

陈亚楠. 冬季北大西洋涛动和乌拉尔山阻塞环流对欧亚大陆变冷的协同影响[J]. 海洋气象学报, 2023, 43(1): 12-26.
CHEN Yanan. Synergistic effects of winter North Atlantic Oscillation and Ural blocking circulation on Eurasian cooling[J]. Journal of Marine Meteorology, 2023, 43(1): 12-26. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2023.01.002. (in Chinese)

冬季北大西洋涛动和乌拉尔山阻塞环流 对欧亚大陆变冷的协同影响

陈亚楠

(1. 山东省气象防灾减灾重点实验室, 山东 济南 250031; 2. 山东省气象科学研究所, 山东 济南 250031)

摘要: 虽然全球平均表面气温不断升高,但在冬季欧亚大陆经常出现年际-年代际尺度上的变冷趋势。利用美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)再分析资料,指出冬季影响欧亚大陆变冷的大气环流主要是北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation, NAO)和乌拉尔山阻塞(Ural blocking, UB)的环流组合。其中,NAO环流可以在年际尺度上作为背景环流影响UB过程对欧亚低温天气的作用。统计分析发现,在NAO正(负)位相(NAO^+ / NAO^-)环流背景下UB的发生频率可以解释冬季平均UB发生频率的52%(13%),表明 NAO^+ 环流有利于下游阻塞形势出现。尽管如此,研究发现在 NAO^- 环流背景下的UB事件平均给欧亚地区带来的降温幅度更强,约是 NAO^+ 环流背景下的2倍,而且亚洲降温区的位置偏北约 5° 、偏东约 13.5° 。中等强度的 NAO^+ 环流背景下UB事件对欧亚降温的贡献更显著,强的 NAO^+ 环流背景下,UB过程在欧亚大陆中纬度地区产生的冷异常较弱,这与 NAO^+ 环流在欧亚大陆北部产生的明显增温有关。而在 NAO^- 环流背景下,欧亚大陆北部有明显的降温,UB环流的出现会进一步将冷空气向南输送影响我国,这种情况主要反映的是 NAO^- 环流异常对欧亚地区降温的作用,因此 NAO^- 环流越强降温越强烈。

关键词: 欧亚大陆变冷; 大气环流; 北大西洋涛动; 乌拉尔山阻塞

中图分类号: P461 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2023)01-0012-15

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2023.01.002

Synergistic effects of winter North Atlantic Oscillation and Ural blocking circulation on Eurasian cooling

CHEN Yanan

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031, China; 2. Shandong Institute of Meteorological Sciences, Jinan 250031, China)

Abstract: Although the global mean surface temperature continues to rise, significant cooling trends at the interannual-decadal scale often occur over Eurasia in winter. Based on the NCEP (National Centers for Environmental Prediction) reanalysis data, it is suggested that the main atmospheric circulations affecting the cooling in the mid latitude of Eurasia in winter are the combination of North Atlantic Oscillation (NAO) and Ural blocking (UB) circulations. Among them, the NAO circulation can be used

收稿日期: 2022-10-10; 修订日期: 2022-12-06

基金项目: 山东省气象局科研项目(2021SDQN10)

通信作者简介: 陈亚楠, 女, 博士, 工程师, 主要从事极端天气动力学及天气预报机理研究, cyn1866@163.com。

as a background circulation to influence the contribution of UB process to Eurasian cold anomaly at the interannual scale. Statistical analysis shows that the frequency of UB occurring simultaneously with a positive-phase (negative-phase) NAO (NAO^+/NAO^-) explains 52% (13%) of its average frequency in winter, which indicates that the NAO^+ circulation favors the downstream blocking occurrence. Nevertheless, the UB events related to a NAO^- can cause a stronger Eurasian cold anomaly on average, which is about twice as strong as that of the UB events related to a NAO^+ , and the position of Asian cold anomaly is shifted by approximately 5° north and 13.5° east. It is also found that the UB event causes a significant cooling in Eurasia under the background of moderate NAO^+ circulation, and the cold anomaly generated by UB process in the mid latitude of Eurasia is relatively weak under the background of strong NAO^+ circulation, which is related to the obvious warming generated by NAO^+ circulation in the northern Eurasia. Under the background of NAO^- circulation, there is an obvious cooling in the northern Eurasia before the UB, and the occurrence of UB circulation can transport cold air southward to affect China. It mainly reflects the effect of NAO^- circulation on Eurasian cold anomaly, so the stronger the NAO^- circulation, the stronger the cooling.

Keywords: Eurasian cooling; atmospheric circulation; North Atlantic Oscillation (NAO); Ural blocking

引言

近年来,北半球冬季陆地上频繁爆发极端低温天气。欧亚大陆作为世界上最大的陆地,自 2000 年后,其冬季表面气温出现了剧烈的下降趋势^[1-7],人口聚集的中纬度地区常常发生大范围的持续降温、冰雪等极端寒冷天气,给当地的社会生活和生态环境带来了巨大灾难^[8-10]。

针对发生在欧亚大陆冬季的这些低温事件,多数研究从个例分析出发,包括 2005/2006 年冬季欧洲和北亚出现的低温天气^[11]、2008 年初影响中国南方的雨雪冰冻灾害^[12-17]、2009/2010 年^[18-21]和 2011/2012 年^[22-26]冬季席卷了整个欧亚大陆的持续极端寒冷天气。从个例出发,进一步研究冬季陆地上极端低温天气频繁发生的归因尤为迫切。大多数科学家把欧亚大陆冬季持续的低温天气归因于北极增暖或北极海冰减少^[1-3,5,11,27-28]、热带海洋信号如拉尼娜^[12-14,17,29]和热带大气季节内振荡^[15,30-33],以及北大西洋中纬度海面温度上升^[29,34-35]等,目前这些归因尚存在争议^[6],但几乎所有研究都证实了北半球中高纬度大气环流持续性异常是造成欧亚大陆冬季持续性低温天气的直接原因^[36]。因此,抓住造成欧亚变冷的大气环流型,研究其本身及受强迫产生的变异性,才会对欧亚低温事件的归因有更清楚的认识。

很多研究发现冬季欧亚变冷与北半球极地涡旋或北极涛动 (Arctic Oscillation, AO) 的负位相环流紧密相关^[18-20,36-38],而被认为是 AO 在北大西洋地区局

地表现的北大西洋涛动 (North Atlantic Oscillation, NAO) 则会直接影响欧洲地区的天气和气候^[37-41]以及通过传播到下游的波列影响亚洲地区^[41-43]。国内学者在对我国冬季持续性低温天气的研究中,经常将其与乌拉尔山地区的阻塞形势偏强联系^[13-16,43-45]。乌拉尔山阻塞 (Ural blocking, UB) 是高空西风带上深厚的准双周暖性高压系统^[4,46],在海平面上常常对应着西伯利亚高压的增强^[47],与东亚冬季风的加强密切相关^[48-51]。研究发现, AO 可以控制北半球中高纬地区高空的阻塞形势,在正位相的 AO 环流下,由于平流层极涡很冷,中高纬西风急流较强,一般不利于对流层阻塞发展^[16,52]。此外,李崇银等^[34]指出北大西洋中纬度海面温度异常偏高是影响 2008 年 UB 长时间稳定存在的主要外强迫,而 NAO 与北大西洋海面温度变化密切相关^[53-54],常常伴随着下游欧亚大陆中高纬的阻塞高压异常^[4-5,24,55-56]。研究表明单个大气环流型对欧亚冷异常的影响可能较小,但大气环流之间的组合可能会加强这种降温影响^[14],大量研究证实了 NAO 与 UB 的环流组合会影响暖北极-冷欧亚大陆型气温变化^[5,57-61],但 NAO 与 UB 的不同配置对欧亚大陆变冷的定量化影响差异还有待进一步研究。

1 数据与方法

研究的北半球冬季为 12 月—次年 2 月,例如,1950 年冬季为 1950 年 12 月—1951 年 2 月。使用

的再分析数据主要来自美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)和美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)联合发布的再分析数据集(<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>) 1950—2018年冬季的日平均和月平均资料,水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$,用到的变量有500 hPa位势高度(Z_{500})、表面气温(surface air temperature, SAT)、500 hPa纬向风速(U_{500})和经向风速(V_{500})以及向下长波辐射等。在对各气象要素的分析中,每个格点上异常或距平定义为原始数据减去季节循环气候态(1950—2018年)的偏差,并且用去掉长期线性趋势的方式消除全球变暖的影响。

使用的AO、NAO、斯堪的纳维亚(SCANDinavian, SCAND)环流型和东大西洋-西俄罗斯(East Atlantic-West Russia, EAWR)遥相关型指数的月平均数据来自美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)气候预测中心(Climatic Prediction Center, CPC)(<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/telecontents.shtml>),大西洋年代际振荡(Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO)、太平洋年代际振荡(Interdecadal Pacific Oscillation, IPO)和Niño3.4指数的月平均数据来自NOAA物理科学实验室(Physical Sciences Laboratory, PSL)(<https://psl.noaa.gov/>)。

根据Scherrer等^[62]提出、Davini等^[63]改进的二维阻塞识别方法,记录了北半球中高纬度各个格点上阻塞发生的时间。该二维阻塞指数基于 Z_{500} 的经向梯度来定义:

$$G_{\text{HGS}}(\lambda_0, \theta_0) = \left[\frac{Z_{500}(\lambda_0, \theta_0) - Z_{500}(\lambda_0, \theta_s)}{\theta_0 - \theta_s} \right] > 0, \quad (1)$$

$$G_{\text{HGN}}(\lambda_0, \theta_0) = \left[\frac{Z_{500}(\lambda_0, \theta_N) - Z_{500}(\lambda_0, \theta_0)}{\theta_N - \theta_0} \right] < -10 \text{ m}/(^{\circ}), \quad (2)$$

$$G_{\text{HGS2}}(\lambda_0, \theta_0) = \left[\frac{Z_{500}(\lambda_0, \theta_s) - Z_{500}(\lambda_0, \theta_s - 15^{\circ})}{15^{\circ}} \right] < -5 \text{ m}/(^{\circ}), \quad (3)$$

其中, (λ_0, θ_0) 表示任一个经纬度格点, $\theta_s = \theta_0 - 15^{\circ}$, $\theta_N = \theta_0 + 15^{\circ}$ 。 G_{HGS} 表示向南的位势高度梯度, G_{HGN} 表示向北的位势高度梯度, G_{HGS2} 表示偏低纬度向南的位势高度梯度。若日值数据满足等式(1)~

