996; Jhun and Lee, 2004;

康丽华等, 2009; 梁苏洁等, 2014; 丁一汇等, 2014), 空间场上主要表现为北方型模态和南方型模态, 北方型模态的主要特征为东亚大槽的西移和西伯利亚高压的增强, 而南方型模态则表现为东亚大槽的加深和蒙古上空高压的增强 (Wang et al., 2010b)。此外, 东亚地区为典型季风区, 冬季气温受东亚冬季风影响较大, 冬季风的重要成员——西伯利亚高压位置和强度的变化直接影响中国冬季平均温度的变化 (宗海峰等, 2008; 肖晓等, 2016)。ENSO (陈文, 2002; Honda et al., 2009; Chen et al., 2016)、北极海冰 (武炳义, 2018) 等外强迫因子, 以及大气遥相关 (范可和刘辉, 2013; Wang and Zhang, 2015; 汪宁等, 2017)、平流层爆发性增温 (SSW) (Kidston et al., 2015) 等大气内部变率, 它们共同作用导致东亚冬季风发生异常, 进而影响东亚冬季平均气温。

然而, 观测事实表明, 欧亚大陆冬季气温还存在着显著的季节内变化 (Hu et al., 2005; 黄嘉佑和胡永云, 2006; 李一玲等, 2018; 贾丹和简茂球, 2015; 韦玮等, 2014, 2020; Li et al., 2021; 马锋梅等, 2021; 祁莉和泮琬楠, 2021; Zhang et al., 2021; Zhong and Wu, 2022; Yu et al., 2022)。以 2008-2009 年冬季为例, 图 1 给出了 11 月-次年 3 月逐日气温的距平及累计距平平均值, 可以清晰地看到, 气温累计距平的平均值始终在 0 值附近波动, 然而该年前冬显著偏冷, 而后冬最高气温可达 6°C 以上, 前冬和后冬的最大气温差高达 10°C 以上。可见, 在冬季平均气温与气候态较为接近的情况下, 气温也可能出现较大的季节内冷暖起伏, 这往往给居民和社会带来更大、更深远的影响。韦玮 (2014, 2020) 等人指出, 我国冬季气温在前冬至后冬存在两个主要模态, 第一模态为前后冬同相演变; 第二模态则为前后冬反相演变, 在前后冬反相变化的模态中前后冬能量传播的方式并不相同。也有学者认为东亚地区气温的主要年际变化与欧亚大陆高纬一中低纬气温的反相变化密切相关 (Hu et al., 2005; 黄嘉佑和胡永云, 2006; 李一玲等, 2018; 贾丹和简茂球, 2015)。申红艳 (2021) 等指出近几十年来气温季节内变率逐渐减弱, 然而在本世纪初则出现明显增强。此外马锋梅 (2021) 等指出气温的季节内变化在 1986 年前在南方较显著, 而在 1986 年后则表现在北方更明显。

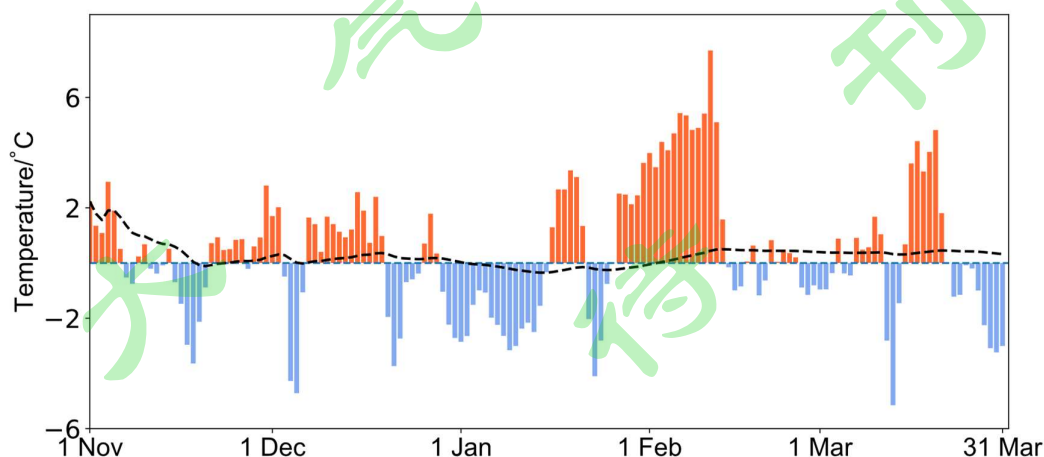


图 1 东亚地区 (100°E - 125°E , 20°N - 50°N) 2008 年 11 月至 2009 年 3 月气温的逐日距平 (柱状图, 单

位: °C) 及其累计距平的平均值 (黑色虚线, 单位: °C)

Fig. 1 Daily temperature anomalies (bar, unit: °C) and the average of their cumulative anomalies (black dashed line, unit: °C) over East Asia(100°E-125°E, 20°N-50°N) from November 2008 to March 2009.

可见, 在一些年份中东亚地区冬季气温前、后冬的变化是剧烈的, 其年际变化的幅度不低于冬季平均气温的变率, 在近年来又出现了增强趋势。然而, 学界对它发生的机制还未达成共识。祁莉和泮琬楠 (2021) 利用月平均数据提取前、后冬气温反相变化的经验正交函数分解 (Empirical Orthogonal Function, EOF) 模态, 指出欧亚遥相关波列 (EU 遥相关波列) 在前、后冬位相发生转变, 导致低层西伯利亚高压发生转向, 进而造成气温的反相。Zhong and Wu (2022) 则提出前冬 11 月、12 月东亚地区气温主要受北大西洋海温偶极模态的影响, 而后冬 1 月、2 月北极海冰海温耦合模态通过影响欧亚大陆上空的环流导致气温发生变化, 进而造成气温的反相。2020-2021 年冬季发生的极端气温冷暖转换事件, Zhang et al. (2021) 指出前冬的异常冷与“暖北极-冷欧亚”模态有关, 2 月“暖北极-冷欧亚”模态转向则导致了后冬的异常偏暖; Yu et al. (2022) 则认为此次极端气温冷暖转换事件与气温年际分量和大气季节内振荡 (Intraseasonal Oscillation, ISO) 分量的协同作用有关。此外, 北极放大效应有利于极端冷事件的发生, 它与全球变暖在冬季的交替影响也会增加气温季节内反相的可能 (Ma et al., 2018)。

综上, 前人已有关注到东亚地区气温在前、后冬反相的变化, 并提出了多种影响因子和相关的机制, 但仍有较大争议, 这些工作大多基于月资料或某一次个例。值得注意的是, 月平均数据可能掩盖了气温反转现象的本质, 并且冬季气温的冷暖转向不一定发生在前冬 (12 月) 和后冬 (2 月) 之间。因此, 本研究将基于逐日资料确定的东亚大范围长时间的温度转向典型事件, 通过对多个例的合成分析, 深入研究东亚冬季大范围、长时间维持的气温季节内反相的特征, 探究其可能的影响机制, 并寻找稳定的前兆信号, 这对提高我国冬季气候预测能力有重要的科学意义和应用价值。

2 资料与方法

2.1 资料

本文中主要使用的大气环流数据为美国环境预报中心/美国大气资料中心 (NCEP-NCAR) 提供的水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的全球日平均再分析资料, 要素主要包括 2m 气温、海平面气压场, 垂直方向 1000—10hPa 位势高度场、风场等资料 (Kalnay et al., 1996)。

