徐玮平, 张杰, 刘晨, 等. 2020. 20 世纪 90 年代以后华北初春低温增强和北大西洋海温关系 [J]. 大气科学, 44(6): 1167−1187. XU Weiping, ZHANG Jie, LIU Chen, et al. 2020. Relationship between the Early-Spring Low-Temperature Enhancement in North China and Sea Surface Temperature in the North Atlantic since the 1990s [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(6): 1167−1187. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1912.19127

20 世纪 90 年代以后华北初春低温增强和北大西洋海温关系

徐玮平[1, 2] 张杰[1] 刘晨[1] 孟祥新[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/气象灾害省部共建教育部重点实验室，南京 210044
2 山东省气候中心，济南 250031

摘 要 本文利用 ECMWF 再分析资料及 Hadley 中心提供的海温数据分析了 20 世纪 90 年代以后华北地区初春低温增强的原因，并通过数值模拟结果予以验证。结果表明，北大西洋“马蹄型”海温模态与影响我国华北地区的欧亚波列存在显著的相关关系。同时该海温模态与 1997 年以后北大西洋关键区垂直波作用通量有着较密切的相关关系，1997 年以后北大西洋地区的 500 hPa 环流模态，整体呈现出东移南撤的趋势。1997 年以后格陵兰岛东侧表面温度受异常热力强迫导致正值区增多，同时此处西风急流加大，有利于 Rossby 波向下游传播，导致其下游欧洲大陆地区形成暖脊。通过局地多尺度能量涡度分析法（Localized Multiscale Energy and Vorticity Analysis，简称 MS-EVA）证明格陵兰岛东侧关键区表面温度的异常热力强迫作用与气压梯度力在对流层整层做正功，导致高层动能的增加并向外辐散，使得脊加强向北伸展。通过欧亚波列致使下游华北地区上空气旋式异常加强，促使亚洲极涡加强和稳定维持，华北地区温度下降剧烈，极端低温事件增多。最后通过 CAM5.1 模式模拟研究了北大西洋“马蹄型”海温模态对大气环流异常及华北地区极端低温的影响。模拟结果很好地验证了观测结果，进一步表明该海温模态可以通过激发出欧亚波列，影响欧亚大陆大气环流异常，进而导致我国华北地区气旋性加强和经向环流加大，极端低温事件增多。

关键词 极端低温 北大西洋海温 能量分析 CAM5.1 模式
文章编号 1006-9895(2020)06-1167-21 **中图分类号** P467 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1912.19127

Relationship between the Early-Spring Low-Temperature Enhancement in North China and Sea Surface Temperature in the North Atlantic since the 1990s

XU Weiping[1, 2], ZHANG Jie[1], LIU Chen[1], and MENG Xiangxin[2]

1 *Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education*, *Nanjing University of Information Science & Technology*, *Nanjing*, 210044
2 *Shandong Climate Center*, *Jinan* 250031

收稿日期 2019-03-13；**网络预出版日期** 2020-03-17
作者简介 徐玮平，男，1990 年出生，硕士研究生，研究方向为极端气候与数值模拟。E-mail: 245332105@qq.com
通讯作者 张杰，E-mail: zhangj@nuist.edu.cn
资助项目 国家自然科学基金项目 41975083、41630426，中国气象局预报员专项 CMAYBY2019-066
Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41975083, 41630426), Special Forecast for China Meteorological Administration (Grant CMAYBY2019-066)

Abstract Based on reanalysis data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) and sea-surface temperature (SST) data from the Hadley Center (Hadley), in this paper, we present our analyses and determination of the reason for the extreme low-temperature events of the North China's enhancement in spring since the 1990s, which we verified by numerical simulation. The results indicate a significant correlation between the North Atlantic "Horse Hoof" SST mode and the Eurasian (EU) wave train, which could be a factor in North China's extreme low-temperature events. The SST mode was also found to be closely correlated with the vertical wave energy in key areas of the North Atlantic after 1997. The 500-hPa circulation mode in the North Atlantic for the same period showed a trend of eastward movement and southward withdrawal. Since 1997, the expansion of the regional scope of positive surface temperature forced by thermal anomalies adjacent to eastern Greenland, as well as increases in the westerly jet stream, could have stimulated the EU pattern and generated warm ridges downstream of the Eurasian continent. The results obtained using the localized multiscale energy and vorticity analysis (MS-EVA) method revealed that the forces of the surface thermal anomalies and the pressure gradient in the key area of eastern Greenland have had a positive effect on the whole troposphere, which have led to an increase and divergence of high-level kinetic energy and a strengthening of the ridge toward the north. Via the EU wave train, the cyclonic anomaly was strengthened downstream from North China, and the Asian polar vortex was both strengthened and maintained. The temperature in North China decreased sharply, which increased the number of extreme low-temperature events. Finally, we used the CAM5.1 model to simulate the effects of the North Atlantic "Horse Hoof" SST mode on the atmospheric circulation anomalies and the extreme low temperatures in North China. We found the simulation results to agree well with the observation results. This further confirms that the SST mode can affect the atmospheric circulation anomalies in Eurasia by stimulating the EU wave train, thereby leading to the intensification of cyclones and meridional circulation, as well as increasing the number of extreme low-temperature events in North China.

Keywords Extreme low temperature, North Atlantic sea surface temperature, Energy analysis, Community Atmosphere Model (CAM5.1)

1 引言

IPCC 最新评估报告指出，在全球变暖的背景下，极端天气气候事件频发（Seneviratne et al., 2012; Donat et al., 2013; 王岱等, 2016）。极端温度事件的强度和频率出现了显著的变化（Brabson and Palutikof, 2002; 秦大河, 2004; New et al., 2006; Zhou et al., 2018），其中近 10 年来中国冬季气温变暖的范围和程度在减弱（任国玉等, 2005; 王晓娟等, 2012; 李维京等, 2013），并且近几年我国极端低温事件明显增多、增强（王凌等, 2008; 孙楠等, 2016）。研究发现我国极端低温事件具有明显的区域性特征（任福民和翟盘茂, 1998; Zhou et al., 2016; Wang Y J et al., 2017），对此许多学者对我国分区域进行了大量的研究。付冬雪等（2011）发现冬半年全国范围内极端低温频数变化均呈减小趋势，其中西北和东北地区极端低温事件呈现显著减少的趋势（杨金虎等, 2007; 陈少勇等, 2011; 张霏燕和徐海明, 2011; 秦玉琳, 2012）；但华北地区 2000 年以后冬季持续性异常低温事件有所增加（刘樱等, 2016）。

极端气候事件是中高纬大气环流异常作用的结果（Zhou and Wang, 2008）。研究发现中高纬系统与极端低温事件密切相关（李艳等, 2018）。Cholaw et al.（2011）发现大型斜压槽脊是我国低温的关键环流系统。乌拉尔山阻塞高压持续发展，东亚大槽长期稳定维持，槽后冷空气不断南下，可造成地面气温偏低（朱艳峰等, 2007）。当北大西洋涛动 NAO（North Atlantic Oscillation）、北极涛动 AO（Arctic Oscillation）为正（负）位相时，通过改变纬向温度平流，进而导致中国北方气温偏高（低）（李春和方之芳, 2005）。孙诚和李建平（2012）研究发现，2009/2010 年冬季，我国北方异常低温事件与 NAO 负位相密切相关。NAO 引起的大气环流异常有利于冷涡在贝加尔湖到东北一带维持，导致东北地区气温偏低，冷日（夜）频发（韩方红等, 2018）。另外 AO 异常负位相时，冬季风偏强，西伯利亚高压加强，高空东亚大槽加强，我国温度偏低（何春和何金海, 2003; 龚道溢和王绍武, 2003; 琚建华等, 2004; 杨辉和李崇银, 2008）。还有研究表明北太平洋涛动 NPO（North Pacific Oscillation）指数异常偏小，发生区域性极端低温事件的概率较高（王晓娟等, 2013）。Wang et al.（2019）指出欧亚型 EU（The Eurasian teleconn-

ection）与东亚地区地表温度和降水密切相关；当中北大西洋海温偏低（高），可以激发出 EU 正（负）位相，导致我国气温偏低（高）（Li, 2004; 曲金华等, 2006）。

中高纬大气环流形势的形成与维持主要是通过天气尺度波的扰动能量供应，以及更多的能量向大尺度环流形势输送与转化（Hoskins et al., 1983; 吴国雄等, 1994）。由于下垫面热力异常激发出 Rossby 波向外频散，形成遥相关波列（Huang and Sun, 1992; Wang and He, 2015），导致大气环流形势异常，极端气候事件频发。

维持大气遥相关的内部动力学机制主要是通过以下两种能量转换过程（Chen et al., 2013）：一方面，通过正压转换过程从基本气流中获得能量；另一方面，通过斜压不稳定过程从平均流中获得有效位能，能量的增加导致大气扰动的发生，极端气候事件频发（Hu et al., 2004; Hsu et al., 2011）。另外，不同尺度之间的动能输送也是动能收支的一部分（贺海晏等, 1992; Tsou et al., 2014）。根据最新研究表明（徐玮平等, 2018），1990 年代以后格陵兰岛以东关键区有波能向东频散，导致贝加尔湖附近的槽加强，致使华北地区上空气旋式环流异常加强，有利于极端低温的发生和维持。

另外，许多学者也针对外强迫源与极端低温的关系进行了大量研究。例如厄尔尼诺 ENSO（El Niño/La Niña–Southern Oscillation）与 2018 年我国南方大范围低温雨雪密切相关（丁一汇等, 2008; 李崇银等, 2008; 张庆云等, 2008; Wang Z Y et al., 2017）。Sun et al.（2019）指出喀拉海地区海冰减少导致我国中部降雪事件增多。另外 Liu and Zhou（2018）研究发现强烈的太阳活动通过加快平流层季节转换，导致我国华北地区降温。目前华北地区极端低温成因大多探讨环流异常和大气内部变率，但是其与北大西洋海温异常及其大气环流持续性异常的原因及机理尚不完全清楚。本文重点分析 20 世纪 90 年代以后华北地区极端低温增强与北大西洋海温之间可能的联系及其内部的能量转换过程。最后利用模式模拟北大西洋海温理想试验对华北地区极端低温的影响，进一步验证观测结果。

2　资料与方法

2.1　资料

本文使用的资料包括：

（1）1979～2015 年欧洲中期天气预报中心（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts，ECMWF）的 ERA-interim 再分析资料。垂直方向 1000～100 hPa 共分为 27 层，其中 1000～750 hPa 间隔 25 hPa，750～250 hPa 间隔 50 hPa，250～100 hPa 间隔 25 hPa，空间分辨率分别为 0.75°×0.75°逐月及 2.5°×2.5°的逐日再分析资料，要素包括：高度场、温度场、三维风场和地表 2 m 温度。

（2）英国哈德莱中心（Hadley Center）1871～2015 年逐月全球海温资料（Rayner et al., 2003）水平分辨率为 1°×1°（https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/sst-data-hadisst-v11）[2019-03-13]。

（3）1961～2015 年我国初春 3 月 753 个台站逐日温度资料。选择出温度资料相对完整的我国北方（30°N～55°N，73°E～135°E）501 个观测站点作为研究对象。

2.2　研究方法

由于本文延续徐玮平等（2018）的研究，因此主要针对 1979～2015 年华北地区（35°N～41°N，112°E～123°E）初春（3 月）期间的极端低温事件。

冷偏差（徐玮平等，2018）指 1961～2015 年中国北方区域（30°N～55°N, 73°E～135°E）初春（3 月）每站准双周（15 天）最低温度距平。通过使用百分位法（翟盘茂和潘晓华, 2003），将冷偏差序列进行升序排列，得到第 5 个百分位值，将 55 年的百分位值的平均值定义为某站极端低温事件的阈值，如果某日的冷偏差低于该日的极端低温事件的阈值，则认为该日出现极端低温事件。

采用经验正交展开分解（EOF）、三维波作用通量、相关分析等方法研究影响华北极端低温的欧亚波列与北大西洋海温的关系。通过使用回归分析、奇异值分解方法（Singular Value Decomposition, SVD）（Bretherton et al., 1992; Wallace et al., 1992）探究表面温度和关键区能量之间的联系，显著性水平的检验方法为 t 检验。

能量方面使用以多尺度子空间变换（Multiscale Window Transform, MWT）为基础建立的局地多尺度能量涡度分析法（Localized Multiscale Energy and Vorticity Analysis, MS-EVA）（Liang and Robinson, 2005; Liang and Anderson, 2007; Liang, 2016）研究初春华北地区高空动能来源。MWT 通

过泛函分析使得一个时间或空间序列正交分解成不同尺度的子空间，在此分解过程中并能够保持物理过程的局地性特点（卢慧超等, 2017）。

以下为根据 MS-EVA 方法推导出的动能方程 [具体推导过程详见 Liang（2016）]：

$$\frac{\partial K}{\partial t} = -b - \nabla \cdot Q_k - \nabla \cdot Q_p + E + \Gamma, \qquad (1)$$

动能收支方程各项的简称为

$$K_t = \mathrm{BUOY} + \mathrm{QK} + \mathrm{QP} + \mathrm{R} + \mathrm{T},\ \mathrm{T} = \mathrm{T}_{01} + \mathrm{T}_{21}, \qquad (2)$$

其中，K_t ($\partial K/\partial t$) 表示动能的变化率；BUOY(-b) 为浮力转换项，表示有效位能向动能的转换；QK ($-\nabla \cdot Q_k$) 表示动能不同尺度子空间的平流输送项之和；QP($-\nabla \cdot Q_p$) 表示由于气压梯度力做功导致动能增加项；R(E) 表示摩擦耗散的动能；T(Γ) 代表动能在不同尺度之间的转换项，该转换已被广泛使用（Lau and Lau, 1992; Maloney and Dickinson, 2003; Hsu et al., 2009），T_{01} 代表大尺度向季节平均尺度（低频振荡）的动能跨尺度传输项，T_{21} 代表天气尺度向季节平均尺度（高频扰动）的动能跨尺度传输项。

