秋季北大西洋马蹄型海温异常与初冬我国气温年际变化的联系

李忠贤[1,2] 王庭轩[1,2] 曾刚[1,2] 邓伟涛[1,2]

1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心，南京 210044

2 南京信息工程大学大气科学学院，南京 210044

摘要 本文基于 Hadley 中心的海表温度资料、全国 160 站气温资料以及 NCEP/NCAR 的再分析资料，运用经验正交函数分解和相关分析等多种统计方法，研究了 1951—2020 年秋季（9—11 月）北大西洋海温年际异常的主要特征及其对初冬（12 月）我国气温异常的影响。结果表明：秋季北大西洋海温异常 EOF 的第一模态是纽芬兰岛东南部海温为负（正）距平，北大西洋副极地和副热带及其东部海温为正（负）距平的马蹄型海温模态，方差贡献率为 20.5%。研究表明，秋季北大西洋马蹄型海温异常与我国大部分地区初冬气温异常有显著的正相关关系，即秋季北大西洋马蹄型海温模态呈正位相时，我国大部分地区初冬气温异常偏高，反之，我国大部分地区初冬气温异常偏低。进一步分析表明，秋季北大西洋马蹄型海温异常能够持续到初冬。当秋季北大西洋马蹄型海温呈正（负）位相时，初冬北大西洋副极地和副热带海温异常通过加热（冷却）异常能够引起局地对流层上层的辐散（辐合）运动，并且激发出南、北两支 Rossby 波列。其中，北支波列由北大西洋副极地向东北方向传播至巴伦支海附近，然后沿西伯利亚向东南方向传播至我国上空；南支波列由北大西洋副热带向东传播至我国上空。在南、北支波列的影响下，我国上空对流层上层出现异常辐合（辐散），与之伴随的异常下沉（上升）运动使得我国上空云量减少（增加），到达地表的短波辐射增加（减少），同时地表向低层大气传输的长波辐射增加（减少），在非绝热加热的作用下，我国大部分地区气温异常偏高（偏低）。利用 NCAR CAM5.3 模拟了北大西洋马蹄型海温异常对初冬大气环流、辐射强迫和气温的影响，模拟结果与观测资料统计分析结果基本一致，进

收稿日期 2022 年 6 月 26 日 **网络预出版日期**

作者简介 李忠贤，男，1979 年出生，教授，主要从事海气相互作用与短期气候预测研究。E-mail: lizhongxian@nuist.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 42175034、42175035

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 42175034, 42175035)

一步表明该海温模态能够激发出遥相关波列，影响东亚大气环流异常，通过非绝热加热的作用影响我国气温异常的年际变化。

关键词　北大西洋海温　初冬气温　非绝热加热　年际变化

文章编号：doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2209.22106

Characteristic of North Atlantic Horseshoe SSTA in Autumn and the Relationship with the Interannual Variation of Early Winter Temperature in China

Li Zhongxian[1,2], Wang Tingxuan[1,2], Zeng Gang[1,2], and Deng Weitao[1,2]

1 *Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education (KLME)/ Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC)/ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD)，Nanjing University of Information Science & Technology，Nanjing 210044*

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

Abstract Based on the sea surface temperture (SST) data of Hadley Center, the temperture data of 160 stations in China and the reanalysis data of NCEP/NCAR, the interannual variability of North Atlantic SST anomaly (SSTA) in autumn and its association with early winter temperture in China are studied by using a variety of statistical methods such as Empirical Orthogonal Function (EOF) and correlation analysis. The results suggest that the first mode of North Atlantic SST anomaly EOF in autumn is North Atlantic Horseshoe Pattern (NAH) with negative (positive) SST anomalies in southeastern Newfoundland, and positive (negative) SST anomalies in the subpolar, subtropical and eastern North Atlantic, which revealed 20.5% variance. The results show that there is a significant positive correlation between NAH SSTA in autumn and early winter temperture in most parts of China. Further analysis show that the NAH SSTA in autumn can persist until early winter. When the NAH SST is in a positive (negative) phase in autumn, the heating (cooling) of NAH SSTA over the subpolar and subtropical in early winter can cause divergence (convergence) in the upper troposphere, two Rossby wave trains are stimulated in the north and south branch. The north branch of the wave train propagates northeastward from the North Atlantic subpolar to the vicinity of the Barents Sea, and then propagates southeast along Siberia to the China. The south branch of wave train propagates eastward from the subtropical North Atlantic to China. Under the influence of the south and north branch of wave trains, convergence (divergence) occurs in the upper troposphere over China. Through the sinking (rising) movement, the total cloud cover in the above area is reduced (increased), the shortwave radiation reaching the surface has increased (reduced), and the

longwave radiation transmitted from the surface to the lower atmosphere has increased (reduced). Under the action of diabatic heating, the temperature in most areas of China is abnormally high (low). NCAR CAM5.3 was used to simulate the effects of the NAH SSTA on atmospheric circulation, radiative forcing and air temperature in early winter. The simulation results were basically consistent with the statistical analysis results of the observational data. This further confirms that the SST mode can affect the atmospheric circulation anomalies in East Asia by stimulating the teleconnected wave train, thereby affect the interannual variation of air temperature anomalies in China through the effect of diabatic heating.

Keywords North Atlantic SST, early winter temperture, diabatic heating, interannual variability

1 引言

北大西洋位于欧亚大陆上游，其海温异常可以显著影响海表热通量异常，通过非绝热加热等激发欧亚大气遥相关型（Czaja and Frankignoul，1999；Peng et al.，2003；Huang and Shukla，2005；Pan，2005），从而对欧亚地区大气环流和气候造成显著的影响（杨修群等，1992；Wu et al.，2009；Zuo et al.，2013；Chen et al.，2014；Qiu et al.，2021）。

北大西洋海温变率具有多时间尺度特征（Battisti et al.，1995；Sutton and Allen，1997；Laurent，2012；Muhammad et al.，2020），国内外学者针对北大西洋多年代振荡变率（AMO）和三极型海温变率及其气候影响做了大量研究（Kushnir，1994；Kerr，2000；Wu and Liu，2005；Liu et al.，2014；Hong and Lu，2016；Ding et al.，2020）。近年来，北大西洋马蹄型海温模态及其影响已成为学者们关注和研究的热点问题（Wu et al.，2007；Gastineau and Frankignoul，2015；Yang and Wu，2015）。

北大西洋马蹄型海温模态是北大西洋海温年际变率的主要模态之一，最初由Czaja and Frankignoul（1999）定义，其空间分布特征表现为纽芬兰岛东南部海温异常偏暖（冷）和北大西洋东部海温异常偏冷（暖），该海温模态异常信号可以从夏末一直持续到初冬（Czaja and Frankignoul，2002；Cassou et al.，2004；Gastineau and Frankignoul，2015）。北大西洋马蹄型海温异常对北大西洋和欧亚地区大气环流及气候异常具有重要的影响（Chen et al.，2016；2021）。Gastineau and Frankignoul（2015）研究认为，北大西洋马蹄型海温异常，尤其是北大西洋副极地海温异常加热引起对流层上层大气辐散，并激发出定常 Rossby 波向下游传播，并产生北大西洋涛动（NAO）型大气环流异常。Peng et al（2003）、Cassou et al（2007）、Gastineau and Frankignoul（2015）研究指出，北大西洋三极型（或马蹄型）海温异常，特别是北大西洋中纬度海温异常通过非绝热加热改变了海气界面的热通量变化，驱动的大气扰动与大西洋风暴轴相互作用等引起的瞬变波活动，以及瞬变波与平均基本气流的相互作用等，进而产生垂直方向上具有相当正压结构的NAO 型大气环流异常。最近的研究指出，秋季北大西洋马蹄型海温异常对大气环流的影响能够从秋季持续到冬季，导致冬季对流层亚洲极涡异常（Yu and Sun，