研究时段为 1980 年 11 月-2022 年 3 月, 冬季定义为当年 11 月至次年 3 月。对所有的环流场和温度数据均做去趋势处理, 去掉全球变暖的影响。并对数据进行 9 天低通滤波, 以滤去天气尺度波动。

2.2 研究方法

2.2.1 冷暖转换事件的定义

首先对冬季气温的冷暖转换事件进行定义，根据东亚区域（100°E-125°E，20°N-50°N）平均的逐日气温距平：

- （1） 首先确定逐年的偏冷/偏暖时段，其持续时间在 10 天及以上，并且该时段内最大的气温距平超过一个 9 天滑动平均的标准差。若在此时段内气温距平出现持续 5 天以内的反位相波动，则判定其未发生冷暖转换；
 - （2） 若该年中存在相邻的偏冷和偏暖时段，则判定该年出现了气温的冷暖转换事件，并根据冷、暖时段先后的顺序将该事件分类为“冷转暖事件”和“暖转冷事件”。
- 若该年中存在多次的冷暖转换，则选取持续时间最长的时间段。

以 2020-2021 年冬季为例（图 2），2020 年 11 月 21 日-2021 年 1 月 18 日，东亚的气温距平为负值，为偏冷时段，12 月底虽出现温度正距平，但其仅连续维持 2 天，可认为仍处于偏冷时段，因此偏冷时段共维持 58 天。偏暖时段则为 2021 年 1 月 19 日-3 月 31 日，根据定义偏暖时段共持续 71 天。偏冷、偏暖时段温度距平均超过了 1 个 9 天滑动平均的标准差。因此，2020-2021 年冬季东亚地区气温经历了从“偏冷”至“偏暖”的转换，为典型的冷转暖事件，此事件中气温反相持续的时间共计 129 天。依据定义，在 1980-2022 年 42 年冬季中存在典型的 21 个“冷转暖”事件和 6 个“暖转冷”事件，如表 1 所示。

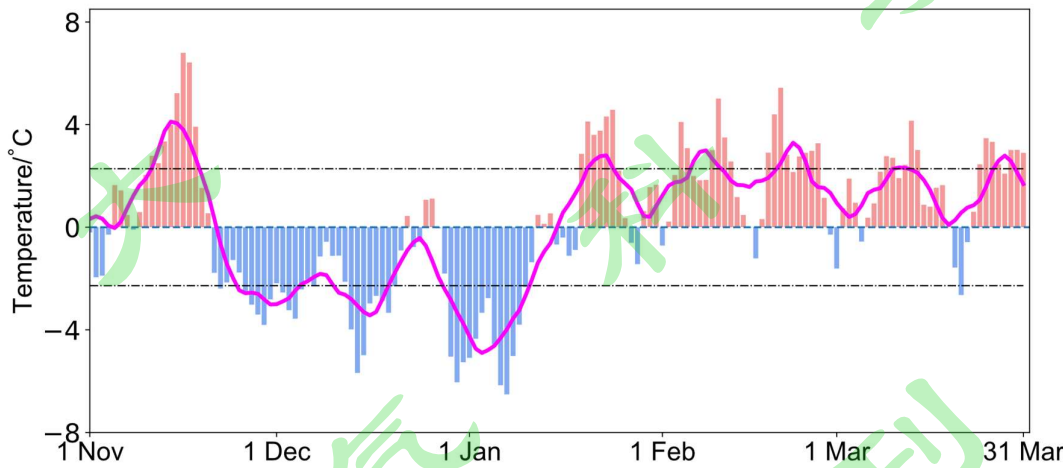


图 2 东亚地区（100°E-125°E，20°N-50°N）2020-2021 年冬季 11 月-3 月的气温距平（℃，柱状图）、9 天滑动平均（℃，粉色实线）及其标准差（℃，黑色虚线）。

Fig. 2 Daily temperature anomalies (°C, bar) , 9-day moving average of the daily temperature anomalies (°C, pink solid line) and its standard deviation (°C, black dashed line) over East Asia (100°E-125°E, 20°N-50°N) from November 2020 to March 2021.

表 1 1980-2022 年冬季气温冷暖转换事件

Table. 1 The classification of winter temperature reversal events during 1980-2022

性质	年份
冷转暖事件	1980-1981、1984-1985、1987-1988、1989-1990、 1990-1991、1992-1993、1993-1994、1994-1995、 1996-1997、1997-1998、2000-2001、2002-2003、 2003-2004、2007-2008、2008-2009、2012-2013、 2014-2015、2017-2018、2018-2019、2020-2021、 2021-2022
暖转冷事件	1982-1983、1985-1986、1991-1992、2004-2005、 2006-2007、2013-2014

2.2.2 统计方法

本文中主要使用的统计方法有合成分析、相关分析，使用 `butterworth` 滤波器进行 9 天低通滤波和 10-90 天带通滤波。

本文计算了 Plumb 波作用通量 (Plumb et al., 1985)，用来描述行星波能量在三维空间中的传播，其计算公式如下：

$$F_{WA} = \frac{p}{p_0} \cos \varphi \times \left(\begin{array}{c} v_g'^2 - \frac{1}{2\Omega a \sin 2\varphi} \frac{\partial(v_g' \phi')}{\partial \lambda} \\ -u_g' v_g' + \frac{1}{2\Omega a \sin 2\varphi} \frac{\partial(u_g' \phi')}{\partial \lambda} \end{array} \right) \quad (1)$$

其中：上标' 代表纬向偏差； ψ 、 λ 、 ϕ 分别代表纬度、经度和位势； a 为地球半径； Ω 代表地球自转角速度； $f = 2\Omega \sin \varphi$ 为科式参数， $p_0=1000 \text{ hPa}$ 。方程中的 u_g 、 v_g 为地转风：

$$u_g = -\frac{1}{fa} \frac{\partial \phi}{\partial \varphi} \quad (2)$$

$$v_g = \frac{1}{fa \cos \varphi} \frac{\partial \phi}{\partial \lambda} \quad (3)$$

3 东亚冬季气温反相的季节内时空分布特征

根据表 1，1980-2022 年间有 27 年出现了显著的气温季节内反相事件，占整体研究时段的 60% 以上，可见冬季气温季节内反相变化的现象是较为普遍的，并且冷转暖事件的概率更大。图 3 给出了 6 次“暖转冷”事件中东亚地区的逐日气温距平演变，6 次事件的过程持续时间均在 1 个月以上，表明气温反相变化过程较长，并非一次简单的天气尺度过程。偏暖 and 偏冷时段的气温距平均较大，极值均超过 5°C ，冷、暖时段的温差可达 10°C 以上。并且这些事件的温度转向并不仅仅发生在前冬（12 月）和后冬（2 月）之间，例如，2006-2007 年的“暖转冷”事件，其温度转向发生在 3 月初。

图 4 给出了典型“冷转暖”事件和“暖转冷”事件中偏暖、偏冷时期温度距平的空间分布，打点区域为通过 95% 显著性 t 检验的区域。可以看出，在所有气温反相事件中，偏暖 and

偏冷时段在空间中均表现出一致的全区域偏暖或偏冷，表明冬季气温的季节内反转并非局地现象，而是东亚地区大范围、长时间的气温反相。

因此，气温季节内反相事件在冬季出现得十分频繁，偏暖和偏冷时段的气温差高达 8-10℃。空间上覆盖整个东亚地区，且整个反相事件的持续时间均在 1 个月以上。由于冬季内偏冷时段与偏暖时段的温度距平在数值上相互抵消，造成了冬季平均气温往往在气候态附近波动，这使得这种冬季内气温的反相事件极易被忽视。然而，这种季节气温的大范围、长时间、大幅度的起伏反转，势必给人民生活带来更显著的、灾害性的影响。因此，必须加强对冬季季节内气温反相事件的监测和预测。那么，导致气温出现反相变化的原因是什么？其高低层环流关键因子又是什么？

