

唐孟琪, 曾刚. 2017. 近 30 多年中国东北地区春季寒潮的年代际变化及其可能原因 [J]. 气候与环境研究, 22 (4): 473–486. Tang Mengqi, Zeng Gang. 2017. Decadal variability of spring cold wave across Northeast China in the past 30 years and its possible causes [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22 (4): 473–486, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16201.

近 30 多年中国东北地区春季寒潮的年代际 变化及其可能原因

唐孟琪 曾刚

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

摘要 利用 1979~2011 年中国东北地区 119 站气温观测数据, 对东北春季寒潮的年代际变化特征进行了分析, 并在此基础上通过分析大气环流及北极海冰的变化, 对寒潮年代际变化的可能原因进行了探讨。结果表明, 东北地区春季寒潮的频次及强度在 20 世纪 80 年代末和 21 世纪初均有明显年代际转折, 即 20 世纪 90 年代寒潮频次减少而强度增加, 21 世纪初寒潮频次有所回升但强度减弱。北极新地岛地区海冰的变化可能是造成我国东北地区寒潮活动年代际变化的原因之一。20 世纪 90 年代新地岛附近海冰迅速减少, 地表温度明显升高, 而高纬海平面气压偏低, 此处冷空气不易南下, 同时东亚大槽偏强, 冷空气强度增加。21 世纪初该区海冰减少趋势减缓, 冷空气频次有所回升, 强度减弱。

关键词 春季寒潮 中国东北 年代际变化 北极海冰

文章编号 1006-9585 (2017) 04-0473-14

中图分类号 P425.5

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16201

Decadal Variability of Spring Cold Wave Across Northeast China in the Past 30 Years and Its Possible Causes

TANG Mengqi and ZENG Gang

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

Abstract Based on 1979–2011 daily surface temperature data collected at 119 stations in Northeast China, the decadal variability of cold waves across Northeast China was investigated. The possible causes for the decadal changes were also discussed through analyzing changes in atmospheric circulation and Arctic sea ice. The frequency and intensity of spring cold waves across Northeast China both changed at the end of the 1980s and in the early 2000s. Cold waves in the 1990s were less frequent but stronger than those in the 1980s, and less frequent but weaker than those in the 2000s. The change in sea ice concentration around Novaya Zemlya was a possible cause for the decadal variability of spring cold waves in Northeast China. Rapid decrease in sea ice in Novaya Zemlya significantly increased surface air temperature (SAT) and weakened sea level pressure (SLP) in the high latitudes around this region, which were not favorable for the southward movement of cold air over Novaya Zemlya. In addition, the decrease in sea ice cover around this area and the deep East

收稿时间 2016-11-14 收到; 网络预出版日期 2017-03-19

作者简介 唐孟琪, 女, 1992 年出生, 硕士, 主要从事东亚季风及海气相互作用研究。E-mail: tmengqi@126.com

通讯作者 曾刚, E-mail: zenggang@nuist.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41575085、41575070、41430528, 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 2013CB430202

Funded by National Natural Science Foundation of China (NSFC, Grants 41575085, 41575070, and 41430528), National Key Project of Basic Research (973 Program, Grant 2013CB430202)

Asia trough could also lead to the strengthening of cold waves across Northeast China, while the cold waves in the 2000s became weaker but occurred more frequently possibly due to a slower decrease trend of sea ice cover in Novaya Zemlya.

Keywords Cold wave in the spring, Northeast China, Decadal variability, Arctic sea ice

1 引言

寒潮是我国冬、春季主要的天气过程之一，能造成霜冻、急剧降温、暴雪、冻雨和大风等灾害性天气，给农牧业生产、交通运输、国民经济和人民生命财产等造成严重的损失。同时，寒潮活动是东亚季风的重要表现特征，强东亚季风对应寒潮活动频繁，寒潮带来的剧烈降温也会直接触发我国极端低温事件（陈海山等，2012）。因此，研究寒潮时空变化特征及其可能机理，对理解东亚季风和极端低温事件的变化规律及机理有重要意义，有助于提高其预测水平，达到防灾减灾的目的。