2021）。此外，也有研究表明，春季北大西洋马蹄型海温异常对欧亚地区的气温、降水和雪深异常变化具有重要的影响（Chen et al.，2020；徐玮平等，2020；刘晨等，2020）。

综上所述，以往的研究主要关注秋季北大西洋马蹄型海温异常对冬季 NAO 和对流层亚洲极涡等大气环流异常的影响，尤其是对冬季 NAO 的影响（Czaja and Frankignoul，2002；Gastineau and Frankignoul，2015；Yang and Wu，2015；Yu and Sun，2021）。然而，目前关于秋季北大西洋马蹄型海温异常变化特征及其与冬季我国气温异常关系的研究还相对较少。近年来研究指出，秋季北大西洋马蹄型海温异常能够影响冬季东亚大槽和蒙古高压等大气环流异常，进而可能引起我国冬季气温变化（梅笑冬，2015；时晓曚等，2015）。那么，秋季北大西洋马蹄型海温异常是否与初冬我国气温年际变化存在联系？其联系的内在物理机制是怎样的？针对上述问题，本文将利用 EOF 方法分析研究秋季北大西洋马蹄型海温异常变化特征，采用相关分析和合成分析方法计算分析秋季北大西洋马蹄型海温异常与初冬我国气温年际异常之间的关系。在此基础上，利用回归分析和动力诊断分析等方法，研究秋季北大西洋马蹄型海温异常对初冬欧亚大气环流异常的影响及其物理过程，初步揭示秋季北大西洋马蹄型海温异常对初冬我国气温年际异常影响的物理机制。最后利用 NCAR CAM5.3 模式模拟秋季北大西洋马蹄型海温异常对初冬我国气温异常的影响，进一步验证观测结果。

2 资料和研究方法

本文所用的资料包括：（1）英国气象局哈德莱中心（The UK Meteorological Office Hadley Center）提供的月平均海表温度（sea surface temperature，SST）资料（Rayner et al.，2003），水平分辨率为 1°×1°，时间段为 1951—2020 年；（2）美国 NCEP/NCAR（National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research）提供的再分析资料（Kalnay et al.，1996），包括位势高度场、气温、风场、垂直速度、短波辐射、长波辐射和总云量，水平分辨率为 2.5°×2.5°，时间段为 1951—2020 年；（3）ECMWF（European Centre for Medium Range Weather Forecasts）提供的 ERA5 再分析资料（Hersbach et al.，2020），包

括位势高度场、气温、风场、垂直速度、短波辐射、长波辐射和总云量，水平分辨率为 0.25°×0.25°，时间段为 1959—2020 年；（4）国家气候中心提供的全国 160 站逐月气温资料，时间段为 1951—2020 年。

本文所用到的方法主要包括：经验正交函数（EOF）、合成分析、相关分析和回归分析等统计方法。本文中秋季指的是 9 月、10 月和 11 月三个月平均，初冬指的是 12 月。本文的研究主要关注年际变率，因此所有资料均去除 9a 以上的年代际变率和线性趋势。文中所涉及的海温、气温、大气环流要素、辐射通量和总云量等均为年际变率分量。

本文在分析气温变化时，采用了局地温度变化方程。根据（Yanai et al.，1973）局地温度变化方程可以写成：

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\vec{V}\cdot\nabla T + \omega\frac{RT}{c_p p} - \omega\frac{\partial T}{\partial p} + \frac{Q}{c_p}$$

其中c_p表示定压比热容，R 表示干空气的气体常数，∇表示水平梯度算子，t 为时间，p 是压强，T 是温度，$\vec{V}$是水平速度，ω 是垂直速度。（$\frac{RT}{c_p p} - \frac{\partial T}{\partial p}$）表示静力稳定度，$Q$ 为非绝热加热的总和。其中，左边第一项$\frac{\partial T}{\partial t}$为气温的局地变化项，右边第一项$-\vec{V}\cdot\nabla T$为水平温度平流项，第二项（$\omega\frac{RT}{c_p p} - \omega\frac{\partial T}{\partial p}$）为垂直输送项，第三项$\frac{Q}{c_p}$为非绝热加热项。由于非绝热加热项计算较为困难，因此，本文采用倒算法，先计算出气温局地变化项、水平温度平流项、垂直输送项，然后利用倒算法，能够间接得到非绝热加热项的大小。

本文所使用的模式为美国大气研究中心（NCAR）独立开发的通用大气模式 5.3 版本（Community Atmosphere Model，CAM5.3），该模式作为通用地球模式（Community Earth System Model，CESM1.2.2）的大气模块，既可以单独运转模拟大气特征，亦可以作为 CESM 的一部分和其他模块耦合运转。本文的数值试验中 CAM5.3 采用有限体积核心，垂直方向上采用 30 层的 σ-p 垂直混合层，水平分辨率为 1.9°×2.5°，最顶层位于 3.643 hPa。模式中采用了 F_2000_CAM5 的组件，使用 HadISST（Hadley Center Global Sea Ice and Sea Surface Temperature）的逐月海温资料及美国国家海洋大气局（NOAA）的周平均最优插值海表面温度资

料作为海洋边界条件，且每个时间积分步长中的海温和海冰资料都使用线性插值方法进行更新（Neale et al.，2010）。

3 秋季北大西洋马蹄型海温异常与初冬我国气温年际变化的联系

对 1951—2020 年秋季北大西洋海温年际变率进行 EOF 分解，前两个模态的方差贡献率分别为 20.5%和 14.8%，根据 North et al.（1982）的检验标准，这两个模态彼此是相互独立的。由图 1 可见，秋季北大西洋海温年际变率第一模态的空间分布表现为：当纽芬兰岛东南部海温为负（正）距平时，副极地和副热带的海温正（负）距平在北大西洋东部连接在一起，其空间结构类似于马蹄型，被称为马蹄型海温模态（Czaja and Frankignoul，1999；Cassou et al.，2004；Chen et al.，2020）。为了方便讨论，本文将纽芬兰岛东南部海温为负（正）距平，北大西洋副极地和副热带及其东部海温为正（负）距平的空间分布型定义为秋季马蹄型海温模态的正（负）位相结构。将 EOF 分解得到的第一模态时间系数标准化值定义为秋季北大西洋马蹄型海温异常（North Atlantic Horseshoe Pattern of SST，NAH）指数。

