

投稿信

尊敬的编辑：

您好！

非常感谢您能在百忙之中审阅我的信件。现向贵刊提交论文《冬季亚洲中纬度极端低温事件与巴伦支-喀拉海异常增暖的关系及联系机制》的终审修改稿，希望该论文能在贵刊发表。

论文创新点和意义主要如下：

（1）在全球变暖大背景下，20 世纪 90 年代末以来中纬度大陆冬季气温呈现下降趋势，而北极近地表气温上升几乎是近几十年全球增暖的两倍。本文进一步明确了亚洲中纬度极端低温事件发生频次与巴伦支-喀拉海异常增暖的关系，通过对温度进行时间尺度分解后的概率密度分析，发现其季节循环尤其对中纬度前冬的偏冷与巴伦支-喀拉海异常增暖的关联。

（2）尽管大量研究阐述巴伦支-喀拉海异常增暖与欧亚大陆中纬度天气、气候之间的联系，但其机制还存在相当大的不确定性。已有研究表明，西伯利亚高压增强有利于亚洲中纬度极端低温频发，乌拉尔阻塞增强有利于西伯利亚高压增强，而巴伦支-喀拉海异常增暖通常伴随乌拉尔阻塞正异常。本文分析并揭示了西伯利亚异常冷高压对巴伦支-喀拉海异常增暖的响应机制。

（3）在确定巴伦支-喀拉海异常增暖造成的环流异常配置后，通过热力学方程诊断确定亚洲中纬度温度平流、垂直运动和非绝热加热对局地温度变化的贡献。研究结果可以为亚洲中纬度冬季极端低温事件对巴伦支-喀拉海异常增暖的响应机制提供进一步的科学依据。

期待您的反馈。

此致

敬礼！

陈海山

2020 年 11 月

冬季亚洲中纬度极端低温事件与巴伦支-喀拉海异常增暖的关系及联系机制

李言蹊^{1,2} 陈海山^{1,2}

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

2 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

摘要 利用 1979-2019 年 NCEP-DOE 再分析资料, 分析了亚洲中纬度冬季极端低温事件发生频次与巴伦支-喀拉海异常增暖的联系及可能机制。研究表明: 巴伦支-喀拉海异常增暖通常对应西伯利亚高压异常增强及亚洲中纬度极端低温频发。进一步分析发现, 伴随巴伦支-喀拉海异常增暖, 新地岛、乌拉尔山附近出现位势高度正异常, 在位势高度正异常的东侧、南侧对应显著的冷平流及下沉运动异常, 并在近地面出现异常辐散气流, 使得西伯利亚高压增强且向东南延伸。热力学方程诊断的结果表明: 西伯利亚高压异常南侧东北风导致的异常冷平流、偏东风异常经过地形造成的异常上升运动以及辐射、感热、潜热交换造成的异常非绝热冷却导致亚洲中纬度近地面温度季节循环振幅增大, 有利于极端低温频发。

关键词 巴伦支-喀拉海异常增暖 极端低温 西伯利亚高压 热力学方程诊断

The Relationship and Mechanism between Winter Extremely Low Temperature Events in Mid-latitude Asia and Abnormal Warming over Barents and Kara Seas

LI Yanxi^{1,2}, CHEN Haishan^{1,2}

1 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract Based on the NCEP-DOE reanalysis data during 1979-2019, this paper investigated the relationship and mechanism between frequency of winter extremely low temperature events in mid-latitude Asia and abnormal warming over Barents and Kara Seas. The results show that the abnormal warming over Barents and Kara Seas usually corresponds to the enhancement of Siberian high and the frequent occurrence of extreme low temperature in mid-latitude Asia. It is found that positive geopotential height anomaly appears over Novaya Zemlya and Urals with the abnormal warming over the Barents and Kara Seas. Significant cold advection and sinking motion anomalies appears on the east and south sides of the positive geopotential height anomaly and abnormal divergent flow appears near the ground, which makes Siberian high strengthen and extend to Southeast. The diagnosis of thermodynamic equation further indicates that cold advection anomaly caused by northeast

作者简介 李言蹊, 女, 1996 年出生, 硕士研究生, 主要从事短期气候预测研究。E-mail: 20181201036@nuist.edu.cn

通讯作者 陈海山, E-mail: haishan@nuist.edu.cn

资助项目 国家重点研发计划重点专项资助项目 2016YFA0600702

Funded by the National Key Research and Development Program of China (2016YFA0600702)

wind on the south side of the Siberian high pressure anomaly, ascending motion anomaly caused by Easterly wind anomalies passing the terrain and abnormal diabatic cooling caused by radiation, sensible heat, and latent heat result in an increase in the amplitude of the near-surface temperature's seasonal cycle in mid-latitude Asia, which conducive to frequent occurrence of extreme low temperature.

Keywords the warming over the Barents and Kara Seas, extremely low temperature, Siberian high, diagnosis of thermodynamic equations.

1 引言

北极近地表气温的上升几乎是近几十年全球增暖的两倍，这一现象被称为“北极放大”。大量研究认为极地外热量、水汽向极输送 (Cai 2005, 2006; Graversen, 2006; Lu and Cai, 2010; Lee, 2014; Ding et al., 2014; Krishnamurti et al., 2015; Li et al., 2019) 和北极海、冰、气相互作用的正反馈 (Screen and Simmonds, 2010; Serreze and Barry, 2011; Serreze et al., 2012) 是北极放大的可能原因。

在全球变暖大背景下，20 世纪 90 年代末以来中纬度大陆冬季气温却呈现下降趋势 (Cohen et al., 2014; Kug et al., 2015; 梁苏洁等, 2014)，欧亚大陆多次受到强寒潮的影响。伴随冷空气爆发，远东地区出现气温骤降、冰冻、雨雪 (Ding et al., 2008; Gong et al., 2014; Ma et al., 2018; 卫捷等, 2008; 武炳义, 2019)。例如，2016 年 1 月下旬，东亚经历了一次严重的极端低温事件。这股寒潮横扫中国东部甚至泰国南部，导致东亚地区地表气温极低，在越南北部造成冬季降雪。已有学者对于亚洲中纬度寒潮及极端低温进行了大量研究 (Ding, 1990; Takaya and Nakamura, 2005; 张宗婕和钱维宏, 2012)。研究认为乌拉尔山附近的高压脊发展是寒潮中短期过程的关键系统，乌拉尔阻塞相增强能够加强地面冷高压；而西伯利亚高压的增强及其向东亚移动是产生和维持寒潮的重要因素 (Takaya and Nakamura, 2005; Park et al., 2013; Shi et al., 2018; 王遵娅和丁一汇, 2006; 谭本旭等, 2014; 李亚飞和任荣彩, 2019)。

伴随北极异常增暖，中纬度的天气系统也发生了深刻变化。许多学者指出，北极增温快于中纬度地区，使得副极地西风减弱，环流经向性增大 (Francis and Vavrus, 2012)，罗斯贝波传播速度变慢 (Screen and Simmonds, 2014)，造成了部分地区更频繁的阻塞事件和极端天气事件 (Liu et al., 2012; Luo et al., 2016; Yao et al., 2017; Ma et al., 2018; Feng and Wu, 2015; 李牧原和罗德海, 2019)。Kug et al. (2015) 基于 CMIP5 模式结果和观测数据，发现巴伦支-喀拉海异常增暖明显超前于东亚降温；巴伦支-喀拉海异常增暖，通常伴随其上空反气旋异常和其下游中纬度槽的加深，在这种环流背景下，乌拉尔阻塞的持续时间变长 (Yao et al., 2017)，进而在中纬度地区产生持续性冷却，为东亚严冬提供了有利条件。Nakamura et al. (2015) 研究表明 11 月海冰减少会使向上的辐射、感热和潜热增加，激发罗斯贝波在极地向上和自极地向中纬度的传播；东亚气旋性异常被认为是对巴伦支海海冰减少引起的稳定罗斯贝波的响应，Honda et al. (2009) 和武炳义 (1999) 的研究也给出了较为一致的结论。