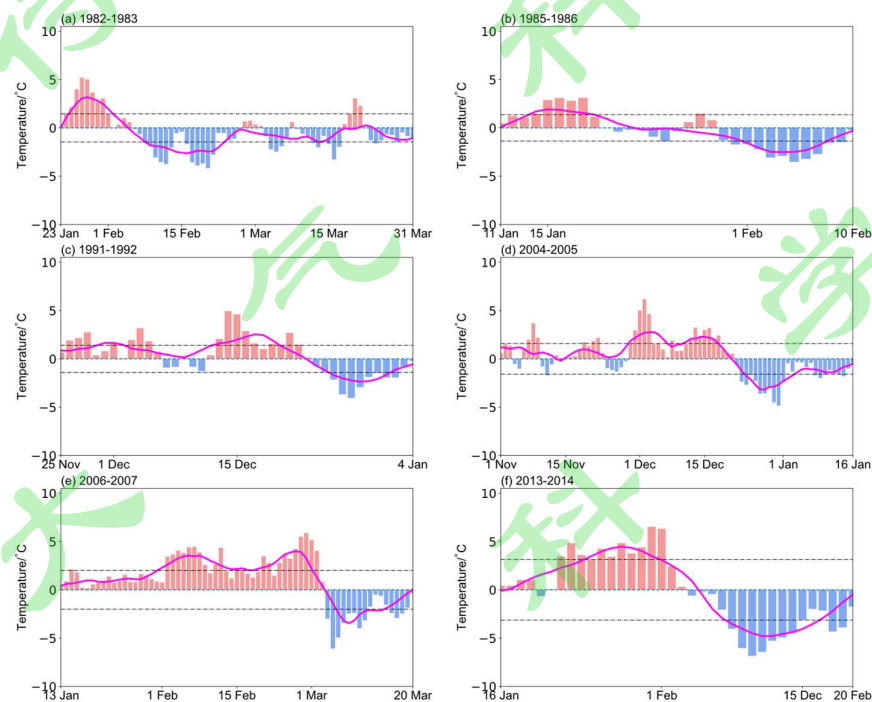


图 3 东亚地区 (100°E-125°E, 20°N-50°N) 冬季典型“暖转冷”事件反相时段内逐日温度的距平 (柱状图)、9 天滑动平均 (粉线) 及其标准差 (黑线) (单位: °C)。 (a) 1982-1983 年, (b) 1985-1986 年, (c) 1991-1992 年, (d) 2004-2005 年, (e) 2006-2007 年, (f) 2013-2014 年

Fig. 3 Daily temperature anomalies (°C, bar), 9-day moving average daily temperature anomalies (°C, pink solid line) and its standard deviation (°C, black dashed line) over East Asia (100°E-125°E, 20°N-50°N). (a) 1982-1983, (b) 1985-1986, (c) 1991-1992, (d) 2004-2005, (e) 2006-2007, (f) 2013-2014

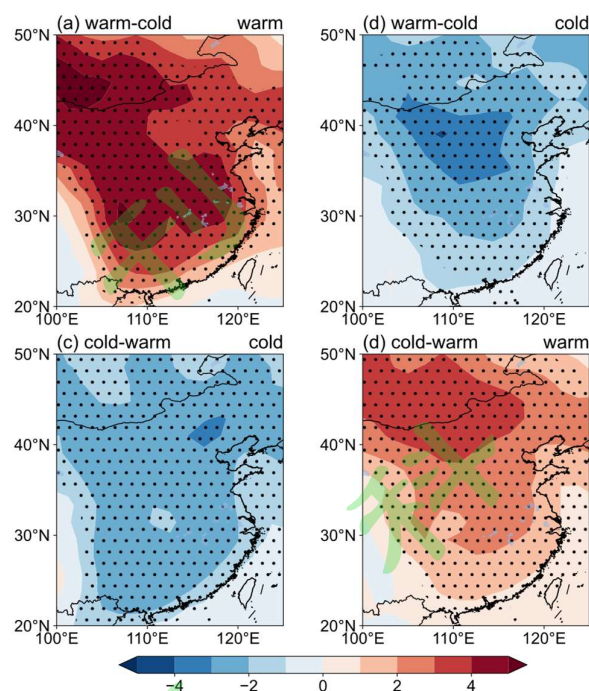


图 4 东亚地区冬季“暖转冷”事件 (a, b) 与“冷转暖”事件中 (c, d) 偏暖 (a, d) 与偏冷 (b, c) 时段合成温度的空间分布 (单位: $^{\circ}\text{C}$)。

Fig. 4 Spatial distribution of temperature during warm (a, d) and cool (b, c) periods of WTCE and CTWE over East Asia in winter (unit: $^{\circ}\text{C}$).

4 影响气温发生反相的可能原因

众所周知, 冬季乌拉尔山阻高的异常活动往往会导致东亚区域的天气及气候异常 (Park et al., 2011; Martineau et al., 2017), 它造成大气中动量与热量的强烈交换 (李艳等, 2012), 前部的冷平流常会导致西伯利亚高压加强 (Zhang et al., 1997), 并导致东亚地区出现寒冷天气。例如, 2008 年的南方冰冻雨雪事件及 2016 年 1 月的“霸王级”寒潮的发生就离不开乌拉尔山阻高的影响 (Li et al., 2019a)。不仅如此, 它还与冬季气温的季节内转向密切相关。

本文以温度转向当天为第 0 天, 合成了从温度转向前 10 天起的 500hPa 位势高度异常, 打点区域通过 90% 显著性 t 检验 (图 5 和 6)。在“暖转冷”过程中 (图 5), 从 -10 天到 -4 天, 乌拉尔山附近为一致的位势高度负异常区域控制。而在 -2 天乌拉尔山地区负位势高度异常转为正的位势高度异常, 并且进一步加强、扩展, 维持至温度转向当天。“冷转暖”事件也是如此, 如图 6 所示, -10 天至 -4 天乌拉尔山地区为正的位势高度异常, 然而从 -2 天起该区域位势高度正异常逐渐被负异常替代, 范围不断扩大。

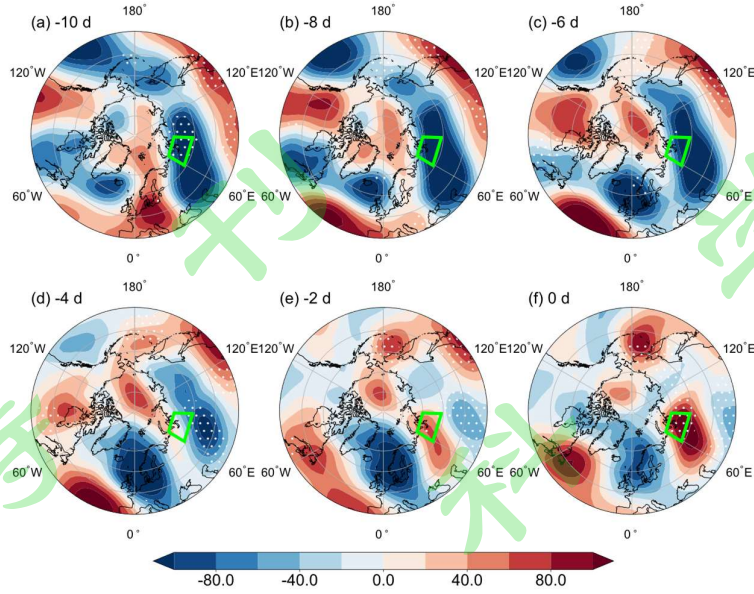


图5 “暖转冷”过程合成的500hPa位势高度异常(单位:m)在东亚地区温度转向前10天至转向当天的分布,绿色框为乌拉尔山阻高关键区,打点区域通过90%显著性t检验。(a) -10天,(b) -8天,(c) -6天,(d) -4天,(e) -2天,(f) 0天。

Fig. 5 Composite distribution of 500hPa geopotential height anomalies(unit :m) during WTCE from -10 day to the reverse day, the green box marks the key area of Ural mountains blocking high, the dots indicate the region significant at the 90% confidence level. (a) -10 day, (b) -8 day, (c) -6 day, (d) -4 day, (e) -2 day, (f) 0 day.