2.3 模式试验

本文使用美国国家大气研究中心（National Center for Atmospheric Research, NCAR）发布的地球系统模式（Community Earth System Model 1_0_3, CESM1.0.3）中的大气模块 CAM5.1 设计北大西洋海温变化的理想试验，探讨北大西洋海温模态对大气环流和华北地区极端低温的影响。该模式既可与其他模式（如海洋、陆地模式等）耦合使用，也可以单独模拟大气环流的变化。该模式垂直方向上使用 σ-p 混合坐标系，共分为 30 层（Neale et al., 2010），模式层顶高度约为 3.643 hPa。选取纬向自西向东均匀分布 96 个格点，经向由南往北均匀分布 144 个格点的水平分辨率为 1.9°×2.5°的多年平均气候态海表温度资料作为海洋边界条件，该资料是美国国家海洋和大气管理局（National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA）与哈德莱海温的融合资料，试验模拟 20 年。为了研究北大西洋“马蹄型”海温模态对我国华北地区极端低温的影响，设计了两个数值试验，即控制试验和敏感性试验。

控制试验：模式运行过程中海表温度采用多年平均的气候态海表温度，即在模拟过程中没有海表温度的年际及长期变化趋势（黄晓璐等, 2015）。

敏感性试验：在控制试验中，北大西洋地区叠加“马蹄型”海温模态的空间场，其他区域仍采用气候态海表温度。因此，敏感性试验与控制试验的差值场表示北大西洋“马蹄型”海温模态对大气环流异常及华北地区极端低温的影响。

3 结果与分析

3.1 欧亚波列与北大西洋海温的遥相关关系

3.1.1 冷偏差与欧亚波列模态

徐玮平等（2018）研究发现，华北地区极端冷偏差发生频率在 20 世纪 80 年代前后和 21 世纪具有明显增大的现象（图 1），极端低温事件频发。两类年代际典型极端低温年份对应的 500 hPa 环流距平场可以发现（图 2），80 年代前后（1979～1982 年）整体环流形式呈现出“三波型”结构，而 21 世纪初（2004、2007 和 2015 年）呈现出“准两波型”的结构。接下来对 1979～2015 年 3 月 200 hPa 经向风场进行 EOF 时空分解（图 3），前两个模态均通过 North 检验，具有显著性差异。第一模态中高纬反映出欧亚波列（EU）的分布形态，中低纬反映出丝绸之路波列 SRP（Silk Road pattern）（Wallace and Gutzler, 1981; Zhang et al., 2019）分布型；第二模态呈现出斯堪的纳维亚型波列模态（杨莲梅和张庆云, 2008）。经向风场的异常加大

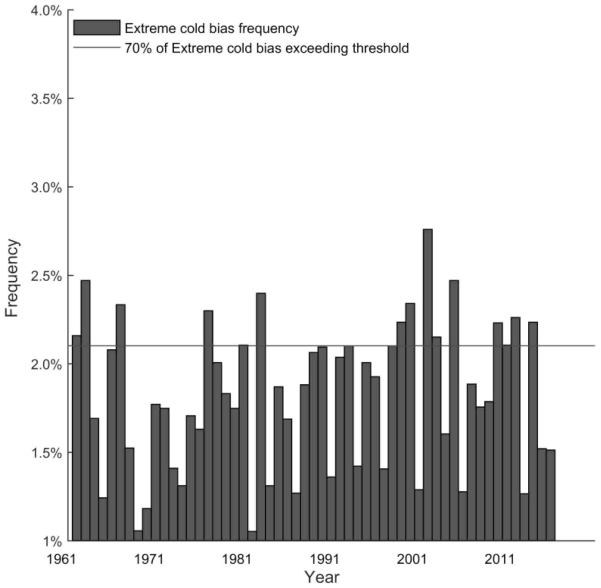

图 1 1961～2015 年华北地区初春（3 月）极端冷偏差发生频率

Fig. 1 Frequency of extreme cold bias in early spring (March) in North China from 1961 to 2015

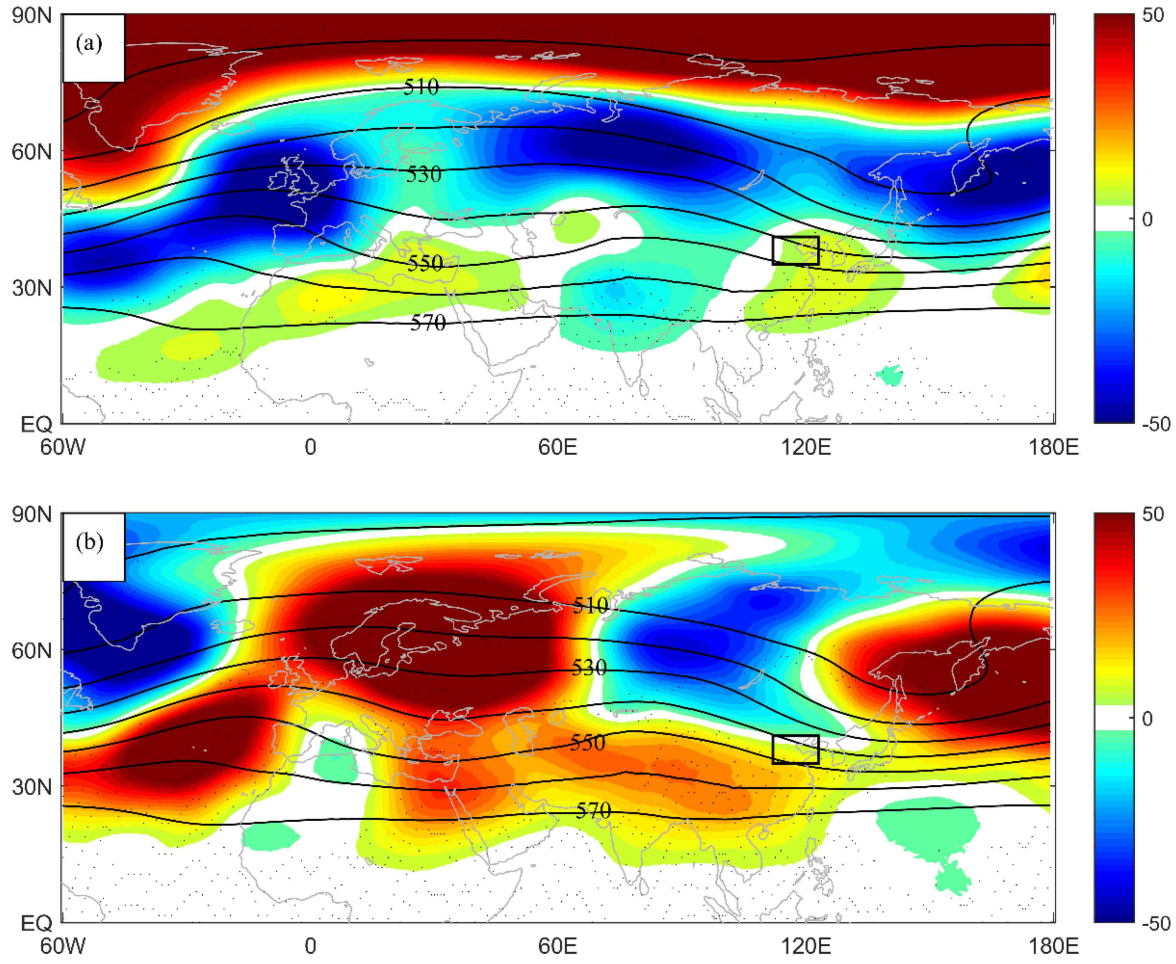

图 2　（a）20 世纪 80 年代前、后和（b）21 世纪初合成的 500 hPa 位势高度距平场（阴影，单位：10^{-1} m^2 s^2）和位势高度气候平均场（等值线，单位：10^{-4} m^2 s^2）。打点区域为通过 90% 显著性检验的区域，方框为 122°E 以东的我国华北地区，黑色等直线从北往南分别为 *Z*=510 dagpm，*Z*=530 dagpm，*Z*=550 dagpm，*Z*=570 dagpm

Fig. 2　Distribution of geopotential height anomaly fields (shaded areas, units: 10^{-1}m^2 s^{-2}) and geopotential height climatic fields (contours, units: 10^{-4} m^2 s^{-2}) at 500 hPa in (a) the 1980s (1979–1982) and (b) 21st century (2004, 2007 and 2015). The dotted areas indicate significance at the 90% confidence level, the rectangle indicates North China east of 122°E. the black contours are *Z*=510 dagpm, *Z*=530 dagpm, *Z*=550 dagpm, *Z*=570 dagpm

有利于华北地区持续性异常低温事件的爆发。为了探究中高纬上空存在的欧亚波列模态与极端低温的关系，分别对欧亚波列模态（PC1、PC2）与极端冷偏差频率进行相关分析，其中欧亚波列模态（PC2）与极端冷偏差频率具有较好的相关性，相关系数达到 0.289 且通过了 90% 的显著性检验（图略）。另外通过 MK 检验方法大致确定 1997 年为其突变年（图略）。上述分析表明，欧亚波列模态（PC2）与冷偏差有着密切的联系，对极端低温事件的发生具有一定的影响。

3.1.2　北大西洋海温时空特征

近年来许多学者对于亚洲气候的研究重点放在北大西洋的海温上（Yang et al., 2004; 曲金华等, 2006; 张霏燕和徐海明, 2011; 肖贻青, 2017），其中有学者指出，北大西洋海温异常可以通过影响北大西洋涛动，进而对我国的大气环流产生影响（梅笑冬 , 2015）。本文使用经验正交展开分解对 1979～2015 年北大西洋（0°～80°N，70°W～30°E）地区初春（3 月）海温距平资料进行时空分解（图 4），前三个模态均通过 North 检验，具有显著性差异。北大西洋初春（3 月）海温距平第一模态贡献占总方差的 21.2%，从空间分布上来看，北大西洋海温模态整体呈现出“马蹄型”。其中大约在北美东海岸（20°N～40°N）地区为负距平，其余地区海温主要以正距平分布为主，另外在格陵兰岛以东洋面地区对应着显著的负距平。第一模态对

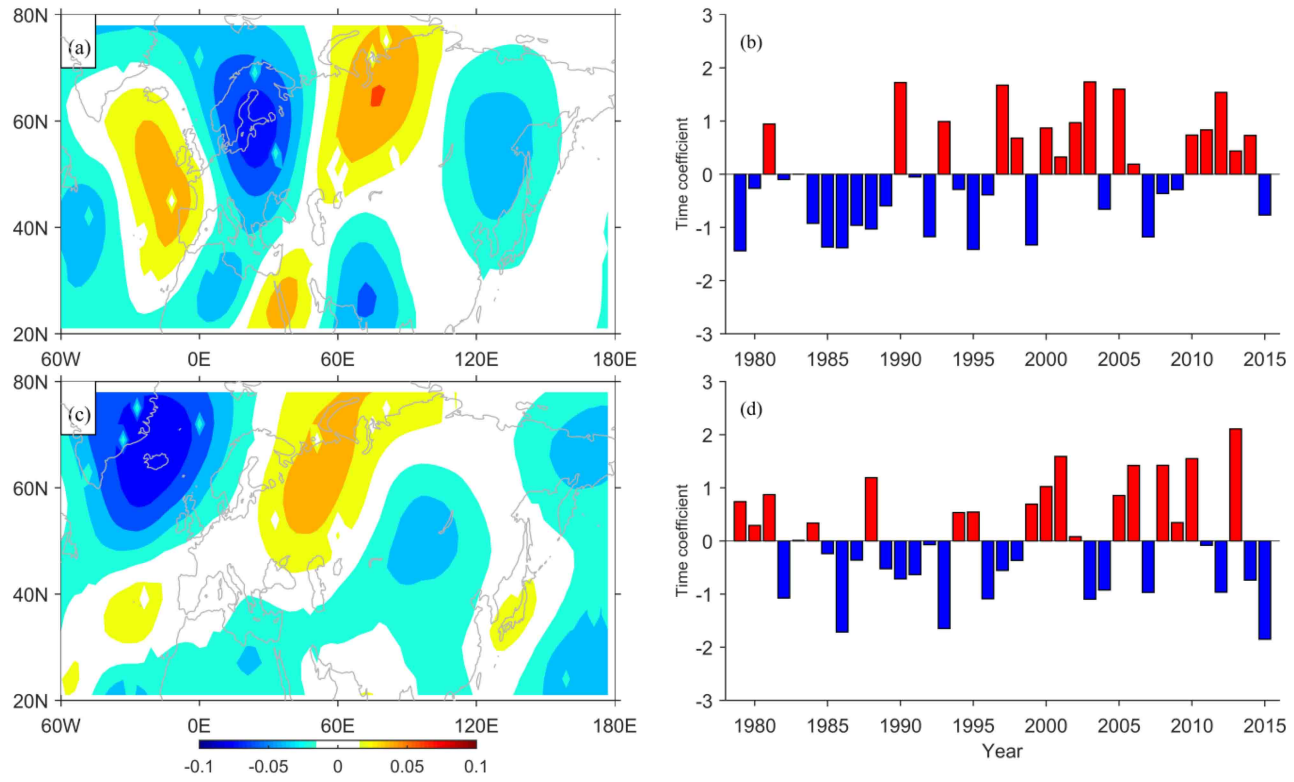

图 3 1979～2015 年 3 月 200 hPa 经向风场 EOF 展开的前两个特征向量的（a，c）空间分布及其（b，d）时间系数

Fig. 3 (a, c) First and second EOF modes and (b, d) their time coefficients of 200-hPa meridional wind field in March during the 1979–2015 period

