

1 稿件编号 2019127C
2 doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1912.19127

3 90年代以后华北初春低温增强和北大西洋海温关系

4 徐玮平^{1, 2}, 张杰¹, 刘晨¹, 孟祥新²

5 (1. 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, 南京信息工程大学,
6 南京 210044; 2. 山东省气候中心, 济南 250031)

7
8 **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90年代以后华北地区
9 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
10 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
11 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500hPa
12 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
13 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
14 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
15 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
16 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。
17 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
18 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”
19 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
20 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
21 华北地区气旋性加强和经向环流加大, 极端低温事件增多。

22
23 **关键词:** 极端低温; 北大西洋海温; 能量分析; CAM5.1模式
24 中图分类号: P467

25
26
27
28
29
30
31
32
33

收稿日期 2019-03-13; 网络预出版日期:
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 国家自然科学基金面上项目“北大西洋与欧亚大陆热力协同对北方夏季年代际旱涝的影响及其机理(41975083)”和国家自然科学基金重点项目“我国典型夏季风影响过渡区陆-气相互作用及其对夏季风响应研究(41630426)共同资助”

Funded by National Natural Science Foundation Item (Grant 41975083), National Natural Science Foundation Key research (Grant 41630426)

34 **The Relationship between the Early Spring Low Temperature**
35 **Enhancement in the North China and Sea Surface Temperature in**
36 **the North Atlantic since the 1990s**

37 **XU Weiping^{1,2}, ZHANG Jie¹, LIU Chen¹, Meng Xiangxin²**

38 (1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/Key Laboratory of
39 Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology,
40 Nanjing, 210044, China; 2. Shandong Climate Center, Jinan 250031, China)

41 **Abstract:** Based on the reanalyze data from European Centre for Medium-Range Weather
42 Forecasts (ECMWF) and the sea surface temperature(SST) data from Hadley Center (Hadley), this
43 paper analyzed the reason for the extreme low temperature of North China enhancement in spring
44 since 1990s, which was verified by numerical simulation results. The results indicated the
45 significant correlation between the North Atlantic “Horse Hoof ”sea surface temperature mode
46 and the Eurasian Wave Train(EU) which could affect North China extreme low temperature. At
47 the same time, the sea surface temperature mode also has a close correlation with the vertical
48 wave energy in the key areas of the North Atlantic after 1997.The 500hPa circulation mode in the
49 North Atlantic for the same period showed a trend of eastward movement and southward
50 withdrawal. Since 1997, and the regional scope of positive surface temperature forced by thermal
51 anomalies next to the eastern Greenland is expending, as well as the westerly jet stream is
52 increasing, which could stimulate the EU pattern and form the warm ridges downstream Eurasian
53 continent. The Localized Multiscale Energy and Vorticity Analysis (MS-EVA) energy analysis
54 method showed that the force of surface temperature thermal anomalies and the force of pressure
55 gradient in the key area of eastern Greenland which do positive work in the whole troposphere,
56 leading to the increase and divergence of the high-level kinetic energy and leading the ridge to
57 strengthen toward North. Through the EU wave train, the cyclonic anomaly was strengthened in
58 the downstream North China, and the Asian polar vortex was strengthened and maintained. The
59 temperature in North China decreased sharply and the extreme low temperature events increased.
60 Finally, the CAM5.1 model simulation was used to study the effects of the North Atlantic “Horse
61 Hoof ” SST mode on atmospheric circulation anomalies and the extreme low temperature in
62 North China. The simulation results verified the observation results well. It further shows that the
63 SST mode can affect the atmospheric circulation anomalies in the Eurasia by stimulating the
64 Eurasian Wave Train, thus leading to the intensification of cyclone and meridional circulation, as
65 well as the increase of the extreme low temperature events in the North China.

66
67 **Keywords:** Extreme low temperature, The North Atlantic sea surface temperature, Energy
68 analysis, Community Atmosphere Model (CAM5.1)

71 1 引 言

72 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
73 (Seneviratne et al, 2012;Donat et al, 2013;王岱等, 2016)。极端温度事件的强度
74 和频率出现了显著的变化(Brabson and Palutikof 2002; New et al, 2006;秦大
75 河, 2004;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
76 减弱(任国玉等, 2005;李维京等, 2013;王晓娟等, 2012)，并且近几年我国极端
77 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
78 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 et
79 al,2017)，对此许多学者对我国分区域进行了大量的研究。付东雪等(2011)发
80 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
81 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
82 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
83 件有所增加(刘樱等, 2016)。

84 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)。
85 研究发现中高纬系统与极端低温事件密切相关(李艳等, 2018)。Bueh et
86 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
87 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
88 偏低(朱艳峰等, 2007)。当北大西洋涛动 NAO(North Atlantic Oscillation)、北
89 极涛动 AO(Arctic Oscillation)为正(负)位相时，通过改变纬向温度平流，进而
90 导致中国北方气温偏高(低) (李春等, 2005)。孙诚和李建平(2012)研究发现，
91 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
92 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
93 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
94 强，西伯利亚高压加强，高空东亚大槽加强，我国温度偏低(杨辉和李崇银,2008;
95 何春和何金海,2003;龚道溢和王绍武,2003;琚建华等, 2004)。还有研究表明北
96 太平洋涛动 NPO(North Pacific Oscillation)指数异常偏小，发生区域性极端低
97 温事件的概率较高(王晓娟等,2013)。Wang et al.(2018)指出欧亚型 EU(The
98 Eurasian teleconnection)与东亚地区地表温度和降水密切相关；当中北大西洋
99 海温偏低(高)，可以激发出 EU 正(负)位相，导致我国气温偏低(高)(曲金华
100 等, 2006;Li,2004)。

101 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
102 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
103 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
104 (Huang,1992;Wang and He,2015)，导致大气环流形势异常，极端气候事件频发。

105 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

106 (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
107 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
108 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
109 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
110 据最新研究表明(徐玮平等,2018)，90年代以后格陵兰岛以东关键区有波能向
111 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
112 强，有利于极端低温的发生和维持。

113 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
114 厄尔尼诺 ENSO(El Niño/La Niña-Southern Oscillation)与 2018 年我国南方大范围低
115 温雨雪密切相关(Ding et al, 2008; Li et al,2008;Zhang et al,2008;Wang et
116 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
117 增多。另外 Li and Zhou (2018) 研究发现强烈的太阳活动通过加快平流层季
118 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
119 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
120 的原因及机理尚不完全清楚。本文重点分析 90 年代以后华北地区极端低温增
121 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
122 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
123 果。

124 2 资料与方法

125 2.1 资料

126 本文使用的资料包括：

127 1) 1979-2015 年欧洲中期天气预报中心 (European Centre for
128 Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 的 ERA-interim 再分析资料。垂直
129 方向 1000-100 hPa 共分为 27 层，其中 1000-750 hPa 间隔 25 hPa, 750-250 hPa
130 间隔 50 hPa, 250-100 hPa 间隔 25 hPa, 空间分辨率分别为 $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ 逐月及
131 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 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
132 m 温度。

133 2) 英国哈德莱中心 (Hadley Center) 1871-2015 年逐月全球海温资料
134 (Rayner et al,2003) 水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$
135 (<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/sst-data-hadisst-v11>)[2019-03-13]

136 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
137 相对完整的我国北方($30^\circ\text{N}-55^\circ\text{N}, 73^\circ\text{E}-135^\circ\text{E}$)501 个观测站点作为研究对象。

138 2.2 研究方法

139 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
140 区($35^\circ\text{N}-41^\circ\text{N}, 112^\circ\text{E}-123^\circ\text{E}$)初春(3 月)期间的极端低温事件。

141 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)
142 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
143 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
144 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
145 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。

146 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
147 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
148 异值分解方法(Singular Value Decomposition, SVD)(Bretherton et al,1992;Wallace et
149 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
150 检验。

151 能量方面使用以多尺度子空间变换(Multiscale Window Transform, MWT)
152 为基础建立的局地多尺度能量涡度分析法(Localized Multiscale Energy and
153 Vorticity Analysis, MS-EVA)(Liang,2016;Liang and Robinson,2005;Liang and
154 Anderson,2007)研究初春华北地区高空动能来源。MWT通过泛函分析使得一
155 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
156 持物理过程的局地性特点(卢慧超等,2017)。

157 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
158 Liang(2016):

$$159 \frac{\partial K}{\partial t} = -b - \nabla \cdot Q_k - \nabla \cdot Q_p + E + \Gamma$$

160 简写的动能收支方程:

$$161 K_t = BUOY + QK + QP + R + T, T = T_{01} + T_{21}$$

162 其中: K_t ($\frac{\partial K}{\partial t}$)表示动能的变化率; BUOY(-b)为浮力转换项,表示有效位能向
163 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;
164 QP ($-\nabla \cdot Q_p$)表示由于气压梯度力做功导致动能增加项; R 表示摩擦耗散的动
165 能; T (T)代表动能在不同尺度之间的转换,该转换已被广泛使用(Lau et
166 al,1992;Maloney,2003; Hsu et al,2009),其中 T_{01} 代表大尺度向季节平均尺度(低频振
167 荡)的动能跨尺度传输, T_{21} 代表天气尺度向季节平均尺度(高频扰动)的动能跨
168 尺度传输。

169 2.3 模式试验

170 本文使用美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric
171 Research, NCAR)发布的地球系统模式(Community Earth System Model

172 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，
173 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
174 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。
175 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
176 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
177 南往北均匀分布 144 个格点的水平分辨率为 $1.9^\circ \times 2.5^\circ$ 的多年平均气候态海表
178 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
179 Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)与哈德莱海温的融合资料，试
180 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
181 温的影响，设计了两个数值试验，即控制试验和敏感性试验。

182 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，
183 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)。