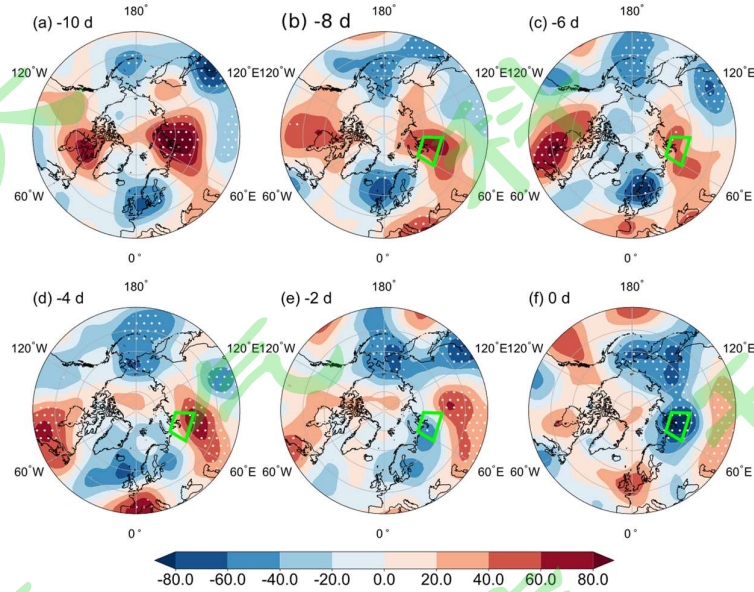


图6 同图5, 但为冷转暖过程

Fig. 6 Same as Figure 5, but for the CTWE

可见,乌拉尔山阻高的发展维持不仅会影响寒潮过程的爆发,该区域位势高度异常的反相变化还与东亚地区大范围、长时间气温的季节内反相密切相关,无论是“暖转冷”事件,还是“冷转暖”事件,乌拉尔山区域(图6绿色框区域)的位势高度均出现了显著的位相转

变，且都超前东亚气温转向 2 天（图 7）。在“暖转冷”过程中，气温距平从偏暖转为偏冷，而乌拉尔山地区的位势高度异常则由负距平转为正距平，并且发生在-2 天，即东亚温度转向的 2 天前。“冷转暖”过程也是如此，乌拉尔山地区的位势高度异常在东亚气温转向的 2 天前由正距平转为负距平。

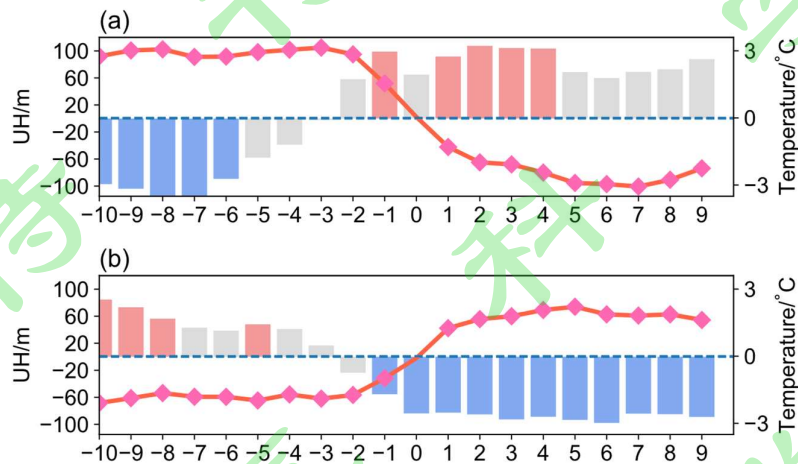


图 7 乌拉尔山关键区 (60°E - 90°E , 60°N - 70°N) 位势高度异常 (柱状图, 单位: m) 与东亚地区 (100°E - 125°E , 20°N - 50°N) 气温距平 (红色线, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 在温度转向前 10 天至转向后 9 天的合成, 打点及填色代表通过 90%显著性 t 检验。(a) 暖转冷过程, (b) 冷转暖过程

Fig. 7 Geopotential height (bar, unit: m) in key area of Ural mountains blocking high (60°E - 90°E , 60°N - 70°N) and temperature anomalies (red line, unit: $^{\circ}\text{C}$) over East Asia (100°E - 125°E , 20°N - 50°N) from 10 days before the temperature reversal to 9 days after reversal, dot and shaded area are significant at the 90% confidence level. (a) WTCE, (b) CTWE

那么，又是什么原因造成了乌拉尔山地区的位势高度异常发生了反相呢？图 8 给出了“暖转冷”过程中-10 天至温度转向当天的波作用通量，从-6 天开始就有一支波列从北大西洋涛动（North Atlantic oscillation, NAO）南中心向东北方向传播至欧洲地区，随后向东南方向传播至乌拉尔山地区（图 8），波作用通量的向东传播，通过经向平流的行星涡度平流影响乌拉尔山地区的位势高度（Yang and Li, 2017），使得其从负异常转向为正常，进而造成了 2 天后东亚气温的季节内转向（图 7a）。事实上，-6 天 NAO 南中心区域波作用通量的发生发展主要受到平流层异常信号的影响。而北半球冬季的中高纬地区正是平流层—对流层耦合的关键区域（Wallace and Thompson, 2002）。在寒潮发生前常常存在平流层位势高度异常信号的向下传播（吴嘉惠和任荣彩, 2021），而平流层—对流层的耦合主要借助于向下传播的 NAO 或北极涛动（Arctic oscillation, AO）信号得以实现（Liang et al., 2022）。在“暖转冷”事件中也存在类似的显著的平流层—对流层的耦合，由于平流层大气具有显著的低频变化周期（李崇银等, 2006），因此图 9 给出了 10-90 天滤波后的位势高度异常在 NAO 南中心处的垂直剖面，可以清晰地看到，在“暖转冷”过程中 NAO 南中心区域的位势高度正异常信号从平流层向下传播至对流层，进而激发波作用通量（图 9a）。并且，NAO 南中心区

域在平流层的正位势高度异常早在东亚温度转向前 35 天就已建立（图 10b），随着平流层波形的调整，这区域的位势高度正异常逐渐加强并下传，影响对流层 NAO 南中心区域的位势高度异常。因此，东亚冬季气温的季节内“暖转冷”事件在温度转向前 35 天就已存在显著的平流层下传过程。这就使得该类事件可以提前 35 天进行监测和预测，极大地有助于提高东亚冬季气温的预测。