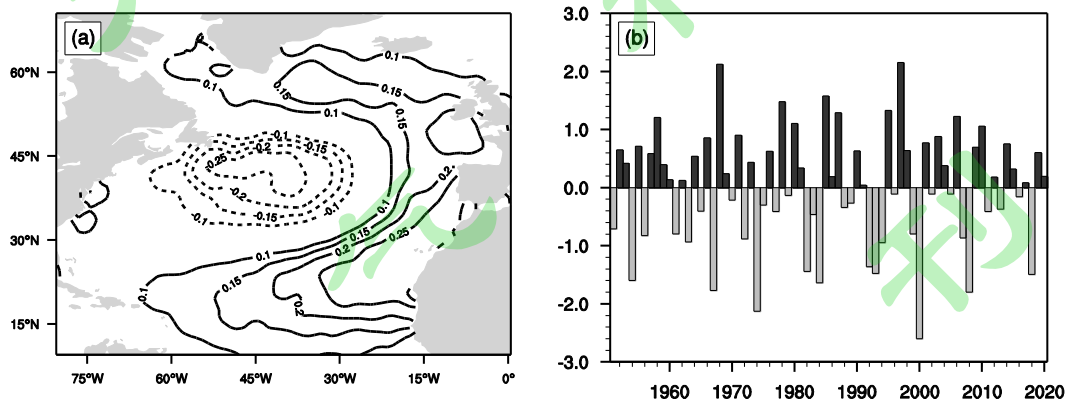

图 1　1951—2020 年秋季北大西洋海温年际变率 EOF 分析第一模态：（a）空间分布；（b）时间系数

Fig.1 The first EOF mode of the interannual variability of autumn SSTA in North Atlantic during 1951—2020 (a) spatial pattern; (b) time coefficients

图 2 为 1951—2020 年秋季 NAH 指数与初冬我国气温年际变化的相关系数，以及秋季北大西洋马蹄型海温异常正位相年（NAH 指数大于 1.0 的年份）和负位相年（NAH 指数小于-1.0 的年份）对应的初冬我国气温年际异常的差值分布。如图 2a 所示，秋季 NAH 指数与初冬我国大部分地区的气温变化存在显著的正相关关系，其中，我国华北和西北地区为相关系数高值区，超过了 0.35，通过了 95%置信水平的显著性检验。由图 2b 可知，我国华北、西北、华中和华南地区气温为显著正异常分布，其中华北和西北地区超过了 2.8 ℃，说明当秋季 NAH 模态呈正位相时，我国大部分地区初冬气温异常偏高；反之亦然。可见，秋季 NAH 异常与初冬我国气温年际变化，尤其是华北和西北地区气温年际变化关系密切。

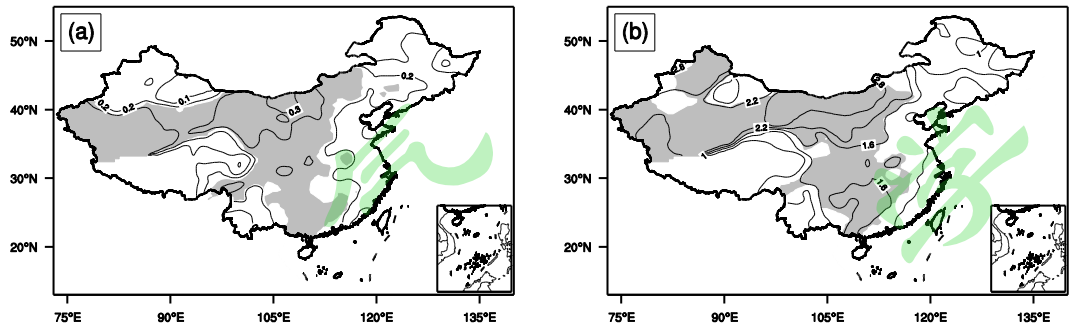

图 2　秋季 NAH 指数与初冬我国气温年际异常的相关系数分布（a）；秋季北大西洋马蹄型海温异常正位相年和负位相年对应的初冬我国气温年际异常的差值分布（b）（单位：℃）（阴影区域表示通过了 95%置信水平的统计显著性检验）

Fig.2 Correlation coefficients between autumn NAH index and early winter interannual temperature anomalies in China (a) and composite differences of temperature anomalies (b) (units: ℃) in China between positive and negative years of NAH SSTA (shaded areas indicate that correlation and differences are statistically significant above 95% confidence level)

4 秋季北大西洋马蹄型海温异常与初冬大气环流及辐射强迫的联系

为了研究秋季北大西洋马蹄型海温异常对初冬我国气温年际变化影响的可能机制，下面讨论有关秋季北大西洋马蹄型海温异常与初冬大气环流及辐射强迫异常的联系。

研究指出，秋季 NAO 异常通过改变海表湍流热通量等产生北大西洋马蹄型海温异常，后者反过来通过影响海表热通量等激发出 NAO 型大气环流异常，进而加强初冬 NAO 异常。初冬 NAO 异常又强迫产生 NAH，形成秋冬季北大西洋海气系统的正反馈机制，这种海气正反馈机制有利于马蹄型海温异常从秋季维持到冬季。（Czaja and Frankignoul 2002；Gastineau and Frankignoul，2015；Yu and Sun，2021）。图 3 给出秋季 NAH 指数与同期、初冬海温异常以及 500 hPa 位势高度异常的回归系数分布。如图 3a 所示，北大西洋副极地的 500 hPa 位势高度异常中心值为 14 gpm，北大西洋中纬度地区的 500 hPa 位势高度异常中心值可达-10 gpm，表现为 NAO 型负位相结构。与之相对应，秋季北大西洋海温异常表现出显著的马蹄型结构，在纽芬兰岛东南部的海温异常为-0.35 ℃，在北大西洋副极地和副热带地区海温异常为 0.35 ℃。由此可见，秋季 NAO 异常与秋季 NAH 存在密切的联系；初冬，北大西洋副极地的 500 hPa 位势高度异常中心值可达 28 gpm，北大西洋中纬度地区的 500 hPa 位势高度异常的范围较秋季明显向东扩大，有两个异常中心，中心值分别为-12 gpm 和-16 gpm，初冬 NAO 型大气环流异常强度较秋季有所增强（图 3b），这表明，秋季 NAH 对初冬北大西洋 NAO 异常有加强作用；在初冬 NAO 异常影响下，北大西洋海温异常也呈现出显著的马蹄型结构，在纽芬兰岛东南部的海温异常为-0.25 ℃，在北大西洋副极地和副热带地区海温异常可达 0.35 ℃。上述分析表明，秋冬季 NAH 与 NAO 异常存在显著的耦合关系，这种耦合关系使得秋季 NAH 维持到初冬。

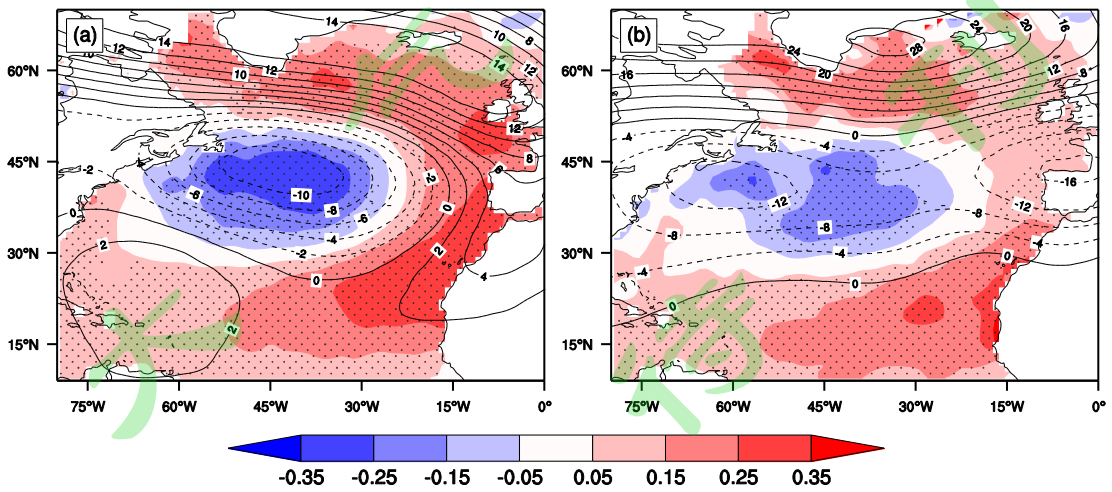

图 3　秋季 NAH 指数对秋季（a）、初冬（b）SST（阴影；单位：℃）、500 hPa 位势高度（等值线；单位：gpm）年际异常的回归系数分布（打点区域表示通过了 95%置信水平的统计显著性检验）