尽管大量研究阐述北极与中纬度之间的联系，但其机制还存在相当大的不确定性（Barnes and Screen, 2015; Mccusker et al., 2016; Sun et al., 2016），这可能是低信噪比及缺乏完备的动力理解等原因造成的（Cohen et al., 2014; Overland et al., 2016; Gu et al., 2018）。已有研究表明，西伯利亚高压增强有利于极端低温频发（Gong and Ho, 2002; Liu and Zhu, 2019），乌拉尔阻塞增强有利于西伯利亚高压增强（Takaya and Nakamura, 2005），而巴伦支-喀拉海异常增暖通常伴随乌拉尔阻塞正异常（Kug et al., 2015; Luo et al., 2016）。本文拟通过统计和诊断，深入讨论巴伦支-喀拉海异常增暖导致亚洲中纬度极端低温频发的动力机制，试图解决以下几个问题：（1）确定亚洲中纬度极端低温事件发生频次与巴伦支-喀拉海异常增暖的关系，通过对温度进行时间尺度分解后的概率密度分析，发现其季节循环尤其对中纬度前冬的偏冷与巴伦支-喀拉海异常增暖的关联；（2）揭示西伯利亚异常冷高压对巴伦支-喀拉海异常增暖的响应机制；（3）进一步通过对热力学方程的诊断，评估水平温度平流、垂直运动、非绝热加热异常对亚洲中纬度近地面局地温度变化增强的贡献，阐述了在巴伦支-喀拉海异常暖年前冬异常偏冷对应的动力学过程。

2 资料和方法

本文所用资料为 NCEP-DOE 的高斯格点日最高、日平均、日最低 2m 气温再分析资料；月平均、日平均的风场、位势高度场的再分析资料，空间分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。为了区分温度季节内扰动和季节循环成分，我们对日平均 2m 气温资料用 Lanczos 滤波方法进行时间尺度 90 天以下的和 90 天以上的 Laconz 滤波（Duchon, 1979）。

此外，本文参照世界气象组织（WMO）世界气候研究计划（WCRP）的气候变率和预测研究项目（CLIVAR）中气候变化检测、监测和指数专家组（ETCCDMI）推荐的极端天气气候事件监测指标（表 1）。

表 1 极端温度指数定义

Table 1 Definition of extreme temperature indices

中文名称	英文缩写	指数定义	单位
冷夜日数	TN10P	日最低气温小于其参考期同日最低温度第 10 个百分位日数	日
冷昼日数	TX10P	日最高气温小于其参考期同日最高温度第 10 个百分位日数	日
冷日日数	Tave10P	日平均气温小于其参考期同日平均温度第 10 个百分位日数	日

为了诊断大气环流异常对巴伦支-喀拉海异常增暖的响应，量化波动能量的传播，

本文利用 Takaya 和 Nakamura (2001) 定义的波活动通量。波活动通量的方向为群速度传播方向，其辐散、辐合能够表征波包的源、汇。在 β 平面、 p 坐标系中，波活动通量为：

$$W = \frac{1}{2|\mathbf{U}|} \begin{pmatrix} U(\psi'^2_x - \psi'\psi'_{xx}) + V(\psi'_x\psi'_y - \psi'\psi'_{xy}) \\ U(\psi'_x\psi'_y - \psi'\psi'_{xy}) + V(\psi'^2_y - \psi'\psi'_{yy}) \\ \frac{f_0^2}{S^2}[U(\psi'_x\psi'_p - \psi'\psi'_{xp}) + V(\psi'_y\psi'_p - \psi'\psi'_{yp})] \end{pmatrix} + C_U M \quad (1)$$

其中， ψ' 为扰动地转流函数，即为当年冬季平均与气候态平均地转流函数之差； U 、 v 为背景场的纬向风、经向风； $|\mathbf{U}|$ 为气候态风场的数值大小， S^2 为静力稳定度参数， $C_U M$ 表示扩展波活动的位相传播，对于冬季平均可以忽略。

为了诊断温度平流、垂直运动、非绝热加热对于局地温度变化的贡献，讨论巴伦支-喀拉海异常增暖背景下，亚洲中纬度冬季极端低温频发的原因，本文采用 p 坐标系中的热力学方程：

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -u \frac{\partial T}{\partial x} - v \frac{\partial T}{\partial y} + S_p \omega - \frac{J}{C_p} \quad (2)$$

对 (2) 进行时间积分得：

$$\int \frac{\partial T}{\partial t} dt = - \int \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) dt + \int S_p \omega dt - \int \frac{J}{C_p} dt \quad (3)$$

其中， $S_p = \frac{RT}{C_p p} - \frac{\partial T}{\partial p} = -\frac{T}{\theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial p}$ ，只要实际递减率小于干绝热递减率， S_p 为正。 J 是辐射、感热、潜热对单位质量流体的加热率。非绝热加热项的计算为热力学方程中局地温度变化与温度平流项、垂直输送项之差。

3 冬季巴伦支-喀拉海异常增暖与亚洲中纬度极端低温的关系

已有研究表明，巴伦支-喀拉海附近的异常增暖会使得大气环流形势变化导致亚洲中纬度降温 (Kug et al., 2015; Luo et al., 2016; Yao et al., 2017; Ma et al., 2018)。根据 Kug (2015)，定义巴伦支-喀拉海 (30°E – 70°E , 70°N – 80°N) 区域平均并作标准化处理后的 2m 气温为 ARTI。为了验证中纬度欧亚大陆极端低温频发与巴伦支-喀拉海异常增暖的联系，对亚洲中纬度的冷昼、冷日、冷夜日数和去趋势前、后的 ARTI 进行分析 (图 1)，结果表明，虽然各相关系数数值上存在差异，但在亚洲中纬度的冷昼、冷日、冷夜日数基本与去趋势前、后 ARTI 呈现明显的正相关。即巴伦支-喀拉海异常增暖通常对应亚洲中纬度极端低温频发。

154 北极放大这一现象出现于近几十年，且 21 世纪以来增暖最为明显。北极放大虽与
156 自然变率如 ENSO (Li et al., 2019)、PDO (Trenberth et al., 2014) 存在联系，存在一
158 定的年际变化和年代际变化，但本文更多强调其出现的非线性、不可逆的趋势对亚洲中
160 纬度冬季气候影响。故选取 1981/1982、1985/1986、1986/1987、1988/1989、1993/1994、
1996/1997、1997/1998、2003/2004 年为 ARTI 负异常年 ($ARTI < -1$)，即巴伦支-喀拉海
162 冷异常年，2004/2005、2005/2006、2007/2008、2011/2012、2012/2013、2015/2016、
2016/2017、2017/2018 年为 ARTI 正异常年 ($ARTI > 1$)，即巴伦支-喀拉海暖异常年。

160 为了诊断亚洲中纬度局地 2m 气温的变化，给出巴伦支-喀拉海冷、暖异常年份亚洲
162 中纬度区域平均的 2m 日平均气温冬季的变化曲线 (图 2)。不难发现，巴伦支-喀拉海
164 暖异常年亚洲中纬度前冬局地温度变化明显大于巴伦支-喀拉海冷异常年亚洲中纬度前
166 冬局地温度变化，为极端低温的频发提供有利条件。