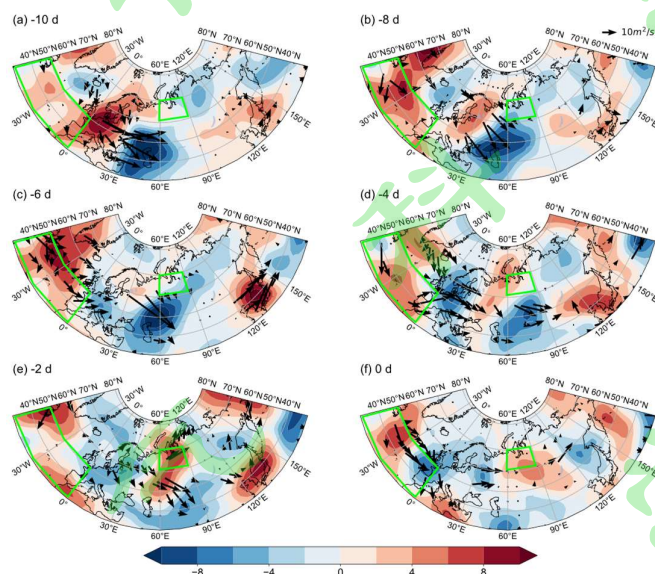


图 8 “暖转冷”过程中气温转向前 10 天至转向当天合成的 500hPa 位势高度（阴影，单位：m）及 Plumb 波作用通量（矢量，单位： m^2/s^2 ），绿色框为 NAO 南中心关键区（ $60^\circ\text{W}-0^\circ$ ， $30^\circ\text{N}-50^\circ\text{N}$ ）。(a) -10 天，(b) -8 天，(c) -6 天，(d) -4 天，(e) -2 天，(f) 0 天

Fig. 8 500hPa potential height (shadow, unit :m) and Plumb wave flux (vector, unit : m^2/s^2) during WTCE, the green box is the key area of the southern center of NAO ($60^\circ\text{W}-0^\circ$, $30^\circ\text{N}-50^\circ\text{N}$). (a) -10 day, (b) -8 days, (c) -6 day, (d) -4 day, (e) -2 day, (f) 0 day

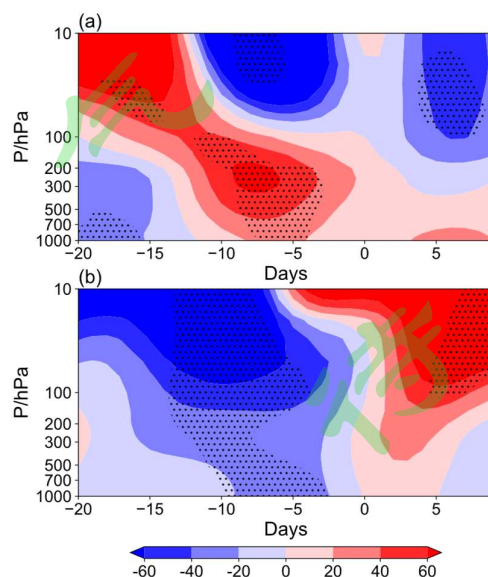


图9 10-90 天带通滤波后两个关键区从-20 天至-10 天的位势高度时间-高度剖面图（单位：m）。（a）“暖转冷”过程中 NAO 南中心关键区（ $60^{\circ}\text{W}-0^{\circ}$ ， $30^{\circ}\text{N}-50^{\circ}\text{N}$ ），（b）“冷转暖”过程中 NAO 北中心关键区（ $20^{\circ}\text{W}-40^{\circ}\text{E}$ ， $50^{\circ}\text{N}-80^{\circ}\text{N}$ ）。打点区域为通过 90%显著性 t 检验区域

Fig. 9 Time-height profile of potential height in two key area after 10-90 days of bandpass filtering from 20 days before temperature reversal to 10 days after temperature reversal (unit :m). (a) key area of the southern center of NAO(60° W- 0° , $30^{\circ}\text{N}-50^{\circ}\text{N}$), (b) key area of the northern center of NAO($20^{\circ}\text{W}-40^{\circ}\text{E}$, $50^{\circ}\text{N}-80^{\circ}\text{N}$). The dot area are significant at the 90% confidence level

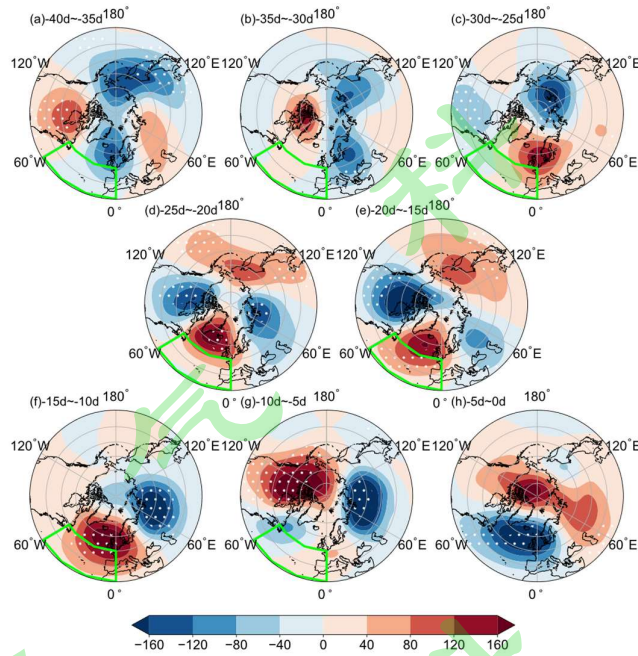


图10 “暖转冷”过程中 10-90 天带通滤波后 10-100hPa 位势高度（单位：m）在-40 天至 0 天每 5 天平均的分布，打点区域通过 90%显著性 t 检验。（a）-40 至-35 天，（b）-35 至-30 天，（c）-30 至-25 天，（d）-25 至-20 天，（e）-20 至-15 天，（f）-15 至-10 天，（g）-10 至-5 天，（h）-5 天至 0 天

Fig. 10 Every 5 days average composite distribution of 10-100hPa 10-90d filtered geopotential height (unit :m) during WTCE from -40 day to 0 day, the dot area is significant at the 90% confidence level. (a) -40 to -35 day, (b) -35 to -30 day, (c) -30 to -25 day, (d) -25 to -20 day, (e) -20 to -15 day, (f) -15 to -10 day, (g) -10 to -5 day, (h) -5 to 0 day

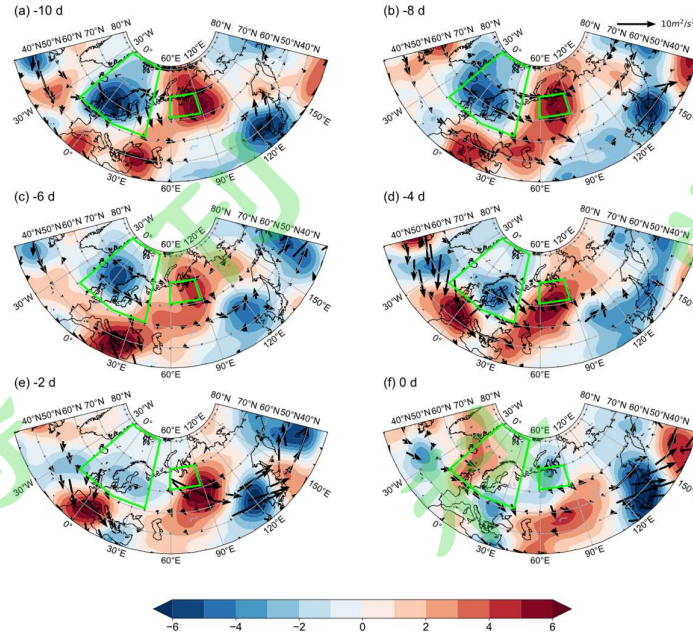


图 11 同图 8，但为“冷转暖”过程。绿色框为 NAO 北中心关键区（20°W-40°E，50°N-80°N）
Fig. 11 Same as Figure 8, but it is the CTWE. The green box is the key area of the northern center of NAO(20°W-40°E，50°N-80°N)