应的时间序列整体呈现出上升趋势，通过了 95% 的显著性水平检验，年代际特征明显。在 20 世纪 90 年代后期存在明显的转折，在此之前主要以负位相为主，以后主要以正位相为主，海温增加明显。

第二模态贡献占总方差的 14.8%，北大西洋海温模态从北向南基本呈现出“+、−、+”的“三极子”型，在格陵兰岛南部和北非西部海域对应着正距平，而两者中间区域为负距平。其对应的时间序列呈现出较大的波动，整体呈现上升的趋势，但没有通过显著性检验，20 世纪 80 年代后期有明显的波动上升趋势。第三模态贡献占总方差的 9.7%，海温呈现出多个正负值区域，第三模态对应的时间序列整体呈现出波动下降趋势，通过了 95% 的显著性水平检验，波动性较大，波动振幅较大。

3.1.3 欧亚波列模态与北大西洋海温相关关系

由于大气对海温、海冰、积雪和土壤湿度等外强迫因子的响应，导致大范围的环流异常（杨修群和黄士松, 1993; 李崇银, 1995）。因此，为了探究中高纬上空存在的欧亚波列模态与北大西洋海温的联系，本文选取了 1979～2015 年的欧亚波列模指数（PC1、PC2）分别与北大西洋海温 EOF 时空分解后的前三个时间系数进行相关分析（图略）。研究发现欧亚波列模指数 PC2 与北大西洋海温 PC1 呈正相关关系，相关系数达到了 0.293 且通过了 90% 的显著性检验，而欧亚波列模指数 PC1 与北大西洋海温没有明显的显著性相关关系（图略）。上述分析表明北大西洋海温模态 PC1 与欧亚波列模指数 PC2 具有密切的联系，同时对极端低温事件的发生具有一定的影响。

3.2 北大西洋海温与关键强迫源关系

3.2.1 两类年代际极端低温的能量频散特征

徐玮平等（2018）进一步发现华北地区 80 年代前后和 21 世纪两类年代际极端低温事件的环流形势存在着明显的经向和纬向异常的现象。为了分析环流异常的原因，通过波作用通量来描述波动能量的频散特征（Takaya and Nakamura, 1997, 2001; 卢楚翰等, 2013; Wang and He, 2015），进而建立北大西洋与我国华北地区在大气波扰能量上的联系。波作用通量的背景场为气候平均态，扰动场为极端年份相对于气候态的距平。图 5 为 1997 年前后华北地区极端低温年份时罗斯贝波异常能量频散特征，

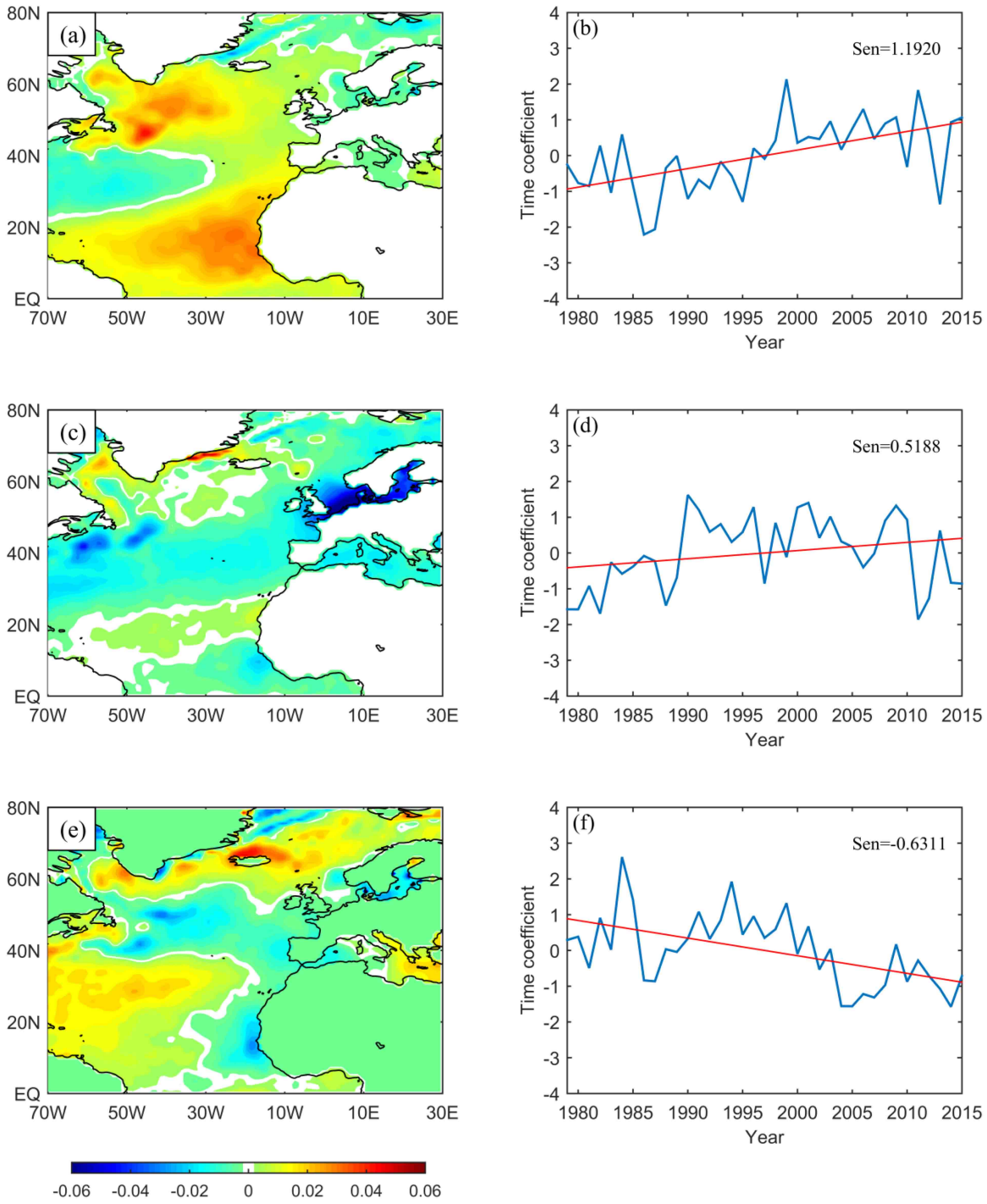

图 4　初春（3 月）北大西洋气候态海温 EOF 分解前（a，c，e）三个模态的空间分布及（b，d，f）相对应的标准化时间系数（红色实线为北大西洋海温变化趋势）

Fig. 4　(a, c, e) Spatial distributions and (b, d, f) its corresponding normalized time coefficients of the first to third EOF modes of the North Atlantic climatic SST in early spring (March). The red line indicates the trend of the North Atlantic SST

重点关注北大西洋洋面的波作用通量关键区，其中可以通过垂直波作用通量（TNZ）判断上层的波能量是否来源于底层，进而判断是否与海平面和陆地表面的属性有关。

根据极端冷偏差发生频率，分别从 1997 年前后选取发生频率较大的特殊年份。研究发现 1997 年以前（1982、1984、1989、1990、1993、1996 年）格陵兰岛南面和北欧附近的北大西洋洋面是最显著

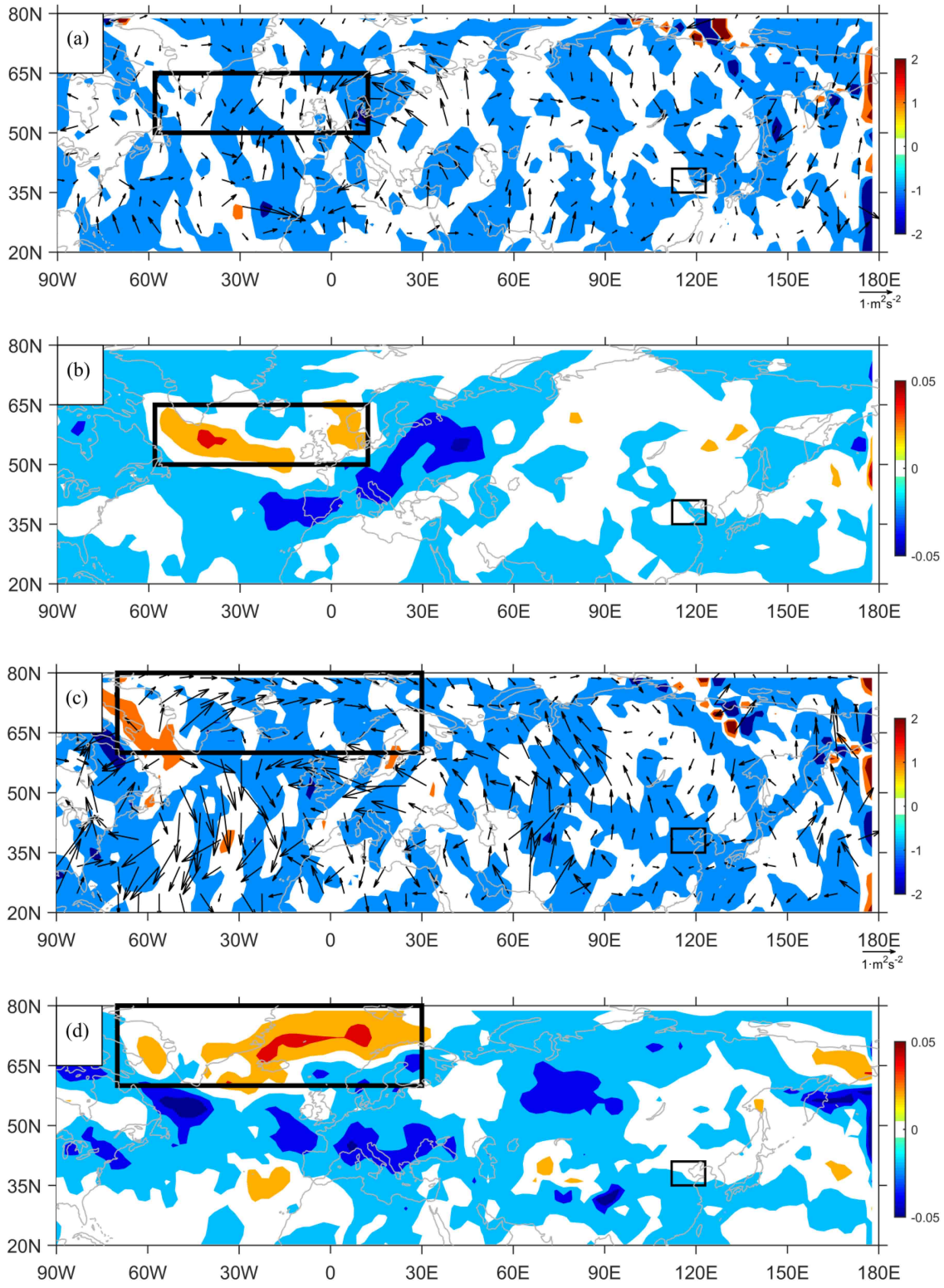

图 5　1997 年（a，b）前、（c，d）后北大西洋地区与欧亚大陆 3 月（a，c）300 hPa 波作用通量（箭头，单位：$m^2\ s^{-2}$) 与通量水平散度（阴影，单位：$10^{-5}\ m\ s^{-2}$）及（b，d）500 hPa 波作用通量垂直分量的合成（阴影，单位：$m^2\ s^{-2}$)。细线方框为 112°E 以东的我国华北地区，粗线方框为关键区

Fig. 5　Compositions of (a, c) wave activity fluxes (vectors, units: $m^2\ s^{-2}$) and flux horizontal divergences (shaded areas, units: $10^{-5}\ m\ s^{-2}$) at 300 hPa and (b, d) the vertical components of wave activity fluxes (shaded areas, units: $m^2\ s^{-2}$) at 500 hPa in the North Atlantic and Eurasia in March (a, b) before and (c, d) after 1997. The small rectangle indicates North China east of 112°E and the large rectangle is the key area

的垂直波作用通量正值中心，说明此关键区是北半球最大的波能量源地。而 1997 年以后（2004、2010、2015 年）格陵兰岛以东洋面为北半球最大的波能量源地。1997 年前后极端低温环流异常的关键区存在着较大的不同，这充分说明 80 年代前后和 21 世纪两类年代际极端低温环流异常关键强迫源发生位置的改变，这是导致我国华北两类年代际极端低温异常波列出现的原因。

3.2.2　海温与波作用通量关系

对北大西洋海温模态与波作用通量的关系进行讨论，分别对 1997 年前后北大西洋关键区垂直波作用通量进行区域平均，得到 1997 年以前关键区垂直波作用通量（TNZ1）序列和 1997 年以后关键区垂直波作用通量（TNZ2）序列，之后这两个序列分别与北大西洋海温模态 PC1 进行相关分析（图略）。研究发现 TNZ2 与同期海温 PC1 的相关系数达到了−0.586，通过了 99% 的显著性检验，具有显著的负相关关系。而 TNZ1 与海温 PC1 没有显著性相关关系。综上所述，北大西洋海温模态 PC1 与 1997 年以后北大西洋关键区垂直波作用通量 TNZ2 上传有着较密切的相关关系。

进一步确定北大西洋海温模态 PC1 与垂直波作用通量的对应关系，分别对 TNZ1，TNZ2 序列与同期北大西洋海温距平场进行回归分析（图 6）。研究发现 TNZ1 序列对同期北大西洋海温距平场进行回归（图 6a），整体呈现出多个正负值区域，