(3), 则代表这个格点上这一天有瞬时阻塞发生。利用客观识别和主观观察相结合的方式, 统计发生在欧洲($40^{\circ} \sim 80^{\circ} \text{N}$, $10^{\circ} \text{W} \sim 40^{\circ} \text{E}$)和乌拉尔山($40^{\circ} \sim 80^{\circ} \text{N}$, $40^{\circ} \sim 80^{\circ} \text{E}$)中高纬度地区的阻塞日。将阻塞高压位置稳定(经纬度不超过 5°)且连续持续3 d或3 d以上的阻塞过程定义为一次阻塞事件, 其中, 阻塞高压最强的一天定义为该阻塞事件的lag0天。

不同位相的NAO事件是根据NOAA PSL提供的NAO日平均指数(<https://psl.noaa.gov/data/timeseries/daily/NAO/>)来定义, 当NAO值连续3 d以上超过0.5/低于-0.5个标准差时, 将满足条件的连续NAO正/负值过程定义为正/负位相的NAO($\text{NAO}^+/\text{NAO}^-$)事件, 并且将一次事件中NAO指数绝对值最大的一天定义为lag0天。除此之外, 文中还用到经验正交函数分解(empirical orthogonal function, EOF)、K值聚类、合成分析、回归分析、相关分析等统计学方法, 并对统计结果用学生t检验和F检验进行验证, 无特殊说明文中使用结果均通过显著性水平为95%的检验。

2 欧亚大陆不同区域变冷对应的大气环流型

为了得到影响冬季欧亚变冷的主要大气环流模态, 先利用EOF方法得到去掉全球变暖影响后的欧亚地区SAT时空变化的前4个主要模态(图1a-h)。从冷异常的位置上看, 冬季欧亚大陆上出现的降温可分为偏北(EOF1)、偏南(EOF2)、偏西(EOF3)和偏东(EOF4)4种情况。偏北型的冷异常主要分布在 40°N 以北, 从斯堪的纳维亚半岛至西伯利亚地区, 对应着我国的新疆、内蒙古和东北地区偏冷, 西南地区偏暖。偏南型的降温范围主要分布在 60°N 以南, 包括南欧、中东和我国大部分地区。偏北型和偏南型降温在 $40^{\circ} \sim 60^{\circ} \text{N}$ 的中纬度地区有明显的重合区, 因此在欧亚大陆中纬度地区降温最为明显, 与前人结论^[2,7]一致。偏西型的主要降温中心在中东地区, 欧洲大陆大部分地区偏暖, 俄罗斯远东地区偏冷。偏东型的降温主要出现在亚洲东部中纬度地区, 包括我国东北、华北和华南地区, 其他地区表现为明显的暖异常。尽管利用EOF方法得到了欧亚地区冬季降温异常的4个主要模态, 但它们能否代替冬季真实发生的低温模态还不清楚。进一步对1950—2018年欧亚地区每个冬

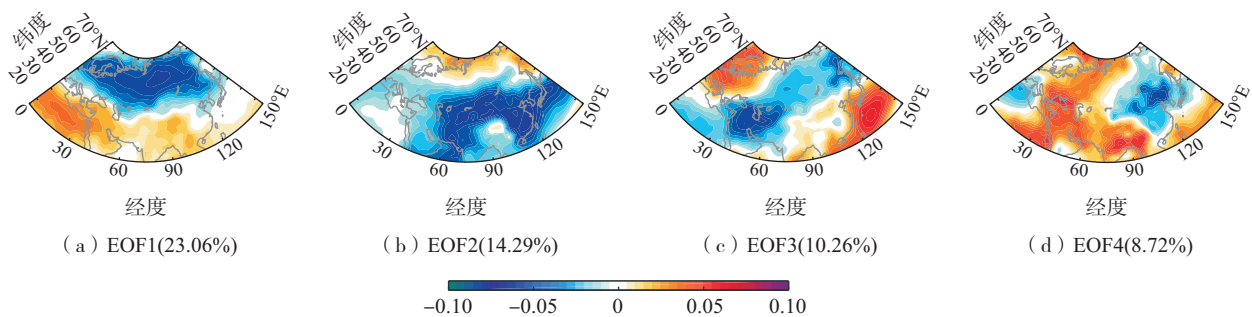
季平均的 SAT 异常做聚类分析(图略),证实了 EOF 得到的 4 个欧亚降温模态可以主导一些欧亚冬季低温异常,也可以组合在欧亚地区出现范围更广强度更强的降温天气,因此研究 EOF 4 个主要降温模态具有现实意义。

通过 EOF 方法得到的欧亚地区 SAT 前 4 个模态对应的时间变化相互独立,但在 10 a 尺度上,EOF1 和 EOF2 出现正位相(时间序列 PC1 和 PC2 为正值)的时间段大致相同,主要在 P1(1965—1975 年)和 P2(2005—2015 年)两个时期(图 1e、f),因此对欧亚冬季 SAT 变化方差贡献占 37% 的偏北和偏南型降温模态在 P1 和 P2 两个时期共同作用欧亚大陆出现全局变冷。尽管 EOF1 和 EOF2 两个降温模态几乎覆盖欧亚全局,但是相比于 P1 时期整个欧亚大陆出现的大范围降温,P2 时期主要是在欧亚中东部出现降温(图略),这种降温区域的差异仅靠研究 EOF1 和 EOF2 无法解释,需要继续考虑 EOF3 和 EOF4 的叠加作用,以此解释欧亚大陆 SAT 在局地的不均匀变化。偏西型模态的时间序列 PC3 在 P1 时期为正(图 1g),对应欧亚大陆中东地区变冷;偏东型模态的时间序列 PC4 则在 P2 时期转为正位相(图 1h),对应欧亚大陆东部地区强烈降温。由此得到欧亚大陆降温在 P1 和 P2 时期的不同空间分布,一是在 1960 年后出现的大范围(偏北、偏南和偏西的叠加)欧亚变冷,二是在 2000(2005)年后出现偏北(偏南)和偏东型叠加的欧亚变冷。

从回归到 4 个模态时间系数上的 SAT 和 Z_{500} 距平场可以看到,EOF1 对应应在北极地区是高压环流异常,类似偏向北大西洋的负位相 AO(AO⁻)模态,NAO⁻环流特征明显(图 1i)。计算各时间序列的相关系数(表 1)可知,PC1 与冬季平均的 AO/NAO 指

数有显著的强的负相关,因此影响欧亚大陆偏北型降温异常的主要环流为 AO⁻/NAO⁻。EOF2 对应的环流在乌拉尔山地区有个高压异常、欧亚大陆中纬度地区由低压异常控制(图 1j),PC2 与 UB 频率有显著的强的正相关,因此冬季欧亚偏南地区出现的降温与 UB 环流紧密相关。欧亚偏北和偏南的两个变冷模态分别对应以 NAO⁻和 UB 为主导的环流型,与已有研究^[36]结果一致。

EOF3 对应的环流较为复杂,尽管在欧洲大陆上有高压异常(图 1k),但 PC3 与欧洲阻塞(Europe blocking, EB)发生频率的相关系数较弱,未通过 95% 的显著性检验,表明 EB 与中东地区低温天气关系的不确定性。PC3 与 AO 和 UB 有显著的弱正相关,这间接说明中高纬度高压环流异常的位置对偏西型降温异常的影响不大。而 PC3 与 SCAND 环流型有显著的强正相关,揭示了偏东型降温异常关键依赖于欧亚中高纬高压与中低纬低压的配置。EOF4 对应的环流主要是在乌拉尔山地区的高压异常(图 1l),且 PC4 与 UB 发生频率有显著的正相关。相较于 EOF2, EOF4 对应的 UB 环流与北大西洋地区联系更为紧密。从表 1 中可以看到,PC4 与自北大西洋上空传播至欧亚地区的 EAWR 波列有显著的强负相关,而 PC2 与 UB 的相关系数明显高于与其他波列(EAWR 和 SCAND)的相关系数。因此欧亚地区偏南型降温模态主要受 UB 环流的局地影响,而偏东型降温模态受来自北大西洋的大气遥相关波列与 UB 的配合作用。进一步研究发现,与 UB 环流密切相关的偏南和偏东型降温模态变化与 AMO、IPO 和厄尔尼诺这些海洋变率的相关系数有所差异,其中 EOF2 与太平洋和北大西洋海面温度降低异常密切相关,而 EOF4 与北大西洋海面温度