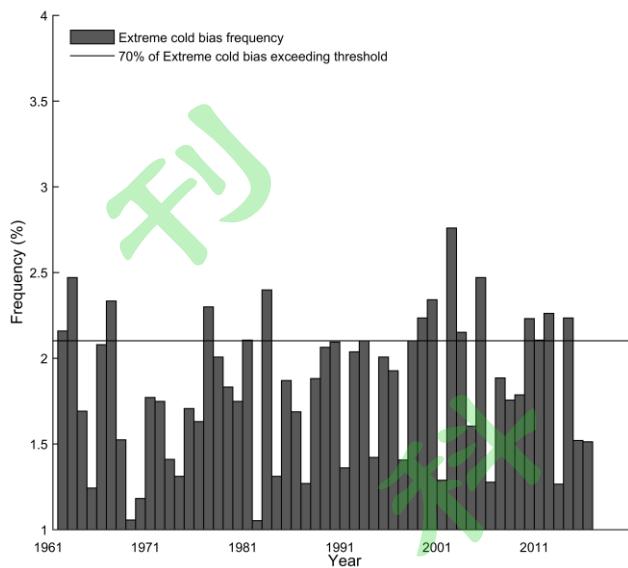
184 敏感性试验：在控制试验中北大西洋地区叠加“马蹄型”海温模态的空
185 间场。其他区域仍采用气候态海表温度。因此，敏感性试验与控制试验的差
186 值场表示北大西洋“马蹄型”海温模态对大气环流异常及华北地区极端低温
187 的影响。

188 3 结果与分析

189 3.1 欧亚波列与北大西洋海温的遥相关关系

190 3.1.1 冷偏差与欧亚波列模态

191 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
192 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
193 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
194 (1979-1982 年)整体环流形式呈现出“三波型”结构，而 21 世纪(2004、2007 和
195 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
196 进行 EOF 时空分解，前两个模态均通过 North 检验，具有显著性差异。第一模
197 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
198 SRP(Silk Road pattern)(Zhang et al,2018; Wallace and Gutzler,1981) 分布型；第
199 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
200 异常加大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
201 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
202 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
203 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。另外通过
204 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
205 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。



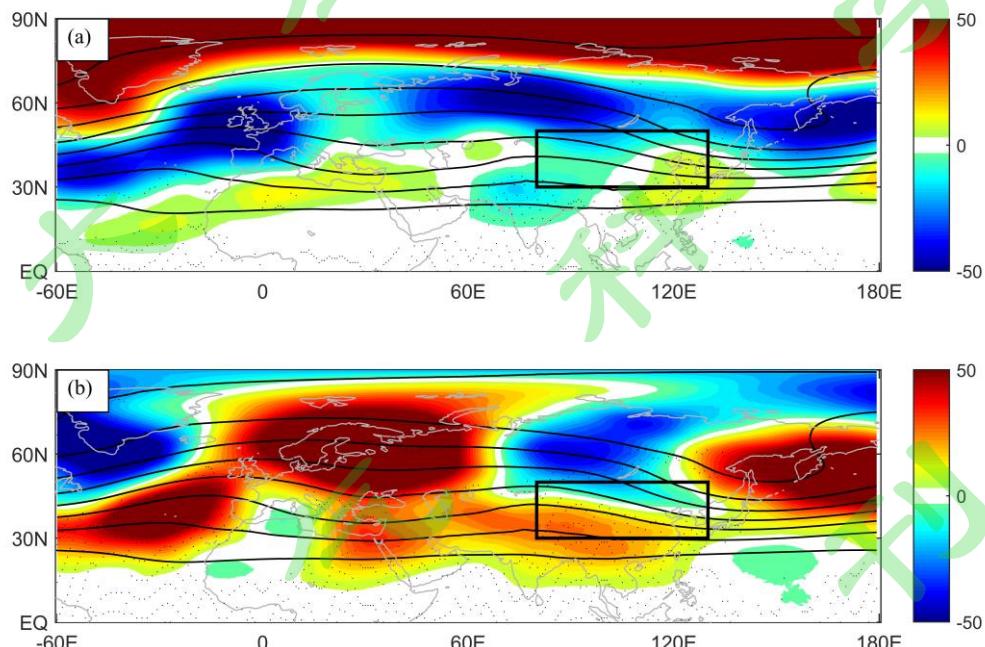
206

207

208

图 1 华北地区初春极端冷偏差发生频率

Fig.1 The extreme cold bias frequency in early spring in North China



209

210

211

212

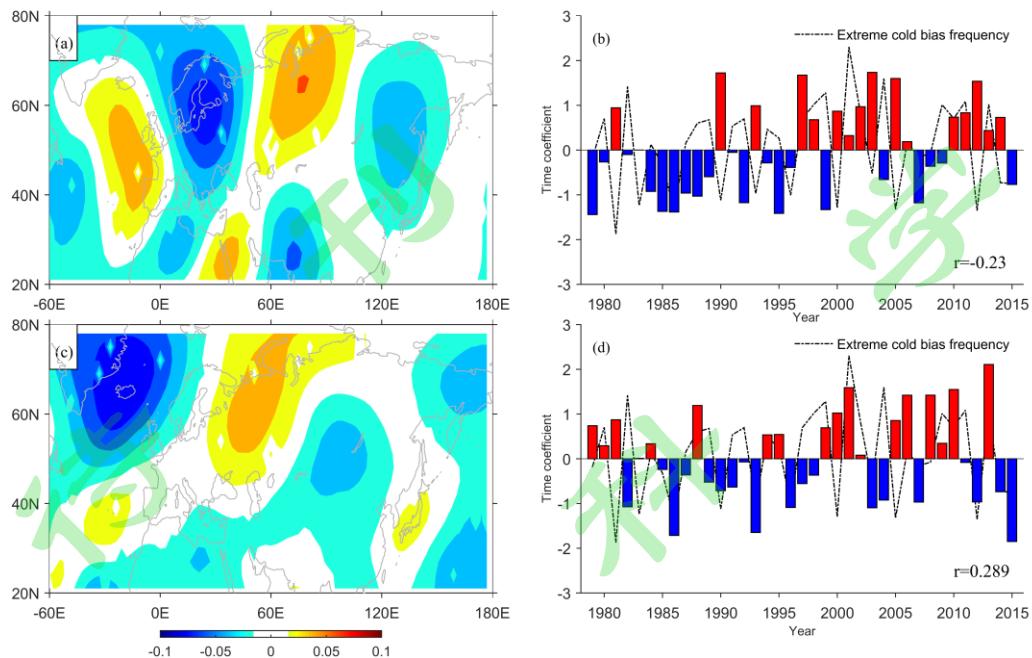
图 2 20 世纪 80 年代前后(a)和 21 世纪(b)500hPa 位势高度距平场(阴影,单位: $10^{-1} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)和位势高度气候平均场(等值线,单位: $10^{-4} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)(阴影打点区域为通过显著性检验的区域,方框为 80°E 以东的我国北方地区)

213

214

215

Fig.2 The distribution of geopotential height anomaly field (the shaded, unit: $10^{-1} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) and climatic field(the contour, unit: $10^{-4} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) at 500hPa in the 1980s(a) and 21st century(b) (The dot areas have passed the confident level) (The rectangle represents 80°E east of north China)



216

217 图 3 1979-2015 年 3 月 200 hPa 经风场 EOF 展开的前两个特征向量的空间分布(a, c)及其时间系数(b, d)
218 黑色虚线为极端冷偏差发生频率, 单位: (%)

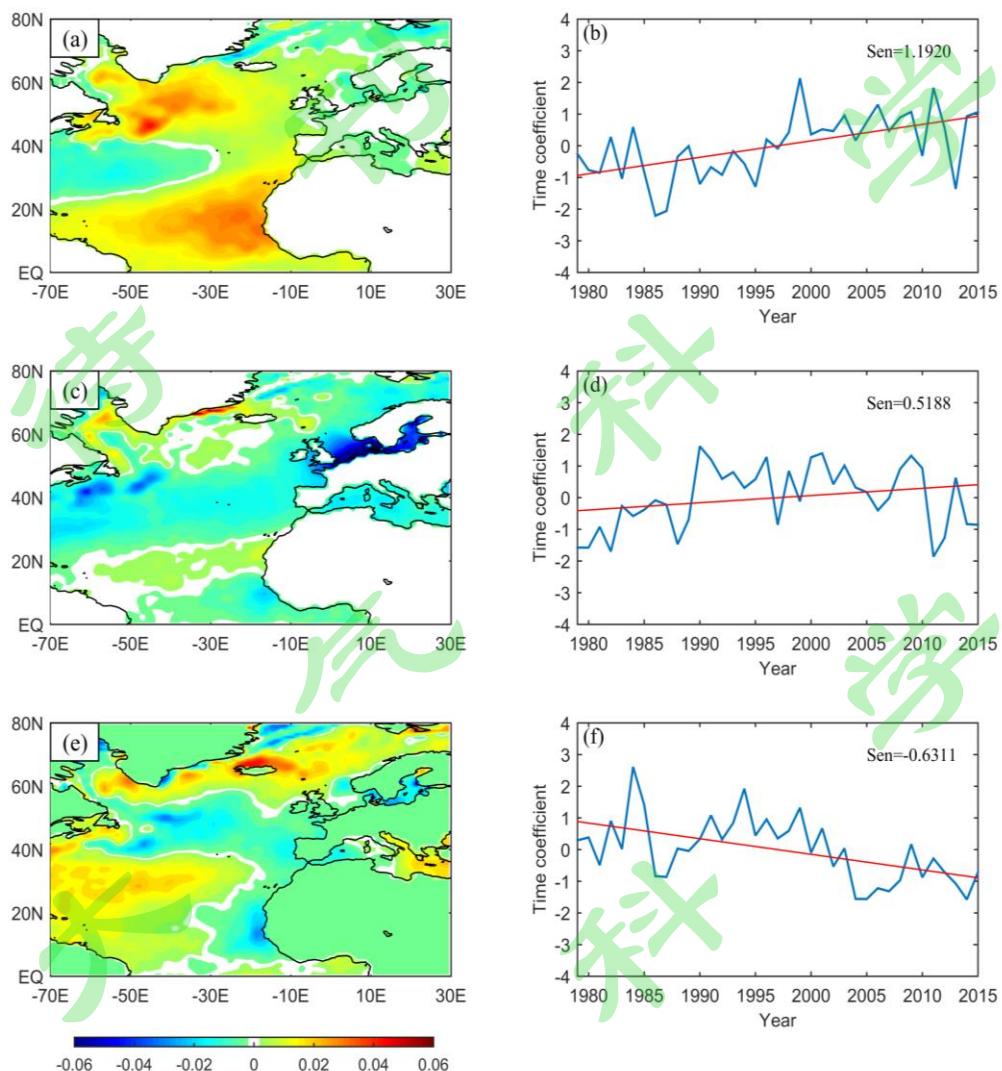
219 Fig.3 The first and second EOF modes (a, c) and their time coefficients (b, d) of 200 hPa Eurasian meridional wind
220 in March during 1979-2015. The black dotted line is the extreme cold bias frequency, units: (%)