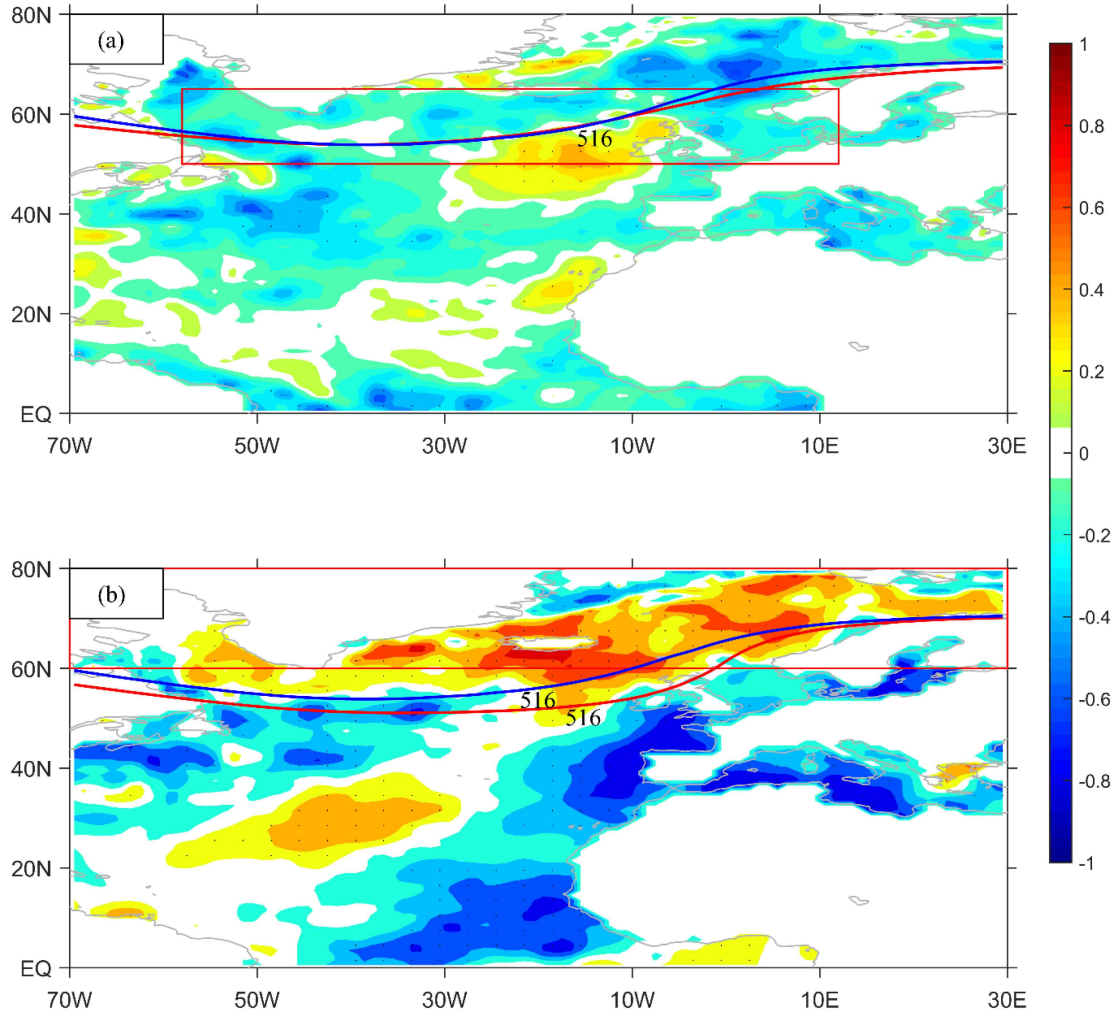

图 6　1997 年（a）前、（b）后关键区 500 hPa 垂直波作用通量序列回归同期的海温距平场（阴影）。打点区域为通过 90% 信度检验的显著区域，红色方框为关键区，蓝色和红色等值线分别为 516 位势什米气候态环流场和异常环流场（均经过标准化处理）

Fig. 6　Simultaneous regressions of the SST anomaly field regressed onto the time series of the 500 hPa vertical components of wave activity fluxes (a) before and (b) after 1997. The dotted areas indicate the 90% level of confidence, the red box indicates the key area, the blue and red contour line shows the 516 geopotential climatic circulation field and abnormal circulation field. All data have been standardized

其中在格陵兰岛以东洋面海温为明显的负值区，西欧以西附近的洋面海温为明显的正值区。同时，1997 年以前北大西洋地区的 500 hPa 环流场和气候态环流场相一致。

图 6b 中，1997 年以后关键区 TNZ2 序列对北大西洋海温距平场的回归整体呈现出“马蹄型”模态，其中大约在北美东海岸（20°N～40°N）地区为海温正值区，其余地区海温主要以负值分布为主，另外格陵兰岛以东、以南洋面地区海温增加明显，这与图 2 中北大西洋海温 EOF 第一模态空间场整体相反，符合上文所述结论。再分析 1997 年以后的北大西洋地区 500 hPa 环流场，与气候态环流场相比，整体呈现出东移南撤的趋势，对应着环流的经向和纬向异常的移动，这与徐玮平等（2018）所得到的结论相一致。

3.3 成因分析

3.3.1 表面温度和西风急流的 SVD 奇异值分解对比

1997 年前后北大西洋关键区垂直波作用通量 TNZ 的增加来源于底层海平面属性的变化。着重分析 1997 年前后 3 月北大西洋地区表面温度变化及其对大范围环流的影响。将 1997 年前后每年 3 月北大西洋地区地表 2 m 温度作为左场，同期 300 hPa 纬向风作为右场进行 SVD 奇异值分解，其中第一模态方差贡献率达到了 79.02%，图 7 为两者第一模态异性相关图。

对比图 7a 和 c，3 月北大西洋地区地表 2 m 温度在 1997 年前后有着明显的不同。首先从图 7a 中可以看出，格陵兰岛及其以西、以南的洋面和北非地区呈现明显的负相关，西欧及 20°N～40°N 之间的北美沿岸为明显的正相关区域。另外，图 7c 中可以发现，整体正负相关区域分布与图 7a 相比，没有太大变化，但其正负区域中心强度都有所增加。另外在格陵兰岛以东的 30°W～0°北大西洋洋面，正相关区域呈明显增多的趋势，表面温度增加明显。

与地表 2 m 温度模态相对应的纬向风如图 7b、d，1997 年前后纬向风模态也存在明显的变化。从

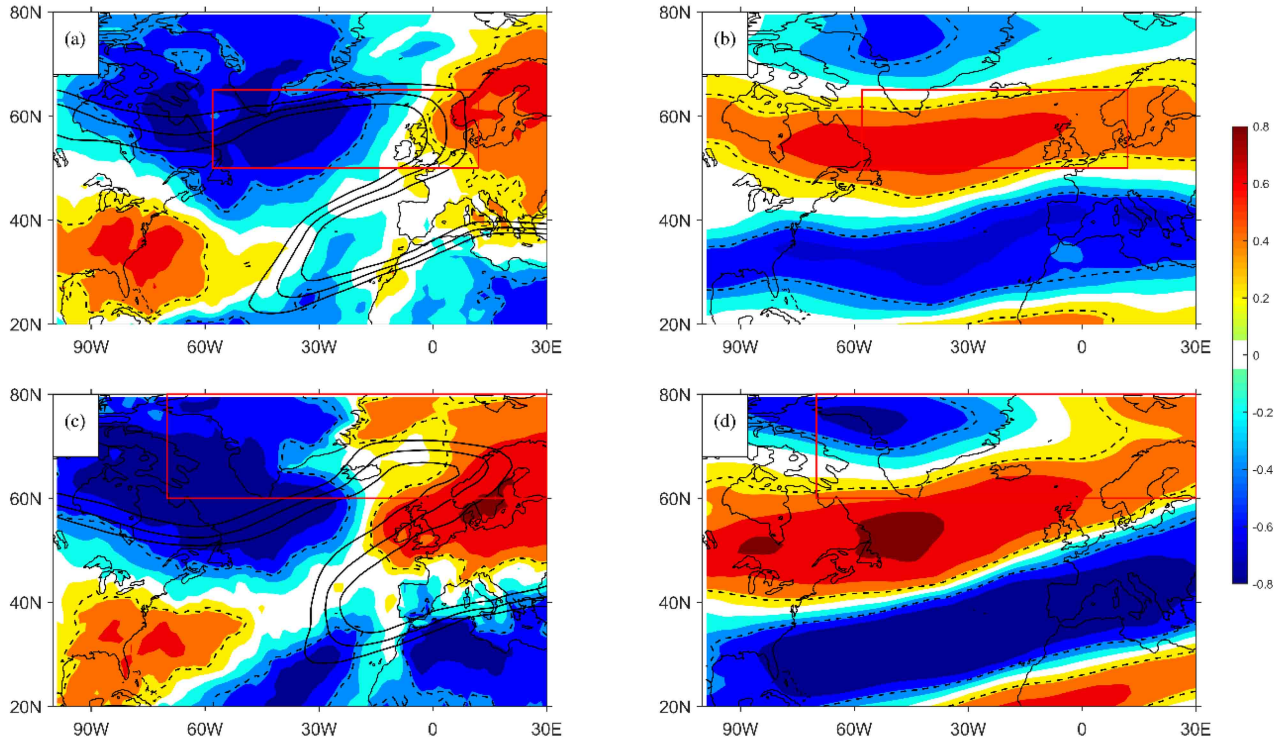

图 7 1997 年（a，b）前、（c，d）后每年 3 月北大西洋（a，c）地表 2 m 高度的温度与（b，d）同期 300 hPa 纬向风（U）的 SVD 第一模态异性相关系数。黑色虚线标记的区域为通过 90% 信度检验的显著区域，红色方框为关键区，黑色等值线分别为 U=14 m s^{-1}, U=16 m s^{-1}, U=18 m s^{-1}

Fig. 7 Singular Value Decomposition (SVD) first-mode heterosexual correlation coefficient of (a, c) 2-m height surface temperature and the 300-hPa zonal wind in the North Atlantic in March (b, d) before (a, b) and after (c, d) 1997. The areas marked by the black dotted line indicate the 90% level of confidence, the red box indicates the key area, the black contours are U=14 m s^{-1}, U=16 m s^{-1}, and U=18 m s^{-1}

图 7b 可以得出，1997 年以前北大西洋地区 300 hPa 纬向风整体呈现出“−、+、−、+”的模态。其中格陵兰岛和墨西哥湾—地中海沿岸之间地区为负相关区域，另外两者之间的北大西洋洋面为正相关区域，北非的部分地区也为正相关区域。图 7d 中 1997 年以后的纬向风整体也呈现出“−、+、−、+”的模态，与图 7b 相比，正负值强度都有所增加。在格陵兰岛东侧的关键区海域存在着明显的纬向风正相关区域增大的现象，这与图 7c 中格陵兰岛东侧海温异常升高相对应。另外从图 7a、c 中也可以看出，1997 年前后北大西洋地区急流轴相比也呈现出东移南撤的趋势，对应着环流也呈现出经向和纬向异常移动的现象，这与前文所述结论相一致。

上述表明 1997 年以后格陵兰岛东侧的地表 2 m 温度异常升高，导致此处西风加大，有利于 Rossby 波向下游频散能量，影响下游北欧地区形成暖脊。同时格陵兰岛以东关键区能量增大，能量向东频散，使得脊加强并向北伸展，致使下游华北地区上空气旋式异常加强，环流易稳定维持，导致华北地区温度下降剧烈，易发生极端低温事件。

图 8 为 1997 年前后 3 月北大西洋地区地表 2 m 温度与同期 300 hPa 纬向风的 SVD 时间序列图，1997 年前后地表 2 m 温度趋势均通过了 90% 的显著性水平检验。由图 8a 中可以看出，1997 年以前的地表 2 m 温度序列整体上呈现出波动上升的趋势，同时 300 hPa 纬向风序列也开始迅速上升，两者都在 1981 年达到谷值之后，呈现快速异常升高的现象，继续波动上升，到 1989 年达到峰值。同时两者的相关系数达到了 0.883，通过了 99% 的显著性检验。由图 8b 中可以看出，1997 年以后地表 2 m 温度增暖上升趋势较 1997 年以前有所减缓。地表 2 m 温度变化序列和 300 hPa 纬向风序列整体都呈现出一致的波动上升趋势，纬向风随着地表 2 m 温度的变化而变化。同时 1997 年以后两者的相关系数达到了 0.929，也通过了 99% 的显著性检验，相关性较 1997 年以前更好。说明 1997 年以后的地表 2 m 温度模态更加有助于西风的加大。

3.3.2　表面温度对高度场的回归

表面温度和大气环流是相互作用、相互影响的（孙照渤和曾煜, 1995; 施宁和张乐英, 2013）。下面对表面温度与大气环流的关系进行讨论。分别将经过 SVD 处理后的 1997 年前后 3 月北大西洋地表 2 m 温度与同期的 500 hPa 位势高度距平场进行回归（图 9），显著区域通过 90% 的信度检验。从图 9a 可以看出，1997 年以前 500 hPa 位势高度距平场上，中高纬存在着一个自西向东分布为“−、+、−、+”的波列结构，格陵兰岛和咸海附近地区为负异常中心，而西欧和贝加尔湖附近地区