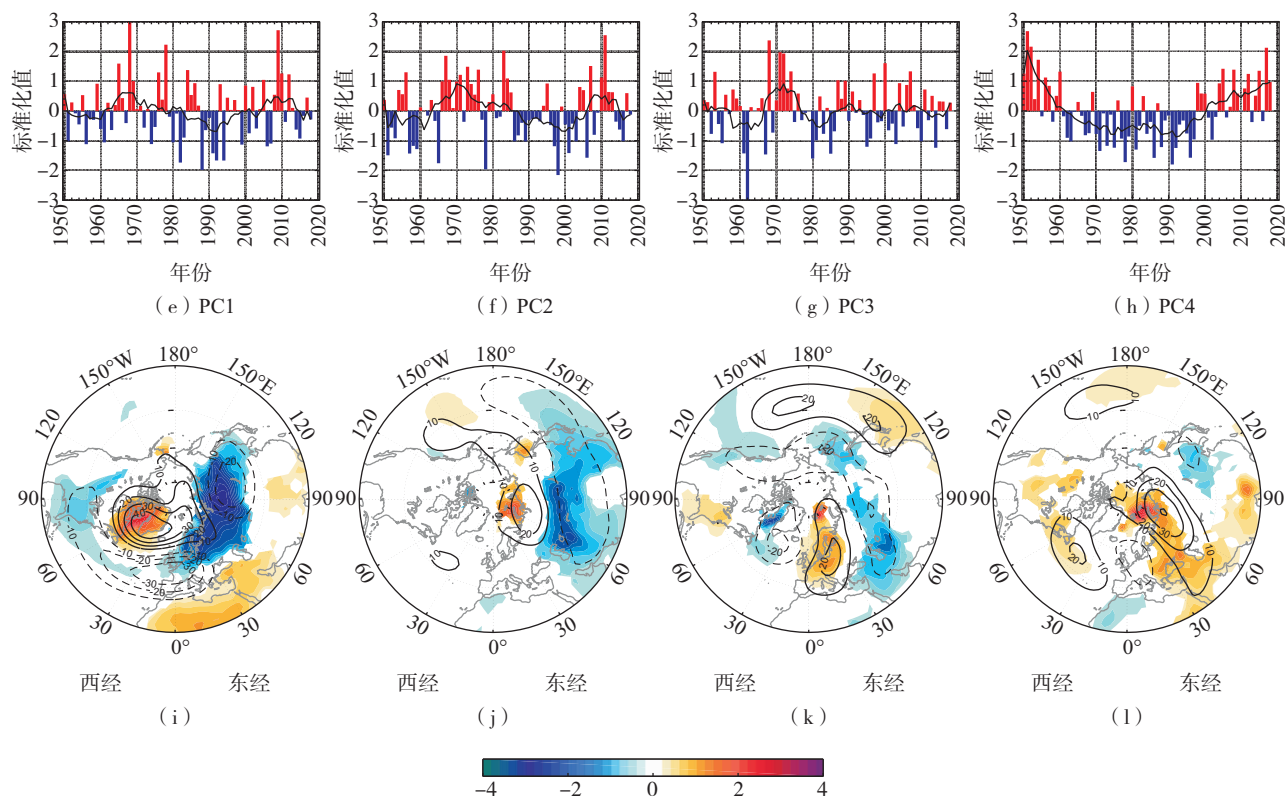


图1 1950—2018年冬季欧亚地区(15°~75°N,0°~150°E)去线性趋势标准化表面气温(SAT)EOF的前4个空间模式(a-d,色阶表示载荷向量)和主成分序列(e-h;红色柱表示正值,蓝色柱表示负值,黑线表示9 a滑动平均),以及对应的回归到时间序列上的SAT(色阶,单位:°C)和500 hPa位势高度(Z_{500} ,等值线,间隔为10 gpm)异常场(i-l)

Fig.1 Four leading EOF modes (a-d, color scale represents load vector) and corresponding principal components time series (e-h; red bars show positive values, blue bars show negative values, and black lines denote 9-year smoothing curves) of the normalized detrended DJF-mean surface air temperature (SAT) anomaly over the Eurasia region (15°-75°N, 0°-150°E) during 1950-2018, and regression fields of SAT (color scale, units: °C) and geopotential height at 500 hPa (Z_{500} , contour, interval: 10 gpm) anomalies to the PCs (i-l)

升高有关。因此在长期气候信号上,UB环流可能会受到来自太平洋和大西洋海面温度变化的影响和调制^[60-61],进而加剧欧亚大陆不同区域的低温天气。本文的关注重点在大尺度大气环流的配置上,这里不对长期气候信号做过多讨论。

总结可得,欧亚地区4个主要的降温模式与欧洲-乌拉尔山地区的阻塞形势和NAO环流有关,UB对4类降温均有贡献,NAO⁻主要对偏北型降温起作用。相较于欧亚地区偏北和偏南的降温异常,单个区域环流对偏西和偏东模式的影响较小,更多的是大气遥相关环流的影响,因此考虑不同区域环流的组合是必要的。AO体现了北极地区极涡的强度,具有纬向对称结构。PC1和PC3均与AO有显著的相关性,其中PC1与NAO(UB)有显著的负(正)相关,PC3与NAO(UB)有正(正)相关,因此AO在欧亚大陆的不同配置关系可以用NAO和UB的不同组合表示。

表1 1950—2018年冬季欧亚地区SAT异常EOF前4个模式的时间序列与大气(AO、NAO、UB、EB、SCAND和EAWR)和海洋变率(AMO、IPO、Niño3.4)之间的相关系数

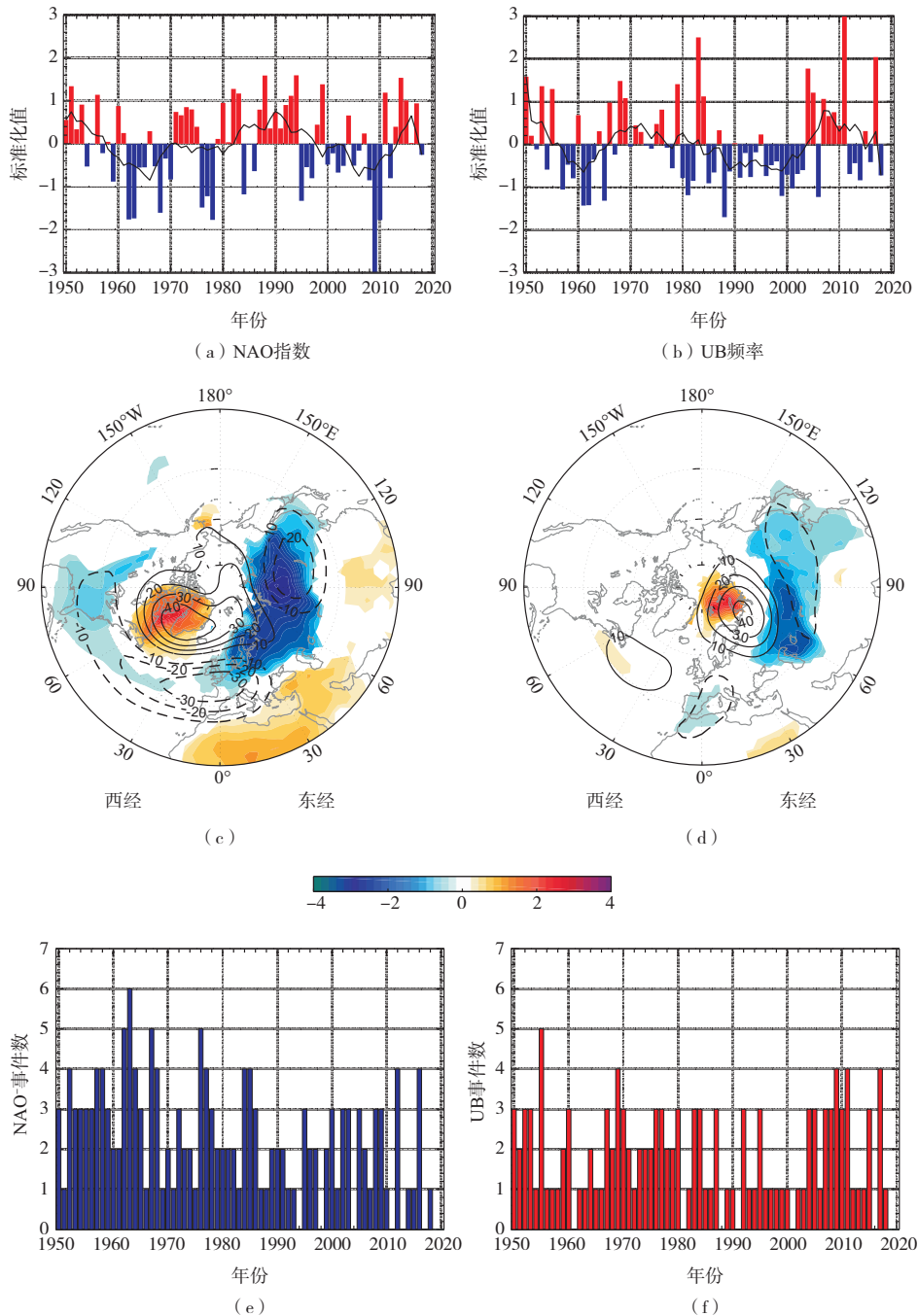
Table 1 Correlation coefficients of 4 leading EOF PCs of SAT anomaly over the Eurasia region with the atmospheric (AO, NAO, UB, EB, SCAND, and EAWR index) and oceanic (AMO, IPO, and Niño3.4 index) variability in winters during 1950-2018

内部变率	气温模式与内部变率的相关系数			
	PC1	PC2	PC3	PC4
AO	-0.82**	-0.07	0.26*	-0.09
NAO	-0.70**	0.06	0.21	0.22
UB	0.24*	0.55**	0.25*	0.30**
EB	0.04	0.20	0.12	-0.28*
SCAND	0.61**	0.34**	0.36**	0.10
EAWR	-0.34**	-0.29*	0.16	-0.58**
AMO	0.04	-0.29*	-0.20	0.49**
IPO	0.02	-0.39**	0.15	-0.12
Niño3.4	0.02	-0.41**	0.17	-0.06

注:“*”和“**”分别表示相关系数通过95%和99%的显著性水平检验。

计算得到冬季平均的 NAO 指数(图 2a)与 UB 发生频率(图 2b)之间的相关系数仅为 0.06,因此在年际尺度上二者对欧亚变冷的作用相对独立。由 9 a 滑动平均(图 2a-b 中黑线)来看,在 P1 和 P2 时期 NAO 呈负位相且 UB 发生频率偏多,二者对欧亚变冷的作用是叠加的。在冬季平均上,NAO⁻环流和 UB 频率增加都对应了欧亚大陆中纬度地区 SAT 出现冷异常(图 2c-d)。统计了季节内尺度上发生的 NAO⁻和 UB 事件数(图 2e-f),并对所有 NAO⁻/UB 事件进

行合成,发现 NAO⁻事件在欧亚地区造成的降温较弱且位置偏北(图 2g),而 UB 事件给欧亚地区带来的降温(图 2h)比冬季平均更强烈。因此,NAO⁻环流主要是在年际尺度上影响欧亚大陆偏北地区的降温,UB 则是通过一次次阻塞过程给欧亚地区带来降温天气且可以体现在冬季平均上。如此一来,北大西洋上的 NAO 环流可以充当下游乌拉尔山阻塞事件的背景条件,不同位相 NAO 环流背景下阻塞对欧亚大陆降温的影响有何差异需要进一步讨论。