近年来，对我国寒潮活动的气候变动特征研究逐渐开展。许多研究结果表明，近几十年影响我国的寒潮活动频次呈减少趋势（李峰等，2006；钱维宏和张玮玮，2007；康志明等，2010）。关于影响寒潮活动特征的因子研究主要集中在以下几个方面。Jeong and Ho (2005) 发现，东亚寒潮的爆发频次增多与北极涛动 (Arctic Oscillation, AO) 的负位相有关。魏凤英 (2008) 认为，中国全国性寒潮爆发频次的气候趋势与 AO 位相变化有一定联系，AO 处于负位相的气候背景极易诱发中国中东部寒潮灾害的发生。Hong et al. (2008) 指出近几十年来台湾寒潮爆发频次的减少与冬季北极涛动/北大西洋涛动 (North Atlantic Oscillation, NAO) 正位相偏多有关。Park et al. (2011) 根据环流特征，将东亚寒潮划分为阻塞型和波列型两类，发现阻塞型寒潮活动多发生在 AO 负位相时期，且其振幅和维持时间均强于 AO 正位相时期。Woo et al. (2012) 发现相对于 20 世纪 90 年代，20 世纪 80 年代和 21 世纪最初 10 年冷空气活动更频繁、更强且持续时间更长。沈柏竹 (2013) 指出，AO 是 21 世纪以来欧亚大陆中高纬度冬季冷事件频发的直接的、主要的影响因子之一。梁苏洁等 (2014) 指出，在 AO 正指数异常时，极地冷空气较少影响到我国北方，而 AO 负指数异常时，冷空气则可以直接进入我国东北地区。叶丹和张耀存 (2014) 发现，高空西风急

流对寒潮冷空气活动和极端低温事件有重要影响，东亚温带急流(East Asian Polarfront Jet, EAPJ)和东亚副热带急流(East Asian Subtropical Jet, EASJ)之间的协同变化可以影响冷空气的路径。欧亚大陆中高纬大型斜槽、斜脊也是中国大范围持续性低温事件的关键环流系统(Bueh et al., 2011)。时晓曦 (2014) 进一步指出，巴伦支海秋季海洋热状况可作为预测中国冬季冷空气活动的一个重要参考因素。朱晨玉等 (2014) 指出，20 世纪 80 年代以来的我国北方寒潮冷空气活动频数减少主要与全球变暖有关，北极海冰的减少使得北极涛动加强，并激发出欧亚遥相关波列进而影响我国的寒潮冷空气活动。而狄慧 (2014) 和谢永坤等 (2014) 指出，北极海冰可通过影响西伯利亚高压进而影响冷空气的变化特征。

由于目前对寒潮的研究多是全国性的，但我国幅员辽阔，不同地区的气候有很大差异，而东北地区寒潮爆发频繁，且频次变化趋势最显著（王遵娅和丁一汇，2006）。所以选择东北地区作为研究区域更能反映影响我国的冷空气变化特征。以往对寒潮的研究大多集中于冬半年或者冬季，而如上文所述，东北地区寒潮爆发频次较多，相比于其他地区其春季寒潮爆发仍很频繁。而春季作为冬、夏季季节转换过渡期，大气环流转变明显，且春季是与农作物播种等农业生产相关最密切的季节，所以关注春季寒潮的变化，对国民经济的发展亦有重大意义。近 30 多年来大气环流表现出一些新的时空演变特征，东亚冬季风在 20 世纪 80 年代中期开始明显减弱(Wu et al., 2006; 丁一汇等, 2014)，而 Easterling and Wehner (2009) 也指出，2000 年以来全球变暖开始减弱甚至已经停止变暖，即全球变暖 hiatus 现象。因此，研究探讨这种气候变化背景下，近 30 多年我国东北春季寒潮的年代际变化特征及其可能原因，具有重要意义。