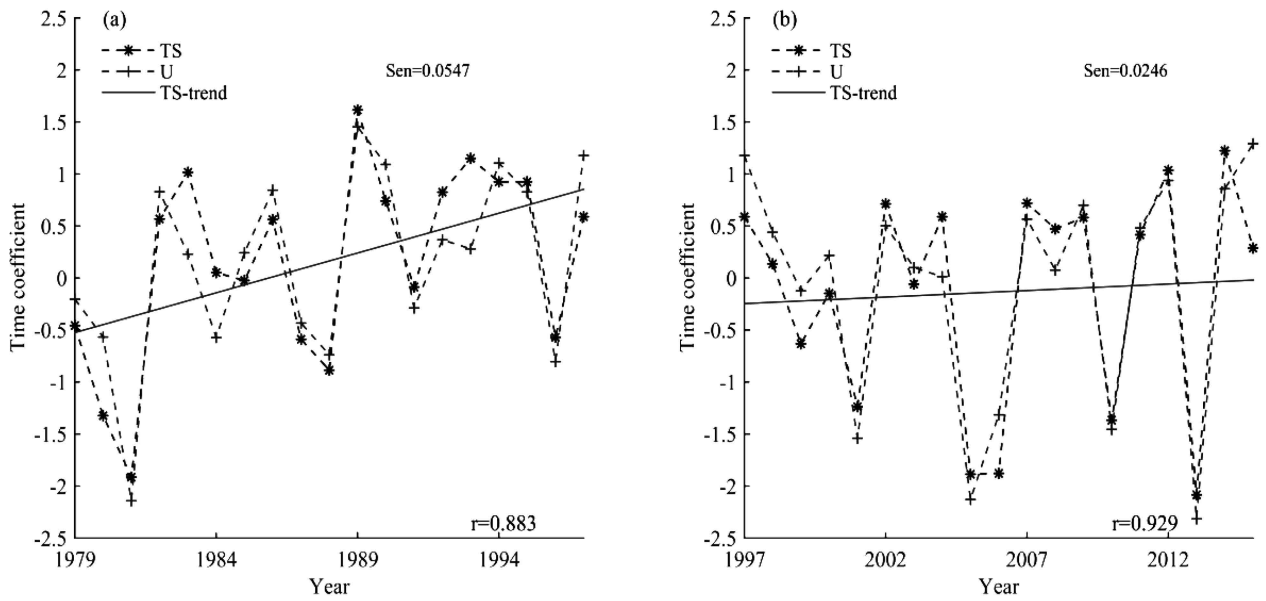

图 8　1997 年（a）前、（b）后 3 月北大西洋地表 2 m 温度与同期 300 hPa 纬向风 SVD 时间序列。黑色实线为该时间段内北大西洋地表 2 m 温度增加趋势

Fig. 8　SVD time series of North Atlantic 2-m height surface temperature in March (a) before and (b) after 1997 and simultaneous 300-hPa zonal wind. The black line indicates the trend of the North Atlantic 2-m height surface temperature

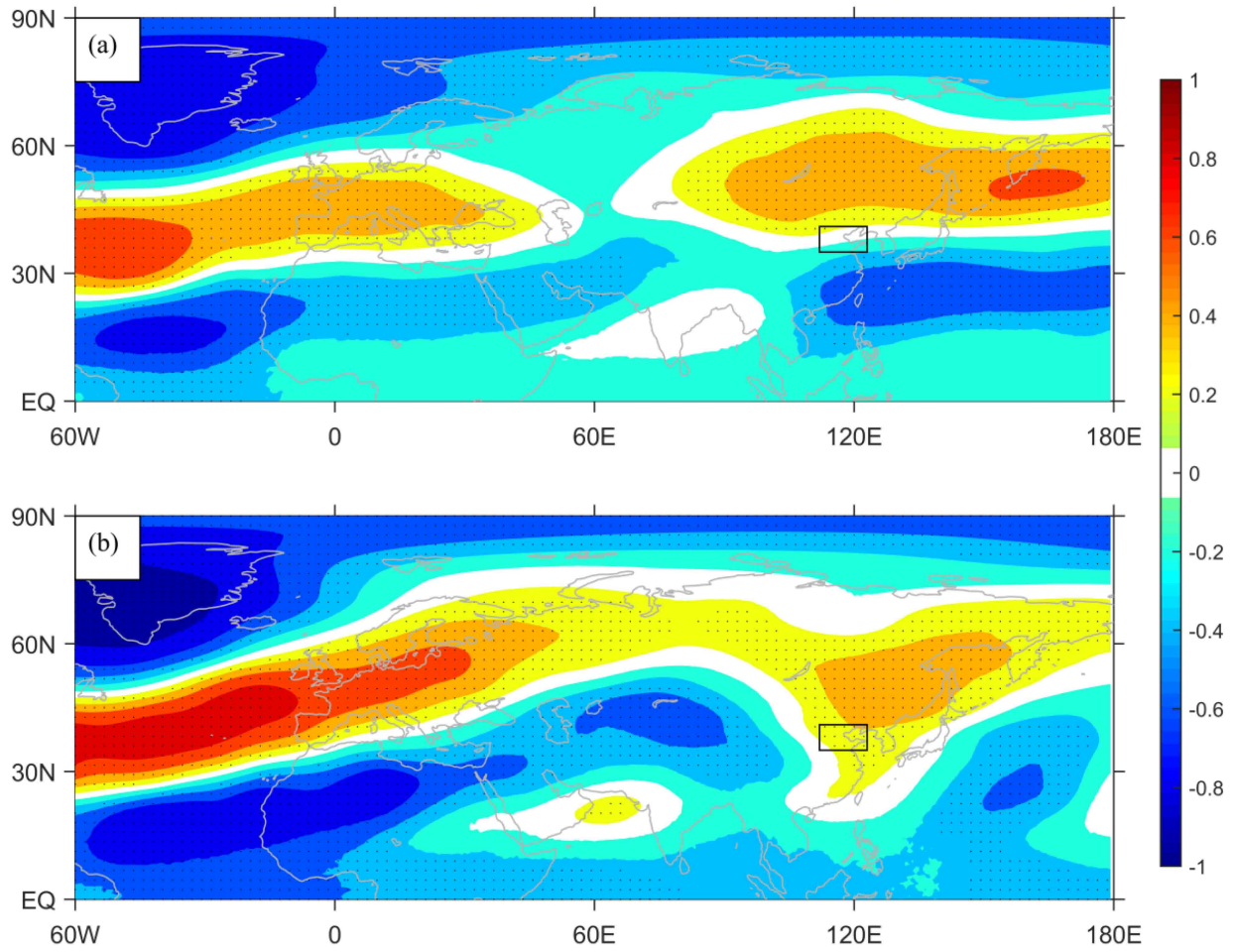

图 9 1997 年（a）前、（b）后地表 2 m 高度的温度回归同期的 500 hPa 位势高度距平场（阴影）。打点区域为通过 90% 信度检验的显著区域，方框为 112°E 以东的我国华北地区

Fig. 9 Simultaneous regression of the 500-hPa geopotential height anomaly fields on the 2-m height surface temperature (a) before and (b) after 1997. The dotted areas meet the 90% level of confidence. The rectangle indicates North China east of 112°E

为正异常中心。另外在图 9b 中，中高纬存着一个自西向东分布的“−、+、−、+”的波列结构，该波列分布与 EU 波列分布相类似（图 1c），通过 90% 的信度检验。北欧地区叠加正异常使得脊加强，巴尔喀什湖叠加负异常使得槽偏西，同时格陵兰岛地区叠加负异常使得槽偏东，具有波长增大的趋势。同时东亚地区附近的正异常中心向东移动，环流形势稳定，降温持续时间长，降温幅度更大。此结果进一步解释了上文所述观点，由于大气环流对 1997 年以后格陵兰岛东侧表面温度异常热力强迫的响应，导致中高纬环流异常，激发出欧亚波列进而导致我国华北地区易发生极端低温事件。

3.3.3 关键区动能变率分析

根据 MS-EVA 动能收支方程，重点分析 1997 年以后格陵兰岛以东关键区在华北极端低温年份时动能的收支情况（图 10）。高层（图 10a）在此期间动能整体收支为正，其中动能的来源主要是由浮力转换项（BUOY）、气压梯度力做功项（QP）、动能平流输送项（QK）（主要为垂直方向）和天气尺度传输项（T_{21}）做贡献；季节平均尺度传输项（T_{01}）是动能的输出项。表明导致与华北地区极端低温及大气环流异常相联系的格陵兰岛东侧关键区能量变化主要原因是有效位能向动能的转换、气压梯度力做功导致动能增加、天气尺度的能量传输和动能的垂直输送。中层（图 10b）动能整体收支为负，动能的主要来源是气压梯度力做功项（QP），其他四项为动能输出项。低层（图 10c）动能整体收支也为负，动能来源项主要有浮力转换项（BUOY）、天气尺度传输项（T_{21}）、季节平均尺度传输项（T_{01}）；其他两项为动能输出项。

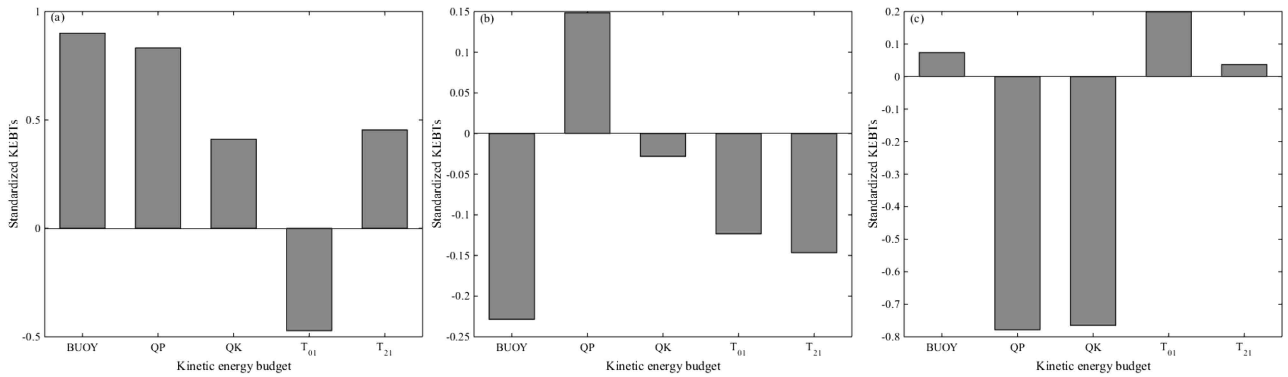

图 10　1997 年以后格陵兰岛以东关键区在华北极端低温年（a）高层（500～300 hPa）、（b）中层（800～500 hPa）和（c）低层（1000～800 hPa）动能收支各项的合成（均经过标准化处理）

Fig. 10　Composition of Kinetic energy budget terms (KEBTs) in the (a) upper (500–300 hPa), (b) middle (800–500 hPa), and (c) lower (1000–800 hPa) levels of the key area east of Greenland in atypical years of extremely low temperatures in North China since 1997. All data have been standardized

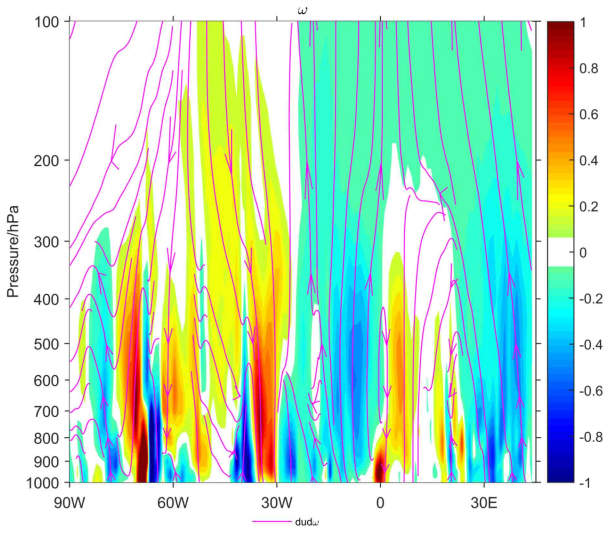

图 11　1997 年以后合成的格陵兰岛以东关键区沿 60°N～70°N 平均的垂直速度 ω（阴影，单位：Pa s^{-1}）的垂直剖面. 粉色线表示垂直环流

Fig. 11　Composition of the vertical section of average vertical velocity (shading, units: Pa s^{-1}) along 60°N–70°N in key area east of Greenland since 1997 The pink line indicates vertical circulation

从整层上看，中低层动能减少，高层动能增加。

为了进一步证明高空动能的来源，继续对 1997 年以后格陵兰岛以东关键区沿 60°N～70°N 纬向平均的垂直速度 ω 剖面进行了合成分析（图 11）。从图中可以看出关键区 30°W～0°附近范围内对流层整层垂直速度 ω 主要为负值，表明存在上升运动，即气压梯度力在对流层整层向上做正功，有助于高层动能积累；同时中低层动能平流输送（垂直方向）也随之向上输送，为高层传递能量。高层动能增加向东辐散，导致下游脊加强向北然后伸展，中高纬环流异常，进而引起我国华北地区极端低温事件的发生。

同时由于强烈的垂直上升运动与格陵兰岛东侧的热力强迫导致对流层上层有效位能向动能的转换增强（卢慧超等, 2017），高层浮力转换项（BUOY）随之增强。另外在 0°～10°E 附近范围内对流层中低层存在下沉运动，而高层以上升运动为主，存在强烈的斜压不稳定结构，能量不稳定，易进行有效位能向动能的转换，底层浮力转换项（BUOY）也随之增强，这与前文所述结论相一致。综上所述，由于格陵兰岛东侧底层海表温度的异常热力强迫与气压梯度力在对流层整层做正功，导致高层动能的增加并向外辐散，进而影响华北地区极端低温事件的发生。

3.4　数值模拟

上述分析表明，北大西洋“马蹄型”海温模态（第一模态）与我国华北地区大气环流异常和极端低温事件发生存在着显著的关系。在此利用美国国家大气研究中心（NCAR）发布的全球大气环流模式（CAM5.1）模拟北大西洋地区海表温度理想变化对我国华北地区极端低温的影响，进一步验证诊断结果。

图 12 为模式模拟两个数值试验的初春（3 月）500 hPa 高度场及其差值场。从图 12a 中可以看出，中高纬地区整体呈现出两波形结构，在我国东北地区上空和乌拉尔山地区上空分别被两个大槽控制，同时北大西洋洋面和贝加尔湖附近地区上空分别被