164 亚洲中纬度冬季温度的变化可视为季节内扰动叠加在季节循环之上。将时间尺度小
166 于 90 天的部分视为季节内扰动，将时间尺度大于 90 天的部分视为季节循环。在巴伦支
168 -喀拉海暖异常年季节循环的振幅明显大于气候态 (图 2)。将亚洲中纬度冬季日平均温
170 度距平 (图 3a) 及其季节循环 (图 3b) 和季节内扰动 (图 3c) 进行概率密度分析，在
172 巴伦支-喀拉海暖异常年出现冷日的概率是近 40 年出现冷日的概率的 1.90 倍，而季节循
174 环温度扰动出现小于 1979/1980-2018/2019 年冬季季节循环温度扰动达到升序第 10 个百
分位日数的概率是近 40 年的 2.61 倍，季节内温度扰动出现小于 1979/1980-2018/2019 年
冬季季节内温度扰动达到升序第 10 个百分位日数的概率是近 40 年的 0.90 倍。即在巴伦
支-喀拉海暖异常年季节内温度扰动叠加与更大振幅的季节循环之上，更加有利于极端
低温的发生。

4 冬季巴伦支-喀拉海异常增暖导致东亚极端低温频发的可能机制

176 为了分析环流异常和巴伦支-喀拉海异常增暖的联系，挑选出 ARTI 正异常年与 ARTI
178 负异常年进行合成。从合成的环流不难发现，巴伦支-喀拉海增暖对应着高层波活动通
180 量辐散，能够激发一准定常罗斯贝波向东南方向传播 (图 4a)，在新地岛以西存在一位
182 势高度正异常，且在 300hPa 附近异常达到最大，这种位势高度正异常为一深厚的暖高
184 压异常，除了极地近地面地区有浅薄热低压异常，几乎从地面一直延伸到对流层顶；贝
加尔湖西南部调整出位势高度负异常，且在 300hPa 附近异常达到最大，这种位势高度
负异常为一深厚的冷低压异常，从对流层低层 700hPa 一直延伸到对流层顶 (图 4)。值
得注意的是，在贝加尔湖西部有显著的下沉运动异常 (图 4c)，近地面西伯利亚的东北
风异常增强了冷平流，贝加尔湖附近的低层为冷高压异常 (图 4b)。

186 为了分析巴伦支-喀拉海异常增暖导致西伯利亚高压异常的原因，图 5 进行了
500hPa 水平风场、温度平流和垂直速度以及 300hPa 和近地面辐散风的合成。不难发现，
当巴伦支-喀拉海异常暖时，近地面出现显著的异常风场辐合 (图 5a)，伴随上升运动，

188 对流层顶出现显著的异常风场辐散（图 5b），在地转偏向力作用下，在西伯利亚上空出现显著的异常偏北气流（Xu et al., 2019）。这种偏北风异常有利于冷平流的增强（图 5c）。
190 根据干空气状态方程可得，在等压面上大气温度的降低对应着密度的增加，同等体积的气体质量增大。由于对流层中高层大气质量增加，单位截面积气柱质心偏高，进而增强
192 下沉运动调整气柱质心（图 5d）。这种下沉运动的异常的有利于中西伯利亚高原、西西伯利亚平原的对流层底气压升高（武炳义等，2011；Ding, 1990），进而产生向东、向南的异常辐散风（图 5a），使得异常高压向东向南延伸，即在整个中高纬欧亚大陆对流层低层为一高压异常（图 4b）。

196 由于亚洲中纬度前冬局地温度的变化在 ARTI 正异常年明显大于 ARTI 负异常年，而前冬更大的局地温度变化有利于极端低温的频发，又因逐日 40 年气候态的亚洲中纬度区域平均 2m 气温在 1 月 23 日达到最小（图 2），利用热力学方程，从 12 月 1 日积分至次年 1 月 23 日，积分的计算过程为逐日各项乘以 86400 秒再求和，比较巴伦支-喀拉海冷、暖异常年水平温度平流、垂直运动、非绝热加热对局地温度变化贡献的差异。巴伦支-喀拉海暖异常时，亚洲中纬度近地面前冬局地温度变化增加，但其原因不尽相同。
202 从 850hPa 水平风场（图 6b）和对流层中低层垂直运动（图 7c）异常来看，图兰低地 and 我国东北南部、朝鲜、韩国存在显著的偏北风异常进而导致更强的冷平流和下沉运动；
204 而受地形作用，我国长江流域以北、蒙古东部异常偏东气流在垂直方向上主要表现为异常上升运动；准格尔盆地、塔里木盆地主要表现为异常下沉运动。图兰低地的近地面下沉异常造成的绝热增温异常（图 7c）和非绝热加热异常（图 7d）不足以弥补冷平流异常（图 6b、7b）对局地大气的冷却作用，使得该地区近地面局地温度变化增大（图 7a）。
206 而中国新疆、蒙古西部主要依靠非绝热冷却异常（图 7d）。蒙古中部、我国内蒙古、甘肃、宁夏的主要依靠冷平流异常（图 6b、7b）和异常的绝热上升冷却（图 6c、7c）。蒙古东部、华北、绝热下沉冷却主要依靠异常的绝热上升冷却（图 6c、7c）。我国东北、朝鲜、韩国主要依靠异常的冷平流（图 7b）。

212 为了比较对流层低层巴伦支-喀拉海冷、暖异常年水平温度平流、垂直运动、非绝热加热对亚洲中纬度局地温度变化作用的差异，将 850hPa 前冬 54 天温度局地变化、水平温度平流、垂直输送项、非绝热加热项积分合成差值取亚洲中纬度进行区域平均。总体来看，水平温度平流与垂直运动项对对流层低层局地温度变化呈正贡献，而非绝热加热部分抵消了水平温度平流与垂直运动的贡献（图 8）。

218 在亚洲中纬度地区，总体来看，巴伦支-喀拉海暖异常年相较于冷异常年，非绝热加热不能完全抵消水平温度平流和垂直运动对大气的冷却作用，使得前冬局地温度变化增大（图 8）。在亚洲中纬度的不同地区，西伯利亚高压异常南侧东北风导致的异常冷平流、偏东风异常经过地形造成的异常上升运动以及辐射、感热、潜热交换造成的异常非绝热冷却（图 6、7）导致亚洲中纬度近地面温度季节循环振幅增大（图 2、3b），有利于极端低温频发。

5 结论与讨论

本文应用 NCEP-DOE 再分析资料,运用合成、诊断分析等方法,揭示巴伦支-喀拉海异常增暖导致亚洲中纬度极端低温频发的可能机制。研究表明:

(1) 巴伦支-喀拉海异常增暖通常对应亚洲中纬度极端低温频发。通过对温度进行时间尺度分解后的概率密度分析,发现了中纬度季节循环巴伦支-喀拉海暖异常年对应着亚洲中纬度冬季更大振幅的季节循环,进而有利于亚洲中纬度极端低温发生;

(2) 冬季巴伦支-喀拉海异常增暖伴随西伯利亚高压异常增强,可能的影响途径为:当巴伦支-喀拉海异常暖时,近地面出现显著的异常风场辐合,伴随上升运动,对流层顶出现显著的异常风场辐散,在地转偏向力作用下,在西伯利亚上空出现显著的异常偏北气流。这种偏北风异常有利于冷平流的增强,进而增强下沉运动。这种下沉运动的异常的有利于中西伯利亚高原、西西伯利亚平原的对流层底气压升高,进而产生向东、向南的异常辐散风,使得异常高压向东向南延伸,即在整个中高纬欧亚大陆对流层低层为一高压异常;