本文分析了 1979~2011 年我国东北春季寒潮的时空变化特征，通过对寒潮活动特征及近 3 个年代大气环流特征的年代际变化的分析，以及探讨其与北极海冰变化的关系，从而加深对我国东北春季寒潮活动的年代际变化及其可能机理的理解。

2 资料与方法

2.1 资料

本文所用资料：1) 中国东北区域（东三省及内蒙古五盟市）1979~2011 年经过质量控制和均一化处理的 119 站观测气温数据 (Xu et al., 2013)。2) NCEP/NCAR 逐日和逐月再分析资料，所选要素场包括 2 m 地表温度、海平面气压场、300 hPa 及 850 hPa 位势高度场，850 hPa 风场，时间为 1979 年 3 月至 2011 年 5 月，资料水平分辨率为 2.5°（纬度）×2.5°（经度）。春季定义为 3 月 1 日至 5 月 31 日。3) 寒潮路径追踪所用资料为 NCEP/NCAR 每日四次气候预测系统再分析 (Climate Forecast System Reanalysis) 资料 (Saha et al., 2010; Decker et al., 2012)，包括三维风场、温度、比湿等，资料水平分辨率为 2.5°（纬度）×2.5°（经度），垂直方向为 17 层，时间为 1979 年 3 月至 2011 年 5 月。4) Hadley 环流中心逐月海冰密集度资料 (Rayner et al., 2003)，资料水平分辨率为 1°（纬度）×1°（经度）。所有资料选用的时间为 1979 年 3 月至 2011 年 5 月。

2.2 寒潮定义标准

依据《寒潮等级》(GB/T21987-2008) (中华人民共和国质量监督检验检疫总局和中国国家标准化委员会, 2008) 和《冷空气等级》(GB/T 20484-2006) (中华人民共和国质量监督检验检疫总局和中国国家标准化委员会, 2006) 中的规定，单站寒潮定义为：某地的日最低气温 24 h 内降温幅度 ≥8 °C，或 48 h 内降温幅度 ≥10 °C，或 72 h 内降温幅度 ≥12 °C，而且该地日最低气温 ≤4 °C 时视为一次寒潮事件发生。若最低气温回升，则视为一次寒潮过程结束。本文将一次寒潮过程中最低气温的最大降幅定义为寒潮强度。

区域寒潮定义采用 Park et al. (2011) 的定义方法，将东北地区站点按 5°（纬度）×5°（经度）分为 7 格（如图 1 所示）。分别计算每个格点的平均温度，记录每格平均温度的降幅达到寒潮标准的时间。当（35°N~55°N，90°E~115°E）范围内海平面气压场 (Sea Level Pressure, SLP) 极大值大于 1035 hPa 时，视为存在西伯利亚高压。当有一格及以上的降温达到单站寒潮标准，且有西伯利亚高压存在，则视为一次区域寒潮事件发生。

2.3 寒潮路径追踪方法

寒潮路径的追踪采用基于拉格朗日算法的

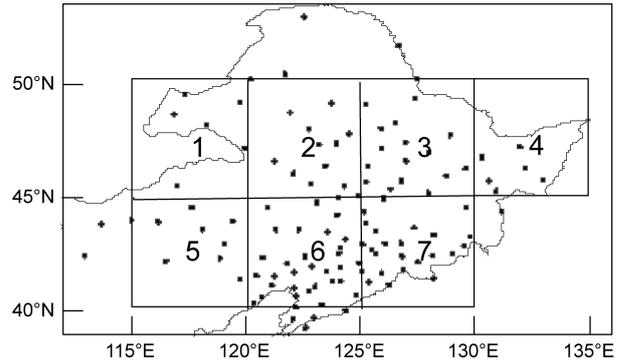


图 1 东北地区 119 个站点分布

Fig. 1 Distributions of 119 observation stations over Northeast China

FLEXPART 模式 (Stohl, 1998; Stohl and Seibert, 1998; Park et al., 2011)，追踪的起点选在气温单日降幅最大的格点，追踪时间为 5 d。假设气团可以用质点代替，质点轨迹方程为

$$\frac{dX(t)}{dt} = \dot{X}[X(t), t], \quad (1)$$

其中， $X(t)$ 为 t 时刻质点的坐标， \dot{X} 为当前坐标下的风速。

用二阶形式的差分方程来计算轨迹，则轨迹方程为

$$X(t_1) \approx X(t_0) + \frac{1}{2} \Delta t [\dot{X}(t_0) + \dot{X}(t_1)], \quad (2)$$