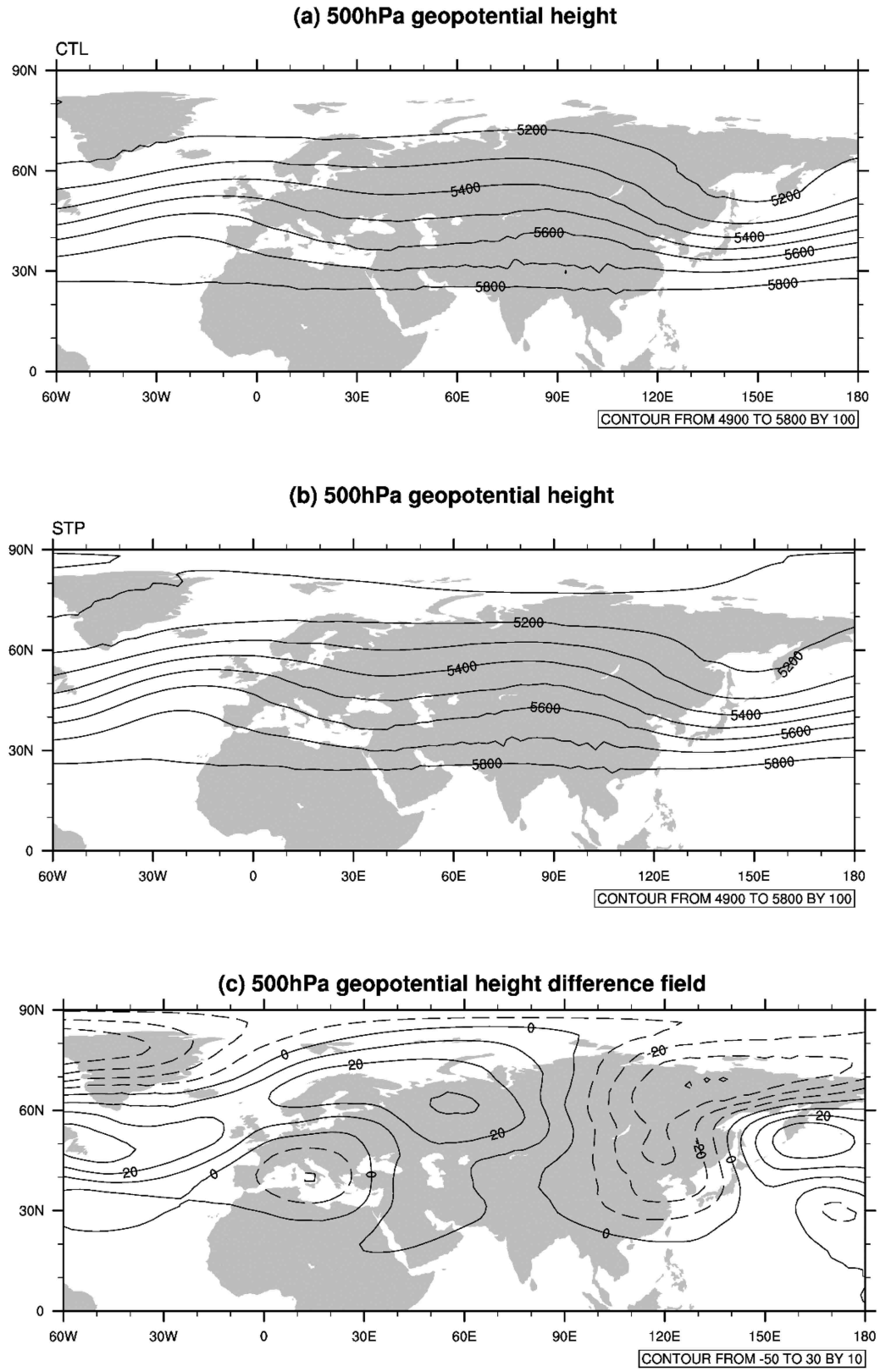

图 12 模式模拟 3 月气候态 500 hPa 位势高度场及其差值分布（单位：gpm）：（a）控制试验；（b）敏感性试验；（c）差值场（敏感性试验减去控制试验）

Fig. 12 Simulation of 500-hPa geopotential height climatic fields and their differences distribution in March from 1979 to 2015 (units: gpm): (a) Model control experiment; (b) model sensitive experiment; (c) their differences (results of sensitive experiment minus results of control experiment)

宽广的高压脊所控制。从图 12b 中可以看出，中高纬环流形势整体加强的，同时格陵兰岛以东关键区海域经向环流形势东升加强趋势明显。

另外，在图 12c 差值场上，在中高纬上有明显的“−、+、−、+”的波列结构，与前文所述的波列分布型相一致（图 2），通过 90% 的信度检验。在格陵兰岛地区叠加负异常，槽向东；贝加尔湖地区叠加负异常，使得东亚大槽加深且槽向西；同时欧亚大陆叠加正异常，导致波长增大，有助于环流形势稳定，极端低温持续时间长。由此可见，北大西洋“马蹄型”海温模态通过激发出欧亚波列，影响欧亚大陆大气环流异常，从而影响我国华北地区极端低温事件的发生，数值模拟效果较好。

接下来通过模式模拟北大西洋罗斯贝波异常能量频散特征，判断在格陵兰岛以东洋面是否存在波能量源地，并证明其模拟效果。图 13 为模式模拟北大西洋罗斯贝波异常能量频散特征。从图中可以看出在格陵兰岛以东、以西洋面存在着明显的波能量源地，波源位置与图 4c、d 相似。该结果解释了格陵兰岛地区能量增大，能量向东频散，导致环流异常，华北地区极端低温事件发生增多，并且再次证明数值模拟效果较好。

另外为了再次充分证明北大西洋“马蹄型”海温模态与华北地区极端低温有密切的联系，通过模式模拟北大西洋与欧亚大陆地区表面温度的异常场。图 14 为模式模拟表面温度的异常场（敏感性试验减控制试验）。从图中可以看出在格陵兰岛以东洋面表面温度增加明显，另外华北地区有明显的降温。综上所述，结合模拟结果与上文所得结论，充分说明了北大西洋“马蹄型”海温模态对于大气环流异常及华北地区极端低温事件有密切联系。另外 1997 年以后北大西洋海温增强，可能与北大西洋

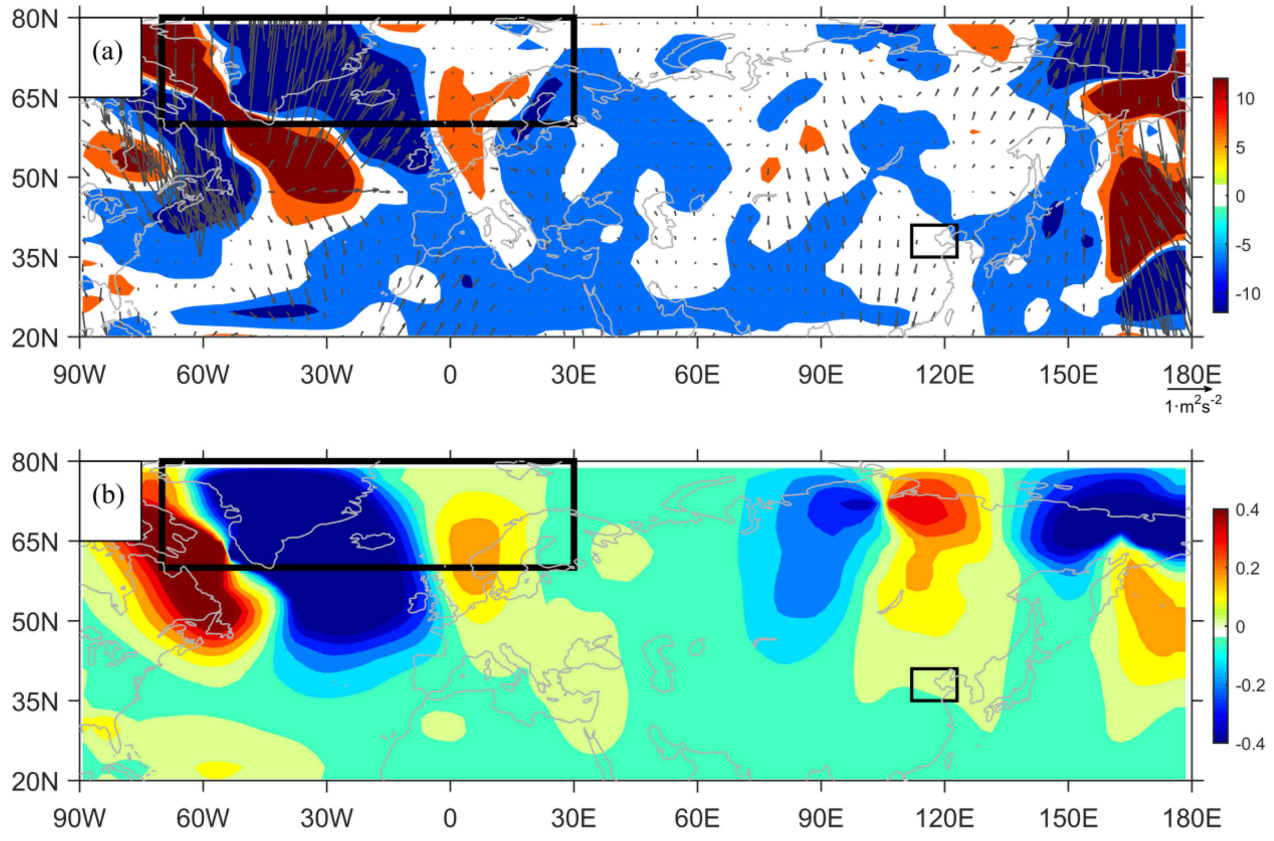

图 13　模式模拟的北大西洋地区与欧亚大陆 3 月气候态（a）300 hPa 波作用通量（箭头，单位：$m^2\ s^{-2}$）与通量水平散度（阴影，单位：$10^{-5}\ m\ s^{-2}$）及（b）500 hPa 波作用通量垂直分量的合成（阴影，单位：$m^2\ s^{-2}$）。细线方框为 112°E 以东的我国华北地区，粗线方框为关键区

Fig. 13　Compositions of (a) climatic wave activity fluxes (vectors, units: $m^2\ s^{-2}$) and horizontal flux divergence (shaded areas, units: $10^{-5}\ m\ s^{-2}$) at 300 hPa and (b) vertical components (shaded areas, units: $m^2\ s^{-2}$) at 500 hPa in the North Atlantic and Eurasia in March simulated in numerical experiments. The small rectangle indicates North China east of 112°E and the large rectangle is the key area

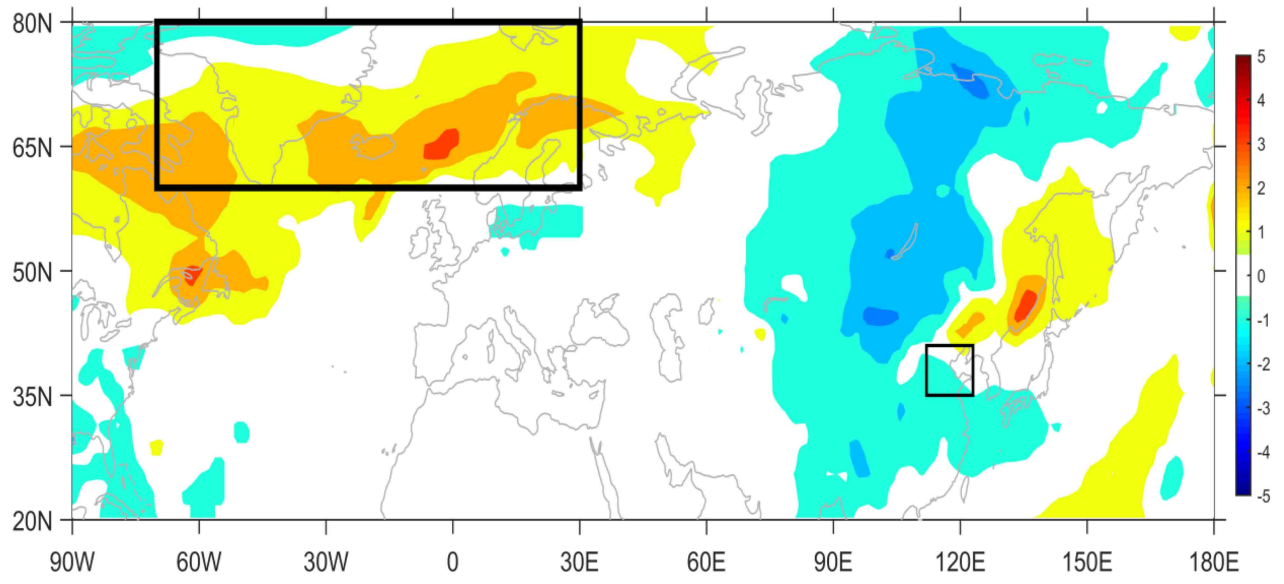

图 14 模式模拟北大西洋与欧亚大陆地区表面温度气候异常场（单位：K）。细线方框为 112°E 以东的我国华北地区，粗线方框为关键区

Fig. 14 Simulation of climatic surface temperature anomaly field in the North Atlantic and Eurasia (units: K). The small rectangle indicates North China (east of 112°E) and the large rectangle is the key area

多尺度振荡 AMO 有关，那么 AMO 对我国华北地区极端低温事件有什么影响，有待于进一步讨论。

4 结论

首先分析了欧亚波列与我国华北地区极端低温的遥相关关系，以及与北大西洋海温的关系。然后利用波作用通量、SVD 奇异值分解、MS-EVA 能量分析方法讨论了北大西洋罗斯贝波能量频散特征与海温的关系，并探究关键区高空动能的来源。最后通过 CAM5.1 模式模拟验证北大西洋“马蹄型”海温模态与大气环流异常及华北地区极端低温的关系，得到以下结论：