221 3.1.2 北大西洋海温时空特征

222 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
223 et al, 2004; 曲金华等, 2006; 张菲燕和徐海明, 2011; 肖贻青, 2017), 其中有学者指出,
224 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
225 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
226 (70°W - 30°E , 0 - 80°N) 地区初春(3 月)海温距平资料进行时空分解(图 3), 前三个
227 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
228 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
229 “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
230 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
231 平。第一模态对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
232 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
233 要以负位相为主, 以后主要以正位相为主, 海温增加明显。

234 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
235 ‘+’、‘-’、‘+’ 的“三极子”型, 在格陵兰岛南部和北非西部海域对应着正
236 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
237 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
238 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,

239 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
240 平检验，波动性较大，波动振幅较大。



241
242 图4 初春(3月)北大西洋海温EOF分解前三个模态的空间分布(a, c, e)及相对应的标准化时间系数(b, d, f)
243 (红色实线为北大西洋海温变化趋势)

244 Fig.4 The spatial distribution (a, c, e) and the variation of corresponding normalized time coefficient (b, d, f) of the
245 EOF first to three modes of the North Atlantic SST in early spring (March)
(The red line is the trend of the North Atlantic SST)

246 3.1.3 欧亚波列模态与北大西洋海温相关关系

247 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
248 范围的环流异常(杨修群和黄士松, 1993; 李崇银, 2000)。因此为了探究中高纬上
249 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
250 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
251 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
252 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
253

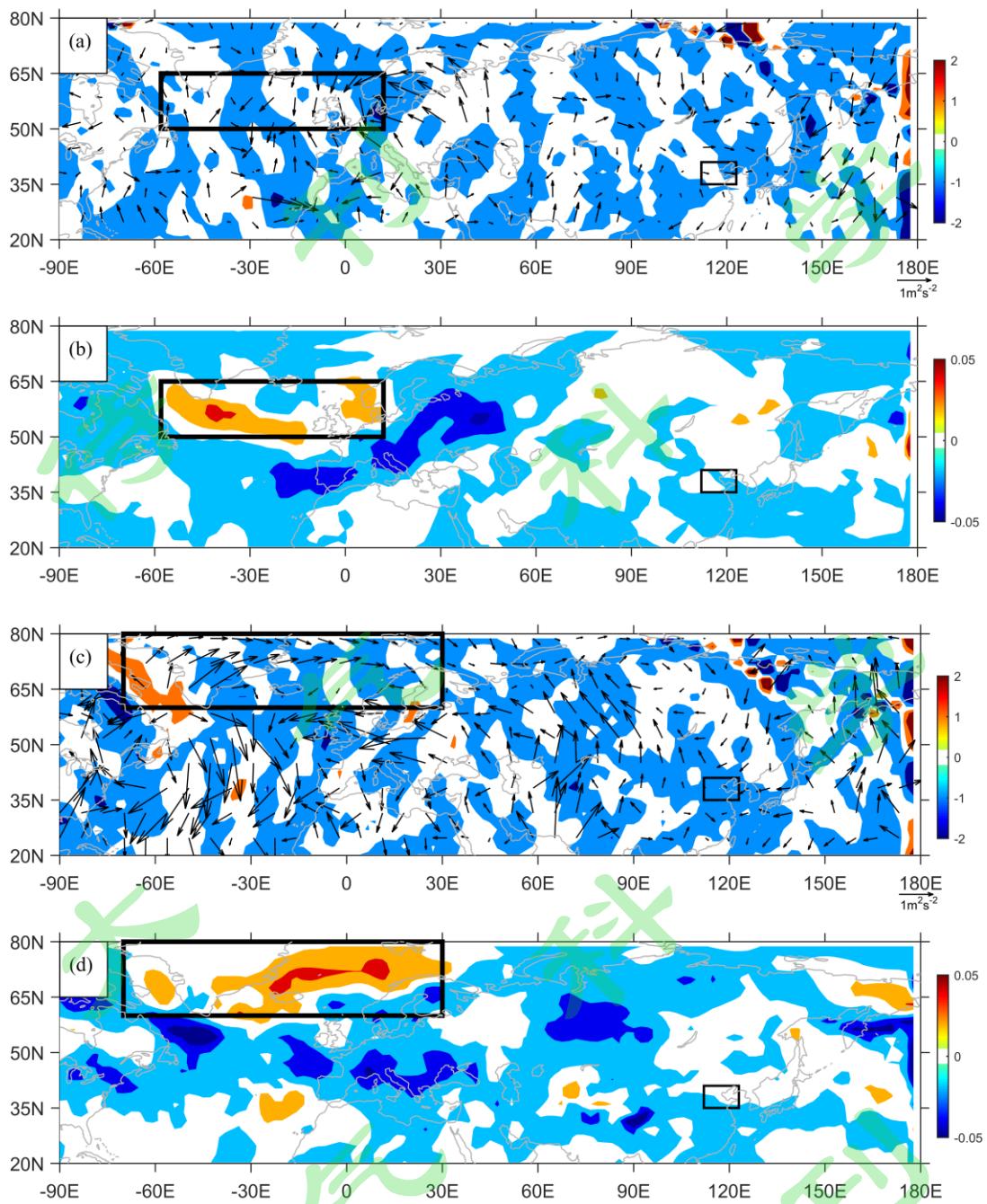
254 欧亚波列模指数 PC1 与北大西洋海温没有明显的显著性相关关系(图略)。上
255 述分析表明北大西洋海温模态 PC1 与欧亚波列模指数 PC2 具有密切的联系，
256 同时对极端低温事件的发生具有一定的影响。

257 3.2 北大西洋海温与关键强迫源关系

258 3.2.1 两类年代际极端低温的能量频散特征

259 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
260 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
261 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
262 Nakamura, 1997; 2001; 卢楚翰等, 2013; Wang and He, 2015)，进而建立北大西洋与我
263 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，
264 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
265 温年份时罗斯贝波异常能量频散特征，重点关注北大西洋洋面的波作用通量
266 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
267 层，进而判断是否与海平面和陆地表面的属性有关。

268 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
269 年份。研究发现 1997 年以前(1982、1984、1989、1990、1993、1996)格陵兰岛
270 南面和北欧附近的北大西洋洋面是最显著的垂直波作用通量正值中心，说明
271 此关键区是北半球最大的波能量源地。而 1997 年以后(2004、2010、2015)格陵
272 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
273 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
274 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
275 端低温异常波列出现的原因。



276
 277 图 5 1997 年前(a, b)后(c, d)北大西洋地区与欧亚大陆 3 月 300hPa(a, c)波作用矢量(箭头, 单位: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)与通量
 278 水平散度(阴影, 单位: $\times 10^{-5} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)及 500 hPa 波作用通量垂直分量(b, d)的合成(阴影, 单位: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) (细线方
 279 框为 112°E 以东的我国华北地区, 粗线方框为关键区)

280 Fig.5 The composition of the wave activity fluxes(vectors ,unit: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)and flux horizontal divergence (the shaded,
 281 unit: $\times 10^{-5} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$) at 300 hPa (a, c) and flux vertical component (the shaded, unit: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) at 500 hPa in the North
 282 Atlantic and Eurasia in March(b, d) during the before(a, b) and after(c, d)1997 (The thin rectangle represents
 283 100°E east of north China and the thick rectangle represents key area)

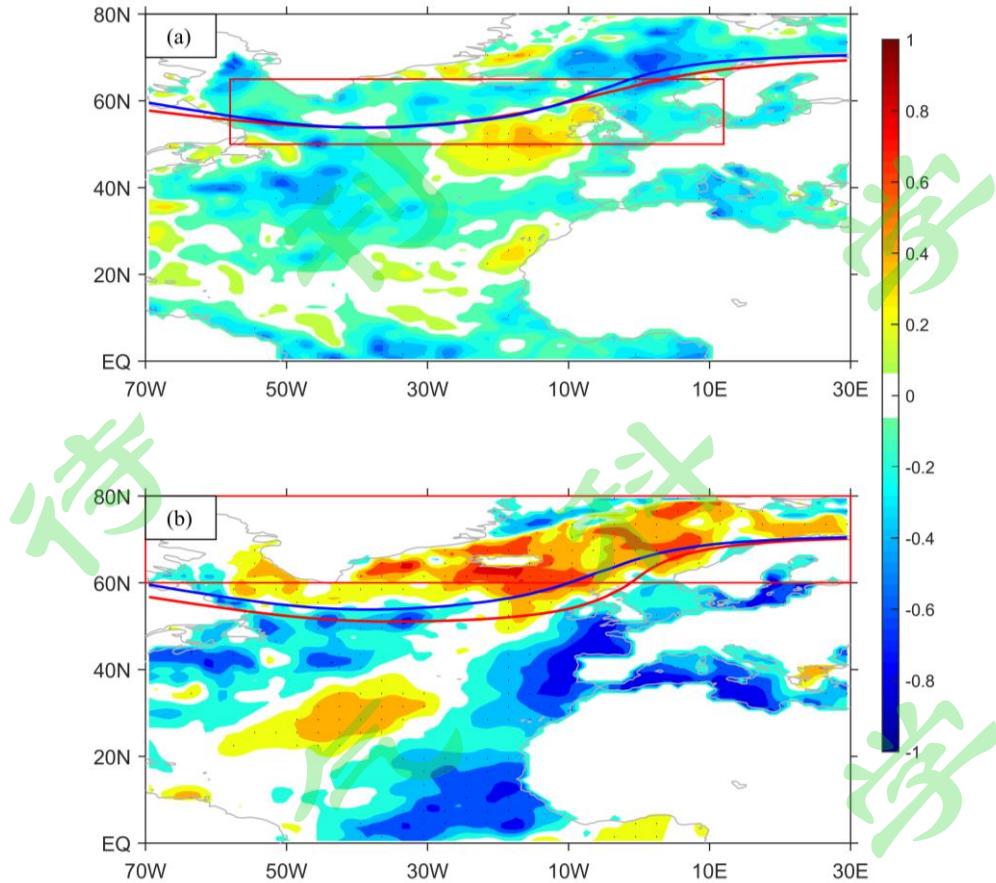
284 3.2.2 海温与波作用通量关系

285 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

286 北大西洋关键区垂直波作用通量进行区域平均得到关键区 TNZ1、TNZ2 序列，
287 之后分别与北大西洋海温模态 PC1 进行相关分析(图略)。研究发现 1997 年以
288 后关键区垂直波作用通量 TNZ2 与同期海温 PC1 的相关系数达到了 -0.586，通
289 过了 99% 的显著性检验，具有显著的负相关关系。而 1997 年以前 TNZ1 与海
290 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
291 以后北大西洋关键区垂直波作用能量 TNZ2 上传有着较密切的相关关系。