(3) 在这种异常环流配置下,进一步运用热力学方程进行诊断,诊断结果表明:巴伦支-喀拉海暖异常年,冷平流异常、稳定层结大气中异常上升运动及异常的非绝热冷却为亚洲中纬度近地面前冬局地温度变化增大提供了有利条件。西伯利亚高压异常东侧、南侧异常的偏北气流有利于冷平流增强;气流过地形导致上升运动异常,在稳定层结中使得大气绝热冷却;再通过辐射、感热、潜热等作用在中国新疆、蒙古西部出现非绝热冷却异常。进而导致巴伦支-喀拉海暖异常年季节循环振幅增大,有利于极端低温频发。

目前,我们很难确认巴伦支-喀拉海异常增暖与新地岛以西的位势高度正异常之间的因果关系,科学界也并未得到一致结论(Luo et al., 2016; Overland et al., 2016; Mccusker et al., 2016; Sun et al., 2016; 武炳义, 2018)。北极放大从 20 世纪 90 年代后才开始变得明显,其特征及成因还有待进一步研究;前人研究表明,北极放大是自然变率和人类活动的共同结果,因此预测未来北极放大的变化趋势仍具有挑战性(Screen and Simmonds, 2010; Lee, 2014; Overland et al., 2016)。更有研究表明,亚洲中纬度极端低温事件所对应的环流异常不仅与北极异常增暖有关,与前期热带太平洋海温异常关系更为密切(Wu, 2017),因此,从气候态角度看,亚洲中纬度冬季极端低温事件为对巴伦支-喀拉海异常增暖的响应亦或是亚洲中纬度冬季极端低温事件和巴伦支-喀拉海异常增暖均为对太平洋海温异常的响应,还有待进一步讨论。此外,北极海冰、热带海温和欧亚积雪等下垫面异常为亚洲中纬度冬季极端低温事件提供了可能的季节预测信号(Nakamura et al., 2015; Wang et al., 2000; Peings et al., 2013),探讨这些因素无疑是下一阶段重点关注的内容。

参考文献 (References)

- Barnes E A, Screen J A. 2015. The impact of Arctic warming on the midlatitude jet-stream: Can it? has it? will it? [J]. *WIREs Climate Change*, 6 (3): 277-286, doi:10.1002/wcc.337.
- Cai M. 2005. Dynamical amplification of polar warming [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32 (22): L22710, doi:10.1029/2005GL024481.
- Cai M. 2006. Dynamical greenhouse-plus feedback and polar warming amplification. Part I: A dry radiative-transportive climate model [J]. *Climate Dyn.*, 26 (7-8): 661-675, doi:10.1007/s00382-005-0104-6.
- Cohen J, Screen J A, Furtado J C, et al. 2014. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather [J]. *Nature Geosci.*, 7 (9): 627-637, doi:10.1038/ngeo2234.
- Ding Y. 1990. Build-up, air mass transformation and propagation of Siberian high and its relations to cold surge in east Asia [J]. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 44 (1-4): 281-292, doi:10.1007/BF01026822.
- Ding Y, Wang Z, Song Y, et al. 2008. The unprecedented freezing disaster in January 2008 in southern China and its possible association with the global warming [J]. *Acta Meteor. Sin.*, 22 (4): 538-558.
- Ding Q, Wallace J M, Battisti D S, et al. 2014. Tropical forcing of the recent rapid Arctic warming in northeastern Canada and Greenland [J]. *Nature*, 509 (7499): 209-212, doi:10.1038/nature13260.
- Duchon C E. 1979. Lanczos filtering in one and two dimensions [J]. *J. Appl. Meteor.*, 18 (8): 1016-1022. doi:10.1175/1520-0450(1979)018<1016:LFIOAT>2.0.CO;2.
- Francis J A, Vavrus S J. 2012. Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 39 (6): L06801, doi:10.1029/2012GL051000.
- Feng C, Wu B. 2015. Enhancement of Winter Arctic Warming by the Siberian High over the Past Decade [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 8 (5): 257-263, doi:10.3878/AOSL20150022.
- Gong D, Ho C. 2002. The Siberian High and climate change over middle to high latitude Asia [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 72(1-2): 1-9, doi:10.1007/s007040200008.
- Gong Z, Feng G, Ren F, et al. 2014. A regional extreme low temperature event and its main atmospheric contributing factors [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 117 (1-2): 195-206, doi:10.1007/s00704-013-0997-7.
- Graversen R G. 2006. Do Changes in the Midlatitude Circulation Have Any Impact on the Arctic Surface Air Temperature Trend? [J]. *J. Climate*, 19 (20): 5422-5438, doi:10.1175/jcli3906.1.
- Gu S, Zhang Y, Wu Q, et al. 2018. The linkage between arctic sea ice and midlatitude weather: In the perspective of energy [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 123 (11): 536-550, doi:10.1029/2018JD028743.
- 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.
- Krishnamurti T N, Krishnamurti R, Das S, et al. 2015. A Pathway Connecting the Monsoonal Heating to the Rapid Arctic Ice Melt* [J]. *J. Atmos. Sci.*, 72 (1): 5-34, doi:10.1175/JAS-D-14-0004.1.
- Kug J, Jeong J, Jang Y, et al. 2015. Two distinct influences of Arctic warming on cold winters over North America and East Asia [J]. *Nature Geosci.*, 8 (10): 759-762, doi:10.1038/ngeo2517.

294 Lee S. 2014. A Theory for Polar Amplification from a General Circulation Perspective [J]. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 50 (1): 31-43, doi:10.1007/s13143-014-0024-7.

296 李牧原, 罗德海. 2019. 冬季北极增暖与中纬度环流和极寒天气之间的联系: 经向位涡梯度的关键作用 [J]. *中国科学: 地球科学*, 49 (9): 1335-1345. Li Muyuan, Luo Dehai. 2019. Winter Arctic warming and its linkage with midlatitude atmospheric circulation and associated cold extremes: The key role of the meridional potential vorticity gradient [J]. *Science China Earth Sciences(in Chinese)*, 49 (9): 1335-1345. doi:10.1360/N072018-00309.

298

300 李亚飞, 任荣彩. 2019. 北半球冬季各阻塞系统对大范围极端温度异常的单独和协同影响 [J]. *大气科学*, 43 (6): 1313-1328. Li Yafei, Ren Rongcai. 2019. The independent and coordinative influences of the four blocking systems in the northern hemisphere winter on the occurrence of widespread extreme cold surface temperature [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 43 (6): 1313-1328. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1811.18214.

302

304 Li Z, Zhang W, Stuecker M F. 2019. Different Effects of Two ENSO Types on Arctic Surface Temperature in Boreal Winter [J]. *J. Climate*, 32 (16): 4943-4961, doi:10.1175/JCLI-D-18-0761.1.

306

308 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 (5): 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.

310

312 Liu B, Zhu C. 2020. Diverse impacts of the Siberian High on surface air temperature in Northeast China during boreal winter [J]. *Int. J. Climatol.*, 40, 594-603, doi:10.1002/joc.6199.

314

Liu J, Curry J A, Wang H, et al. 2012. Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 109 (11): 4074-4079, doi:10.1073/pnas.1114910109.

316

Lu J, Cai M. 2010. Quantifying contributions to polar warming amplification in an idealized coupled general circulation model [J]. *Climate Dyn.*, 34 (5): 669-687, doi:10.1007/s00382-009-0673-x.