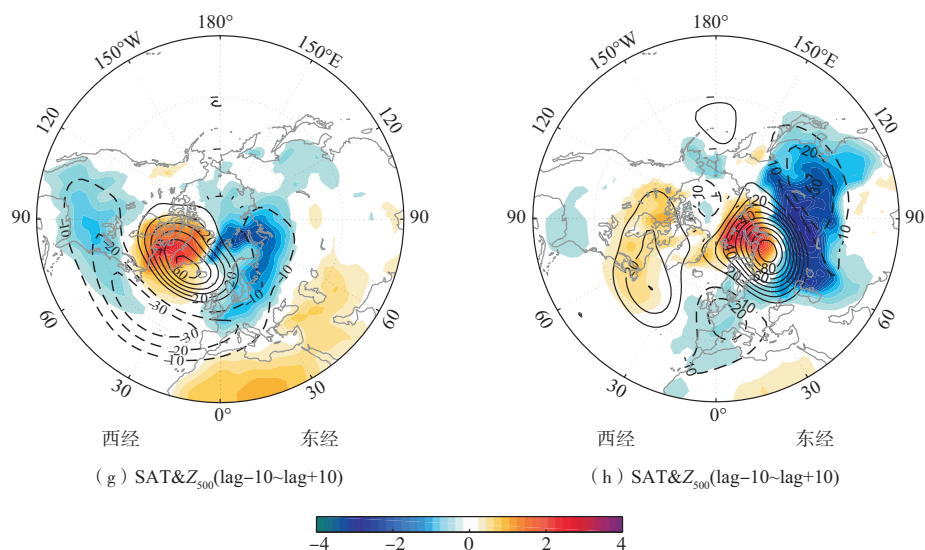


图2 1950—2018年标准化且去线性趋势的冬季平均NAO指数(a)和UB频率变化(b,黑线表示9 a滑动平均), 负的NAO指数和UB频率分别线性回归得到的SAT(色阶,单位:℃)和 Z_{500} (等值线,间隔为10 gpm)异常场(c,d), 以及冬季发生的 NAO^- (e)和UB(f)事件数和事件期间lag-10~lag+10天SAT(色阶,单位:℃)和 Z_{500} (等值线, 间隔为10 gpm)异常的合成场(g,h)(图c-d,g-h的色阶显示区域分别表示回归或合成结果通过95%的显著性水平的 t 检验或 F 检验,下同)

Fig.2 Normalized time series of detrended DJF-mean NAO index (a) and UB frequency (b, the black lines denote 9-year smoothing) during 1950–2018, regressions fields (c/d) of SAT (color scale, units: °C) and Z_{500} (contour, interval: 10 gpm) anomalies to the time series of negative NAO index and UB frequency, time series of NAO^- (e) and UB (f) event numbers in winters during 1950–2018, composite maps of daily SAT (color scale, units: °C) and Z_{500} (contour, interval: 10 gpm) anomalies from lag-10 to lag+10 days during the life cycle for NAO^- (g) and UB (h) events (the shading areas in c-d and g-h indicate that the regression or composite results pass the t -test or F -test at the 95% significance level, respectively, similarly below)

3 不同位相NAO与UB的联系及对欧亚变冷的影响

冬季在北大西洋-欧亚中高纬度地区较为活跃的大气阻塞有3个频率高值中心^[46,62-64]:频率最高的中心位于欧洲北侧海岸线附近,涵盖了中纬度到高纬度的阻塞;另一个阻塞高频中心位于格陵兰岛南部,这附近发生的阻塞被称为格陵兰阻塞(Greenland blocking, GB),与NAO环流紧密联系^[64];此外,乌拉尔山地区(55°~75°N, 30°~90°E)有一个弱的阻塞高频中心。虽然冬季UB发生频率比EB和GB低,由于地理位置的原因,UB的出现对欧亚中纬度地区尤其是我国的降温天气有更显著的作用。

根据UB发生当天NAO指数的正负将UB分为对应NAO正、负指数两种情况,统计每个冬季不同情况的UB发生频率(图3a-b),发现对应NAO正指数的UB(UB- NAO^+)频次多于对应NAO负指数的UB(UB- NAO^-)。计算冬季UB- NAO^+ 和UB-

NAO^- 发生频率与冬季NAO指数和总的UB发生频率之间的相关系数,发现UB- NAO^- 发生频率与NAO变化的相关性($r=-0.50$)比与UB本身变化的相关性($r=0.36$)更好,而UB- NAO^+ 频率变化与冬季总的UB频率变化的相关系数($r=0.72$)比与NAO变化的相关系数($r=0.35$)更高。进一步将统计的UB事件按照阻塞期间(lag-15~lag+15天)平均NAO指数的正负进行分类,分为伴随 NAO^+ / NAO^- 的UB(UB- NAO^+ /UB- NAO^-)事件(图3c-d)。统计发现,UB- NAO^+ 事件数多于UB- NAO^- 事件数,其中UB- NAO^+ /UB- NAO^- 事件数分别占总UB事件数的62%/38%。分析结果表明,在次季节尺度上,UB发生时常常伴随着上游 NAO^+ 环流,因此在冬季平均尺度上,UB- NAO^+ 的频率变化可以解释大部分UB环流自身的变率,对冬季 NAO^+ 环流依赖较弱,而UB- NAO^- 的发生更多地依赖于冬季 NAO^- 环流的出现,因此可以解释部分冬季 NAO^- 环流的变化特征。

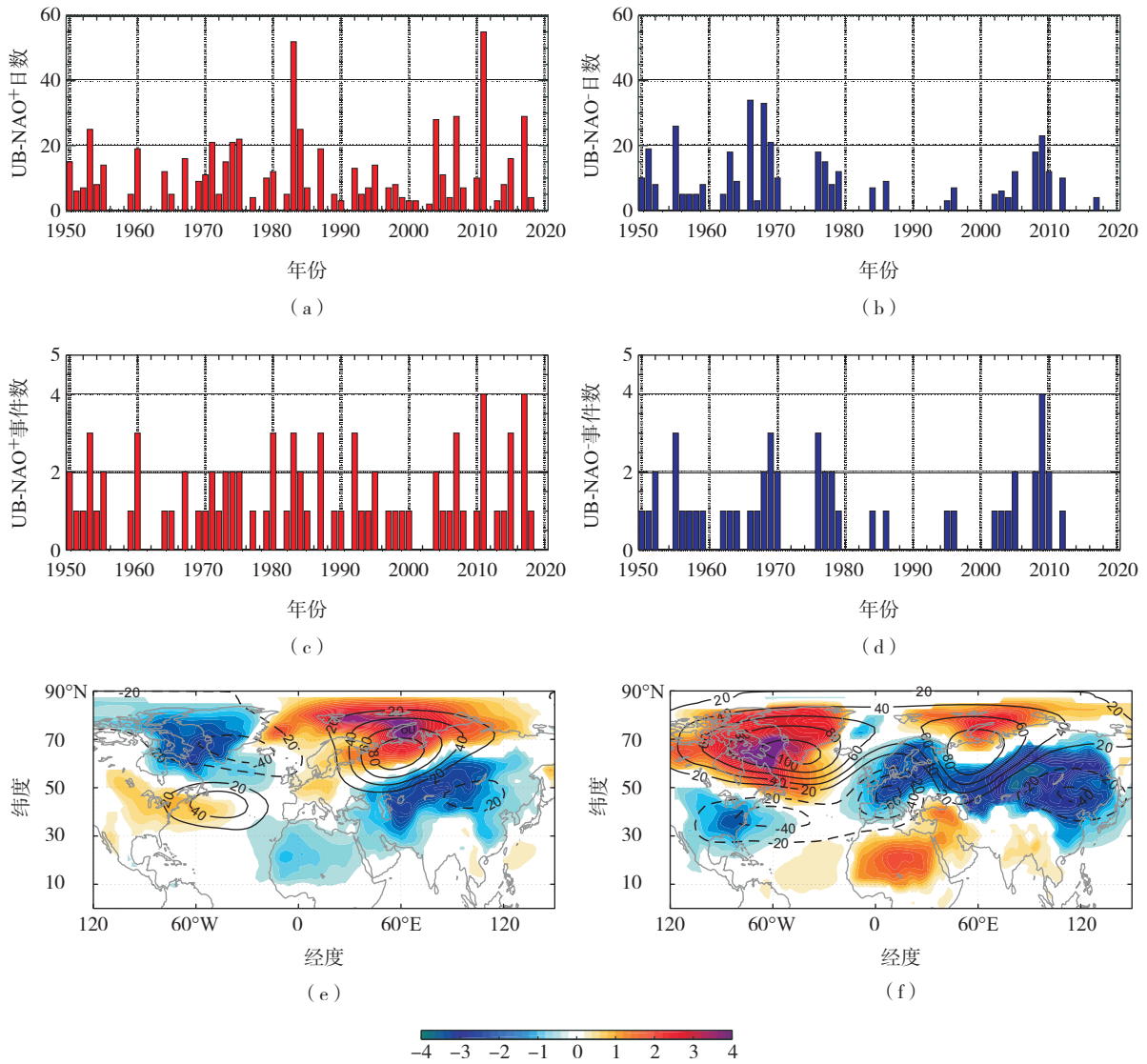


图 3 1950—2018 年冬季不同 NAO 环流背景下发生 UB 日数 (a. UB-NAO⁺, b. UB-NAO⁻) 和 UB 事件数 (c. UB-NAO⁺, d. UB-NAO⁻), 以及 UB 事件期间 lag-10~lag+10 天 SAT (色阶, 单位: °C) 和 Z₅₀₀ (等值线, 间隔为 20 gpm) 异常的合成场 (e. UB-NAO⁺, f. UB-NAO⁻)

Fig.3 Time series of DJF-mean UB days (a. UB-NAO⁺, b. UB-NAO⁻) and UB events (c. UB-NAO⁺, d. UB-NAO⁻) related to NAO in different phases during 1950–2018, and composite maps of daily SAT (color scale, units: °C) and Z₅₀₀ (contour, interval: 20 gpm) anomalies from lag-10 to lag+10 days during the life cycle for UB events (e. UB-NAO⁺, f. UB-NAO⁻)

比较伴随 NAO 不同位相的 UB 环流特征 (图 3e-f) 发现:UB-NAO⁺的阻塞高压偏强,切断低压位于高压东南侧,在欧亚大陆中纬度地区产生冷异常;UB-NAO⁻的阻塞高压与 NAO⁻在北大西洋上的高压异常相连,阻塞高压两侧有低压系统,在欧亚大陆中纬度地区造成非常强烈的冷异常。不同位相的 NAO 环流背景下的 UB 事件在欧亚地区产生的降温异常在范围和强度上均有所差异,UB-NAO⁻影响范围更大。计算二者共同影响区域 (30°~150°E,