Fig.3 Regression coefficients of interannual anomalies of early winter SST (shaded areas; units: ℃) and geopotential height on 500 hPa (black line; units: gpm) onto NAH index during autumn (the dotted areas indicate that the regression coefficients are statistically significant above 95% confidence level)

在北大西洋副极地地区（50°~65°N）和副热带地区（15°~30°N）对流层中层 500 hPa 垂直速度的中心值分别达到了-1.2×10^{-2} Pa/s 和-0.6×10^{-2} Pa/s（图 4），说明北大西洋副极地和副热带海温正异常通过加热异常能够引起对流层的垂直运动，产生异常的上升运动，进而影响对流层上层的大气环流异常。其中，北大西洋副极地加热异常对大气环流的影响更为显著。Gastineau and Frankignoul（2015）分析认为，秋冬季 NAH 海温异常对北大西洋大气环流的影响，起主要贡献的海温异常中心位于北大西洋高纬度地区，本文的结果与之基本一致。

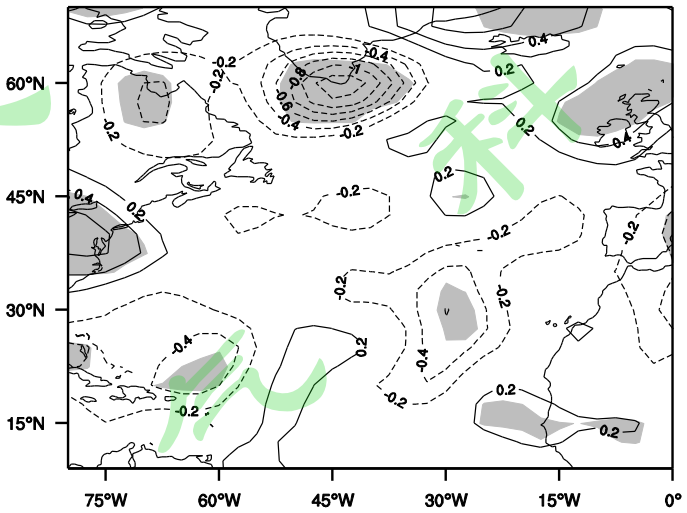

图 4　秋季 NAH 指数对初冬 500 hPa 垂直速度（单位：10^{-2} Pa s^{-1}）年际变化的回归系数分布（阴影区域表示通过了 90%置信水平的统计显著性检验）

Fig.4 Regression coefficients of interannual anomalies of early winter vertical velocity on 500 hPa (units: 10^{-2} Pa s^{-1}) onto NAH index during autumn (shaded areas indicate that the regression coefficients are statistically significant above 90% confidence level)

图 5 给出了 1951—2020 年秋季 NAH 指数与 200 hPa 初冬散度场和波活动通量（Wave-Activity Flux，WAF）年际异常的回归系数分布。如图 5 所示，秋季 NAH 能够持续到初冬，初冬 NAH 海温异常影响其上方的大气环流异常。当秋季 NAH 呈正位相时，初冬在北大西洋副极地和副热带地区正海温异常上方的对流层上层出现显著的大气辐散运动，中心数值分别为 0.2×10^{-6} kg/(m^2·s)和 0.3×10^{-6} kg/(m^2·s)。北大西洋副极地和副热带的大气辐散运动通过波动将扰动能量向下游传播，波列传播路径可分为南、北两支。其中，北支波列由北大西洋副极地向东北方向传播至巴伦支海附近，然后沿西伯利亚向东南方向传播至我国上空；南支波列由北大西洋副热带向东传播至我国上空。此外，从图 5 中可以看到，北大西洋副极地激发的波列还可以向东南方向传播至北非和西亚地区。

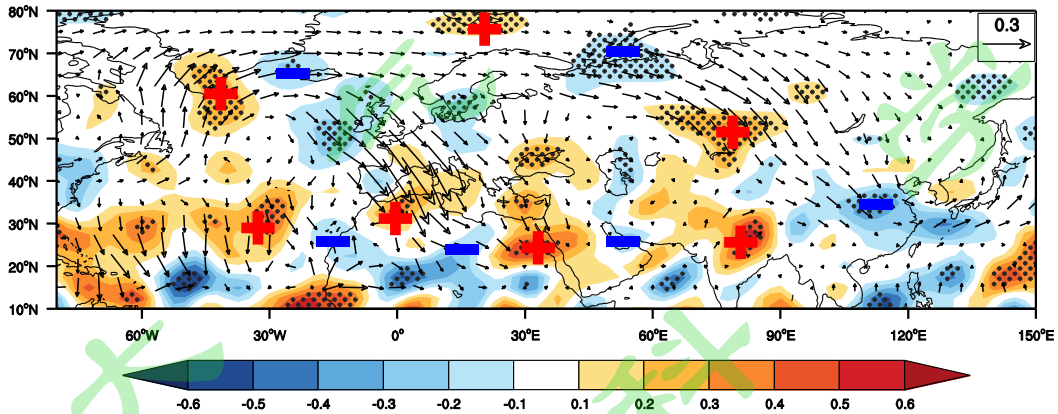

图 5　秋季 NAH 指数对初冬 200 hPa 散度（阴影；单位：10^{-6} kg m^{-2} s^{-1}）和波活动通量（箭矢；单位：m^2 s^{-2}）年际变化的回归系数分布（打点区域表示通过了 90%置信水平的统计显著性检验，只画出波活动通量大于 0.01 m^2 s^{-2} 的部分）

Fig.5 Regression coefficients of interannual anomalies of early winter 200 hPa divergences (shaded areas; units: 10^{-6} kg m^{-2} s^{-1}) and wave-activity flux (arrows; units: m^2 s^{-2}) onto NAH index during autumn: (the dotted areas indicate that the regression coefficients are statistically significant above 90% confidence level, and only the part of the wave activity flux greater than 0.01 m^2 s^{-2} is drawn)

从局地温度变化方程可知，局地气温变化取决于温度的水平平流、垂直输送以及非绝热加热，而对于近地层而言，非绝热加热是影响大气温度局地变化的重要因子（Chen and Wu，2017；李娜等，2020；李惠心等，2021）。图 6 给出了北大西洋马蹄型海温异常正位相与负位相年对应的初冬我国区域平均的 850 hPa 局

地温度变化项、温度平流项、垂直输送项、非绝热加热项的差值合成，由图 6 可知，温度平流项、垂直输送项、非绝热加热项对我国初冬气温的变化都呈正贡献，其中非绝热加热项贡献最大，说明在秋季北大西洋马蹄型海温异常的作用下，非绝热加热对初冬气温异常的影响最为显著。通过计算秋季 NAH 指数对初冬地表净短波辐射和地表净长波辐射的回归系数分布，此处短波辐射定义向下为正，长波辐射向上为正。结果表明，当秋季 NAH 呈正位相时，初冬地表净短波辐射通量和地表净长波辐射通量在我国大部分地区为显著正异常，中心值分别达到了 1.8 W/m^2 和 1.4 W/m^2（图 7），说明到达地表的短波辐射增加，同时地表向低层大气传输的长波辐射增加。在我国大部分地区初冬总云量为显著负异常，达到了 -1.4%（图 8），总云量的减少导致对短波辐射的阻挡作用减弱，到达地表的短波辐射增加，同时地表向低层大气传输的长波辐射增加，在非绝热加热的作用下，使得我国大部分地区初冬气温异常增加。结合垂直运动可以发现，当秋季 NAH 呈正位相时，初冬我国大部分地区对流层上层气流辐合，出现显著的下沉运动，总云量减少，在非绝热加热的作用下，我国大部分地区初冬气温异常增加。本文也利用 ERA5 再分析资料，计算了秋季 NAH 指数与初冬大气环流要素、辐射通量和总云量变化等的关系（图略），所得结果与 NCEP/NCAR 再分析资料的结果基本一致。