292 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
293 对 1997 年前后关键区垂直波作用通量 TNZ1, TNZ2 序列与同期北大西洋海温
294 距平场进行回归分析(图 6)。研究发现 1997 年以前关键区垂直波作用通量 TNZ1
295 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
296 域，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
297 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
298 态环流场相一致。

299 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
300 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
301 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
302 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，
303 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
304 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
305 常的移动，这与徐玮平等(2018)所得到的结论相一致。



306
307 图 6 1997 年前后关键区垂直波作用通量 TNZ 序列回归同期的海温距平场(a, b) (阴影打点区域为通过 90%
308 信度检验的显著区域, 红色方框为关键区, 蓝色等值线为气候态环流场, 红色等值线为异常年环流场)
309

310 Fig.6 The simultaneous regression of sea surface temperature anomaly field regressed onto the time series of the
311 TNZ flux vertical component during the before and after 1997(a, b) (The dot areas have passed the confident level
312 of 90% and the red box is the key area. The blue contour is the climatic state circulation field and the red contour
313 is the abnormal annual circulation field)

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

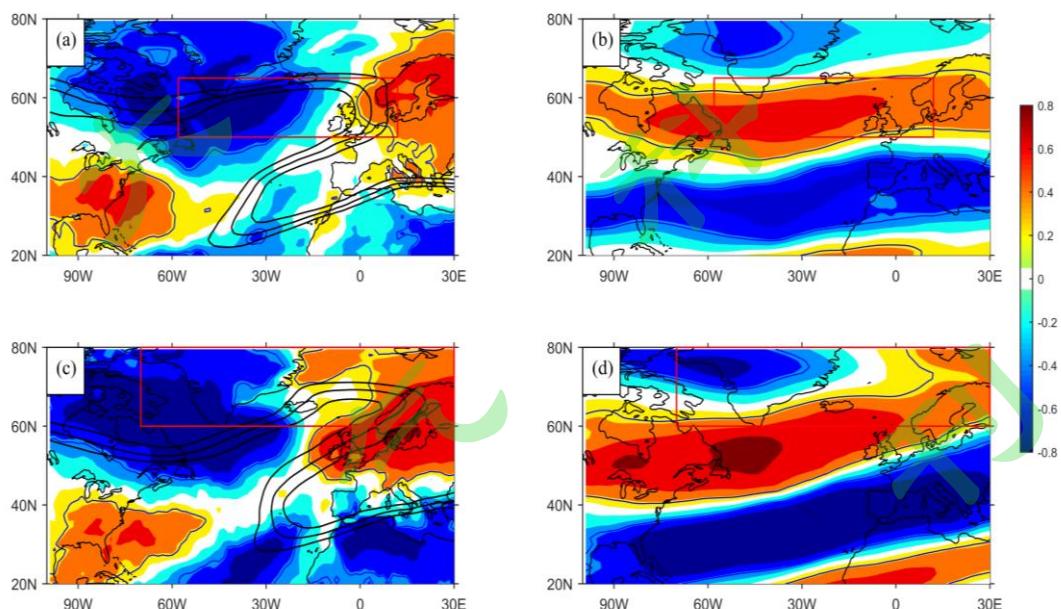
314 1997年前后北大西洋关键区垂直波作用通量TNZ的增加来源于底层海平面属性的变化。着重分析1997年前后3月北大西洋地区表面温度变化及其对大
315 范围环流的影响。将1997年前后3月北大西洋地区地表2 m温度作为左场, 同
316 期300 hPa西风急流作为右场进行SVD奇异值分解, 其中第一模态方差贡献率
317 达到了79.02%, 图7为两者第一模态异性相关图。
318

319 对比图7a、7c, 3月北大西洋地区地表2 m温度在1997年前后有着明显的
320 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
321 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
322 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
323 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
324

325 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。

326 与地表 2 m 温度模态相对应的西风急流如图 7b、7d，1997 年前后西风急
327 流模态也存在明显的变化。从图 7b 可以得出，1997 年以前北大西洋地区 300
328 hPa 西风急流整体呈现出 ‘-’、‘+’、‘-’、‘+’ 的模态。其中格陵兰
329 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
330 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
331 的西风急流整体也呈现出 ‘-’、‘+’、‘-’、‘+’ 的模态，与图 7b 相比，
332 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西风急
333 流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。
334 另外从图 7a、7c 中也可以看出，1997 年前后北大西洋地区急流轴相比也呈现
335 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
336 前文所述结论相一致。

337 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
338 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。
339 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，
340 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
341 度下降剧烈，易发生极端低温事件。



342
343 图 7 1997 年前(a, b)后(c, d)3 月北大西洋地表 2 m 温度(a, c)与同期 300 hPa 西风急流 SVD 第一模态异
344 相关系数(b, d)(黑色等值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，粗黑色等值
345 线分别为 $U=14\text{m/s}$, $U=16\text{m/s}$, $U=18\text{m/s}$)

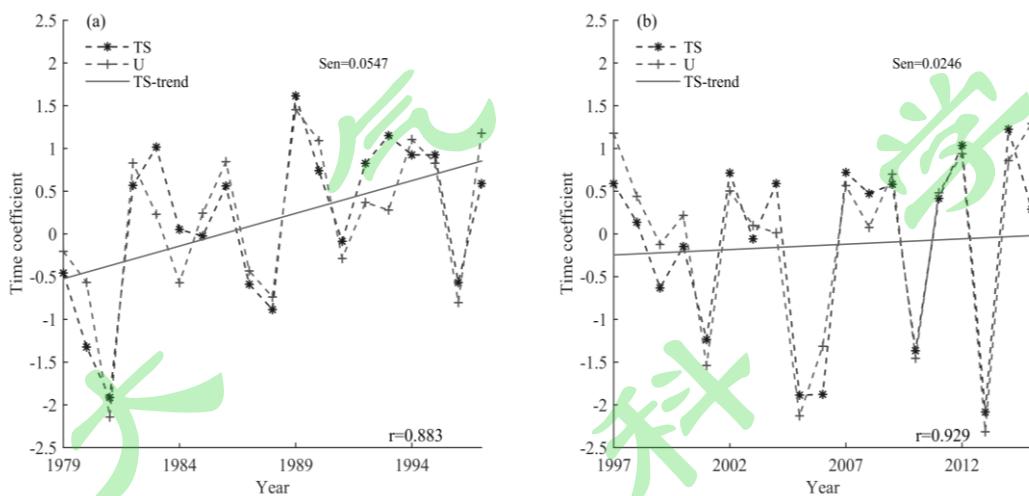
346 Fig.7 The North Atlantic 2m surface temperature in March (a, c) and the same period of 300hPa westerly jet
347 Stream SVD first mode heterosexual correlation coefficient (b, d) during the before(a, b) and after(c, d)1997 (The
348 area marked by the black contour have passed the confident level of 90% and the red box is the key area. The thick

349

black contours are U=14m/s, U=16m/s, U=18m/s)

350

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 西风的 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 西风急流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 西风急流序列整体都呈现出一致的波动上升趋势, 西风急流随着地表 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。



361

362

图 8 1997 年前后 3 月北大西洋地表 2 m 温度与同期 300 hPa 西风急流 SVD 时间序列图(a, b)

363

(黑色实线为该时间段内北大西洋地表 2 m 温度增加趋势)

364

Fig.8 The North Atlantic 2m surface temperature in March during the before and after 1997 over the same period of 300hPa westerly jet stream SVD time series chart (a, b) (The black line is the trend of the North Atlantic 2m surface temperature)