318

Luo D, Xiao Y, Yao Y, et al. 2016. Impact of Ural Blocking on Winter Warm Arctic-Cold Eurasian Anomalies. Part I: Blocking-Induced Amplification [J]. *J. Climate*, 29 (11): 3925-3947, doi:10.1175/JCLI-D-15-0611.1.

320

322 Ma S, Zhu C, Liu B, 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.

324

Mccusker K E, Fyfe J C, Sigmond M. 2016. Twenty-five winters of unexpected Eurasian cooling unlikely due to Arctic sea-ice loss [J]. *Nature Geosci.*, 9 (11): 838-842, doi:10.1038/ngeo2820.

326

328 Nakamura T, Yamazaki K, Iwamoto K, et al. 2015. A negative phase shift of the winter AO/NAO due to the recent Arctic sea-ice reduction in late autumn [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120 (8): 3209-3227, doi:10.1002/2014JD022848.

Overland J E, Dethloff K, Francis J A, et al. 2016. Nonlinear response of mid-latitude weather to the changing Arctic [J]. *Nature Clim. Change*, 6 (11): 992-999, doi:10.1038/nclimate3121.

330

332 Park T W, Ho C H, Deng Y. 2014. A synoptic and dynamical characterization of wave-train and blocking cold surge over East Asia [J]. *Climate Dyn.*, 43 (3-4): 753-770, doi:10.1007/s00382-013-1817-6.

334 Peings Y, Brun E, Mauvais V, et al. 2013. How stationary is the relationship between Siberian snow and Arctic Oscillation over the 20th century? [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 40 (1): 183-188, doi:10.1029/2012GL054083

336 Screen J A, Simmonds I. 2010. The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification[J]. *Nature*, 464 (7293): 1334-1337, doi:10.1038/nature09051.

338 Screen J A, Simmonds I. 2014. Amplified mid-latitude planetary waves favour particular regional weather extremes [J]. *Nature Clim. Change*, 4 (8): 704-709, doi:10.1038/nclimate2271.

340 Serreze M C, Barry R G. 2011. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis [J]. *Global Planet. Change*, 77 (1-2): 85-96, doi:10.1016/j.gloplacha.2011.03.004.

342 Serreze M C, Barrett A P, Stroeve J. 2012. Recent changes in tropospheric water vapor over the Arctic as assessed from radiosondes and atmospheric reanalyses [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 117 (10): D10104, doi:10.1029/2011JD017421.

344 Shi N, Wang X, Tian P. 2018. Interdecadal variations in persistent anomalous cold events over Asian mid-latitudes [J]. *Climate Dyn.*, 52: 3729-3739, doi:10.1007/s00382-018-4353-6.

346 Sun L, Perlwitz J, Hoerling M. 2016. What caused the recent “Warm Arctic, Cold Continents” trend pattern in winter temperatures? [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 43 (10): 5345-5352, doi:10.1002/2016gl069024.

350 Takaya K, Nakamura H. 2001. A Formulation of a Phase-Independent Wave-Activity Flux for Stationary and Migratory Quasigeostrophic Eddies on a Zonally Varying Basic Flow [J]. *J. Atmos. Sci.*, 58 (6): 608-627, doi:10.1175/1520-0469(2001)058<0608:afopi>2.0.co;2.

352 Takaya K, Nakamura H. 2005. Mechanisms of Intraseasonal Amplification of the Cold Siberian High [J]. *J. Atmos. Sci.*, 62 (12): 4423-4440, doi:10.1175/JAS3629.1.

354 谭本馗, 陈文. 2014. 中高纬度大气遥相关动力学及其对东亚冬季气候影响的研究进展 [J]. *气象学报*, 72 (5): 908-925. Tan Benkui, Chen Wen. 2014. Progress in the study of the dynamics of extratropical atmospheric teleconnection patterns and their impacts on East Asian climate [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 72 (5): 908-925, doi:10.11676/qxxb2014.071.

356 358 Trenberth K E, Fasullo J T, Branstator G, et al. 2014. Seasonal aspects of the recent pause in surface warming [J]. *Nature Clim. Change*, 4 (10): 911-916, doi:10.1038/nclimate2341.

360 Wang B, Wu R, Fu X. 2000. Pacific-East Asian teleconnection: how does ENSO affect East Asian climate?* [J]. *J. Climate*, 13 (9): 1517-1536, doi:10.1175/1520-0442(2000)013<1517:peathd>2.0.co;2

362 王遵亲, 丁一汇. 2006. 近 53 年中国寒潮的变化特征及其可能原因 [J]. *大气科学*, 30 (6): 14-22. Wang Zunya, Ding Yihui. 2006. Climate change of the cold wave frequency of China in the last 53 years and the possible reasons [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 30 (6): 14-22. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.06.02.

364 366 卫捷, 陶诗言, 赵琳娜. 2008. 2008 年 1 月南方冰雪过程的可预报性问题分析 [J]. *气候与环境研究*, 13 (4): 520-530. Wei Jie, Tao Shiyang, Zhao Linna. 2008. Predictability of snow storm and freezing

- rain disaster in southern China in January 2008 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 2008, 13 (4): 520-530. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2008.04.16.
- 武炳义, 黄荣辉, 高登义. 1999. 冬季北极喀拉海、巴伦支海海冰面积变化对东亚冬季风的影响 [J]. 大气科学, 23 (3): 267-275. Wu Bingyi, Huang Ronghui, Gao Dengyi. 1999. The impact of variation of sea-ice extent in the Kara Sea and the Barents Seas in winter on the winter monsoon over East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23 (3): 267-275. doi:10.1088/0256-307X/15/8/013.
- 武炳义, 苏京志, 张人禾. 2011. 秋—冬季节北极海冰对冬季西伯利亚高压的影响 [J]. 科学通报, 56 (27): 2335–2343. Wu Bingyi, Su Jingzhi, Zhang Renhe. 2011. Effects of autumn–winter Arctic sea ice on winter Siberian high [J]. Chinese Sci. Bull. (in Chinese), 56 (27): 2335-2343, doi:10.1007/s11434-011-4696-4.
- 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. Wu Bingyi, 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.
- 武炳义, 2019. 2012 年 1 月、2016 年 1 月东亚两次极端严寒事件及其与北极增暖的可能联系 [J]. 大气科学学报, 42 (1): 14–27. Wu Bingyi, 2019. Two extremely cold events in East Asia in January of 2012 and 2016 and their possible associations with Arctic warming [J]. Trans Atmos Sci (in Chinese), 42 (1): 14-27, doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20180724002.
- Wu B. 2017. Winter atmospheric circulation anomaly associated with recent Arctic winter warm anomalies [J]. J. Climate, 30 (21): 8469-8479, doi: 10.1175/JCLI-D-17-0175.1.
- Xu X, He S, Gao Y, et al. 2019. Strengthened linkage between midlatitudes and Arctic in boreal winter [J]. Climate Dyn., 53 (7-8): 3971-3983, doi:10.1007/s00382-019-04764-7.
- Yao Y, Luo D, Dai A, et al. 2017. Increased Quasi Stationarity and Persistence of Winter Ural Blocking and Eurasian Extreme Cold Events in Response to Arctic Warming. Part I: Insights from Observational Analyses [J]. J. Climate, 30 (10): 3549-3568, doi:10.1175/JCLI-D-16-0261.1.
- 张宗婕, 钱维宏. 2012. 中国冬半年区域持续性低温事件的前期信号 [J]. 大气科学, 36 (6): 1269–1279. Zhang Zongjie, Qian Weihong. 2012. Precursors of regional prolonged low temperature events in China during winter half year [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (6): 1269-1279, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11227.