“冷转暖”过程也存在类似的平流层下传过程，然而，该过程的关键区域位于 NAO 的北中心，从-8 天开始波作用通量就从 NAO 的北中心出发，穿过欧洲地区，向东传播至乌拉尔山地区（图 11），造成该地区的位势高度异常从正异常转为负异常（图 7）。“冷转暖”过程中 NAO 北中心区域的波作用通量同样来自于平流层的下传（图 9b），在-20 天平流层已出现负位势高度异常信号，在此后不断下传，导致 NAO 北中心位势高度出现负位势高度异常。在平流层 10-100hPa 位势高度异常的合成图（图 12）中可看出，NAO 北中心区域在平流层的信号早在-30 天已出现了负的位势高度异常（图 12c），并进一步增强、维持在关键区上空，直至温度转向前 5 天，负位势高度异常才减弱。

综上所述，东亚冬季气温的季节内反相存在明显的平流层—对流层耦合。“暖转冷”事件中，在温度转向前 35 天平流层异常信号从 NAO 南中心下传至对流层，通过波作用通量造成乌拉尔山地区位势高度异常转向，进而造成东亚气温异常发生反转。NAO 南中心区域平流层位势高度异常与东亚气温序列的相关系数在超前 30-35 天就已达到-0.8 以上（图 13a），显著通过了 95%置信度检验。“冷转暖”过程的关键区域则为 NAO 的北中心，其与东亚气温的相关系数同样在超前 25 天就达到了-0.8 以上（图 13b）。

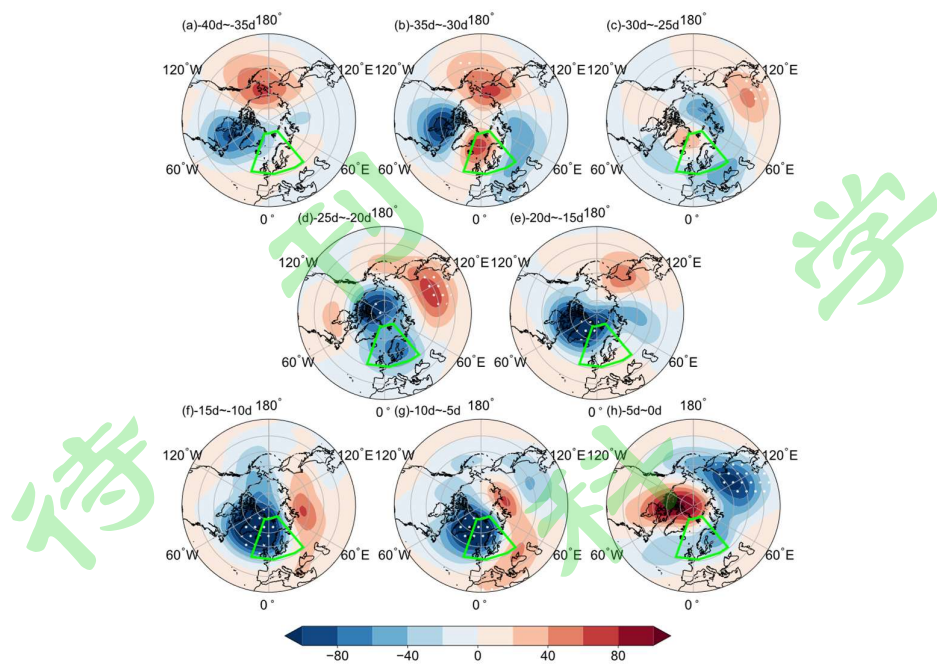


图 12 同图 10，但为冷转暖过程
Fig. 12 Same as Figure 10, but it is the CTWE

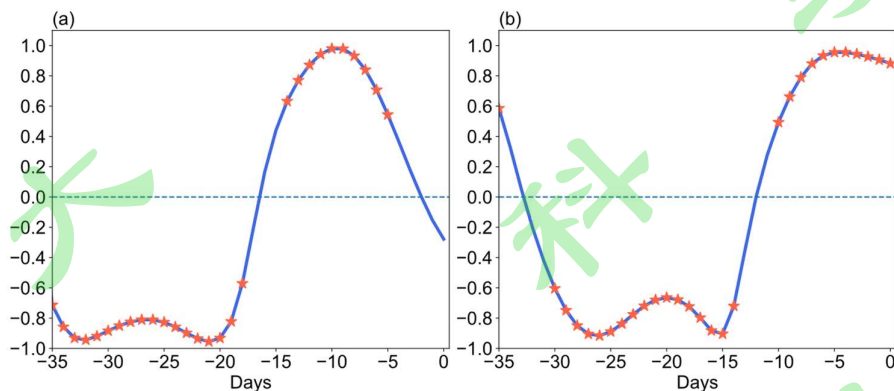


图 13 东亚地区 ($100^{\circ}\text{E}-125^{\circ}\text{E}$, $20^{\circ}\text{N}-50^{\circ}\text{N}$) 温度 (单位: $^{\circ}\text{C}$) 与平流层 10-100hPa 关键区位势高度 (单位: m) 的滞后相关, 星形打点为通过 95% 显著性 t 检验。

(a) “暖转冷” 过程, 平流层关键区为 NAO 南中心区域 ($60^{\circ}\text{W}-0^{\circ}$, $30^{\circ}\text{N}-50^{\circ}\text{N}$),

(b) “冷转暖” 过程, 平流层关键区为 NAO 北中心区域 ($20^{\circ}\text{W}-40^{\circ}\text{E}$, $50^{\circ}\text{N}-80^{\circ}\text{N}$)

Fig. 13 Lag correlation between temperature (unit: $^{\circ}\text{C}$) over East Asia ($100^{\circ}\text{E}-125^{\circ}\text{E}$, $20^{\circ}\text{N}-50^{\circ}\text{N}$) and stratospheric 10-100hPa potential height (unit: m) of key area, the star dot area is significant at the 95% confidence level. (a) WTCE, the stratospheric key region is the corresponding region of NAO southern center ($60^{\circ}\text{W}-0^{\circ}$, $30^{\circ}\text{N}-50^{\circ}\text{N}$), (b) CTWE, the stratospheric key region is the corresponding region of NAO northern center ($20^{\circ}\text{W}-40^{\circ}\text{E}$, $50^{\circ}\text{N}-80^{\circ}\text{N}$)

5 总结与讨论

东亚冬季气温存在显著的季节内冷暖转向, 对人民生活造成了显著的影响。因此,

本文基于 1980-2022 年 NCEP 再分析逐日资料,对历年东亚地区冬季气温反相事件进行分类,分析了气温反相事件的主要特征,探讨了影响气温反相变化的主要影响因子,得到的主要结论如下:

东亚冬季气温反相事件较为频繁,在 1980-2022 年共 42 年冬季中出现了典型的 21 个“冷转暖”事件及 6 个“暖转冷”事件,占事件时间长度的 60%以上。气温反转事件的维持时间较长,均超过 1 个月;偏暖和偏冷时段气温的强度都较大,冷暖转换的气温差在 8-10°C 以上;并且,无论是“冷转暖”还是“暖转冷”事件均表现为东亚地区全区一致的冷暖转向。