20°~70°N)内 SAT 冷异常格点的加权平均强度和位置,发现 UB-NAO⁺/UB-NAO⁻事件在亚洲地区造成降温的平均强度约为-0.68 °C/-1.30 °C,平均经纬度位置约为(81°E,44°N)/(94.5°E,50°N),UB-NAO⁻造成亚洲中纬度降温更强烈且位置偏北偏东。除此之外,UB-NAO⁻还可以在欧洲大陆上产生剧烈降温天气,而 UB-NAO⁺可以在中东地区产生降温。

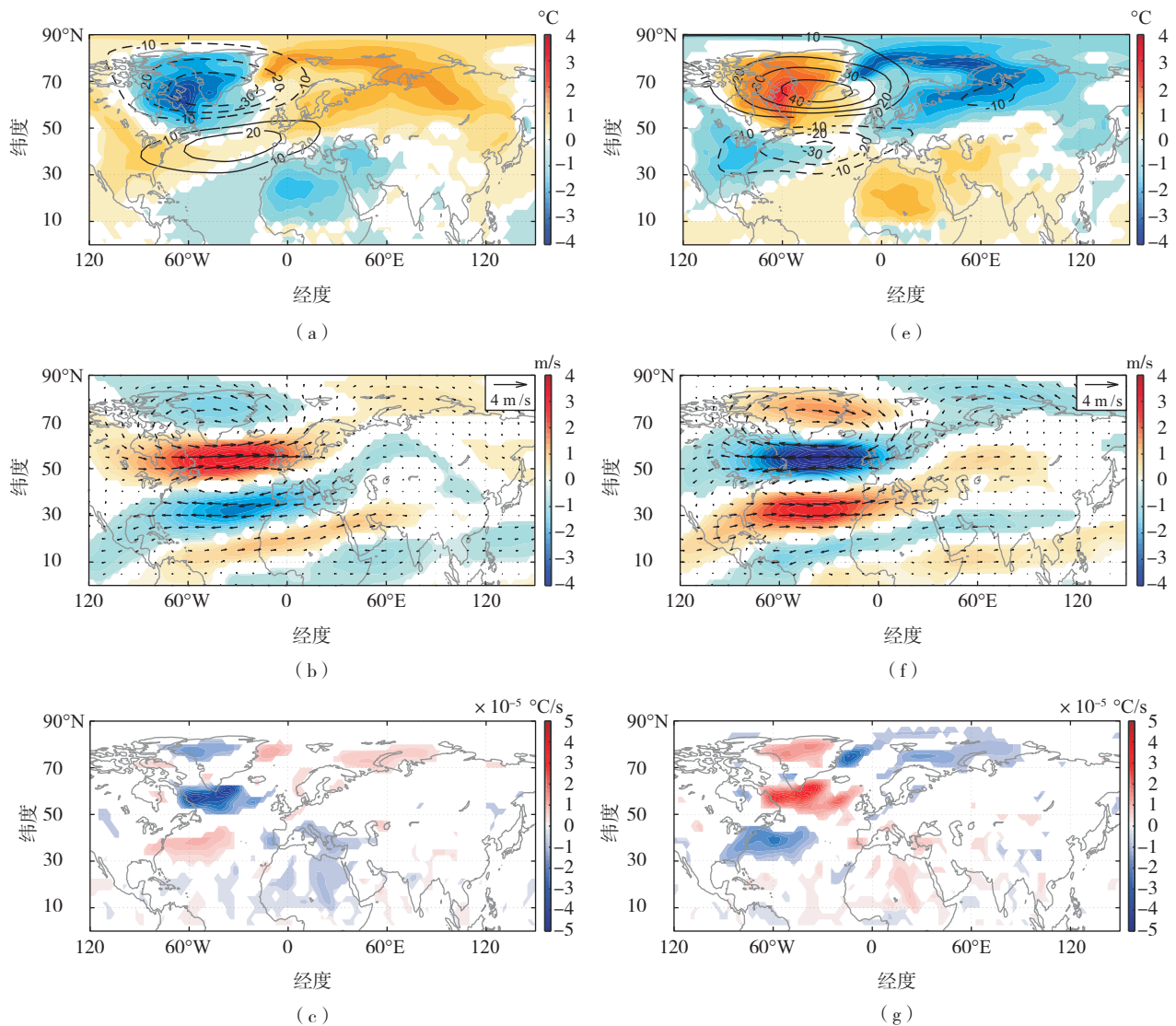
综上,UB 的发生常常伴随着 NAO⁺环流,但在冬季平均的情况下 UB 发生频率与 NAO⁺关系不大。在

冬季 NAO⁻背景下,伴随 NAO⁻发生的 UB 事件增多。伴随 NAO⁻环流的 UB 造成的欧亚降温要强于伴随 NAO⁺环流的 UB,归结其原因为 NAO⁻和 UB 两个区域环流对欧亚变冷的双重作用。图 4 给出了不同位相 NAO 环流对应的背景条件,在 NAO⁺时欧亚大陆北部和北极区域内气温明显偏暖(图 4a),这是因为 NAO⁺下北大西洋西风急流增强且北移(图 4b),可以将海洋中纬度的暖湿空气输送至欧亚大陆北部,增加温度暖平流(图 4c)和向下长波辐射(图 4d),因此下游 UB 环流向南输送的冷空气偏弱,在欧亚中纬度地区造成的降温也稍弱。而在 NAO⁻时欧亚大陆北部和北极范围内气温偏冷(图 4e),这是因为北大西洋中纬度西风急流减弱(图 4f),向欧亚大陆输送的湾流区域暖湿空气偏少(图 4g),因此欧亚大陆北部高纬度地区气温在冬季辐射冷却(图 4h)的作用下明显变

冷。在这种环流背景下,UB 事件的发生发展可以将北部堆积的冷空气向南输送,进而在欧亚中纬度地区造成强烈的降温天气。这种解释尽管在平均意义上更为合理,但是对于不同的阻塞个例而言会出现较大偏差,有的 UB-NAO⁺事件也可以在欧亚地区产生强烈降温,而有的 UB-NAO⁻事件带来的欧亚降温较弱,推测可能与背景 NAO 环流的强弱有关,接下来将进一步分析不同强度 NAO 环流如何调制 UB 在欧亚地区产生的降温。

4 不同强度 NAO 与 UB 的联系及对欧亚降温的影响

统计阻塞发生背景下(lag-15~lag+15 天)平均 NAO 指数的大小发现,大多 UB 事件伴随的 NAO 强度为-0.8~0.8,强 NAO 背景下的 UB 事件数较少。



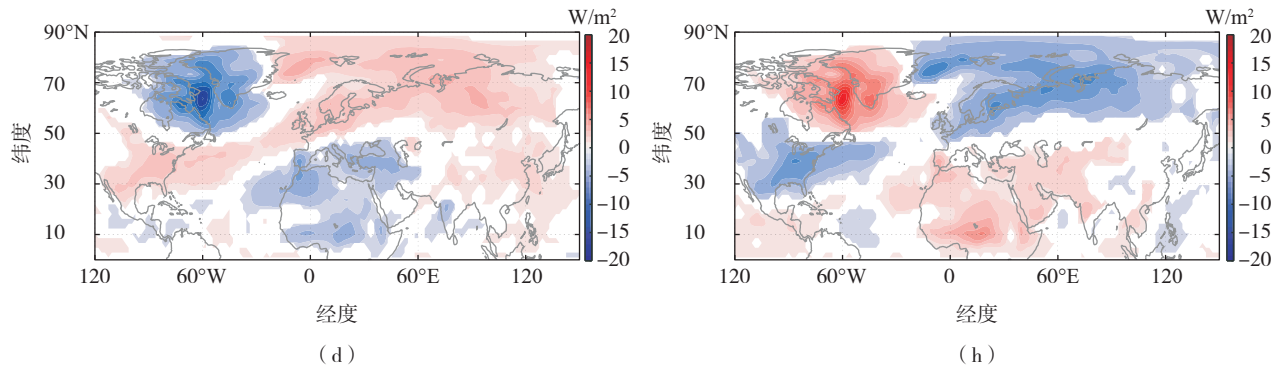


图 4 NAO⁺(a-d)和 NAO⁻(e-h)事件期间 lag-15~lag+15 天 SAT(色阶)和 Z₅₀₀(等值线,间隔为 10 gpm;a、e)、500 hPa 风场(b、f;箭头:速率;色阶:纬向风分量 U₅₀₀),850 hPa 温度平流(色阶,c、g)和向下长波辐射(色阶,d、h)异常的合成场

Fig.4 Composite maps of daily SAT (color scale) and Z₅₀₀ (contour, interval: 10 gpm; a/e), winds (b/f; arrow: wind speed, color scale: zonal wind component U₅₀₀) at 500 hPa, temperature advection (color scale, c/g) at 850 hPa and downward longwave radiation (color scale, d/h) anomalies from lag-15 to lag+15 days during the life cycle for NAO⁺(a-d) and NAO⁻(e-h) events

研究还发现 UB 事件期间(lag-10~lag+10 天)欧亚大陆中纬度(30°~150°E,20°~70°N)区域内 SAT 冷异常格点的平均面积、强度和经纬度位置与背景 NAO 强度之间存在线性关系(图 5),其中冷异常强度和纬度位置与 NAO 强度的线性关系较强。值得注意的是,在 NAO 强度不强(背景 NAO 指数绝对值小于 0.8)时,这种线性关系并不显著。当 UB 期间 NAO 负指数很强时,UB 造成的欧亚冷异常范围偏大、强度偏强、经度位置偏东、纬度位置偏北;当 NAO 正指数很强时,则相反。

将 UB 事件根据阻塞期间 NAO 环流的强度分为 3 类,即弱 NAO(NAO 指数绝对值小于 0.4)、中等强度 NAO(NAO 指数绝对值为 0.4~0.8)和强 NAO(NAO 指数绝对值大于 0.8)环流对应的 UB 事件。由上文得知,UB-NAO⁺在欧亚地区产生的冷异常纬度位置偏南,计算冬季 UB-NAO⁺事件数变化与 EOF 得到的欧亚 SAT 偏南型降温模态(EOF2)时间序列之间的相关系数为 0.37($p < 0.01$)。进一步计算发现,只有中等 NAO⁺环流背景下发生的 UB 事件数变化与 EOF2 的相关系数通过了 99% 的显著性检验($r = 0.33$),说明中等 NAO⁺环流下的 UB 对偏南型欧亚降温异常的贡献更明显。同理,UB-NAO⁻造成的欧亚冷异常位置偏北,冬季 UB-NAO⁻事件数变化与 PC1 之间的相关系数为 0.62($p < 0.01$),其中强 NAO⁻环流下的 UB 事件起到主要作用($r = 0.68$)。