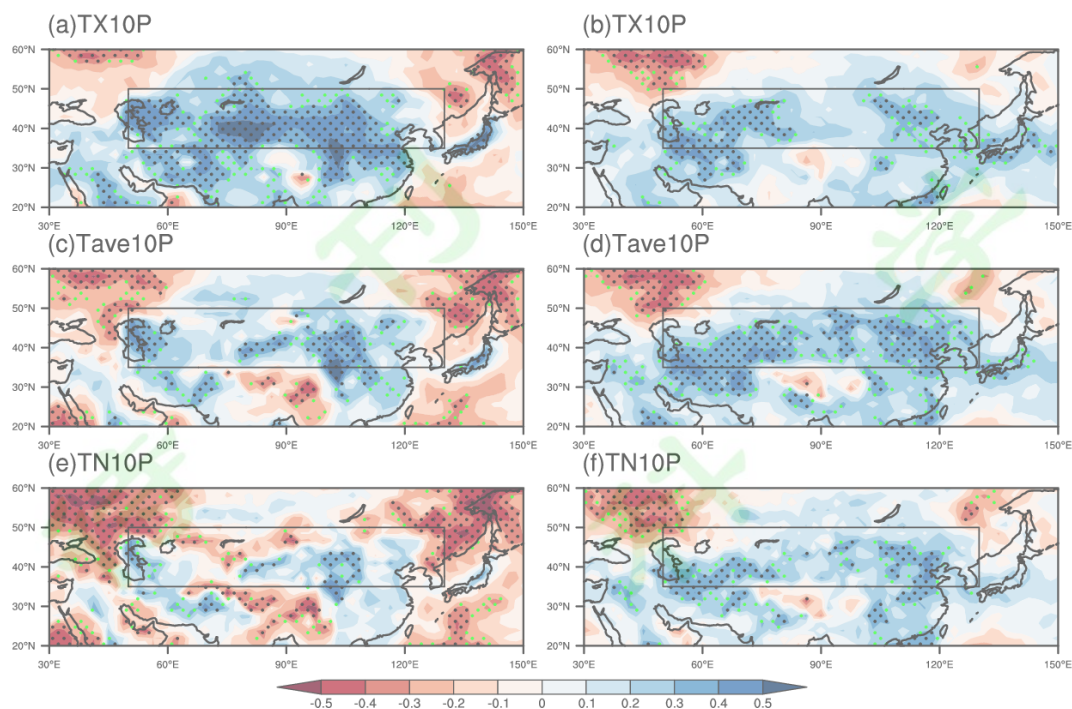


图 1 中纬度欧亚大陆冬季冷昼 (a、b)、冷日 (c、d)、冷夜 (e、f) 日数与去趋势前 (后) ARTI 相关系数空间分布; 打黑 (绿) 点区域通过 0.05 (0.1) student-t 检验的置信水平; 黑框表示亚洲中纬度 (35-50°N, 50-130°E) 区域

Fig.1 Spatial distributions of correlation coefficients between TX10P(a, b), Tave10P(c, d), TN10P(e, f) and ARTI before(after) detrend. Black(green) dots denote regions where are significant at the 0.05(0.1) confidence level by student-t test. Black box indicates region of Mid-latitude Asia

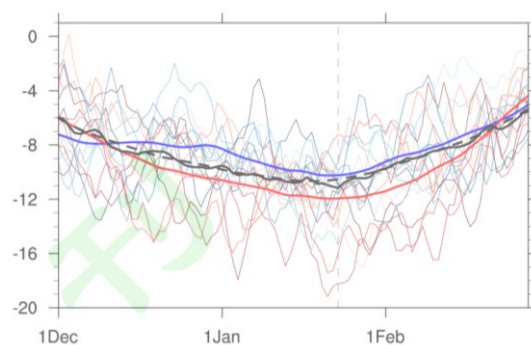


图 2 亚洲中纬度 (35-50 N, 50-130 E) 区域平均 ARTI 负异常年 (蓝色细线)、ARTI 正异常年 (红色细线)、1979/1980-2018/2019 年冬季逐日气候态 (黑色实线); 21 天滑动平均后 ARTI 负异常年 (蓝色粗线)、ARTI 正异常年 (红色粗线) 8 年逐日平均、气候态 (黑色虚线) 的 2m 气温 (K)

Fig.2 regional average temperature(K) at 2m in Mid-latitude Asia, which blue thin lines mean years of negative ARTI anomalies, red lines mean years of positive ARTI anomalies, black solid line means daily climate state in winter of 1979/1980-2018/2019, blue thick line means daily average in the years of negative ARTI anomalies after 21 day moving average, red thick line means daily average in the years of positive ARTI anomalies after 21 day moving average, black dotted line means daily climate state in winter of 1979/1980-2018/2019 after 21 day moving average

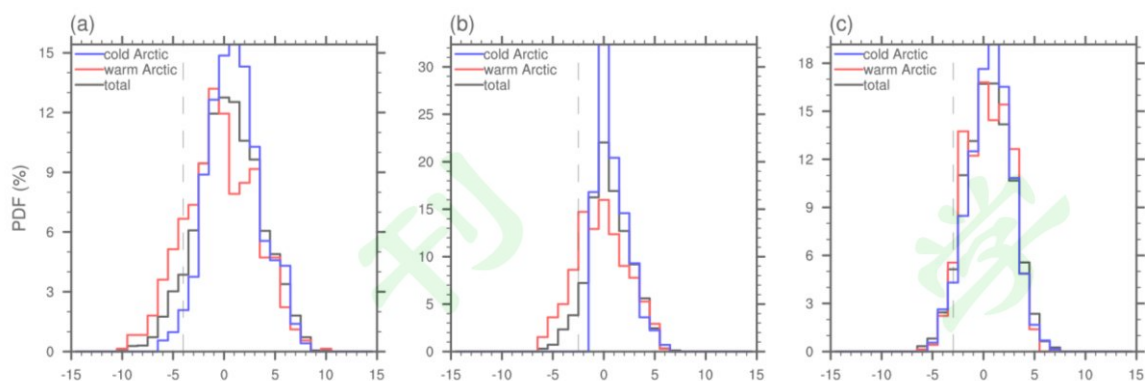


图 3 1979/1980-2018/2019 年冬季总体（黑线）、ARTI 负异常年（蓝线）和 ARTI 正异常年（红线）的亚洲中纬度（35-50°N，50-130°E）区域平均 2m (a)日平均气温、(b)时间尺度大于 90 天温度扰动、(c) 时间尺度小于 90 天温度扰动距平（K）的概率密度分布

Fig.3 Probability density distribution of regional average in (a)daily average temperature, (b)time scale greater than 90 days temperature disturbance, (c)time scale less than 90 days temperature disturbance anomalies(K) at 2m in Mid-latitude Asia(35-50°N, 50-130°E), which black lines mean winter of 1979/1980-2018/2019, blue lines mean years of negative ARTI anomalies and red lines mean years of positive ARTI anomalies