综上所述，秋季北大西洋马蹄型海温异常通过其与 NAO 之间的相互作用可以持续到初冬。初冬北大西洋马蹄型海温异常通过加热异常引起北大西洋副极地和副热带地区对流层上层的辐散辐合运动，并且激发出南、北两支 Rossby 波列。其中，北支波列由北大西洋副极地向东北方向传播至巴伦支海附近，然后沿西伯利亚向东南方向传播至我国上空；南支波列由北大西洋副热带向东传播至我国上空。受其影响，我国上空对流层上层出现异常辐合辐散，与之伴随的异常垂直运动使得我国上空云量变化，通过非绝热加热的作用引起我国大部分地区气温发生变化。

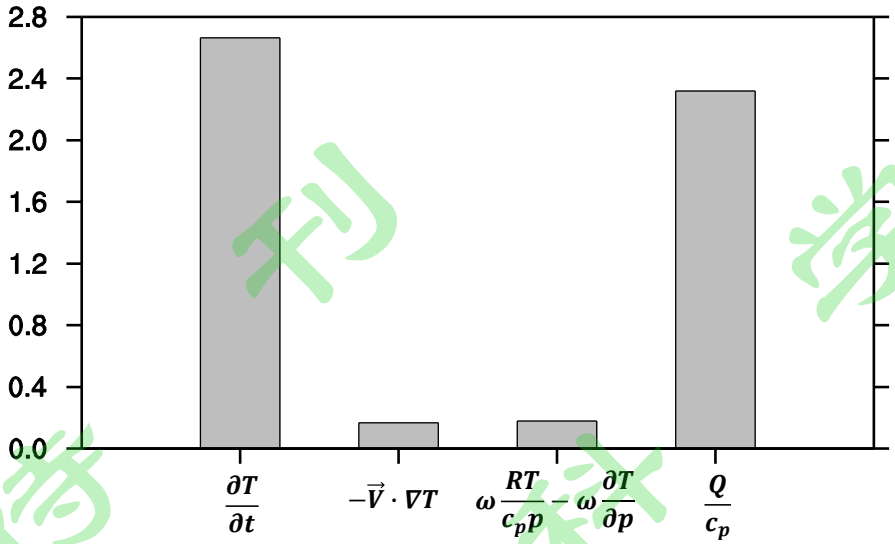

图 6　北大西洋马蹄型海温异常正位相与负位相年对应的初冬我国区域平均的 850 hPa 局地温度变化项、温度平流项、垂直输送项、非绝热加热项的差值（单位：10^{-5} K s^{-1}）

Fig.6 Differences of North Atlantic horseshoe of different terms in the thermodynamic equation in the 850 hPa in China about local temperature variation, horizontal advection, adiabatic heating related to vertical motion, diabatic heating (units: 10^{-5} K s^{-1}) in early winter between positive years and negative years

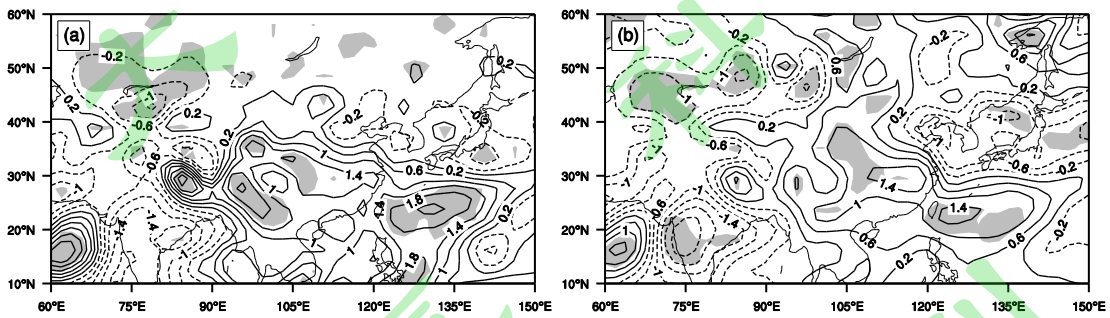

图 7　秋季 NAH 指数对初冬地表净短波辐射（a）和地表净长波辐射（b）（单位：W m^{-2}）年际变化的回归系数分布（阴影区域表示通过了 90%置信水平的统计显著性检验）

Fig.7 Regression coefficients of interannual anomalies of early winter surface net shortwave radiation (a) and surface net longwave radiation (b) (units: W m^{-2}) onto NAH index during autumn (shaded areas indicate that the regression coefficients are statistically significant above 90% confidence level)

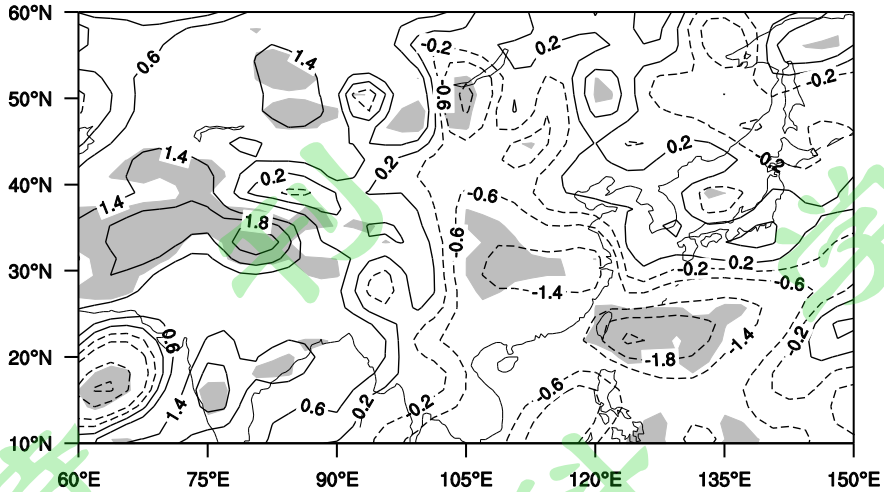

图 8　秋季 NAH 指数对初冬总云量（单位：%）年际变化的回归系数分布（阴影区域表示通过了 90%置信水平的统计显著性检验）

Fig.8 Regression coefficients of interannual anomalies of early winter total cloud cover (units: %) onto NAH index during autumn (shaded areas indicate that the regression coefficients are statistically significant above 90% confidence level)