根据不同强度 NAO⁺/NAO⁻环流背景下发生的 UB 事件前期(lag-30~lag-10 天)和期间(lag-10~lag+10 天)的平均 SAT 和 Z₅₀₀异常场发现,UB-NAO⁺前期的 NAO⁺环流并未给欧亚大陆带来明显降温(图 6a、c、e),冷异常全部是在 UB 发生期间造成(图 6b、d、f)。而 UB-NAO⁻前期的 NAO⁻环流可以提前给欧亚带来降温(图 7a、c、e),并且 NAO⁻环流越强带来的降温越强,UB 期间会进一步加剧降温的幅度(图 7b、d、f)。因此,UB-NAO⁻产生的降温由 NAO⁻和 UB 环流共同贡献,NAO⁻的作用随着强度增强而增加。中等强度 NAO⁺环流的前期,受增强的北大西洋西风急流影响,北大西洋极地-巴伦支-喀拉海地区偏暖,有利于阻塞环流的稳定维持,因此 UB 在欧亚中纬度地区产生的冷异常更强。随着 NAO⁺环流强度进一步加强,UB 前期欧亚大陆北侧的增温更加强烈,在强 NAO⁺环流下对应的 UB 高压很强且范围很大,但阻塞环流向南输送的冷空气强度偏弱,在欧亚中纬度地区产生的降温范围偏小且强度偏弱。在 NAO⁻的背景环流下,UB 前期乌拉尔山附近已经出现高压异常,说明 UB-NAO⁻事件的影响时间尺度更长,体现了中纬度大气波动的持续存在。强 NAO⁻环流下 UB 造成的欧亚冷异常很强,但阻塞高压很弱,欧亚大陆北部的降温主要由强 NAO⁻环流造成,与偏北型欧亚降温模态的特征一致,此时出现的 UB 活动可以进一步将北方的冷空气向南输送影响我国。

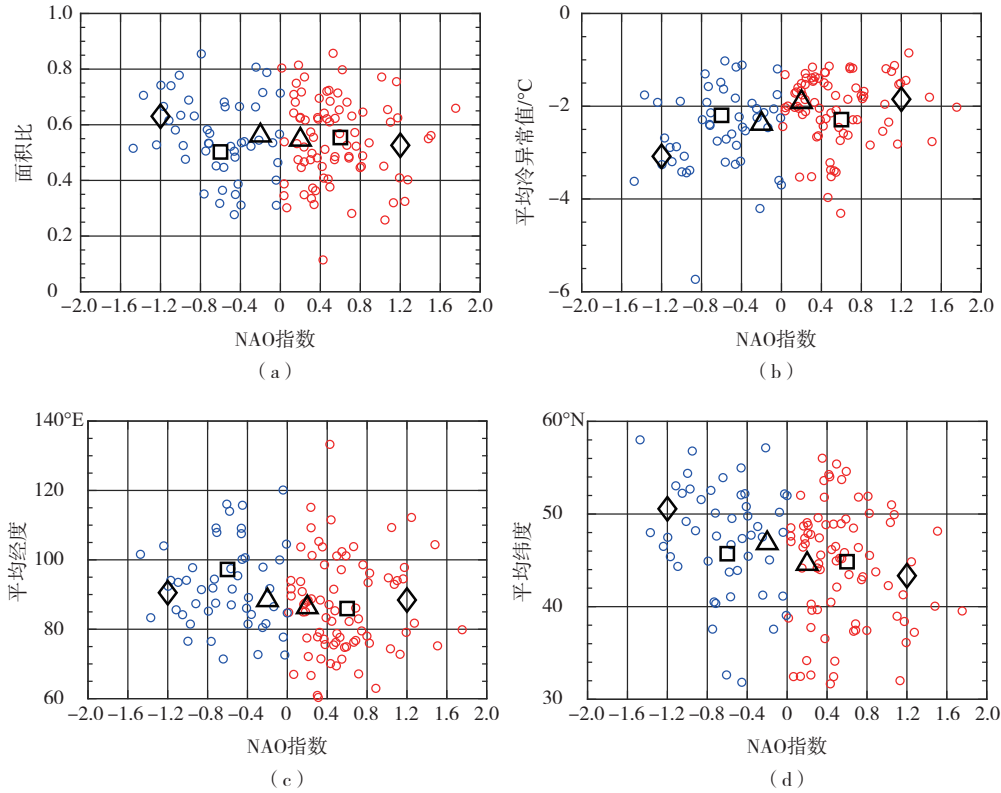
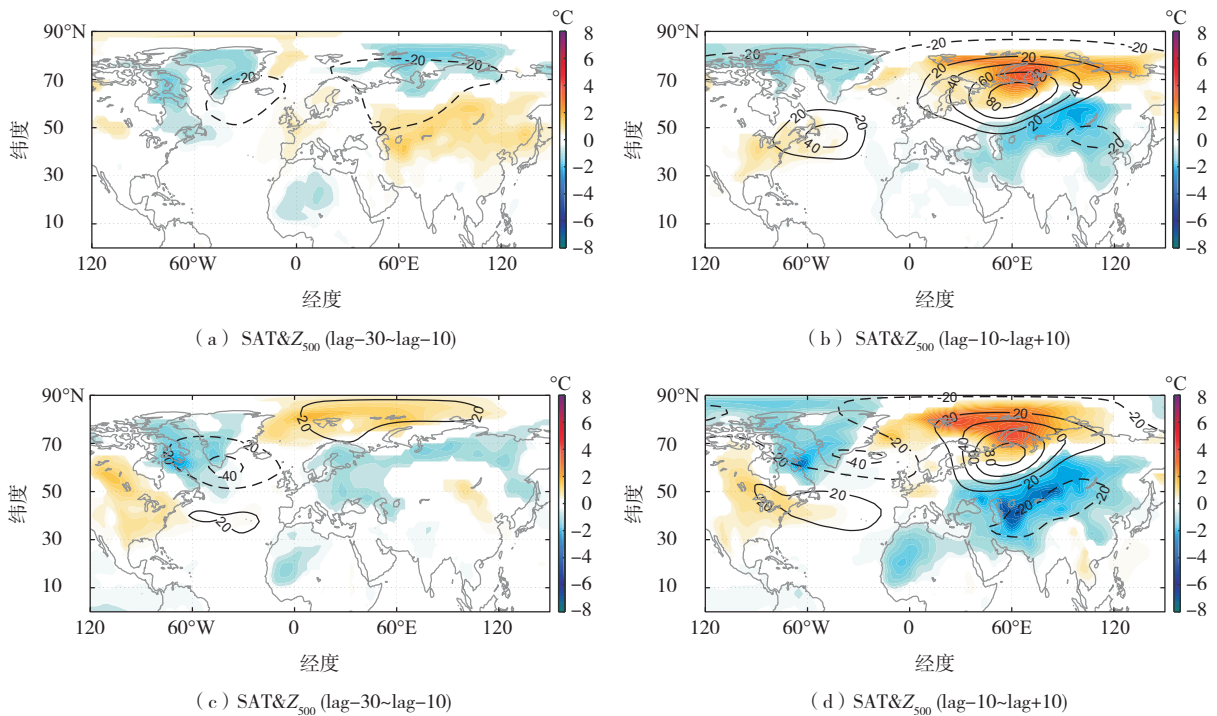


图5 UB事件期间欧亚大陆中纬度地区(30°~150°E,20°~70°N)的SAT负异常格点所占面积比(a)、平均SAT值(b)、经度(c)和纬度(d)随NAO指数的分布(红、蓝色圆圈表示NAO指数为正、负的UB事件,黑色三角形、正方形和菱形分别表示对应弱、中等强度和强NAO指数的UB事件的平均值)

Fig.5 Scatter diagram of the area ratio (a), average SAT values (b), longitude (c), and latitude (d) of cold SAT anomalies in the Eurasian mid latitude (30°-150°E, 20°-70°N) with NAO index during UB events (red and blue circles indicate UB events related to NAO⁺ and NAO⁻, respectively, while black triangles, squares, and diamonds represent the averaged values of UB events related to the weak, moderate, and strong NAO index)



(a) SAT&Z₅₀₀ (lag-30~lag-10)

(b) SAT&Z₅₀₀ (lag-10~lag+10)

(c) SAT&Z₅₀₀ (lag-30~lag-10)

(d) SAT&Z₅₀₀ (lag-10~lag+10)

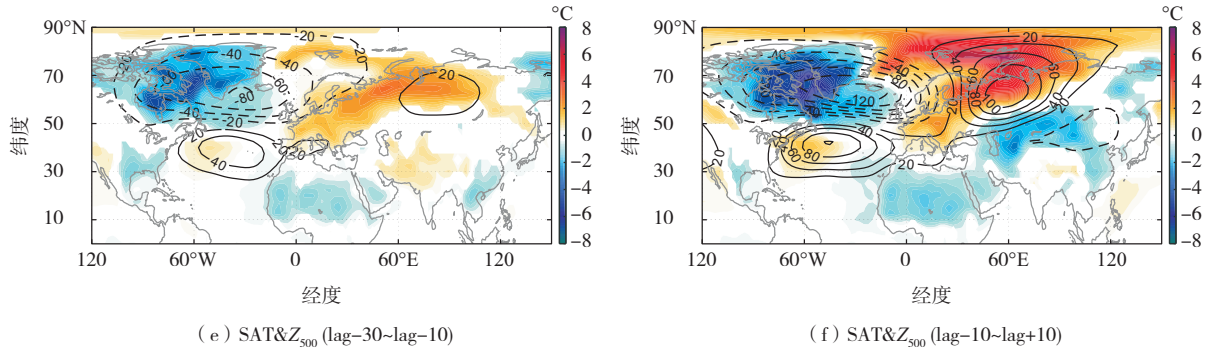


图 6 弱的(a,b)、中等强度的(c,d)和强的(e,f)UB-NAO⁺事件前期 lag-30~lag-10 天及期间 lag-10~lag+10 天 SAT(色阶)和 Z₅₀₀(等值线,间隔为 20 gpm)异常的合成场