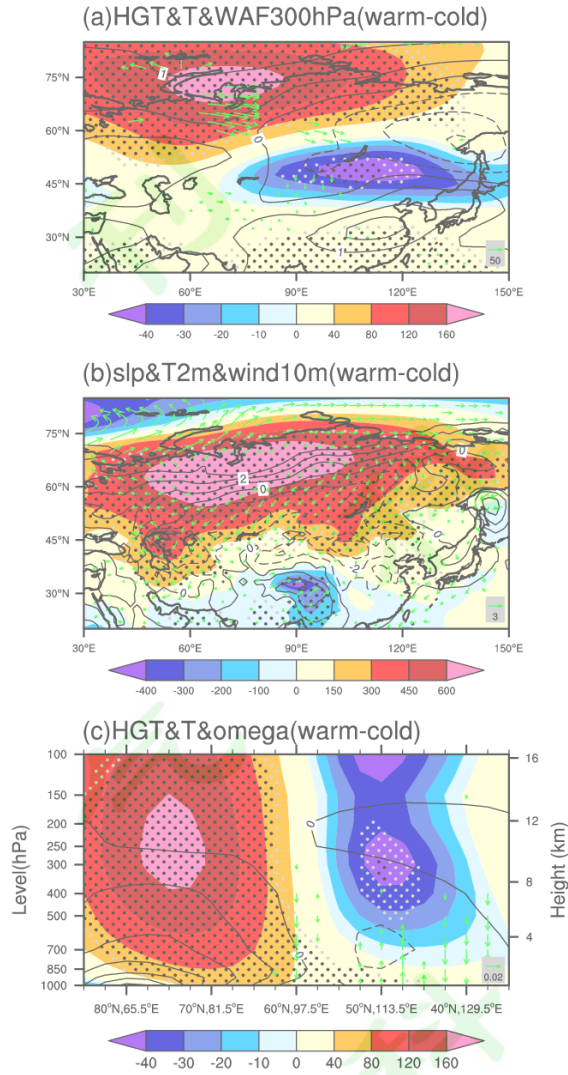


图4 ARTI 正异常年与 ARTI 负异常年 (a) 300hPa 温度 (K, 等值线, 范围为-1.5-1.5, 间隔为 0.5)、位势高度 (gmp, 填色)、波活动通量 (m^2/s^2 , 矢量), (b) 2m 温度 (K, 等值线, 范围为-2-6, 间隔为 1)、海平面气压 (hPa, 填色)、10m 风场 (m/s, 矢量), (c) 85°N, 57.5°E-35°N, 137.5°E 温度 (K, 等值线, 范围为-2-12, 间隔为 2)、位势高度 (gmp, 填色)、垂直速度 (m/s, 矢量) 合成差值; 打黑 (灰) 点区域通过 0.05 (0.1) 的 t 检验的置信水平; 波活动通量、10m 风场、垂直速度只给出通过 0.1t 检验置信水平的矢量

Fig.4 Composite differences (ARTI positive years minus ARTI negative years) in the (a) temperature (K, contour from -1.5 to 1.5 by 0.5), geopotential height (gmp, shading), wave activity flux (m^2/s^2 , vector) at 300hPa, (b) temperature at 2m (K, contour from -2 to 6 by 1), sea level pressure (hPa, shading), wind at 10m (m/s, vector), (c) temperature from 85°N, 57.5°E to 35°N, 137.5°E (K, contour from -2 to 12 by 2), geopotential height (gmp, shading), vertical velocity (m/s, vector). Black (gray) dots denote regions where are significant at the 0.05 (0.1) confidence level by t test. Wave activity flux, wind at 10m and vertical velocity are only shown significant at the 0.1 confidence level by t test

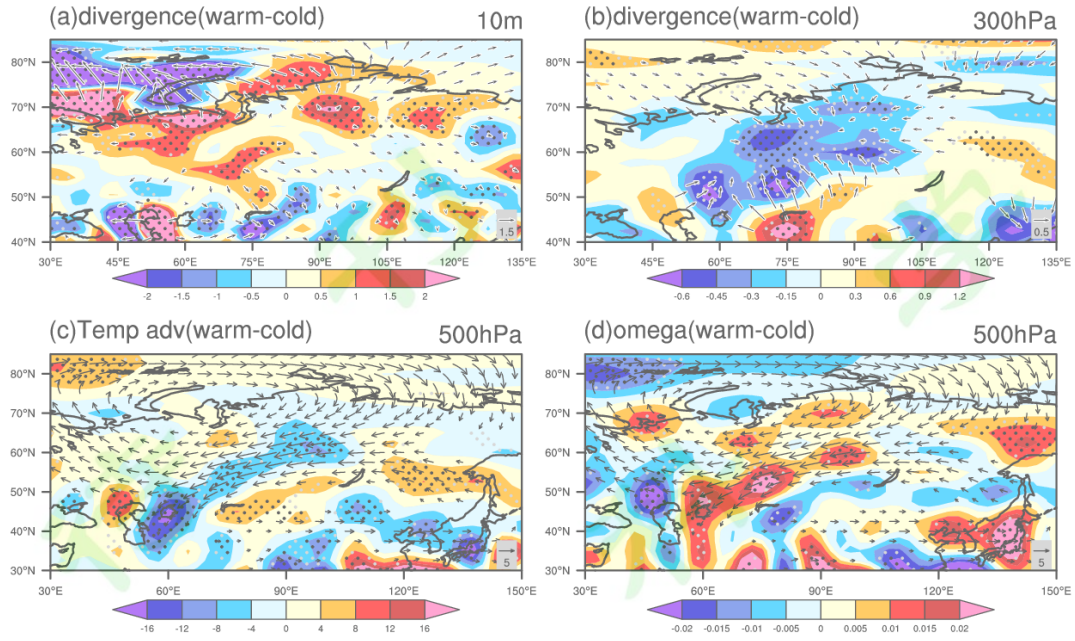


图5 ARTI 正异常年与 ARTI 负异常年 (a) 10m 散度 ($\times 10^6 \text{K/s}$, 填色)、散度风 (m/s , 矢量), (b) 300hPa 散度 ($\times 10^6 \text{K/s}$, 填色)、散度风 (m/s , 矢量), (c) 500hPa 温度平流 ($\times 10^6 \text{K/s}$, 填色)、水平风场 (m/s , 矢量), (d) 500hPa 垂直运动 (Pa/s , 填色)、水平风场 (m/s , 矢量) 合成差值; 打黑 (灰) 点区域通过 0.05 (0.1) 的 t 检验的置信水平。水平风场只给出通过 0.1t 检验置信水平的矢量

Fig.5 Composite differences(ARTI positive years minus ARTI negative years) in the (a)divergence($\times 10^6 \text{s}^{-1}$, shading), divergent wind (m/s , vector) at 10m, (a)divergence($\times 10^6 \text{s}^{-1}$, shading), divergent wind(m/s , vector) at 300hPa, (c)temperature advection($\times 10^6 \text{K/s}$, shading), horizontal wind fields(m/s , vector) at 500hPa, (d)vertical motion(Pa/s , shading), horizontal wind fields(m/s , vector) at 500hPa. Black(gray) dots denote regions where are significant at the 0.05(0.1) confidence level by t test. horizontal wind fields are only shown significant at the 0.1 confidence level by t test