5 北大西洋马蹄型海温异常影响初冬大气环流及辐射强迫和气温异常的模拟分析

前文的观测资料分析表明，秋季北大西洋马蹄型海温异常可以持续到初冬，后者通过影响初冬大气环流异常，进而影响我国气温异常。为了验证这一机制，本文设计了一组控制试验和两组敏感性试验。试验方案如下：（1）控制试验（记为 CTL）的下边界强迫采取模式自带的气候态月平均海温和海冰，利用模式自带初始场，从 1 月开始，连续积分 20 年，得到 20 年的模式积分结果，取后 10 年作为控制试验的结果；（2）北大西洋马蹄型海温异常正位相试验（记为 NAH_POS），模式将控制试验结果中每年 1 月 1 日大气资料作为敏感性试验的初始场，下边界强迫场与控制试验一致，但从 9 月 1 日开始在北大西洋区域（80.5～0.5°W，9.5～70.5°N）加入 NAH 模态正位相年的秋季（9—11 月）和初冬（12 月）海温距平场，其他区域不做更改，积分过程中海温异常强度保持不变，每个样本从 1 月 1 日持续积分到 12 月 31 日，得到 10 个样本的 NAH_POS 试验结果；（3）北大西洋马蹄型海温异常负位相试验（记为 NAH_NEG）：与 NAH_POS 试验一

致，但下边界强迫场中加入的是 NAH 模态负位相年的秋季（9—11 月）和初冬（12 月）北大西洋区域海温距平场，得到 10 个样本的 NAH_NEG 试验结果。

图 9 给出了北大西洋马蹄型海温异常正位相与负位相试验模拟的初冬 200 hPa 散度场的差值分布。与观测分析结果较为一致，在北大西洋副极地和副热带的对流层上层为明显的大气辐散异常，并激发出南、北两支波列。其中北支波列先向东北方向传播至巴伦支海附近，再沿西伯利亚向东南方向传播至我国上空；南支波列向东传播至我国上空，导致我国上空出现明显的大气辐合运动。但相较于观测结果（图 5），模拟的我国上方对流层上层大气辐合异常中心位置略偏南。

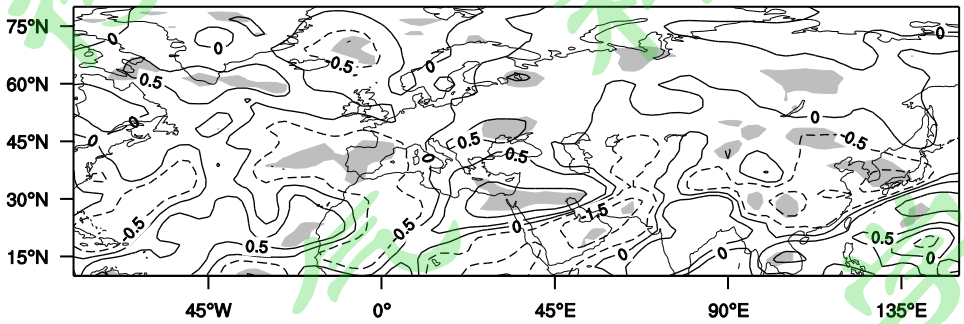

图 9　北大西洋马蹄型海温异常正位相与负位相试验的初冬 200 hPa 的散度（单位：10^{-6} kg m^{-2} s^{-1}）的差值分布（阴影区域表示通过了 90%置信水平的统计显著性检验）

Fig.9 Differences of the early winter 200 hPa divergences (units: 10^{-6} kg m^{-2} s^{-1}) between NAH_POS and NAH_NEG (shaded areas indicate that the differences are statistically significant above 90% confidence level)

图 10 给出北大西洋马蹄型海温异常正位相和负位相试验的初冬净短波辐射和净长波辐射的差值分布，我国大部分地区的短波辐射和长波辐射均为正异常，这与观测分析结果较为一致（图 7）。但相较于观测结果，数值模拟的短波辐射和长波辐射的中心位置较为偏南，最强中心出现在我国华南地区。

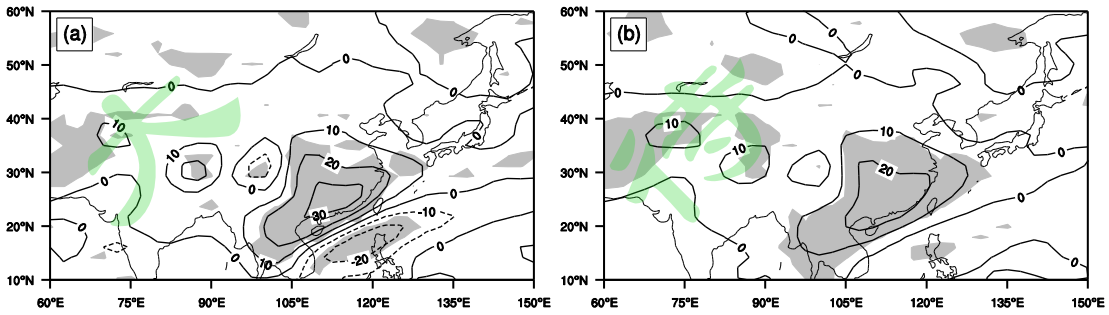

图 10　北大西洋马蹄型海温异常正位相与负位相试验的初冬地表净短波辐射（a）和地表净长波辐射（b）（单位：W m^{-2}）的差值分布（阴影区域表示通过了 90%置信水平的统计显著性检验）

Fig.10 Differences of the early winter surface net shortwave radiation(a) and surface net longwave radiation(b) (units: W m^{-2}) between NAH_POS and NAH_NEG (shaded areas indicate that the differences are statistically significant above 90% confidence level)

图 11 给出北大西洋马蹄型海温异常正位相和负位相试验模拟的初冬气温的差值分布。如图所示，我国华北、西北、华中和华南地区气温为显著正异常，其中华北和西北地区超过了 2.4 ℃，这与观测结果基本一致（图 2b）。与观测结果不同的是，模拟结果在青藏高原附近地区气温为显著负异常，这与数值模拟的该处上方 200 hPa 辐散相对应（图 9），可能是由于模式在青藏高原附近大气环流模拟存在误差所造成的。

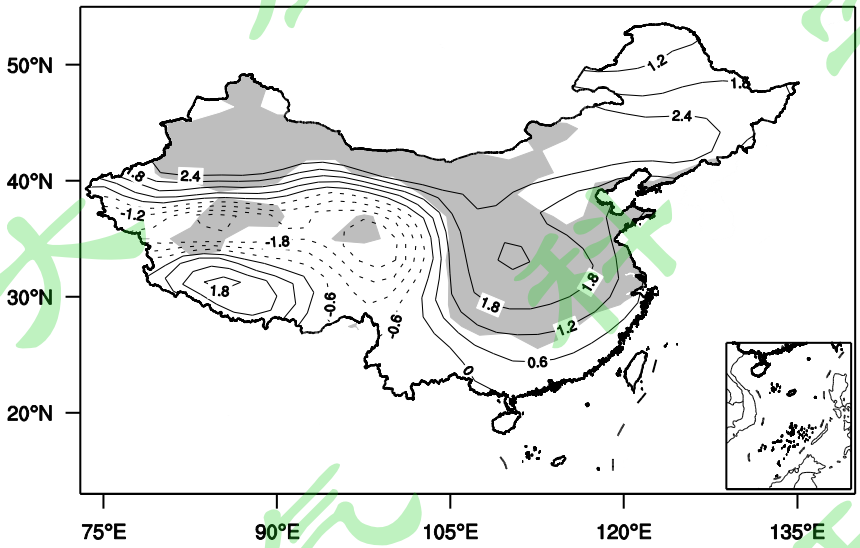

图 11 北大西洋马蹄型海温异常正位相与负位相试验的初冬气温（单位：℃）的差值分布（阴影区域表示通过了 90%置信水平的统计显著性检验）

Fig.11 Differences of the early winter temperature (units: ℃) between NAH_POS and NAH_NEG (shaded areas indicate that the differences are statistically significant above 90% confidence level)