Fig.6 Composite maps of daily SAT (color scale) and Z₅₀₀ (contour, interval; 20 gpm) anomalies from lag-30 to lag-10 days prior to the UB onset and from lag-10 to lag+10 days during the UB life cycle for weak (a/b), moderate (c/d), and strong (e/f) UB-NAO⁺ events

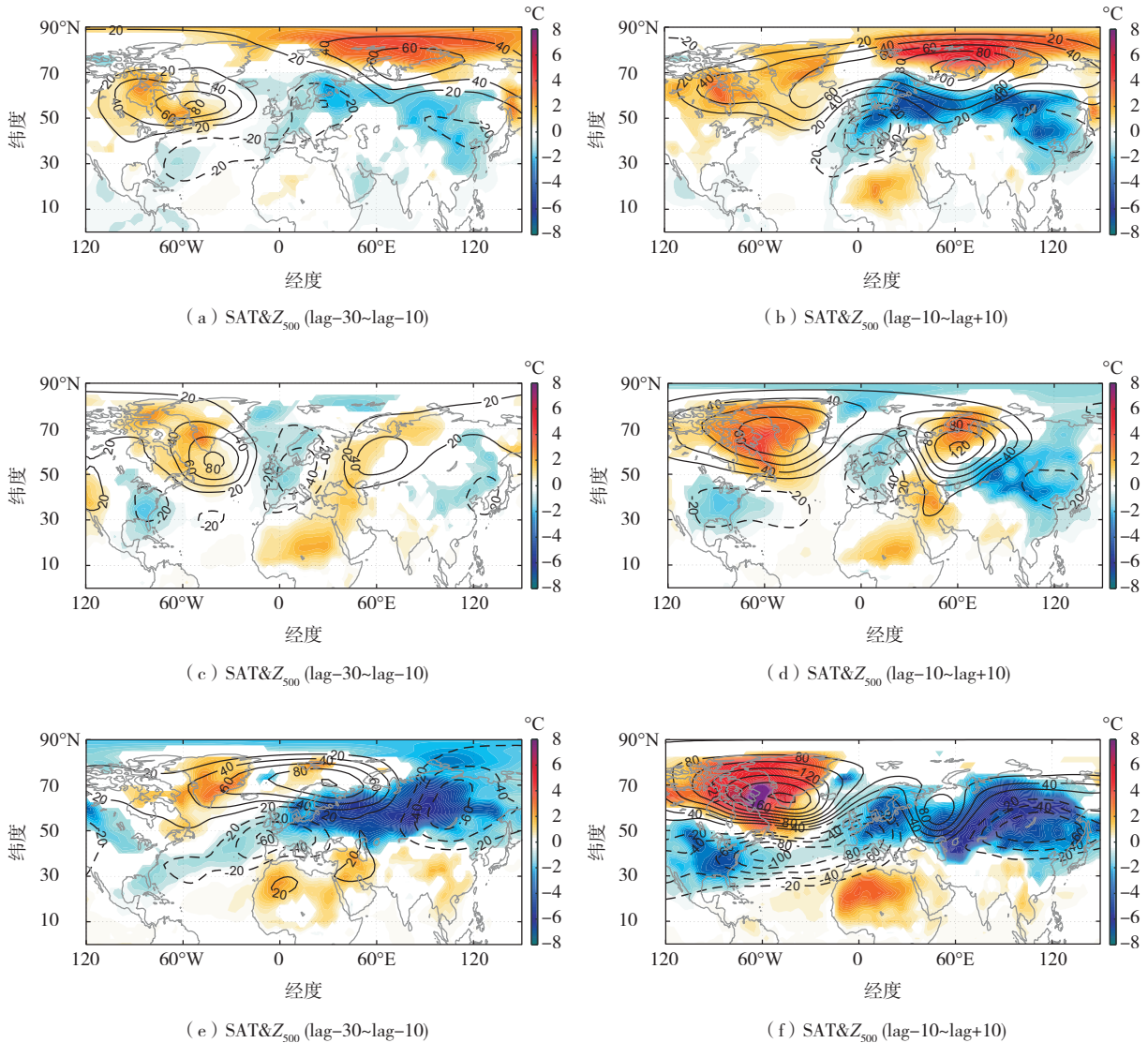


图 7 同图 6,但为弱的(a,b)、中等强度的(c,d)和强的(e,f)UB-NAO⁻事件

Fig.7 The same as Fig.6, but for weak (a/b), moderate (c/d), and strong (e/f) UB-NAO⁻ events

5 结论与讨论

欧亚地区冬季 SAT 异常的 EOF 前 4 个模态叠加可以解释其 56% 的方差变化,而聚类结果表明 4 个模态可以真实地代表欧亚冬季低温天气,进一步讨论了 4 个欧亚降温模态的空间和时间分布特征。在空间分布上 EOF1 和 EOF2 影响欧亚变冷的南北不均匀,但在 2 个欧亚大陆偏冷时期 (P1: 1965—1975 年, P2: 2005—2015 年) 二者均有贡献。EOF3 和 EOF4 影响欧亚变冷在东西方向上的不均匀,分别在 P1 和 P2 时期做出贡献。

研究发现欧亚地区 4 个主要的降温模态与欧洲-乌拉尔山地区的阻塞形势和 NAO 环流密切相关, EOF1 和 EOF2 分别由 NAO 和 UB 环流主导。NAO⁻ 环流在年际尺度上影响欧亚大陆偏北地区降温,在季节内尺度上的作用偏弱;而 UB 则是在季节内尺度上通过一次次过程给欧亚地区带来降温天气,在冬季平均上较弱。EOF3 和 EOF4 对应的环流较为复杂,与北半球大气遥相关波列相关系数更高。UB 环流在 EOF2 和 EOF4 中均发挥着显著的作用,但其背后的机理存在差异: EOF2 变化与太平洋上的海洋变率显著相关,而 EOF4 的出现源自北大西洋海面温度变化。因此太平洋或大西洋的海面温度变化以及尚未提到的北极海冰变化等气候变率可以通过调制 UB 环流进而影响欧亚变冷,一些研究^[58-61] 对此已经证实。

通过相关性分析发现, UB 的发生常常伴随 NAO⁺ 环流,而冬季 NAO⁻ 环流背景会增加 UB-NAO⁻ 的发生频率。研究计算了 UB-NAO⁺/UB-NAO⁻ 事件在亚洲大陆中纬度地区产生的降温平均强度分别约为 $-0.68\text{ }^{\circ}\text{C}/-1.30\text{ }^{\circ}\text{C}$, 平均经纬度位置在 $(81^{\circ}\text{E}, 44^{\circ}\text{N})/(94.5^{\circ}\text{E}, 50^{\circ}\text{N})$ 附近,因此 UB-NAO⁻ 事件平均造成的降温更强烈,且位置偏北偏东。此外, UB-NAO⁺ 事件往往可以给中东地区带来降温天气,而 UB-NAO⁻ 因为与 AO 环流有更好的相关性,可以在整个北半球中纬度地区均造成降温天气。值得注意的是,这种纬向降温异常的强度在亚洲最强,与 UB-NAO⁻ 体现的 AO 空间分布有关,而 AO 空间分布的变化与 UB-NAO⁻ 和欧亚变冷之间的关系有待进一步讨论。

UB 期间 NAO 环流的强度也会对造成的欧亚降

温有影响。UB-NAO⁺ 与偏南型欧亚降温模态有密切联系,进一步发现中等强度 NAO⁺ 环流下的 UB 贡献最大。当 NAO⁺ 环流很强时, UB 在欧亚地区产生的冷异常偏弱,这是因为强的 NAO⁺ 环流向欧亚大陆北部地区输送的北大西洋中纬度的暖湿空气增多,此时欧亚大陆北部增温明显, UB 向南输送的冷空气偏弱。UB-NAO⁻ 造成的欧亚降温偏北,研究发现强 NAO⁻ 环流背景下的 UB 对偏北型欧亚降温模态贡献最大,主要体现了 NAO⁻ 环流对偏北型欧亚降温模态的作用。当 NAO⁻ 环流很强时, UB 事件前期在欧亚大陆北部就有明显的降温异常,而 UB 发生可以进一步将冷空气向南输送,造成我国的低温天气。

参考文献:

- [1] COHEN J L, FURTADO J C, BARLOW M A, et al. Arctic warming, increasing snow cover and widespread boreal winter cooling[J]. *Environ Res Lett*, 2012, 7(1): 014007.
- [2] COHEN J, SCREEN J A, FURTADO J C, et al. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather[J]. *Nat Geosci*, 2014, 7(9): 627-637.
- [3] MORI M, WATANABE M, SHIOGAMA H, et al. Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades [J]. *Nat Geosci*, 2014, 7(12): 869-873.
- [4] RIMBU N, LOHMANN G, IONITA M. Interannual to multidecadal Euro-Atlantic blocking variability during winter and its relationship with extreme low temperatures in Europe[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 2014, 119(24): 13621-13636.
- [5] LUO D H, XIAO Y Q, YAO Y, et al. Impact of Ural blocking on winter warm Arctic-cold Eurasian anomalies. Part I: blocking-induced amplification [J]. *J Climate*, 2016, 29(11): 3925-3947.
- [6] McCUSKER K E, FYFE J C, SIGMOND M. Twenty-five winters of unexpected Eurasian cooling unlikely due to Arctic sea-ice loss[J]. *Nat Geosci*, 2016, 9(11): 838-842.
- [7] JOHNSON N C, XIE S P, KOSAKA Y, et al. Increasing occurrence of cold and warm extremes during the recent global warming slowdown [J]. *Nat Commun*, 2018, 9(1): 1724.
- [8] 周冠博,尹尽勇,渠鸿宇,等. 2020 年冬季海洋天气评述[J]. *海洋气象学报*, 2021, 41(2): 97-108.
- [9] 李燕,赛瀚,刘晓初,等. 辽宁东南部一次强降雪天气的