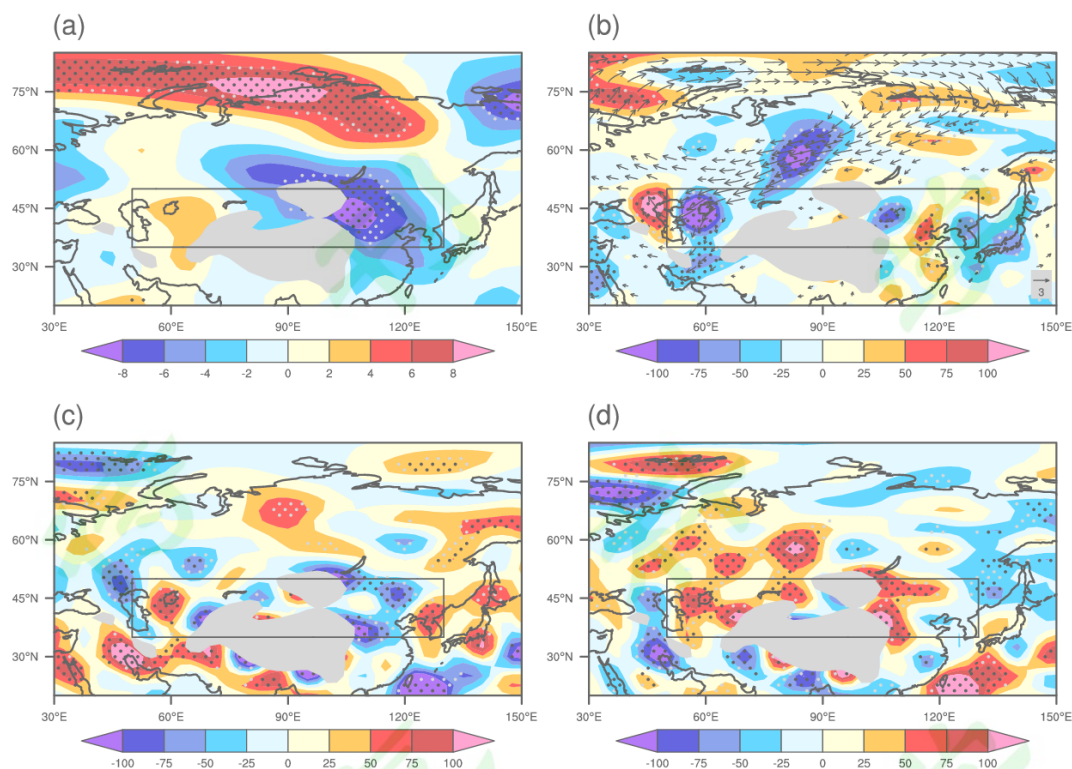


图 6 ARTI 正异常年与 ARTI 负异常年 850hPa 前冬 54 天 (a) 温度局地变化积分 (K), (b) 水平温度平流积分 (K, 填色)、平均水平风场 (m/s, 矢量), (c) 垂直输送项积分 (K), (d) 非绝热加热项积分 (K) 合成差值; 打黑 (灰) 点区域通过 0.05 (0.1) 的 t 检验的置信水平; 水平风场只给出通过 0.1t 检验置信水平的矢量; 黑框表示亚洲中纬度 (35-50°N, 50-130°E) 区域

Fig.6 Composite differences(ARTI positive years minus ARTI negative years) in the (a) integral of local temperature change(K), (b) integral of horizontal temperature advection(K, shading), average horizontal wind fields(m/s, vector), (c) integral of vertical transport(K), (d) integral of diabatic heating(K) in the first 54 days of winter at 850hPa. Black(gray) dots denote regions where are significant at the 0.05(0.1) confidence level by t test. horizontal wind fields are only shown significant at the 0.1 confidence level by t test. Black box indicates region of Mid-latitude Asia

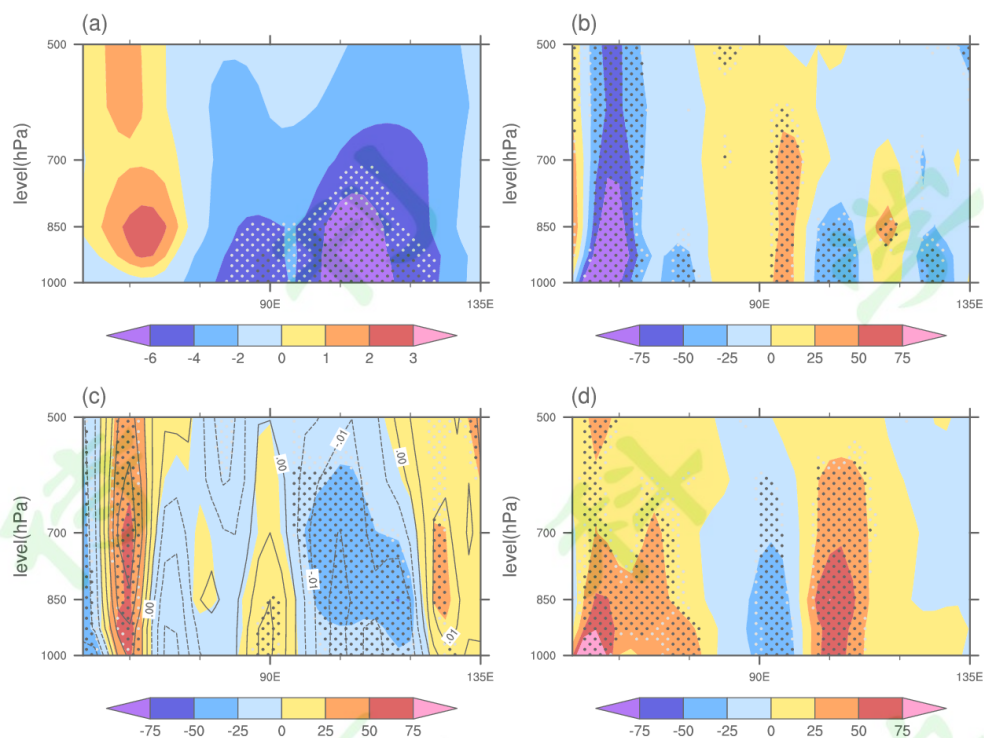


图7 ARTI 正异常年与 ARTI 负异常年经向平均 (35° – 50° N) 前冬 54 天 (a) 温度局地变化积分 (K), (b) 水平温度平流积分 (K), (c) 垂直输送项积分 (K, 填色)、平均垂直速度 (Pa/s, 等值线), (d) 非绝热加热项积分 (K) 合成差值; 打黑 (灰) 点区域通过 0.05 (0.1) 的 t 检验的置信水平。水平风场只给出通过 0.1t 检验置信水平的矢量

Fig.7 Composite differences(ARTI positive years minus ARTI negative years) in the (a) integral of local temperature change(K), (b) integral of horizontal temperature advection(K), (c) integral of vertical transport(K, shading), average vertical velocity(Pa/s, contour), (d) integral of diabatic heating(K), in the first 54 days of winter averaged along 35° – 50° N. Black(gray) dots denote regions where are significant at the 0.05(0.1) confidence level by t test. horizontal wind fields are only shown significant at the 0.1 confidence level by t test

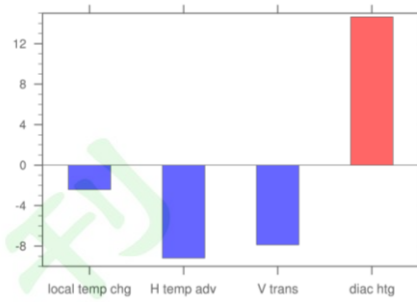


图 8 ARTI 正异常年与 ARTI 负异常年 850hPa 亚洲中纬度 (35-50°N, 50-130°E) 区域平均前冬 54 天温度局地变化、水平温度平流、垂直输送项、非绝热加热项积分 (K) 合成差值

Fig.8 Composite differences(ARTI positive years minus ARTI negative years) of regional average in the integral of local temperature change, horizontal temperature advection, vertical transport and diabatic heating(K) in the first 54 days of winter at 850hPa in Mid-latitude Asia