6 结论和讨论

本文利用 Hadley 中心的海表温度资料、全国 160 站气温以及 NCEP/NCAR 的再分析资料，对秋季北大西洋马蹄型海温异常变化特征以及与初冬我国气温异常的联系进行了初步研究，得到以下结论：

（1）秋季北大西洋海温年际异常 EOF 第一模态表现为马蹄型海温模态，即：当纽芬兰岛东南部海温为负（正）距平时，副极地和副热带的海温正（负）距平在北大西洋东部连接在一起，其方差贡献率为 20.5%。

（2）秋季北大西洋马蹄型海温异常与初冬我国大部分地区气温有显著的正相关关系，其中华北和西北地区的相关系数最大，中心数值超过了 0.35，通过了 95%置信水平的统计显著性检验，说明当秋季北大西洋马蹄型海温模态呈正位相时，初冬我国大部分地区气温偏高，反之则偏低。

（3）秋季北大西洋马蹄型海温异常持续到初冬，后者通过影响初冬东亚地区的大气环流异常和非绝热加热等，从而引起初冬我国气温异常。秋季 NAH 正位相年时，初冬北大西洋副极地和副热带海温正异常通过对大气加热异常能够引起的对流层上层的辐散运动，并通过南、北两支波动将扰动能量向下游传播。其中，北支波列从北大西洋副极地向东北方向传播至巴伦支海附近，再沿西伯利亚向东南方向传播至我国上空；南支波列从北大西洋副热带向东传播至我国上空。受其影响，我国上空对流层上层的大气运动产生辐合异常，出现异常的下沉运动，使得该地区云量减少，到达地表的短波辐射增加，同时地表向低层大气传输的长波辐射增加，在非绝热加热的作用下，使得我国大部分地区气温异常增加；反之亦然。利用 NCAR CAM5.3 模拟了北大西洋马蹄型海温异常对大气环流、辐射强迫和气温的影响，模拟结果与观测资料统计分析结果基本一致。

本文对秋季北大西洋马蹄型海温异常变化特征及其与初冬我国气温年际变化的机理进行了初步探讨，通过统计分析方法讨论了秋季北大西洋马蹄型海温对初冬大气环流异常以及我国气温异常的影响，最后通过模式试验验证其结果。本文针对初冬大气环流异常对秋季 NAH 异常的响应特征进行了初步的模拟验证。今后将利用线性斜压模式等深入开展数值模拟研究，进一步揭示秋季 NAH 异常激发产生大气环流遥相关波列的动力学机制。研究指出，东亚冬季气温存在显著的季节内变化（韦玮等，2014；祁莉和泮琬楠，2021）。关于秋季北大西洋马蹄

型海温与后冬我国气温异常的联系还需要开展研究。此外，Wu et al.（2011）、Chen and Wu（2017）研究认为，北大西洋海温异常与欧亚气温异常的联系存在年代际转折。本文通过对秋季 NAH 指数和初冬我国西北地区气温年际异常进行 11a 滑动相关（图略），结果发现在 20 世纪 80 年代后期以前，秋季 NAH 指数和初冬我国西北地区气温呈正相关关系，而在 80 年代后期之后，两者为负相关关系。关于秋季 NAH 异常与初冬我国西北地区气温异常年际关系的年代际变化及其机理还有待于进一步研究。

致谢：非常感谢两位匿名审稿专家对本文提出的建议和修改意见。本论文的数值计算得到了南京信息工程大学高性能计算中心的计算支持和帮助。

参考文献（References）

Battisti D S, Bhatt U S, Alexander M A. 1995. A modeling study of the interannual variability in the wintertime North Atlantic Ocean [J]. J. Climate, 8(12): 3067-3083. doi:10.1175/1520-0442(1995)008<3067:AMSOTI>2.0.CO;2.

Cassou C, Deser C, Terray L, et al. 2004. Summer sea surface temperature conditions in the North Atlantic and their impact upon the atmospheric circulation in early winter [J]. J. Climate, 17(17): 3349-3363. doi:10.1175/1520-0442(2004)017<3349:SSSTCI>2.0.CO;2.

Cassou C, Deser C, Alexander A. 2007. Investigating the impact of reemerging sea temperature anomalies on the winter atmospheric circulation over the North Atlantic [J]. J. Climate, 20(14): 3510-3526. doi:10.1175/JCLI4202.1.

Chen S F, Wu R G, Chen W, et al. 2020. Structure and dynamics of a springtime atmospheric wave train over the North Atlantic and Eurasia [J]. Climate Dyn., 54(11-12): 5111-5126. doi:10.1007/s00382-020-05274-7.

Chen S F, Wu R G, Chen W. 2021. Influence of North Atlantic sea surface temperature anomalies on springtime surface air temperature variation over Eurasia in CMIP5 models [J]. Climate Dyn., 57(9-10): 2669–2686. doi:10.1007/S00382-021-05826-5.

Chen S F, Wu R G, Liu Y. 2016. Dominant modes of interannual variability in Eurasian surface air temperature during boreal spring [J]. J. Climate, 29(3): 1109-1125. doi:10.1175/JCLI-D-15-0524.1.

Chen S F, Wu R G. 2017. Interdecadal changes in the relationship between interannual variations of spring North Atlantic SST and Eurasian surface air temperature [J]. J. Climate, 30(10): 3771-3787. doi:10.1175/JCLI-D-16-0477.1.

Chen W, Lu R Y, Dong B W. 2014. Intensified anticyclonic anomaly over the western North Pacific during El Niño decaying summer under a weakened Atlantic thermohaline circulation [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 119(24): 13637-13650. doi:10.1002/2014JD022199.

Czaja A, Frankignoul C. 1999. Influence of the North Atlantic SST on the atmospheric circulation [J]. Geophys. Res. Lett., 26(19): 2969-2972. doi:10.1029/1999GL900613.

Czaja A, Frankignoul C. 2002. Observed Impact of Atlantic SST Anomalies on the North Atlantic Oscillation [J]. J. Climate, 15(6): 606-623. doi:10.1175/1520-0442(2002)015<0606:oioasa>2.0.CO;2.

Ding T, Yuan Y, Gao H, et al. 2020. Impact of the North Atlantic sea surface temperature on the summer high temperature in northern China [J]. Int. J. Climatology, 40(4): 2296-2309. doi:10.1002/joc.6333.

Gastineau G, Frankignoul C. 2015. Influence of the North Atlantic SST variability on the atmospheric circulation during the twentieth century [J]. J. Climate, 28(4): 1396-1416. doi:10.1175/JCLI-D-14-00424.1.

Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis[J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 146(730): 1999-2049. doi:10.1002/qj.3803.

Hong X W, Lu R Y. 2016. The meridional displacement of the summer Asian jet, silk road pattern, and tropical SST anomalies [J]. J. Climate, 29(10): 3753-3766. doi:10.1175/JCLI-D-15-0541.1.

Huang B H, Shukla J. 2005. Ocean-atmosphere interactions in the tropical and subtropical Atlantic Ocean[J]. J. Climate, 18(11): 1652-1672. doi:10.1175/JCLI3368.1.

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77(3): 437−472. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.

Kerr R A. 2000. A North Atlantic climate pacemaker for the centuries [J]. Science, 288(5473): 1984-1986. doi:10.1126/science.288.5473.1984.