其中， Δt 是时间步长， t_0 为释放粒子时刻， t_1 为第二时刻，方程的解可以通过如下迭代得到：

$$X_1(t_1) \approx X(t_0) + \Delta t \dot{X}(t_0), \quad (3)$$

$$X_2(t_1) \approx X(t_0) + \frac{1}{2} \Delta t [\dot{X}(t_0) + \dot{X}_1(t_1)], \quad (4)$$

$$\dots$$

$$X_i(t_1) \approx X(t_0) + \frac{1}{2} \Delta t [\dot{X}(t_0) + \dot{X}_{i-1}(t_1)], \quad (5)$$

当等式右侧的两个迭代项间差值小于某一特定值，迭代结束，此时可确定轨迹方程。更多关于此模式算法的资料请参照 Stohl (1998) 和 Stohl and Seibert (1998) 的文章，模式代码可以在 <http://www.flexpart.eu> [2016-11-14] 找到。

3 东北春季寒潮的年代际变化

3.1 东北春季寒潮频次的年代际变化特征

图 2a 和 2b 分别给出了 1979~2011 年东北春季单站和区域寒潮的频次。可以看出，单站和区域寒

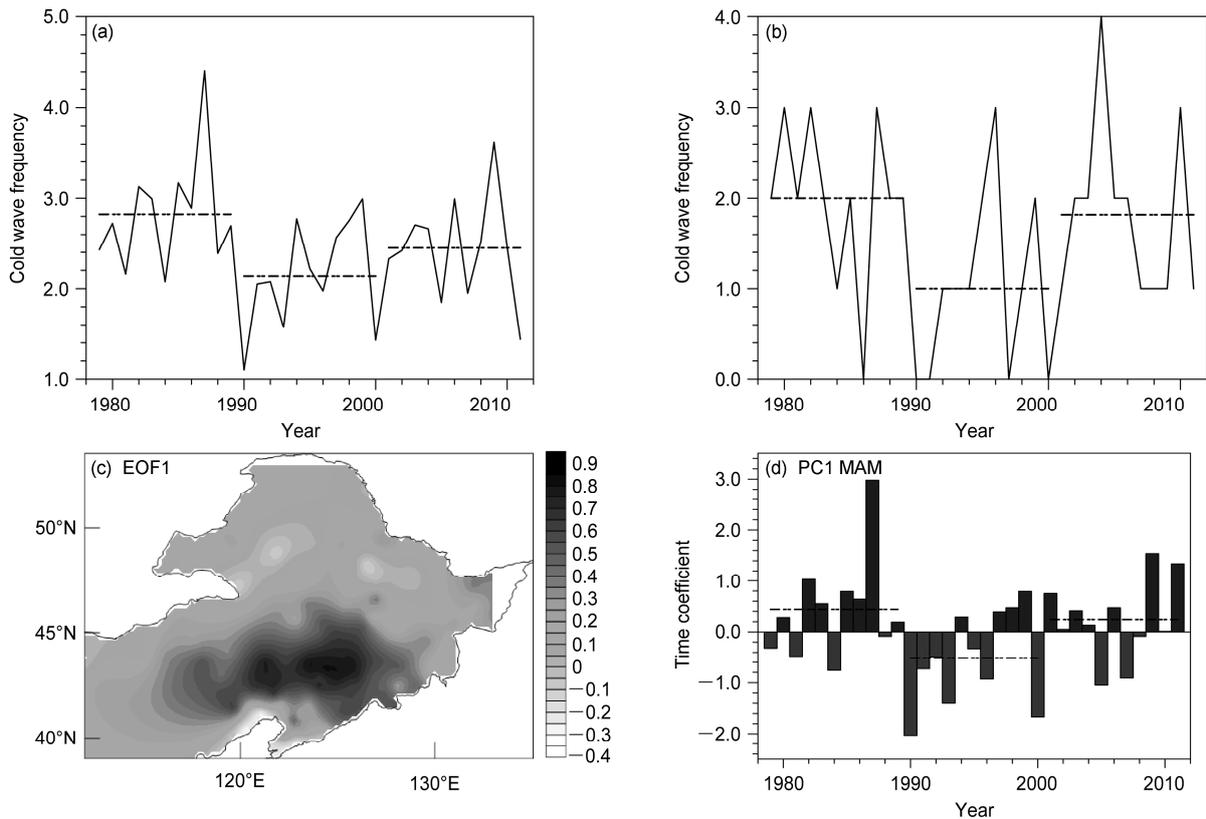


图2 东北地区 1979~2011 年春季 (a) 单站寒潮频次平均与 (b) 区域寒潮频次及 (c) 单站寒潮频次正交分解第一特征向量 (EOF1) 和 (d) 时间系数 (PC1)

Fig. 2 (a) Regionally averaged cold surge frequency at each station and (b) regional cold surge frequency and (c) the EOF1 and (d) PC1 of cold surge frequency at each station in Northeast China during 1979–2011