在“暖转冷”和“冷转暖”事件中,乌拉尔山地区的位势高度均提前 2 天发生了位势高度异常的反转。“暖转冷”事件中,乌拉尔山地区位势高度异常提前 2 天由负异常转为正异常,造成东亚地区大气环流转型,气温由偏暖转为偏冷。“冷转暖”事件亦然。乌拉尔山地区位势高度异常的转向则与 NAO 区域的平流层—对流层耦合有关。“暖转冷”事件中,转向前 35 天 NAO 南中心区域平流层已出现位势高度正异常,加强、维持并下传影响平流层,使得 NAO 南中心激发波列向东传播,波作用通量通过经向平流的行星涡度平流影响了乌拉尔山地区的位势高度。“冷转暖”事件也存在类似的平流层—对流层耦合,但其关键区域位于 NAO 的北中心。

因此,NAO 区域平流层—对流层的耦合为东亚气温的季节内反转提供了提前 30 天的监测和预测信号,这有助于提高冬季气温的预测。在未来的工作中我们将在模式和季节预报中验证和讨论本文结论。此外,在本文中没有讨论外强迫因子如 ENSO、北极海冰等的影响,外强迫因子对冬季气温季节内反相的影响是什么?是否影响其年际变率?这也将在今后的工作中进一步深入分析。

参考文献 (References)

- Chen HW, Alley RB, Zhang FQ. 2016. Interannual Arctic sea ice variability and associated winter weather patterns: a regional perspective for 1979–2014[J]. *J Geophys Res Atmos*, 121:14433–14455. doi:10.1002/2016JD024769
- 陈文. 2002. El Niño 和 La Niña 事件对东亚冬、夏季风循环的影响[J]. *大气科学*, 26(5): 595–610. Chen Wen. 2002. Impacts of El Niño and La Niña on the Cycle of the East Asian Winter and Summer Monsoon[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (In Chinese)*, 26(5): 595–610. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.05.02
- 丁一汇,柳艳菊,梁苏洁,等. 2014. 东亚冬季风的年代际变化及其与全球气候变化的可能联系[J]. *气象学报*, 5:835–852. DING Yihui, LIU Yanju, LIANG Sujie, et al. 2014. Interdecadal variability of the East Asian winter monsoon and its possible links to global climate change[J]. *Acta Meteorologica Sinica. (In Chinese)*, 5: 835–852. doi:10.11676/qxxb2014.079
- 范可,刘辉. 2013. 近百年东亚冬季气温及其大气环流变化型态[J]. *大气科学*, 37(2):383–394. Fan Ke, Liu Hui. 2013. Winter temperature over East Asia and atmospheric circulation patterns in the last 100 years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37 (2): 383–394. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12305
- 高辉,陈丽娟,贾小龙,等. 2008. 2008 年 1 月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析[J]. *气象*, 34(4):101–106. Gao

- Hui, Chen Lijuan, Jia Xiaolong, et al. 2008. Analysis of the Severe Cold Surge, Ice snow and Frozen Disasters in South China During January 2008: II. Possible Climatic Causes[J]. Meteor Mon (in Chinese), 34(4):101-106. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2008.04.013
- Honda M, Inoue J, Yamane S. 2009. Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters[J]. Geophys Res Lett, 36(8):L08707. doi:10.1029/2008GL037079
- Hu Y Y, Tung K K, Liu J P. 2005. A closer comparison of early and late winter atmospheric trends in the Northern Hemisphere [J]. J. Climate, 18(16): 3204-3216. doi:10.1175/JCLI3468.1
- 黄嘉佑, 胡永云. 2006. 中国冬季气温变化的趋向性研究[J]. 气象学报, 64(5): 614-621. Huang Jiayou, Hu Yongyun. 2006. TRENDS OF WINTER TEMPERATURES IN CHINA[J]. Acta Meteorologica Sinica (In Chinese), 64(5): 614-621. doi: 10.11676/qxxb2006.060
- Jhun J G, Lee E J. 2004. A new East Asian winter monsoon index and associated characteristics of winter monsoon[J]. J. Climate 17:711-726. doi: 10.1175/1520-0442(2004)0172.0.CO;2
- 贾丹, 简茂球. 2015. 中国冬季月地面气温的年际变化[J]. 气候与环境研究, 20(04):454-464. JIA Dan, JIAN Maoqiu. 2015. Interannual Variability of Wintertime Monthly Surface Air Temperature in China[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20(4): 454-464. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14240
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. Bull Amer Meteor Soc., 77:437-472. doi: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP> 2.0.CO;2
- Kidston, J., Scaife, A. A., Hardiman, S. C. et al. 2015. Stratospheric influence on tropospheric jet streams, storm tracks and surface weather [J]. Nature Geoscience, 8(6): 433-440. doi:10.1038/ngeo2424
- 康丽华, 陈文, 魏科. 2006. 我国冬季气温的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, 11(03):330-339. KANG Li-Hua, CHEN Wen, WEI Ke. 2006. The Interdecadal Variation of Winter Temperature in China and Its Relation to the Anomalies in Atmospheric General Circulation[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11(3): 330-339. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2006.03.09
- Kolstad E W, Breiteig T, Scaife A A. 2010. The association between stratospheric weak polar vortex events and cold air outbreaks in the Northern Hemisphere[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 136(649):886-893. doi:10.1002/qj.620
- 李崇银, 程胜, 潘静. 2006. 冬季北半球平流层季节内振荡与对流层季节内振荡的关系[J]. 大气科学, 30(5): 744-752. LI Chong-Yin, CHENG Sheng, PAN Jing. 2006. The Relationship Between the Intraseasonal Oscillations in the Northern Hemisphere During the Boreal Winter in the Stratosphere and Troposphere[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30(5): 744-752. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.05.03
- Li H., Fan K., He S., Liu Y., Yuan X., Wang H. 2021. Intensified impacts of central Pacific ENSO on the reversal of December and January surface air temperature anomaly over China since 1997[J]. J. Climate, 34(5), 1601-1608. doi:10.1175/JCLI-D-20-0048.1
- Li Y., Zhang J. Y., Lu Y., et al. 2019a. Characteristics of transient eddy fluxes during blocking highs associated with two cold events in China[J]. Atmosphere, 10(5):235. doi:10.3390/atmos 10050235