Kushnir Y. 1994. Interdecadal variations in North Atlantic sea surface temperature and associated atmospheric conditions [J]. J. Climate, 7(1): 141-157. doi:10.1175/1520-0442(1994)007<0141:ivinas>2.0.CO;2.

Laurent T. 2012. Evidence for multiple drivers of North Atlantic multi-decadal climate variability [J]. Geophys. Res. Lett., 39(19): L19712. doi:10.1029/2012GL053046.

李惠心, 孙博, 周波涛, 等. 2021. 3 月巴伦支海海冰对中国东部 8 月气温偶极子型的影响及机制研究 [J]. 大气科学学报, 44(1): 89-103. Li Huixin, Sun Bo, Zhou Botao, et al. 2021. Effect of the Barents Sea ice in March on the dipole pattern of air temperature in August in eastern China and the corresponding physical mechanism [J]. Trans Atmos Sci (in Chinese), 44(1): 89-103．doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20201013001.

李娜, 肖子牛, 赵亮. 2020. 2018 年夏季东北极端高温事件物理机制分析 [J]. 气候与环境研究, 25(5): 469-482. Li Na, Xiao Ziniu, Zhao Liang. 2020. Analysis on the mechanism of the 2018 summer extreme high temperature event in Northeast China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25(5): 469−482. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19100.

刘晨, 张杰, 徐玮平. 2020. 春季欧亚大陆积雪主模态及其与北大西洋海温的关系 [J].大气科学, 44(4): 792−807. Liu Chen, Zhang Jie, Xu Weiping. 2020. Main Modes of Spring Snow Depth in Eurasia and Their Relationship with the North Atlantic SST [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(4): 792−807. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1911.19140.

Liu Y Y, Wang L, Zhou W, et al. 2014. Three Eurasian teleconnection patterns: spatial structures, temporal variability, and associated winter climate anomalies [J]. Climate Dyn., 42(11-12): 2817-2839. doi:10.1007/s00382-014-2163-z.

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.

梅笑冬, 孙即霖, 孙雅文. 2017. 基于遥相关的 NAO 位相转换影响机理研究分析 [J]. 中国海洋大学学报, 47(1): 7-16. Mei Xiaodong, Sun Jilin, Sun Yawen. 2017. Analyses of NAO phase transformation mechanism based on teleconnection theory[J]. Periodical of Ocean University of China (in Chinese), 47(1): 7-16. doi: 10.16441/j.cnki.hdxb.20160051.

Muhammad A E, Dario N, Fred K, et al. 2020. Atlantic ocean influence on middle east summer surface air temperature [J]. Clim. Atmos. Sci., 3(7-8): 2015-2029. doi:10.1038/s41612-020-0109-1.

Neale R B, Gettelman A, Park S, et al. 2010. Description of the NCAR community atmosphere model (CAM 5.0) [R]. NCAR Tech. Note NCAR/TN-486+ STR, 2010, 1(1): 1-12.

North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions [J]. Mon Wea Rev, 110(7): 699-706. doi:10.1175/1520-0493(1982)110<0699:seiteo>2.0.CO;2.

Pan L L. 2005. Observed positive feedback between the NAO and the North Atlantic SSTA tripole [J]. Geophys. Res. Lett., 32(6): 83-100. doi:10.1029/2005GL022427.

Peng S, Robinson W A, Li S. 2003. Mechanisms for the NAO responses to the North Atlantic SST tripole [J]. J. Climate, 16(12): 1987-2004. doi:10.1175/1520-0442(2003)016<1987:MFTNRT>2.0.CO;2.

Qiu D N, Xu H M, Deng J C, et al. 2021. Different impacts of spring tropical Atlantic SST anomalies on Eurasia spring climate during the periods of 1970–1995 and 1996–2018 [J]. Atmos. Res., 253. doi:10.1016/j.atmosres.2021.105494.

祁莉, 泮琬楠. 2021. 东亚气温前冬与后冬反相的变化特征及可能影响因子 [J]. 大气科学, 45(5): 1039−1056. Qi Li, Pan Wannan. 2021. Variability of the phase reversal of the East Asia temperature from early to late winter and the possible influencing factors [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(5): 1039−1056. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.20181.

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. doi:10.1029/2002JD002670.

时晓曚, 孙即霖, 孙雅文, 等. 2015. 北大西洋秋季“三极子”海温结构对冬季大气环流场的影响 [J]. 海洋学报, 37(7):33-40. Shi Xiaomeng, Sun Jilin, Sun Yawen, et al. 2015. The impact of the autumn Atlantic sea surface temperature three-pole structure on winter atmospheric circulation [J]. Haiyang Xuebao (in Chinese), 37(7):33-40. doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2015.07.004.

Sutton R T, Allen M R. 1997. Decadal predictability of North Atlantic sea surface temperature and climate [J]. Nature, 388(6642): 536-567. doi:10.1038/41523.

韦玮, 王林, 陈权亮, 等. 2014. 我国前冬和后冬气温年际变化的特征与联系[J]. 大气科学, 38(3): 524-536. Wei Wei, Wang Lin, Chen Quanliang, et al. 2014. Interannual variations of early and late winter temperatures in China and their linkage [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38(3): 524-536. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13320.

Wu L X, He F, Liu Z Y, et al. 2007. Atmospheric teleconnections of tropical Atlantic variability: Interhemispheric, tropical-extratropical, and cross-basin interactions [J]. J. Climate, 20(5):856-870. doi:10.1175/JCLI4019.1.

Wu L X, Liu Z Y. 2005. North Atlantic decadal variability: air-sea coupling, oceanic memory, and potential northern hemisphere resonance [J]. J. Climate, 18(2): 331-349. doi:10.1175/JCLI-3264.1.

Wu R G, Yang S, Liu S, et al. 2011. Northeast China summer temperature and North Atlantic SST [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 116, D16. doi:10.1029/2011JD015779.

Wu Z W, Wang B, Li J P, et al. 2009. An empirical seasonal prediction model of the east Asian summer monsoon using ENSO and NAO [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 114, D18. doi:10.1029/2009JD011733.

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.1006-9895.1912.1912.

Yanai M, Esbensen S, Chu J H. 1973. Determination of bulk properties of tropical cloud clusters from large-scale heat and moisture budgets [J]. J. Atmos. Sci., 30: 611-627. doi:10.1175/1520-0469(1973)030<0611:DOBPOT>2.0.CO;2.

杨修群, 谢倩, 黄士松. 1992. 大西洋海温异常对东亚夏季大气环流影响的数值试验 [J]. 气象学报, 50(3): 349-354. Yang Xiuqun, Xie Qian, Huang Shisong. 1992. Numerical experiments of effect of warm SST anomalies in Atlantic ocean on the east Asian general circulation during the northern hemisphere summer [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 50(3): 349-354. doi: 10.11676/qxxb1992.042.

Yang Y, Wu L X. 2015. Changes of Air–sea Coupling in the North Atlantic over the 20th Century [J]. Adv. Atmos. Sci., 32(4): 445-456. doi:10.1007/s00376-014-4090-7.

Yu S, Sun J Q. 2021. Conditional impact of boreal autumn North Atlantic SST anomaly on winter tropospheric Asian polar vortex [J]. Climate Dyn., 56(3-4):855-871. doi:10.1007/s00382-020-05507-9.

Zuo J Q, Li W J, Sun C H, et al. 2013. Impact of the North Atlantic sea surface temperature tripole on the East Asian summer monsoon [J]. Adv. Atmos. Sci, 30(4): 1173-1186. doi:10.1007/s00376-012-2125-5.