（1）欧亚波列模态 PC2 与冷偏差具有较好的相关性，同时又与北大西洋“马蹄型”海温模态 PC1 具有密切的联系，表明北大西洋“马蹄型”海温模态（第一模态）与大气环流异常和我国华北地区极端低温事件发生存在显著的关系。

（2）20 世纪 80 年代前后和 21 世纪两类年代际极端低温环流异常关键强迫源发生位置的改变，这是导致我国华北两类年代际极端低温异常波列出现的原因。北大西洋“马蹄型”海温模态 PC1 与 1997 年以后北大西洋关键区垂直波作用能量（TNZ2）有着比较显著的相关关系。同时，1997 年以后的北大西洋地区 500 hPa 环流场，与气候态环流场相比，整体呈现出东移南撤的趋势，对应着环流的经向和纬向异常的移动。

（3）1997 年以后格陵兰岛东侧表面温度异常热力强迫，导致此处纬向风加大，可激发出欧亚波列，影响其下游欧洲大陆地区形成暖脊。由于关键区表面温度的异常热力强迫与气压梯度力在对流层整层做正功，导致高层动能的增加并向外辐散，使得北欧地区脊加强向北伸展，中高纬 EU 波列型环流异常。在贝加尔湖和华北地区的气旋异常造成东亚大槽加深，两侧的反气旋加强有助于乌拉尔山脊和鄂霍茨克海高压加强，表现为行星尺度经向度加大，进而导致我国华北地区极端低温增强和维持（图 15）。另外，由于 20 世纪 90 年代中期正是北大西洋多尺度振荡 AMO 的位相转折时期，北大西洋“马蹄型”海温模态也可能与 AMO 有直接的关系，该内容有待于进一步的探讨。

（4）数值模式 CAM5.1 模拟北大西洋地区海表温度理想变化对我国华北地区极端低温的影响。通过设计一个控制试验和一个北大西洋地区叠加“马蹄型”海温模态空间场的敏感试验，其差值场表示北大西洋“马蹄型”海温模态对大气环流异常及华北地区极端低温的影响。在 500 hPa 差值场上，中高纬上存在着明显的欧亚波列结构。另外，模式模拟验证格陵兰岛以东洋面存在着明显的波能量源地，进一步解释了北大西洋“马蹄型”海温模态可以通过激发出欧亚波列，贝加尔湖气旋异常、乌拉

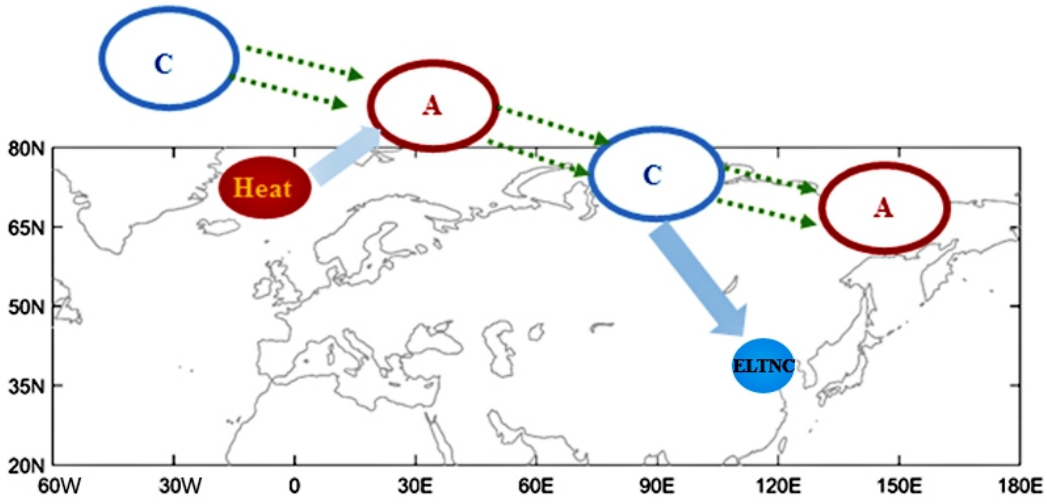

图 15　华北地区极端低温与对流层中层（500 hPa）欧亚波列（绿色箭头）的遥相关关系。A、C 分别代表反气旋和气旋

Fig. 15　Teleconnection of Eurasia wave train (green arrow) in the mid-troposphere (500 hPa) and extreme low temperatures in North China (ELTNC). The letters A and C indicate anticyclone and cyclone, respectively

尔山脊和鄂霍茨克海反气旋异常导致准定常尺度环流加强，有助于冷平流向我国华北地区输送，极端低温增强，模式模拟结果与观测一致。

本文对 20 世纪 90 年代以后初春华北地区极端低温增强及其原因进行了探讨，通过运用波作用通量、SVD、MS-EVA 能量分析方法讨论了北大西洋“马蹄型”海温和大气环流异常对极端低温的影响，以及关键区能量的来源，最后通过模式模拟验证其结果。但对于 AMO 是否与我国华北地区初春极端低温事件有影响没有讨论，这部分有待于进一步研究。对这方面问题的进一步探讨将有助于更加全面地了解我国华北地区极端低温年际和年代际特征的形成机理。

参考文献（References）

Brabson B B, Palutikof J P. 2002. The evolution of extreme temperatures in the central England temperature record [J]. Geophys. Res. Lett., 29(24): 16-1−16-4. doi:10.1029/2002GL015964

Bretherton C S, Smith C, Wallace J M. 1992. An intercomparison of methods for finding coupled patterns in climate data [J]. Journal of Climate, 5(6): 541−560. doi:10.1175/1520-0442(1992)005<0541:aiomff>2.0.co;2

陈少勇, 王劲松, 任燕, 等. 2011. 近 49 年中国西北地区极端低温事件的演变特征 [J]. 高原气象, 30(5): 1266−1273. Chen Shaoyong, Wang Jinsong, Ren Yan, et al. 2011. Evaluative characteristic of extreme minimum temperature of Northwest China in recent 49 years [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 30(5): 1266−1273.

Chen G S, Huang R H, Zhou L T. 2013. Baroclinic instability of the Silk Road pattern induced by thermal damping [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 70(9): 2875−2893. doi:10.1175/jas-d-12-0326.1

Cholaw B, Fu X Y, Xie Z W. 2011. Large-scale circulation features typical of wintertime extensive and persistent low temperature events in China [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 4(4): 235−241. doi:10.1080/16742834.2011.11446935

丁一汇, 王遵娅, 宋亚芳, 等. 2008. 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, 66(5): 808−825. Ding Y H, Wang Z Y, Song Y F, et al. 2008. Causes of the unprecedented freezing disaster in January 2008 and its possible association with the global warming [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 66(5): 808−825. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2008.05.014

Donat M G, Alexander L V, Yang H, et al. 2013. Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118(5): 2098−2118. doi:10.1002/jgrd.50150

付冬雪, 孙照渤, 李忠贤, 等. 2011. 1955-2006 冬半年中国极端低温的时空变化特征 [J]. 气象科学, 31(3): 274−281. Fu Dongxue, Sun Zhaobo, Li Zhongxian, et al. 2011. Spatial and temporal features of China extreme minimum temperature in winter half year during 1955-2016 [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 31(3): 274−281. doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2011.03.005

龚道溢, 王绍武. 2003. 近百年北极涛动对中国冬季气候的影响 [J]. 地理学报, 58(4): 559−568. Gong Daoyi, Wang Shaowu. 2003. Influence of Arctic Oscillation on winter climate over China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58(4): 559−568. doi:10.3321/j.issn:0375-5444.2003.04.010

韩方红, 陈海山, 马鹤翟. 2018. 冬季北大西洋涛动与中国北方极端低温相关性的年代际变化 [J]. 大气科学, 42(2): 239−250. Han Fanghong, Chen Haishan, Ma Hedi. 2018. Interdecadal variation in

the relationship between North Atlantic Oscillation and extreme low temperature over northern China in winter [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(2): 239−250. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1705.17101

何春, 何金海. 2003. 冬季北极涛动和华北冬季气温变化关系研究 [J]. 南京气象学院学报, 26(1): 1−7. He Chun, He Jinghai. 2003. Relation between Arctic Oscillation and North China air temperature in winter [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 26(1): 1−7. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2003.01.001

贺海晏, 漆小平, 罗会邦. 1992. 华南春季强对流天气过程的动能收支 (二): 辐散风和旋转风动能的收支和转换 [J]. 热带气象, 8(2): 125−133. He Haiyan, Qi Xiaoping, Luo Huibang. 1992. Kinetic energy budgets of an intense convection event during spring over South China. Part Ⅱ: Budgets and conversion of divergent and rotational kinetic energy [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 8(2): 125−133. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.1992.02.004

Hoskins B J, James I N, White G H. 1983. The shape, propagation and mean–flow interaction of large-scale weather systems [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 40(7): 1595−1612. doi:10.1175/1520-0469(1983)040<1595:tspamf>2.0.co;2

Hsu P C, Tsou C H, Hsu H H, et al. 2009. Eddy energy along the tropical storm track in association with ENSO [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 87(4): 687−704. doi:10.2151/jmsj.87.687

Hsu P C, Li T, Tsou C H. 2011. Interactions between boreal summer intraseasonal oscillations and synoptic–scale disturbances over the western North Pacific. Part I: Energetics diagnosis [J]. Journal of Climate, 24(3): 927−941. doi:10.1175/2010jcli3833.1

Hu Q, Tawaye Y, Feng S. 2004. Variations of the Northern Hemisphere atmospheric energetics: 1948-2000 [J]. Journal of Climate, 17(10): 1975−1986. doi:10.1175/1520-0442(2004)017<1975:votnha>2.0.co;2

Huang R H, Sun F Y. 1992. Impacts of the tropical western Pacific on the East Asian summer monsoon [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 70(1B): 243−256. doi:10.2151/jmsj1965.70.1b_243

黄晓璐, 徐海明, 邓洁淳. 2015. 冬季中国近海海表温度的长期升高及其对中国降水的影响 [J]. 气象学报, 73(3): 505−514. Huang Xiaolu, Xu Haiming, Deng Jiechun. 2015. Long-term rising of SST over the marginal seas of China in winter and its impact on precipitation in China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 73(3): 505−514. doi:10.11676/qxxb2015.038

琚建华, 任菊章, 吕俊梅. 2004. 北极涛动年代际变化对东亚北部冬季气温增暖的影响 [J]. 高原气象, 23(4): 429−434. Ju Jianhua, Ren Juzhang, Lv Junmei. 2004. Effect of interdecadal variation of Arctic Oscillation on temperature increasing in north of East Asian winter [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23(4): 429−434. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2004.04.002

Lau K H, Lau N C. 1992. The energetics and propagation dynamics of tropical summertime synoptic-scale disturbances [J]. Monthly Weather Review, 120(11): 2523−2539. doi:10.1175/1520-0493(1992)120<2523:teapdo>2.0.co;2

李崇银. 1995. 气候动力学引论 [M]. 北京: 气象出版社. 290−296. Li Chongyin. 1995. Introduction to Climate Dynamics (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press. 290-296

Li S L. 2004. Impact of Northwest Atlantic SST anomalies on the circulation over the Ural Mountains during early winter [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 82(4): 971−988. doi:10.2151/jmsj.2004.971

李春, 方之芳. 2005. 北极涛动与东北冬季温度的联系 [J]. 高原气象, 24(6): 927−934. Li Chun, Fang Zhifang. 2005. Linkage of arctic oscillation and winter temperature in Northeast China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 24(6): 927−934. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2005.06.012

李崇银, 杨辉, 顾薇. 2008. 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, 13(2): 113−122. Li C Y, Yang H, Gu W. 2008. Cause of severe weather with cold air, freezing rain and snow over South China in January 2008 [J]. Clim. Environ. Res. (in Chinese), 13(2): 113−122.

李维京, 李怡, 陈丽娟, 等. 2013. 我国冬季气温与影响因子关系的年代际变化 [J]. 应用气象学报, 24(4): 385−396. Li Weijing, Li Yi, Chen Lijuan, et al. 2013. Inter-decadal variability of the relationship between winter temperature in China and its impact factors [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 24(4): 385−396. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2013.04.001

李艳, 张金玉, 李旭, 等. 2018. 两次典型极端低温过程低频特征分析 [J]. 高原气象, 37(5): 1341−1352. Li Yan, Zhang Jinyu, Li Xu, et al. 2018. Low–frequency features during the two typical extreme cold events in China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 37(5): 1341−1352. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00035

Liang X S. 2016. Canonical transfer and multiscale energetics for primitive and quasigeostrophic atmospheres [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 73(11): 4439−4468. doi:10.1175/jas-d-16-0131.1

Liang X S, Robinson A R. 2005. Localized multiscale energy and vorticity analysis: I. Fundamentals [J]. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 38(3-4): 195−230. doi:10.1016/j.dynatmoce.2004.12.004

Liang X S, Anderson D G M. 2007. Multiscale window transform [J]. Multiscale Modeling & Simulation, 6(2): 437−467. doi:10.1137/06066895X

Liu C H, Zhou B T. 2018. Influences of the 11-yr sunspot cycle and polar vortex oscillation on observed winter temperature variations in China [J]. Journal of Meteorological Research, 32(3): 367−379. doi:10.1007/s13351-018-7101-2

刘樱, 郭品文, 冯涛. 2016. 华北地区冬季持续性异常低温事件与大气低频振荡活动的关系 [J]. 大气科学学报, 39(3): 370−380. Liu Ying, Guo Pinwen, Feng Tao. 2016. The relationship between winter persistent abnormal low temperature in North China and atmospheric low-frequency oscillation activities [J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 39(3): 370−380. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20150314053

卢楚翰, 管兆勇, 李永华, 等. 2013. 太平洋年代际振荡与南北半球际大气质量振荡及东亚季风的联系 [J]. 地球物理学报, 56(4): 1084−1094. Lu Chuhan, Guan Zhaoyong, Li Yonghua, et al. 2013. Interdecadal linkages between Pacific decadal oscillation and

interhemispheric air mass oscillation and their possible connections with East Asian Monsoon [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 56(4): 1084−1094. doi:10.6038/cjg20130404

卢慧超, 梁湘三, 容逸能. 2017. 基于局地多尺度能量涡度分析法(MS-EVA)的北半球夏季西太平洋 MJO 动能分析 [J]. 大气科学学报, 40(2): 224−232. Lu Huichao, Liang Xiangsan, Rong Yineng. 2017. An energetic study of the boreal summer western Pacific MJO with the localized multi-scale energy and vorticity analysis (MS-EVA) [J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 40(2): 224−232. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20151214002

Maloney E D, Dickinson M J. 2003. The intraseasonal oscillation and the energetics of summertime tropical western North Pacific synoptic-scale disturbances [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 60(17): 2153−2168. doi:10.1175/1520-0469(2003)060<2153:TIOATE>2.0.CO;2

梅笑冬. 2015. 北大西洋海温对 NAO 型大气环流异常的影响研究 [D]. 中国海洋大学博士学位论文. Mei Xiaodong. 2015. An impact study of North Atlantic SST on NAO-like circulation [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Ocean University of China.