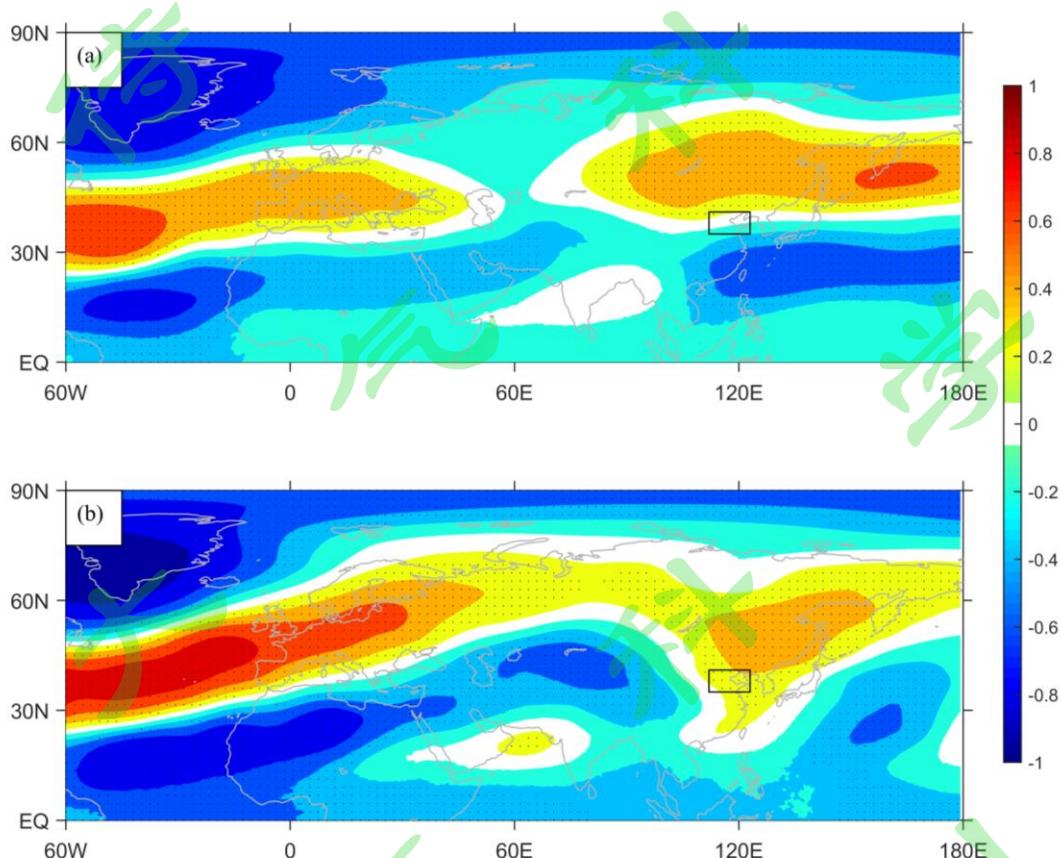
367

3.3.2 表面温度对高度场的回归

368

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为正异常中心。另外在图 9b 中, 中

375 高纬存着一个自西向东分布的 ‘-’ 、 ‘+’ 、 ‘-’ 、 ‘+’ 、 ‘-’ 的波列
 376 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
 377 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
 378 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
 379 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。
 380 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
 381 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
 382 而导致我国华北地区易发生极端低温事件。



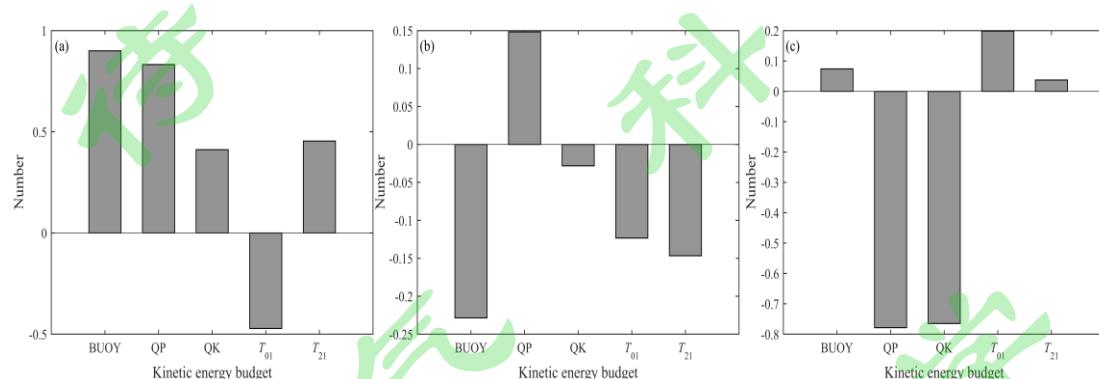
383
 384 图 9 1997 年前后地表 2 m 温度回归同期的 500 hPa 位势高度距平场(a, b)
 385 (阴影打点区域为通过 90% 信度检验的显著区域, 方框为 112°E 以东的我国华北地区)

386 Fig.9 The simultaneous regression of 500 hPa geopotential height anomaly field on the 2 m surface temperature
 387 during the before and after 1997(a, b) (The dot areas have passed the confident level of 90%, The rectangle
 388 represents 112°E east of north China)

389 3.3.3 关键区动能变率分析

390 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
 391 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
 392 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
 393 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

394 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
 395 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
 396 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
 397 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
 398 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，
 399 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
 400 传输项(T_{01})；其他两项为动能输出项。从整层上看，中低层动能减少，高层
 401 动能增加。



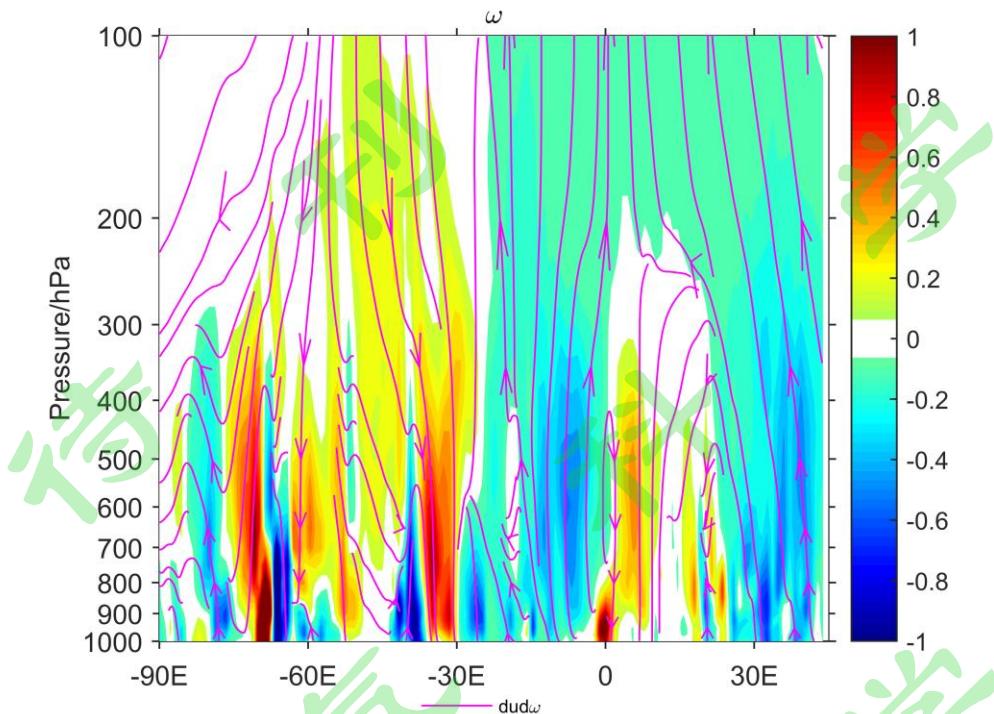
402 图 10 1997 年以后格陵兰岛以东关键区在华北极端低温年份时高层(a) (500-300 hPa)、中层(b) (800-500
 403 hPa)和低层(c) (1000-800 hPa)动能收支各项(均经过标准化处理)

404 Fig.10 Kinetic energy budget in the(a) upper(500-300hPa), (b)middle(800-500hPa) and (c)lower (1000-800hPa)
 405 levels of key area east of the Greenland since 1997 in the typical year of extremely low temperature
 406 (all data have been standardized)

407 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
 408 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
 409 可以看出关键区 -30°E - 0° 附近范围内对流层整层垂直速度 ω 主要为负值，表
 410 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
 411 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。
 412 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，
 413 进而引起我国华北地区极端低温事件的发生。

414 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
 415 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
 416 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
 417 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
 418 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。
 419 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
 420 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
 421

422 端低温事件的发生。



423
424 图 11 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 的垂直剖面图
425 (单位: Pa/s)

426 Fig.11 Vertical section of zonal average vertical velocity along 60°N - 70°N in key area of east of the Greenland
427 since 1997(units: Pa/s)