潮频次均在 20 世纪 80 年代末后有明显下降, 而进入 21 世纪后则有小幅上升, 但其频次仍低于 20 世纪 80 年代的频次, 与任国玉等 (2010) 所得出的寒潮频次变化特点相对一致, 即进入 21 世纪以来寒潮频次有所增多, 但是长期下降趋势没有改变。采用经验正交函数 (Empirical Orthogonal Function, EOF) 分解方法对春季东北地区寒潮频次进行分解 (图 2c), 可以看出单站寒潮频次的第一特征向量 (EOF1) 除极个别站点外, 东北地区基本呈现全区一致性变化特征。且其时间系数 PC1 在 20 世纪 80 年代末由正转为负, 21 世纪初又由负转为正, 表明 20 世纪 80 年代末之后东北春季寒潮频次明显减少, 而在 21 世纪后频次又有所增加, 这与前文所述寒潮频次变化一致。我们对东北地区春季寒潮单站频次和区域频次分别进行了 MK 检验, 突变点分别位于 1989 年和 1990 年 (图略), 且由图可以看出 21 世纪与 90 年代的频次特点有明显差异。参照 Woo et al. (2012) 提出的将东亚地区冷空气活动分为 1979~1989 年、1990~2000 年、2001~2011 年的分段标

准, 以及前文所述的全球气候变化背景, 同样将研究时段分为 3 个时段, 即 1979~1989 年 (以下统称为 20 世纪 80 年代)、1990~2000 年 (20 世纪 90 年代) 和 2001~2011 年 (21 世纪初), 且三者间寒潮单站频次和区域频次均值存在显著性差异, 并通过 95% 可信度检验。下文将分析各个时段的寒潮变化特征及其对应的大气环流特征, 进而研究其可能原因。

3.2 东北春季寒潮强度的年代际变化特征

本文以寒潮过程中最低气温的最大降幅作为一次寒潮强度的衡量标准, 图 3 给出了 1979~2011 年东北地区春季寒潮强度的年代际变化。20 世纪 80 年代 (图 3b) 单次寒潮降温最大值为 13°C , 20 世纪 90 年代 (图 3c) 为 13.9°C , 21 世纪初 (图 3d) 为 14°C 。20 世纪 80 年代, 119 个站点中单次寒潮降温在 11°C 以上的有 94 个, 20 世纪 90 年代达到 107 个, 21 世纪初为 97 个; 单次寒潮降温在 12°C 以上的站点数则分别为 30、52、32。因此, 3 个年代中, 东北春季寒潮的强度在 20 世纪 80 年代最弱, 20 世纪 90 年代最强, 21 世纪相对于 20 世