Neale R B, Chen C C, Gettelman A, et al. 2010. Description of the NCAR community atmosphere model (CAM 5.0) [R]. NCAR Technical Note NCAR/TN-486+STR: 7–8.

New M, Hewitson B, Stephenson D B, et al. 2006. Evidence of trends in daily climate extremes over southern and West Africa [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 111(D14): D14102. doi:10.1029/2005jd006289

秦大河. 2004. 进入 21 世纪的气候变化科学——气候变化的事实、影响与对策 [J]. 科技导报 (7): 4−7. Qin Dahe. 2004. Climate change sciences into the 21st century: Facts, impact and strategies addressing climate change [J]. Science & Technology Review(7): 4−7. doi:10.3321/j.issn:1000-7857.2004.07.002

秦玉琳. 2012. 中国东北夏季极端气温变化特征及其与大气环流的关系 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文. Qin Yulin. 2012. Variation of extreme temperature in Northeast China and its relations with atmospheric circulation during summertime [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology.

曲金华, 江志红, 谭桂容, 等. 2006. 冬季北大西洋海温年际、年代际变化与中国气温的关系 [J]. 地理科学, 26(5): 557−563. Qu Jinhua, Jiang Zhihong, Tan Guirong, et al. 2006. Relation between interannual, interdecadal variability of SST in North Atlantic in winter and air temperature in China [J]. Scientia Geographica Sinica (in Chinese), 26(5): 557−563. doi:10.13249/j.cnki.sgs.2006.05.007

Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 108(D14): 4407. doi:10.1029/2002jd002670

任福民, 翟盘茂. 1998. 1951~1990 年中国极端气温变化分析 [J]. 大气科学, 22(2): 217−227. Ren Fumin, Zhai Panmao. 1998. Study on changes of China's extreme temperatures during 1951~1990 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 22(2): 217−227. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1998.02.10

任国玉, 初子莹, 周雅清, 等. 2005. 中国气温变化研究最新进展 [J]. 气候与环境研究, 10(4): 701−716. Ren Guoyu, Chu Ziying, Zhou Yaqing, et al. 2005. Recent progresses in studies of regional temperature changes in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10(4): 701−716. doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2005.04.001

Seneviratne S I, Nicholls N, Easterling D, et al. 2012. Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment: An overview of the IPCC SREX report [J]. Geophysical Research Abstracts, 14: 12566.

施宁, 张乐英. 2013. 冬季平流层北极涛动对江南气温的影响 [J]. 大气科学学报, 36(5): 604−610. Shi Ning, Zhang Leying. 2013. Influences of Arctic Oscillation on surface air temperature over the south Yangtze River regions [J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 36(5): 604−610. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2013.05.011

孙照渤, 曾煜. 1995. 1 月中国地温异常与北半球 500 hPa 高度场异常关系的合成分析 [J]. 南京气象学院学报, 18(4): 471−477. Sun Zhaobo, Zeng Yu. 1995. Composite analysis of relation of January surface temperature anomaly in China to northern 500 hPa height abnormality [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 18(4): 471−477. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.1995.04.002

孙诚, 李建平. 2012. 2009/2010 年北半球冬季异常低温分析 [J]. 气候与环境研究, 17(3): 259−273. Sun Cheng, Li Jianping. 2012. Analysis of anomalously low surface air temperature in the Northern Hemisphere during 2009/2010 winter [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17(3): 259−273. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10070

孙楠, 段昊书, 徐文彬. 2016. “超级寒潮”来了 [J]. 生命与灾害 (2): 20−21. Su Nan, Duan Haoshu, Xu Wenbin. 2016. “Super cold wave” is coming [J]. Life & Disaster (in Chinese)(2): 20−21.

Sun B, Wang H J, Zhou B. 2019. Climatic condition and synoptic regimes of two intense snowfall events in eastern China and implications for climate variability [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 124(2): 926−941. doi:10.1029/2018jd029921

Takaya K, Nakamura H. 1997. A formulation of a wave‐activity flux for stationary Rossby waves on a zonally varying basic flow [J]. Geophys. Res. Lett., 24(23): 2985−2988. doi:10.1029/97GL03094

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:AFOAPI>2.0.CO;2

Tsou C H, Hsu H H, Hsu P C. 2014. The role of multiscale interaction in synoptic-scale eddy kinetic energy over the western North Pacific in Autumn [J]. Journal of Climate, 27(10): 3750−3766. doi:10.1175/jcli-d-13-00380.1

Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter [J]. Mon. Wea. Rev., 109(2): 784−812. doi:10.1175/1520-0493(1981)109<0784:titghf>2.0.co;2

Wallace J M, Smith C, Bretherton C S. 1992. Singular value

decomposition of wintertime sea surface temperature and 500-mb height anomalies [J]. Journal of Climate, 5(6): 561−576. doi:10.1175/1520-0442(1992)005<0561:svdows>2.0.co;2

Wang H J, He S P. 2015. The North China/Northeastern Asia severe summer drought in 2014 [J]. Journal of Climate, 28(17): 6667−6681. doi:10.1175/jcli-d-15-0202.1

王凌, 高歌, 张强, 等. 2008. 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, 34(4): 95−100. Wang Ling, Gao Ge, Zhang Qiang, et al. 2008. Analysis of the severe cold surge, ice-snow and frozen disasters in South China during January 2008: I. Climatic features and its impact [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 34(4): 95−100. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2008.04.012

王晓娟, 龚志强, 任福民, 等. 2012. 1960~2009 年中国冬季区域性极端低温事件的时空特征 [J]. 气候变化研究进展, 8(1): 8−15. Wang Xiaojuan, Gong Zhiqiang, Ren Fumin, et al. 2012. Spatial/temporal characteristics of China regional extreme low temperature events in winter during 1960-2009 [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 8(1): 8−15. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2012.01.002

王晓娟, 沈柏竹, 龚志强, 等. 2013. 中国冬季区域性极端低温事件分类及其与气候指数极端性的联系 [J]. 物理学报, 62(22): 229201. Wang Xiaojuan, Shen Baizhu, Gong Zhiqiang, et al. 2013. The classification of winter regional extreme low temperature events in China and their corresponding relationship to climatic indices extreme anomaly [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 62(22): 229201. doi:10.7498/aps.62.229201

Wang Y J, Zhou B T, Qin D H, et al. 2017. Changes in mean and extreme temperature and precipitation over the arid region of northwestern China: Observation and projection [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 34(3): 289−305. doi:10.1007/s00376-016-6160-5

Wang L, Liu Y Y, Yang Z, et al. 2019. Time-varying structure of the wintertime Eurasian pattern: Role of the North Atlantic sea surface temperature and atmospheric mean flow [J]. Climate Dynamics, 52(3-4): 2467−2479. doi:10.1007/s00382-018-4261-9

王岱, 游庆龙, 江志红, 等. 2016. 基于均一化资料的中国极端地面气温变化分析 [J]. 高原气象, 35(5): 1352−1363. Wang Dai, You Qinglong, Jiang Zhihong, et al. 2016. Analysis of extreme temperature changes in China based on the homogeneity-adjusted data [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 35(5): 1352−1363. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2016.00019

Wang Z Y, Yang S, Zhou B T. 2017. Preceding features and relationship with possible affecting factors of persistent and extensive icing events in China [J]. International Journal of Climatology, 37(11): 4105−4118. doi:10.1002/joc.5026

吴国雄, 刘辉, 陈飞, 等. 1994. 时变涡动输送和阻高形成——1980 年夏中国的持续异常天气 [J]. 气象学报, 52(3): 308−320. Wu Guoxiong, Liu Hui, Chen Fei, et al. 1994. Transient eddy transfer and formation of blocking high—On the persistently abnormal weather in the summer of 1980 [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 52(3): 308−320.

肖贻青. 2017. 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, 36(6): 1499−1511. Xiao Yiqing. 2017. Relationship between Ural blocking and the North Atlantic Oscillation and their influence on winter weather over China [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 36(6): 1499−1511. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2016.00109

徐玮平, 张杰, 陈志恒. 2018. 两类春季极端低温的年代际特征与欧亚环流异常关系对比 [J]. 高原气象, 37(6): 1655−1670. Xu Weiping, Zhang Jie, Chen Zhiheng. 2018. Comparative analysis of abnormal relationship between two types of decadal characteristics of extreme low temperature in spring and the Eurasian circulation [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 37(6): 1655−1670. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00058

杨修群, 黄士松. 1993. 外强迫引起的夏季大气环流异常及其机制探讨 [J]. 大气科学, 17(6): 697−702. Yang Xiuqiong Huang Shisong. 1993. On the mechanism of summertime atmospheric anomalies induced by external forcing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 17(6): 697−702. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1993.06.08

杨辉, 李崇银. 2008. 冬季北极涛动的影响分析 [J]. 气候与环境研究, 13(4): 395−404. Yang Hui, Li Chongyin. 2008. Influence of Arctic oscillation on temperature and precipitation in winter [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13(4): 395−404.

杨莲梅, 张庆云. 2008. 夏季亚洲副热带西风急流气候特征 [J]. 气候与环境研究, 13(1): 10−20. Yang Lianmei, Zhang Qingyun. 2008. Climate Features of summer Asia subtropical westerly jet stream [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13(1): 10−20.

Yang S, Lau K M, Yoo S H, et al. 2004. Upstream subtropical signals preceding the Asian summer monsoon circulation [J]. Journal of Climate, 17(21): 4213−4229. doi:10.1175/jcli3192.1

杨金虎, 沈永平, 王鹏祥, 等. 2007. 中国西北近 45a 来极端低温事件及其对区域增暖的响应 [J]. 冰川冻土, 29(4): 536−542. Yang Jinhu, Shen Yongping, Wang Pengxiang, et al. 2007. Extreme low temperature events in Northwest China and their response to regional warming in the recent 45 years [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 29(4): 536−542. doi:10.3969/j.issn.1000-0240.2007.04.005

翟盘茂, 潘晓华. 2003. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化 [J]. 地理学报, 58(S1): 1−10. Zhai Panmao, Pan Xiaohua. 2003. Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the second half of the 20th century [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58(S1): 1−10. doi:10.3321/j.issn:0375-5444.2003.z1.001

张霏燕, 徐海明. 2011. 东北春季极端低温的变化特征及其与大西洋海温的关系 [J]. 大气科学学报, 34(5): 574−582. Zhang Feiyan, Xu Haiming. 2011. Spatial/temporal variations of spring extreme low temperature in Northeast China and its relationship with SSTA in Atlantic Ocean [J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 34(5): 574−582. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2011.05.007

张庆云, 宣守丽, 彭京备. 2008. La Niña 年冬季亚洲中高纬环流与我国南方降雪异常关系 [J]. 气候与环境研究, 13(4): 385−394. Zhang Q Y, Xuan S L, Peng J B. 2008. Relationship between Asian circulation in the middle–high latitude and snowfall over South China

during La Niña events [J]. Clim. Environ. Res. (in Chinese), 13(4): 385−394.

Zhang J, Chen H S, Zhang Q. 2019. Extreme drought in the recent two decades in northern China resulting from Eurasian warming [J]. Climate Dynamics, 52(5-6): 2885−2902. doi:10.1007/s00382-018-4312-2

Zhou B T, Wang H J. 2008. Interdecadal change in the connection between Hadley circulation and winter temperature in East Asia [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 25(1): 24−30. doi:10.1007/s00376-008-0024-6

Zhou B T, Xu Y, Wu J, et al. 2016. Changes in temperature and precipitation extreme indices over China: Analysis of a high-resolution grid dataset [J]. Int. J. Climatol., 36(3): 1051−1066. doi:10.1002/joc.4400

Zhou B T, Wang Z Y, Shi Y, et al. 2018. Historical and future changes of snowfall events in China under a warming background [J]. Journal of Climate, 31(15): 5873−5889. doi:10.1175/jcli-d-17-0428.1

朱艳峰, 谭桂容, 王永光, 等. 2007. 中国冬季气温变化的空间模态及其与大尺度环流异常的联系 [J]. 气候变化研究进展, 3(5): 266−270. Zhu Yanfeng, Tan Guirong, Wang Yonguang, et al. 2007. Variation of spatial mode for winter temperature in China and its relationship with the large scale atmospheric circulation [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 3(5): 266−270. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2007.05.004