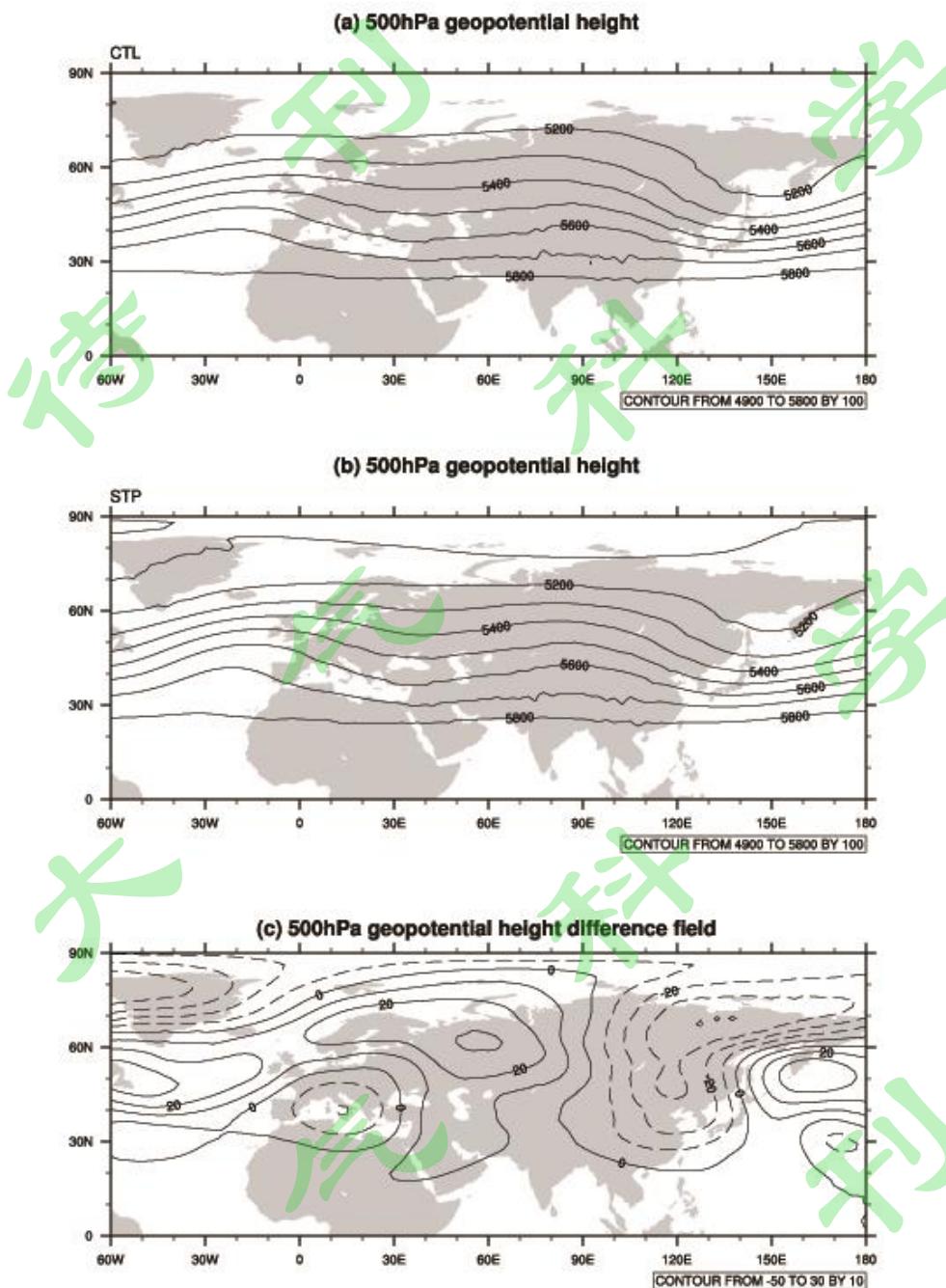
428 3.4 数值模拟

429 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
430 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
431 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
432 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。

433 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
434 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
435 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
436 加尔湖附近地区上空分别被宽广的高压脊所控制。从图 12b 中可以看出，中
437 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
438 加强趋势明显。

439 另外在图 12c 差值场上，在中高纬上有明显的‘-’，‘+’，‘-’，‘+’的
440 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。
441 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
442 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
443 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

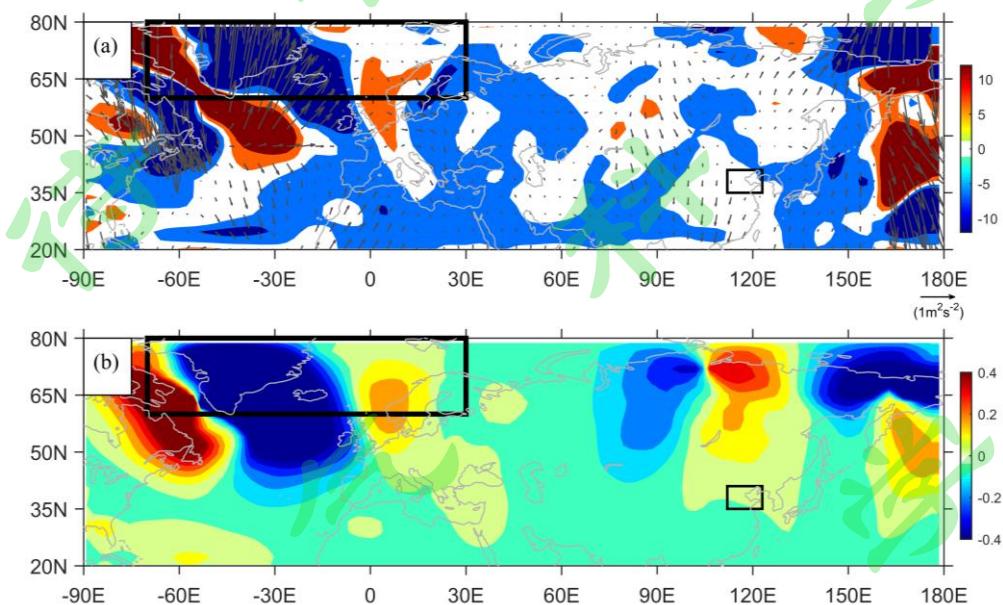
444 过激发出欧亚波列，影响欧亚大陆大气环流异常，从而影响我国华北地区极
445 端低温事件的发生，数值模拟效果较好。



446
447 图 12 数值试验的初春(3月)500hPa 高度场及其差值分布(单位: gpm)
448 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)
449 Fig.12 500hPa height field in the early spring (March)and its differences distribution in numerical experiments
450 (units: gpm) a. model control experiment, b. model sensitive experiment, c. their differences (sensitive experiment
451 minus the control experiment)

452 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

453 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
 454 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
 455 洋面存在着明显的波能量源地，波源位置与图 4c、4d 相似。该结果解释了格
 456 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
 457 件发生增多，并且再次证明数值模拟效果较好。



458
 459 图 13 数值试验的北大西洋地区与欧亚大陆 3 月 300 hPa(a)波作用矢量(箭头, 单位: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)与通量水平散度
 460 (阴影, 单位: $\times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)及 500 hPa 波作用通量垂直分量(b)的合成(阴影, 单位: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) (细线方框为 112°E
 461 以东的我国华北地区, 粗线方框为关键区)

462 Fig.13 The composition of the wave activity fluxes(vectors ,unit: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)and flux horizontal divergence (the
 463 shaded, unit: $\times 10^{-5}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$) at 300 hPa (a) and flux vertical component (the shaded, unit: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) at 500 hPa (b) in the
 464 North Pacific and Eurasia in March in numerical experiments. (The thin rectangle represents 112°E east of north
 465 China and the thick rectangle represents key area)

466 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
 467 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。
 468 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
 469 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
 470 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
 471 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
 472 以后北大西洋海温增强，可能与北大西洋多尺度振荡 AMO 有关，那么 AMO 对
 473 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。

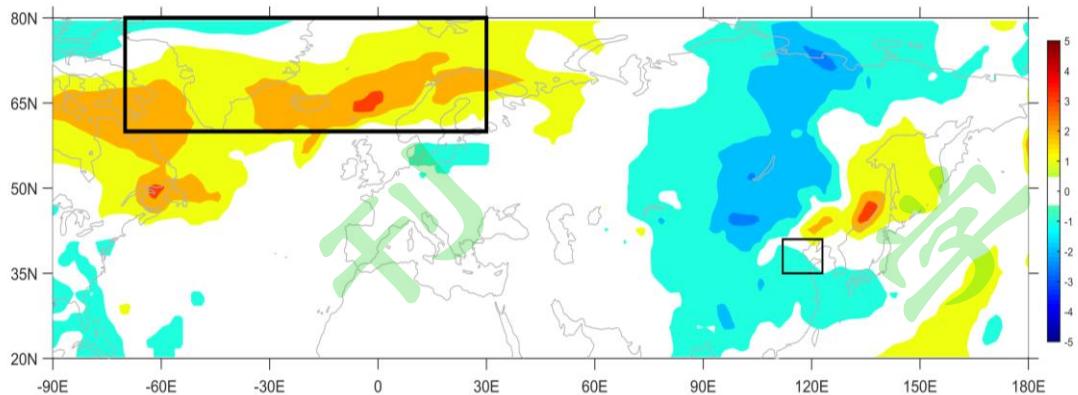


图 14 数值试验的北大西洋与欧亚大陆地区表面温度异常场(单位: K)

(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 Surface temperature anomaly field in the North Pacific and Eurasia (units: K)

(The thin rectangle represents 112°E east of north China and the thick rectangle represents key area)

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:

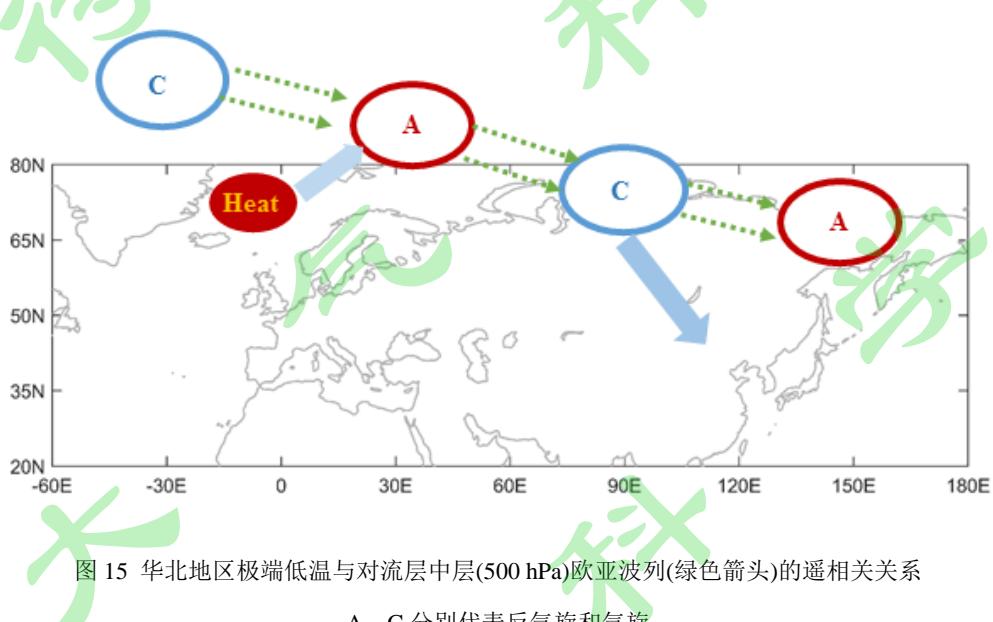
(1) 欧亚波列模态 PC2 与冷偏差具有较好的相关性, 同时又与北大西洋“马蹄型”海温模态 PC1 具有密切的联系, 表明北大西洋“马蹄型”海温模态(第一模态)与大气环流异常和我国华北地区极端低温事件发生存在显著的关系。

(2) 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, 这是导致我国北方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, 导致此处西风加大, 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

502 可能与 AMO 有直接的关系，该内容有待于进一步的探讨。

503 (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
504 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
505 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
506 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
507 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
508 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
509 激发出欧亚波列，贝加尔湖气旋异常、乌拉尔山脊和鄂霍茨克海反气旋异常
510 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
511 强，模式模拟结果与观测一致。



512 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

513 A、C 分别代表反气旋和气旋

514 Fig15. The EU teleconnection (green arrow) in the mid-troposphere (500 hPa) and the relations to extreme low
515 temperature in the North China. The letters A and C indicate anticyclone and cyclone, respectively

516 本文对 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
517 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”
518 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
519 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
520 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
521 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。
522

523 参考文献

524 Brabson, B. B., and J. P. Palutikof, 2002. The evolution of extreme temperatures in the central England
525 temperature record[J]. Geophys. Res. Lett., 29 (24), 2163- 2166.doi:10.1029/2002g1015964.