- 成因分析[J].海洋气象学报,2021,41(3):84-93.
- [10] 魏瑞江,王鑫.国内设施种植气象灾害研究进展[J].海洋气象学报,2021,41(4):73-81.
- [11] PETOUKHOV V, SEMENOV V A. A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 2010,115(D21):D21111.
- [12] 丁一汇,王遵娅,宋亚芳,等.中国南方2008年1月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系[J].气象学报,2008,66(5):808-825.
- [13] 高辉,陈丽娟,贾小龙,等.2008年1月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析Ⅱ.成因分析[J].气象,2008,34(4):101-106.
- [14] 李崇银,杨辉,顾薇.中国南方雨雪冰冻异常天气原因的分析[J].气候与环境研究,2008,13(2):113-122.
- [15] 陶诗言,卫捷.2008年1月我国南方严重冰雪灾害过程分析[J].气候与环境研究,2008,13(4):337-350.
- [16] 王东海,柳崇健,刘英,等.2008年1月中国南方低温雨雪冰冻天气特征及其天气动力学成因的初步分析[J].气象学报,2008,66(3):405-422.
- [17] 王凌,高歌,张强,等.2008年1月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析Ⅰ.气候特征与影响评估[J].气象,2008,34(4):95-100.
- [18] CATTIAUX J, VAUTARD R, CASSOU C, et al. Winter 2010 in Europe: a cold extreme in a warming climate[J]. *Geophys Res Lett*,2010,37(20):L20704.
- [19] COHEN J, FOSTER J, BARLOW M, et al. Winter 2009–2010: a case study of an extreme Arctic Oscillation event[J]. *Geophys Res Lett*,2010,37(17):L17707.
- [20] WANG L, CHEN W. Downward Arctic Oscillation signal associated with moderate weak stratospheric polar vortex and the cold December 2009 [J]. *Geophys Res Lett*, 2010,37(9):L09707.
- [21] ORSOLINI Y J, SENAN R, VITART F, et al. Influence of the Eurasian snow on the negative North Atlantic Oscillation in subseasonal forecasts of the cold winter 2009/2010[J]. *Climate Dyn*,2016,47(3/4):1325-1334.
- [22] 孙丞虎,任福民,周兵,等.2011/2012年冬季我国异常低温特征及可能成因分析[J].气象,2012,38(7):884-889.
- [23] 兰晓青,陈文.2011~2012年冬季欧亚大陆低温严寒事件与平流层北极涛动异常下传的影响[J].大气科学,2013,37(4):863-872.
- [24] LUO D H, YAO Y, FELDMSTEIN S B. Regime transition of the North Atlantic Oscillation and the extreme cold event over Europe in January–February 2012[J]. *Mon Wea Rev*,2014,142(12):4735-4757.
- [25] WU B Y, YANG K, FRANCIS J A. A cold event in Asia during January–February 2012 and its possible association with Arctic sea ice loss [J]. *J Climate*,2017,30(19):7971-7990.
- [26] 布和朝鲁,彭京备,谢作威,等.冬季大范围持续性极端低温事件与欧亚大陆大型斜脊斜槽系统研究进展[J].大气科学,2018,42(3):656-676.
- [27] LIU J P, CURRY J A, WANG H J, et al. Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*,2012,109(11):4074-4079.
- [28] WU B Y, HANDORF D, DETHLOFF K, et al. Winter weather patterns over northern Eurasia and Arctic sea ice loss [J]. *Mon Wea Rev*,2013,141(11):3786-3800.
- [29] 付建建,李双林,王彦明.前期海洋热状况异常影响2008年1月雪灾形成的初步研究[J].气候与环境研究,2008,13(4):478-490.
- [30] JEONG J H, HO C H, KIM B M. Influence of the Madden-Julian Oscillation on wintertime surface air temperature and cold surges in East Asia [J]. *J Geophys Res: Atmos*,2005,110(D11):D11104.
- [31] 马晓青,丁一汇,徐海明,等.2004/2005年冬季强寒潮事件与大气低频波动关系的研究[J].大气科学,2008,32(2):380-394.
- [32] 王允,张庆云,彭京备.东亚冬季环流季节内振荡与2008年初南方大雪关系[J].气候与环境研究,2008,13(4):459-467.
- [33] 马宁,李跃凤,琚建华.2008年初中国南方低温雨雪冰冻天气的季节内振荡特征[J].高原气象,2011,30(2):318-327.
- [34] 李崇银,顾薇.2008年1月乌拉尔阻塞高压异常活动的分析研究[J].大气科学,2010,34(5):865-874.
- [35] SATO K, INOUE J, WATANABE M. Influence of the Gulf Stream on the Barents Sea ice retreat and Eurasian coldness during early winter [J]. *Environ Res Lett*,2014,9(8):084009.
- [36] YE K H, MESSORI G. Two leading modes of wintertime atmospheric circulation drive the recent warm Arctic-cold Eurasia temperature pattern [J]. *J Climate*,2020,33(13):5565-5587.
- [37] WANG D X, WANG C Z, YANG X Y, et al. Winter Northern Hemisphere surface air temperature variability associated with the Arctic Oscillation and North Atlantic Oscillation [J]. *Geophys Res Lett*,2005,32(16):L16706.
- [38] GUAN X D, HUANG J P, GUO R X, et al. The role of

- dynamically induced variability in the recent warming trend slowdown over the Northern Hemisphere [J]. *Sci Rep*, 2015, 5(1): 12669.
- [39] HURRELL J W. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation [J]. *Science*, 1995, 269(5224): 676-679.
- [40] WALLACE J M. North Atlantic Oscillation/annular mode: two paradigms-one phenomenon [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2000, 126(564): 791-805.
- [41] ILES C, HEGERL G. Role of the North Atlantic Oscillation in decadal temperature trends [J]. *Environ Res Lett*, 2017, 12(11): 114010.
- [42] SONG J, LI C Y, ZHOU W. High and low latitude types of the downstream influences of the North Atlantic Oscillation [J]. *Climate Dyn*, 2014, 42(3/4): 1097-1111.
- [43] 李纵横, 宋洁, 殷明, 等. 冬季与北大西洋涛动相关 Rossby 波列传播特征及对下游气候的影响 [J]. *气候与环境研究*, 2019, 24(3): 289-301.
- [44] 陶诗言. 阻塞形势破坏时期的东亚一次寒潮过程 [J]. *气象学报*, 1957, 28(1): 63-74.
- [45] 杨贵名, 孔期, 毛冬艳, 等. 2008 年初“低温雨雪冰冻”灾害天气的持续性原因分析 [J]. *气象学报*, 2008, 66(5): 836-849.
- [46] DIAO Y N, LI J P, LUO D H. A new blocking index and its application: blocking action in the Northern Hemisphere [J]. *J Climate*, 2006, 19(19): 4819-4839.
- [47] TAKAYA K, NAKAMURA H. Mechanisms of intraseasonal amplification of the cold Siberian high [J]. *J Atmos Sci*, 2005, 62(12): 4423-4440.
- [48] WANG C Z, LIU H L, LEE S K. The record-breaking cold temperatures during the winter of 2009/2010 in the Northern Hemisphere [J]. *Atmos Sci Lett*, 2010, 11(3): 161-168.
- [49] WANG L, CHEN W. The East Asian winter monsoon: re-amplification in the mid-2000s [J]. *Chin Sci Bull*, 2014, 59(4): 430-436.
- [50] 吴静, 刁一娜, 庄绪宗. 冬季乌拉尔山阻塞与东亚冬季风的联系分析 [J]. *气候与环境研究*, 2016, 21(5): 577-585.
- [51] 胡思乐, 李艳, 方从羲, 等. 乌拉尔山阻塞高压和西伯利亚高压协同作用与东亚冬季风之间的联系 [J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(4): 440-452.
- [52] WALLACE J M, THOMPSON D W J. The Pacific center of action of the Northern Hemisphere annular mode: real or artifact? [J]. *J Climate*, 2002, 15(14): 1987-1991.
- [53] DESER C, ALEXANDER M A, XIE S P, et al. Sea surface temperature variability: patterns and mechanisms [J]. *Annu Rev Mar Sci*, 2010, 2: 115-143.
- [54] SUN C, LI J P, JIN F F. A delayed oscillator model for the quasi-periodic multidecadal variability of the NAO [J]. *Climate Dyn*, 2015, 45(7/8): 2083-2099.
- [55] 柴晶晶, 刁一娜. 北大西洋涛动指数变化与北半球冬季阻塞活动 [J]. *大气科学*, 2011, 35(2): 326-338.
- [56] 肖贻青. 乌拉尔山阻塞与北大西洋涛动的关系及其对中国冬季天气的影响 [J]. *高原气象*, 2017, 36(6): 1499-1511.
- [57] LUO D H, XIAO Y Q, DIAO Y N, et al. Impact of Ural blocking on winter warm Arctic-cold Eurasian anomalies. Part II: the link to the North Atlantic Oscillation [J]. *J Climate*, 2016, 29(11): 3949-3971.
- [58] YAO Y, LUO D H, DAI A G, et al. 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*, 2017, 30(10): 3549-3568.
- [59] LUO D H, YAO Y, DAI A G, et al. Increased quasi stationarity and persistence of winter Ural blocking and Eurasian extreme cold events in response to Arctic warming. Part II: a theoretical explanation [J]. *J Climate*, 2017, 30(10): 3569-3587.
- [60] LUO B H, LUO D H, DAI A G, et al. A connection of winter Eurasian cold anomaly to the modulation of Ural blocking by ENSO [J]. *Geophys Res Lett*, 2021, 48(17): 094304.
- [61] LUO B H, LUO D H, DAI A G, et al. The modulation of Interdecadal Pacific Oscillation and Atlantic Multidecadal Oscillation on winter Eurasian cold anomaly via the Ural blocking change [J]. *Climate Dyn*, 2022, 59(1/2): 127-150.
- [62] SCHERRER S C, CROCI-MASPOLI M, SCHWIERZ C, et al. Two-dimensional indices of atmospheric blocking and their statistical relationship with winter climate patterns in the Euro-Atlantic region [J]. *Int J Climatol*, 2006, 26(2): 233-249.
- [63] DAVINI P, CAGNAZZO C, GUALDI S, et al. Bidimensional diagnostics, variability, and trends of Northern Hemisphere blocking [J]. *J Climate*, 2012, 25(19): 6496-6509.
- [64] DAVINI P, CAGNAZZO C, NEALE R, et al. Coupling between Greenland blocking and the North Atlantic Oscillation pattern [J]. *Geophys Res Lett*, 2012, 39(14): L14701.