- 李艳,马敏劲,王式功,等. 2012. 阻塞高压与低温持续性降水之间的关系[J].干旱气象, 30(4):539-545. Li Yan, Ma Minjing, Wang Shigong, et al. 2012. Analysis of Relationship Between Blocking Highs and Consecutive Precipitation During the Durative Low Temperature, Snowfall and Freezing Period in China[J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 30(4):539-545. doi:CNKI:SUN:GSQX.0.2012-04-008
- 李一玲,王澄海,张飞民. 2018. 欧亚大陆冬季地表温度南北反相变化的年代际特征及机理[J].气候与环境研究, 23(2):161-175. Yiling LI, Chenghai WANG, Feimin ZHANG. 2018. Interdecadal Variations and Mechanisms of the Seesaw Pattern for Winter Surface Temperature between Northern and Southern Eurasia[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23(2):161-175. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17059
- 梁苏洁,丁一汇,赵南,等. 2014. 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, 38(05):974-992. Liang Sujie, Ding Yihui, Zhao Nan, et al. 2014. Analysis of the Interdecadal Changes of the Wintertime Surface Air Temperature over Mainland China and Regional Atmospheric Circulation Characteristics during 1960-2013[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38(5): 974-992. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13234
- Liang Z, Rao J, Guo D, et al. 2022. Northern winter stratospheric polar vortex regimes and their possible influence on the extratropical troposphere[J]. Climate Dynamics, 60(9-10):3167-3186. doi:10.1007/s00382-022-06494-9
- 马锋敏,陈丽娟,李想,等. 2021. 中国冬季气温不同年代际的季节内变化特征及成因分析[J].大气科学, 46(3): 573-589. MA Fengmin, CHEN Lijuan, LI Xiang, et al. 2022. Characteristics and Causes of Intraseasonal Variation of Winter Temperature in China under Different Interdecadal Scale [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 46(3): 573-589. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2110.21027
- Martineau P, Chen G, Burrows DA. 2017. Wave events: climatology, trends, and relationship to Northern Hemisphere winter blocking and weather extremes[J]. J. Climate, 30(15):5675-5697. doi:10.1175/JCLI-D-16-0692.1
- Ma Shuangmei, Congwen Zhu, Boqi Liu, et al. 2018. Polarized Response of East Asian Winter Temperature Extremes in the Era of Arctic Warming[J]. J. Climate, 31(14): 5543-5557. doi:10.1175/JCLI-D-17-0463.1
- Park TW, Ho CH, Yang S. 2011. Relationship between the Arctic Oscillation and cold surges over East Asia[J]. J. Climate, 24(1):68-83. doi:10.1175/2010JCLI35
- Plumb, Alan R. 1985. On the three-dimensional propagation of stationary waves[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 42(3):217-229. doi:10.1175/1520-0469(1985)042<0217:OTTDPO> 2.0.CO;2
- 祁莉,泮琬楠. 2021. 东亚气温前冬与后冬反相的变化特征及可能影响因子[J].大气科学, 45(5):1039-1056. QI Li, PAN Wannan. 2021. Variability of the Phase Reversal of the East Asia Temperature from Early to Late Winter and the Possible Influencing Factors [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(5):1039-1056. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.20181
- 申红艳,温婷婷,封国林,等. 2021. 中国冬季气温季节内变率特征及环流分析[J].气象, 47(3) :327-336. SHEN Hongyan, WEN Tingting, FENG Guolin, et al. 2021. Characteristics and Circulation Analysis of Intraseasonal Variability of Winter Temperature in China[J]. Meteor Mon (in Chinese), 47(3):327-336.

doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2021.03.006

Wallace J M, Thompson D W J. 2002. Annular modes and climate prediction[J]. *Physics Today*, 55(2): 28-33.
doi:10.1063/1.1461325

Wallace J M, Zhang Y, Bajuk L. 1996. Interpretation of interdecadal trends in Northern Hemisphere surface air temperature [J]. *J. Climate*, 9(2): 249-259. doi:10.1175/1520-0442(1996)0092.0. CO;2

Wang B Y, Wu Z, Chang C-P, et al. 2010b. Another look at interannual-to-interdecadal variations of the East Asian winter monsoon: the northern and southern temperature modes[J]. *J. Climate*, 23(6):1495-1512.
doi:10.1175/2009JCLI32

汪宁,许遐祯,王莹,等. 2017. 东亚高空急流协同变化对冬季欧亚遥相关型气候效应的影响[J]. *大气科学*, 41(3):461-474. Ning WANG, Xiazhen XU, Ying WANG, et al. 2017. The Influence of Upper Level Jet Streams in East Asia on Climatic Effects of Eurasian Teleconnection Pattern in the Winter[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 41(3): 461-474. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1610.15321

Wang N, Zhang Y C. 2015. Evolution of Eurasian teleconnection pattern and its relationship to climate anomalies in China[J]. *Climate dynamics*, 44:1017-1028. doi:10.1007/s00382-014-2171-z

韦玮,王林,陈权亮,等. 2014. 我国前冬和后冬气温年际变化的特征与联系[J]. *大气科学*, 38(03):524-536. WEI Wei, WANG Lin, CHEN Quanliang, et al. 2014. Interannual Variations of Early and Late Winter Temperatures in China and Their Linkage[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 38(3): 524-536. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13320

韦玮,王林,陈权亮,等. 2020. 我国前冬和后冬的划分及其气温的年际变异[J]. *大气科学*, 44(1):122-137. WEI Wei, WANG Lin, CHEN Quanliang, et al. 2020. Definition of Early and Late Winter and Associated Interannual Variations of Surface Air Temperature in China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 44(1):122-137. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1904.18238

武炳义. 2018. 北极海冰融化影响东亚冬季天气和气候的研究进展以及学术争论焦点问题 [J]. *大气科学*, 42(4): 786-805. Bingyi WU. 2018. Progresses in the Impact Study of Arctic Sea Ice Loss on Wintertime Weather and Climate Variability over East Asia and Key Academic Disputes[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 42(4): 786-805. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1804.17262

吴嘉蕙,任荣彩. 2021. 冬季全国性持续低温事件过程中的平流层—对流层相互作用[J]. *大气科学*, 45(3):558-572. WU Jiahui, REN Rongcai. 2021. Stratosphere-Troposphere Interactions during Nationwide Extensive and Persistent Extreme Cold Events in Boreal Winter [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 45(3): 558-572 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.20125

肖晓, 陈文, 范广洲, 等. 2016. 20 世纪 90 年代末东亚冬季风年代际变化的外强迫因子分析[J]. *气候与环境研究*, 21(2):197-209. XIAO Xiao, CHEN Wen, FAN Guangzhou, et al. 2016. Possible External Forcing Factors for the Interdecadal Change in the East Asian Winter Monsoon around the Late 1990s[J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 21(2): 197-209. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15169

晏红明, 王灵, 金燕, 等. 2023. 云南冬季气温变化的主要模态及其影响的关键环流因子[J]. *高原气象*, 42(2): 386-402. Hongming YAN, Ling WANG, Yan JIN ,et al. 2023. Dominant Patterns of Winter Temperature

- Variation in Yunnan and Key Circulation Factors Affecting on Them[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 42(2): 386-402. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2021.00070
- Yang S, Li T. 2017. The role of intraseasonal variability at midhigh latitudes in regulating Pacific blockings during boreal winter[J]. International Journal of Climatology, 37(S1). doi:10.1002 /joc.5080
- Yu M, Ma S, Zhu C. 2022. The Alternating Change of Cold and Warm Extremes Over North Asia During Winter 2020/21: Effect of the Annual Cycle Anomaly[J]. Geophysical Research Letters, 49(2). doi:10.1029/2021GL097233
- Zhang Y, Sperber K. R., Boyle J. S. 1997. Climatology and Interannual Variation of the East Asian Winter Monsoon: Results from the 1979-95 NCEP/NCAR Reanalysis[J]. Monthly Weather Review, 125(10):2605-2619. doi:10.1175/1520-0493(1997)125<2605:CAIVOT>2.0.CO;2
- Zhang Y, Yin Z, Wang H, et al. 2021. 2020/21 record-breaking cold waves in east of China enhanced by the 'Warm Arctic-Cold Siberia' pattern[J]. Environ. Res. Lett. 16 094040. doi: 10.1088/ 1748-9326/ac1f46
- Zhong W, Wu Z. 2022. Subseasonal variations of Eurasian wintertime surface air temperature: two distinct leading modes[J]. Climate Dynamics, 59(1):85-108. doi:10.1007/s00382-021-06118-8
- 宗海锋,张庆云,布和朝鲁,等. 2008. 黑潮和北大西洋海温异常在 2008 年 1 月我国南方雪灾中的可能作用的数值模拟[J].气候与环境研究, 13(4): 491-499. ZONG Hai-Feng, ZHANG Qing-Yun, Bueh ChoLaw, et al. 2008. Numerical Simulation of Possible Impacts of Kuroshio and North Atlantic Sea Surface Temperature Anomalies on the South China Snow Disaster in January 2008[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13(4): 491-499. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2008.04.133878/j.issn.1006-9585.2008.04.13