526 Bretherton C S, Smith C, Wallace J M. 1992. An Intercomparison of Methods for Finding Coupled Patterns in

- 528 Climate Data[J]. Journal of Climate, 5(6): 541-560.doi:10.1175/1520-0442(1992)005<0541:aiomff>2.0.co;2.
- 529 Bueh C, Fu X Y, Xie Z W. 2011. Large-Scale Circulation Features Typical of Wintertime Extensive and Persistent
- 530 Low Temperature Events in China[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 4(4), 235-241.
- 531 Chen GS, Huang RH, Zhou LT.2013. Baroclinic instability of the Silk Road pattern induced by thermal damping[J]
- 532 Journal of Atmospheric Sciences,70:2875–2893.doi:10.1175/jas-d-12-0326.1
- 533 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-
- 534 1273.Chen Shaoyong, Wang Jinsong, Ren Yan, et al.2011. Evaluative Characteristic of extreme minimum
- 535 temperature of Northwest China in recent 49 years[J]. Plateau Meteor, 30(5): 1266-1273.doi:10.7522/j.issn.
- 536 1000-0534.2011.
- 537 Donat M G, Alexander L V, Yang H, et al. 2013. Updated analyses of temperature and precipitation extreme
- 538 indicies since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset[J]. Abstracts, 118(5):2098-2118.
- 539 doi:10.1002/jgrd.50150.
- 540 Ding Y H, Wang Z Y, Song Y W, et al. 2008. Causes of the unprecedented freezing disaster in January 2008 and
- 541 its possible association with the global warming[J]. Acta Meteor Sin. 66: 808–825. doi:10.1029/2007JD00874.
- 542 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-
- 543 281. FU Dongxue, SUN Zhaobo, Li Zhongxian, et al. 2011, Spatial and temporal features of China extreme
- 544 minimum temperature in winter half year during 1955-2016[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 31(3):
- 545 274-281.doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2011.03.005.
- 546 龚道溢, 王绍武.2003.近百年北极涛动对中国冬季气温变化的研究[J].地理学报,58(4):559-568.Gong
- 547 Daoyi ,Wang Shaowu. Influence of Arctic Oscillation on winter climate over China[J]. Acta Geographica Sinica
- 548 (in Chinese), 58 (4):559-568. doi:10.3321/j.issn:0375-5444.2003.04.010.
- 549 Hoskins B J, James I N, White G H. 1983. The Shape, Propagation and Mean-Flow Interaction of Large-Scale
- 550 Weather Systems[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 40(7): 1595-1612. doi:10.1175/1520-0469(1983)
- 551 040<1595:tspamf>2.0.co;2.
- 552 Hsu P C, Li T, Tsou C H. 2011. Interactions between Boreal Summer Intraseasonal Oscillations and Synoptic-Scale
- 553 Disturbances over the Western North Pacific. Part I: Energetics Diagnosis[J]. Journal of Climate,
- 554 24(24):927-941.
- 555 doi:10.1175/2010jcli3833.1.
- 556 Hsu P C, Tsou C H, Hsu H H, et al. 2009. Eddy Energy along the Tropical Storm Track in Association with
- 557 ENSO[J].
- 558 Journal of the Meteorological Society of Japan, 87(4): 687-704.doi:10.2151/jmsj.87.678.
- 559 Hu Q, Tawaye Y, Feng S. 2004. Variations of the Northern Hemisphere Atmospheric Energetics: 1948-2000[J].
- 560 Journal of Climate, 17(10): 1975-1986.doi:10.1175/1520-0442(2004)017<1975:votnha>2.0.co;2.
- 561 Huang R H. 1992. Impacts of the tropical western Pacific on the East Asian summer monsoon[J]. Journal of the
- 562 Meteorological Society of Japan, 70(1B):243-256. doi:10.2151/jmsj1965.70.1b_243.

- 563 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
564 换[J]. 热带气象, 8 (2):125–133. He Haiyang, Qi Xiaoping, Luo Huibang. 1992. Kinetic energy budgets of an
565 intense convection event during spring over south China, Part II : Budgets and conversion of divergent and
566 rotational kinetic energy[J]. Journal of Tropical Meteorology,8(2): 125–133(in Chinese). doi:10.16032/j.issn
567 1004-4965.1992.02.004.
- 568 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,
569 73(3):505-514. Huang Xiaolu, Xu Haiming, Deng Jiechun. 2015. Long-term rising of SST over the marginal
570 seas of China in winter and its impact on precipitation in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 73(3):505-514.
571 doi:10.11676/qxb2015.038.
- 572 何春, 何金海. 2003. 冬季北极涛动和华北气温变化的研究[J]. 南京气象学院学报. 26 (1):1-7. He Chun, He
573 Jinghai. 2003. Relation between Arctic Oscillation and North China air temperature in winter[J]. Journal of Nan
574 Jing Institute of Meteorology (in Chinese),26(1):1-7. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2003.01.001.
- 575 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,
576 42 (2): 239–250. Han Fanghong, Chen Haishan, Ma Hedi. 2018. Interdecadal variation in the relationship
577 between North Atlantic Oscillation and extreme low temperature over northern China in winter[J]. Chinese
578 Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (2): 239–250, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1705.17101.
- 579 瑚建华, 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-
580 434. Ju Jianhua, Ren Juzhang, Lü Junmei. Effect of interdecadal variation of Arctic Oscillation on temperature
581 increasing in north of East Asian winter[J]. Plateau Meteorology (in Chinese) 23(4):429-434. doi:10.3321/j.issn:
582 1000-0534.2004.04.002.
- 583 Lau K H, Lau N C. 1992. The Energetics and Propagation Dynamics of Tropical Summertime Synoptic-Scale
584 Disturbances[J]. Monthly Weather Review, 120(11): 2523. doi:10.1175/1520-0493(1992)120<2523:teapdo>
585 2.0.co;2.
- 586 Liang X S, Anderson D G M. 2007. Multiscale Window Transform[J]. Siam Journal on Multiscale Modeling &
587 Simulation, 6(2):437-467. doi:10.1137/06066895X.
- 588 Liang X S, Robinson A R. 2005. Localized multiscale energy and vorticity analysis: I. Fundamentals[J]. Dynamics
589 of Atmospheres & Oceans, 38(3-4):195-230. doi:10.1016/j.dynatmoce.2004.12.004.
- 590 Liang X S. 2016. Canonical transfer and multiscale energetics for primitive and quasi-geostrophic atmospheres[J].
591 Journal of the Atmospheric Sciences, 73(11). doi:10.1175/jas-d-16-0131.1.
- 592 Li S. 2004. Impact of Northwest Atlantic SST anomalies on the circulation over the Ural Mountains during Early
593 Winter[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 82(4), 971-988. doi:10.2151/jmsj.2004.971.
- 594 Li C, Yang H, Gu W. 2008. Cause of severe weather with cold air, freezing rain and snow over South China in
595 January 2008[J]. Clim Environ Res. 13: 113–122 (in Chinese). doi:10.3724/SP.J.1047.2008.00014.
- 596 Liu C H, Zhou B. 2018. Influences of the 11-yr Sunspot Cycle and Polar Vortex Oscillation on Observed Winter
597 Temperature Variations in China[J]. Journal of Meteorological Research, 32(3),367-379.
598 doi:10.1007/s13351-018.

- 599 李崇银.1995.气候动力学引论[M].北京:气象出版社.Li Chongyin.1995. Introduction to Climate Dynamics[M].
- 600 Beijing: China Meteorological Press.
- 601 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.
- 602 2005. Linkage of Arctic Oscillation and Winter Temperature in Northeast China[J]. Plateau Meteorology, 24(6):
- 603 927-934. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2005.06.012.
- 604 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):
- 605 385-396.Li Weijing, Li Yi, Chen Lijuan, et al. 2013. Inter-dacadal variability of the relationship between winter
- 606 temperature in China and its impact factors[J]. Journal of Applied Meteorological Science 24(4): 385-396.
- 607 doi:10.11898/1001-7313.2013.401.
- 608 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, 2018, 37(5): 1341-1352.
- 609 Li Yan, Zhang Jinyu, Li Xu, et al, 2018. Low-frequency features during the two typiacl extreme cold events in
- 610 China [J]. Plateau Meteorology, 37(5): 1341-1352.doi: 10.7522/j. issn.1000-0534.2018.00035.
- 611 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
- 612 报, 39(3): 370-380. Liu Ying, Guo Pinwen, Feng Tao, 2016. The relationship between winter persistent
- 613 abnormal
- 614 low temperature in North China and atmospheric low-frequency oscillation activities[J]. Trans Atmos Sci,39(3):
- 615 370-380. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20150314053.
- 616 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
- 617 球物理学报, 56(4): 1084-1094. Lu Chuhan, Guan Zhaoyong, Li Yonghua, et al. 2013. Interdecadal linkages
- 618 between Pacific decadal oscillation and interhemispheric air mass oscillation and their possible connections with
- 619 East Asian Monsoon[J]. Chinese J Geophys, 56(4): 1084-109(in Chinese). doi:10.6038/cjg20130404.
- 620 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
- 621 能分析[J]. 大气科学学报, 40(2): 224-232.Lu Huchao, Liang Xiangsan, Rong Yineng. 2017.An energetic study
- 622 of the boral summer western Pacific MJO with the localized multiscale energy and vorticity analysis(MS-EVA)
- 623 [J]. Trans Atmos Sci,40(2) 224-232.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20151214002(in Chinese).
- 624 Maloney E D. 2003.The intra-seasonal oscillation and the energetics of summertime tropical western North Pacific
- 625 synoptic-scale disturbances[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 60(17): 2153-2168.
- 626 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. Mei Xiaodong.2015.An
- 627 impact study of North Atlantic SST on NAO-like circulation[D]. Ocean University of China.
- 628 Neale R. B, Chen C C, Gettelman A, et al.2010.Description of the NCAR community atmosphere model(CAM5.0)
- 629 [J]. NCAR Technical Note NCAR/TN-486+STR:7-8.
- 630 New M, Hewitson B, Stephenson D B, et al. 2006. Evidence of trends in daily climate extremes over southern and
- 631 West Africa[J]. J Geophys. Res, 111(D14): 3007-3021.doi:10.1029/2005jd006289.
- 632 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, 22(0407):4-7.
- 633 Qin Dahe. 2004. Climate change sciences into the 21st century: facts, impact and strategies addressing[J].Scienc
- 634 Science and technology guide, 22(0407): 4-7. doi:10.3321/j.issn:1000-7857.2004.07.002.

- 635 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. Qin Yulin.
636 2012. Variation of extreme temperature in Northeast China and its relations with atmospheric circulation during
637 summertime[D]. Nanjing University of Information Science & Technology.
- 638 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.
639 26(5):557-563.Qu Jinhua, Jiang Zhihong, Tan Guirong, et al. 2006. Relation between interannual, interdecadal
640 variability of SST in North Atlantic in winter and air temperature in China[J]. Scientia Geographica sinica.
641 26(5):557-563. doi:10.13249/j.cnki.sgs.2006.05.007.
- 642 Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night
643 marine air temperature since the late nineteenth century[J]. J Geophys Res, 108(D14):4407. doi:10.1029/2002jd
644 002670.
- 645 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
646 Guoyu, Chu Ziying, Zhou Yaqing, et al. 2005. Recent progress in studies of Regional temperature changes in
647 China[J]. Climatic and Environment Research (in Chinese), 10(4):701-716.doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2005.
648 04.001.
- 649 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
650 Panmao.1998. Study on changes of China's extreme temperature during 1951-1990[J]. Chinese J. Atmos. Sci.
651 (in Chinese) 22(2): 217-227. doi:10.3878/j.issn.1006-9898.1998.02.10.
- 652 Seneviratne S I, Nicholla N, David E, et al, 2012. Changes in climate extremes and their impacts on natural
653 physical
654 environment: An overview of the IPCC SREX report [J]. Egu General Assembly Conference 14(210):12566.
655 doi:<http://arrow.monash.edu.au/vital/access/manager/Repository/m>.
- 656 Sun B, Wang H J, Zhou B.2019. Climatic condition and synoptic regimes of two intense snowfall events in eastern
657 China and implications for climate variability[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres.
658 doi:10.1029/2018jd029921.
- 659 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,
660 Li Jianping. 2012. Analysis of anomalously low surface air temperature in the Northern Hemisphere during
661 2009/2010 winter[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (3): 259–273, doi:10.3878/j.issn.
662 1006-9585.2011.10070.
- 663 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,
664 Zhang Leying. 2013. Influences of Arctic Oscillation on surface air temperature over the south Yangtze River
665 regions[J]. Trans Atmos Sci, 36(5):604-610(in Chinese).doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2013.05.011.
- 666 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.
667 2016. “Super cold wave” is coming[J]. Life and Disaster. 2:20-21.
- 668 孙照渤, 曾煜. 1995. 1 月中国地温异常与北半球 500hPa 高度场异常关系的合成分析[J]. 大气科学学报, (4):
669 473-477. Sun Zhaobo, Zeng Yu. 1995. Composite analysis of relation of January surface temperature anomaly in
670 China to Northern 500hPa height abnormality[J]. Trans Atmos Sci, (4): 473-477.doi:10.13878/j.cnki. dqkxxb.

- 671 1995.04.002.
- 672 Takaya K, 2001. A Formulation of a Phase-Independent Wave-Activity Flux for Stationary and Migratory Quasi
673 geostrophic Eddies on a Zonally Varying Basic Flow[J]. *J Atmos Sci*, 58(6):608-627.
- 674 Takaya K, Nakamura H. 1997. A formulation of a wave - activity flux for stationary Rossby waves on a zonally
675 varying basic flow[J]. *Geophys Res Letters*, 24(23): 2985-2988.doi:10.1029/97gl103094.
- 676 Tsou C H, Hsu H H, Hsu P C. 2014. The Role of Multiscale Interaction in Synoptic-Scale Eddy Kinetic Energy
677 over the Western North Pacific in Autumn[J]. *Journal of Climate*, 27(10): 3750-3766.doi:10.1175/jcli-d-13
678 00380.1.
- 679 Wallace J M, Smith C, Bretherton C S. 1992. Singular Value Decomposition of Wintertime Sea Surface
680 Temperature
681 and 500-mb Height Anomalies[J]. *Journal of Climate*, 5(6): 561-576. doi:10.1175/1520-0442(1992)005
682 <0561:svdows>2.0.co;2.
- 683 Wang H J, He S P. 2015. The North China/Northeastern Asia Severe Summer Drought in 2014[J]. *Journal of
684 Climate*,
685 28(17): 6667-6681.doi:10.1175/jcli-d-15-0202.1.
- 686 Wang Y, Zhou B, Qin D, et al. 2017. Changes in mean and extreme temperature and precipitation over the arid
687 region of northwestern China: observation and projection[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 34(3),
688 289-305,doi:10.1007/s00376-016-6160-5.
- 689 Wang L, Yu Y L, Yang Z, et al. 2019. Time-varying structure of the wintertime Eurasian pattern: role of the North
690 Atlantic sea surface temperature and atmospheric mean flow[J]. *Climate Dynamics*, 2019,52(3-4), 2467-2479.
691 doi: <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4261-9>.
- 692 Wang Z, Yang S, Zhou B. 2017. Preceding features and relationship with possible affecting factors of persistent
693 and extensive icing events in China[J]. *International Journal of Climatology*,37(11), 4105-4118.
694 doi:10.1002/joc.5026.
- 695 Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere
696 winter[J]. *Mon Weather Rev* 109(2):784-812.doi:10.1175/1520-0493(1981)109<0784:titghf>2.0.co;2.
- 697 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.
- 698 Wang Dai, You Qinglong, Jiang Zihong, et al. 2016. Analysis of extreme temperature changes in China based on
699 the homogeneity-adjusted data[J]. *Plateau Meteorology*, 35(5):1352-1363. doi:10.7522/j.issn. 1000-0534.2016.
700 00019.
- 701 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
702 象,34(4): 95-100. Wang Ling, Gao Ge, Zhang Qiang, et al. 2008. Analysis of the severe cold surge, ice-snow
703 and
- 704 frozen disasters in south China during January 2008: I.Climatic Feature and its impact[J]. *Meteor. Mon.* 34(4):
705 95-100. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2008.4.012.
- 706 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]. Journal of physics, 62(22):229201.

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 MeteorSinica, 52(3): 308-320(in Chinese).doi:10.1007/BF02658170.

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,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 Ziheng, 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, 37(6):1655-1670. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00058.

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.Climaet Features of summer Asia subtropical westerly jet stream[J].Climatic and Environmental Research, 13(1):10-20.doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2008.01.02.

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, V29(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]. V29(4): 536-542.doi:10.3969/j.issn.1000-0240.2007.04.005.

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 J Atmos Sci, 17(6):697-702.doi:10.1007/BF02656973.

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 and Li Chongyin. 2008. Influence of Arctic Oscillation on Temperature and Precipitation in winter[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese),13(4): 395-404. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2008.04.05.

- 743 Zhou B, Wang Z Y, Shi Y, et al. 2018. Historical and future changes of snowfall events in China under a warming
744 background[J]. Journal of Climate,31(15), 5873-5889. doi:10.1175/jcli-d-17-0428.1.
- 745 Zhou B, Ying X, Jia W, et al. 2016. Changes in temperature and precipitation extreme indices over China: Analysis
746 of a high-resolution grid dataset[J]. Int J Climatology, 36(3): 1051–1066.doi:10.1002/joc.4400.
- 747 Zhou B, Wang H J, et al. 2008. Interdecadal change in the connection between Hadley circulation and winter
748 temperature in East Asia[J]. Advances in Atmospheric Sciences,25(1),24-30. doi:10.1007/s00376-008-0024-6.
- 749 Zhang Q, Xuan S, Peng J. 2008. Relationship between Asian circulation in the middle-high latitude and snowfall
750 over South China during La Niña events[J]. Clim. Environ Res.13: 385–394 (in Chinese).
- 751 Zhang J, H. Chen, Q. Zhang. 2019. Extreme drought in the recent two decades in northern China resulting from
752 Eurasian warming[J]. Climate Dynamics,52:2885–2902.DOI: 10.1007/s00382-018-4312-2.
- 753 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):
754 574-582. Zhang Fuyan, Xu Haiming. 2011. Spatial/temporal variations of spring extreme low temperature in
755 Northeast China and its relationship with SSTAs in Atlantic Ocean[J]. Trans Atmos Sci, 34(5): 574-582.
756 doi:10.13878/j.cnki:dqkxxb.2011.05.009.
- 757 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(z1):1-10. Zhai Panmao, Pan
758 Xiaohua. 2003. Chang in extreme temperature and precipitation over Northern China during the second half of
759 the 20th century[J]. Acta Geographica Sinica,58(z1):1-10. doi:10.3321/j.issn:0375-5444.2003.z1.001.
- 760 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
761 变化研究进展, 3(5) : 266-270. Zhu Yanfeng, Tan Guirong Wang Yongguang, et al. 2007. Variation of spatial
762 mode
763 for winter temperature in China and its relationship with the Large scale atmospheric circulation[J]. Advances in
764 Climate Change Research (in Chinese), 3(5):266-270. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2007.05.004.