纪 90 年代较弱, 但强度仍强于 20 世纪 80 年代。即 20 世纪 80 年代东北春季寒潮爆发最频繁, 但强度最弱, 20 世纪 90 年代频次明显减少, 但单次寒潮的强度明显增强, 这种特征符合极端天气事件与气候变化的关系 (李峰等, 2006)。

3.3 区域寒潮路径的年代际变化

本文利用基于拉格朗日算法的 FLEXPART 模式 (Stohl, 1998; Stohl and Seibert, 1998; Park et al., 2011) 追踪冷空气的路径。图 4 为 20 世纪 80 年代 (图 4a)、20 世纪 90 年代 (图 4b) 以及 21 世纪 (图 4c) 各次区域寒潮的路径。根据以往对冷空气源地的统计, 影响我国的冷空气的源地主要是新地岛附近和冰岛—格陵兰岛附近, 而且以新地岛附近为主 (朱乾根等, 2000)。而由图 4 可见, 20 世纪 80 年代冷空气的主要来源为新地岛附近, 20 世纪 90 年代后冷空气来源则主要变为格陵兰岛附近, 来自新地岛附近的冷空气明显减少, 而 21 世纪初来自格陵兰岛的冷空气相对 20 世纪 90 年代又有所减少。

4 背景环流场的年代际变化

4.1 高度场的年代际变化

为了从大气环流的角度分析各个年代冷空气的活动特征, 图 5 给出了 20 世纪 80 年代 (图 5a)、20 世纪 90 年代 (图 5b) 及 21 世纪初 (图 5c) 3 个年代 300 hPa 高度场和 850 hPa 高度场距平。由图 5a 可以看出, 20 世纪 80 年代的高度场高低空正距平中心均出现在新地岛附近, 欧亚大陆西岸和西伯利亚地区为负距平中心, 有利于冷空气入侵我国东北地区。西伯利亚高压偏弱的同时, 东亚大槽附近的高度场正距平也使得东亚大槽偏弱, 二者同时导致了冷空气强度偏弱。20 世纪 90 年代 (图 5b) 的新地岛地区有明显负距平, 使得此处冷空气不易南下, 频次减少。正距平中心出现在西伯利亚地区, 西伯利亚高压和东亚大槽均偏强, 冷空气强度偏强。21 世纪初 (图 5c) 格陵兰岛地区为正距平, 负距平中心则位于新地岛至西伯利亚地区及格陵兰岛以南, 范围相对于 90 年代缩小, 强度减弱, 使得冷空气频次又有所回升。而东亚大槽的偏强也使得 21 世纪初的冷空气强度强于 20 世纪 80 年代。

4.2 低层风场的年代际变化

由于低层风场的变化可以直接反映环流的变化特点, 为了进一步分析各个年代环流场的差异,

图 6 给出了 20 世纪 80 年代 (图 6a)、90 年代 (图 6b) 及 21 世纪初 (图 6c) 的 850 hPa 风场距平。20 世纪 80 年代 (图 6a) 新地岛及其以南地区有气流辐散, 利于新地岛附近的冷空气南下。新地岛附近有北风距平, 亚洲东岸则有南风距平, 即冷空气多来自新地岛附近, 且在亚洲东岸不易南下。20 世纪 90 年代 (图 6b) 在新地岛附近有气流辐合, 格陵兰岛东南有气流辐散。二者相互配合, 使欧亚大陆西岸偏西北风, 利于格陵兰岛的冷空气向东南传播进入欧亚大陆, 而新地岛附近偏南风, 不利于冷空气的南下。西伯利亚地区有气流辐合, 即西伯利亚高压偏强, 利于冷空气在此增强并继续南下。21 世纪初 (图 6c) 北风距平主要位于新地岛以西至格陵兰岛, 中国东北及其以北地区有南风距平。综上, 20 世纪 80 年代新地岛附近偏北风, 利于此处冷空气南下。20 世纪 90 年代冷空气自格陵兰岛南下, 并且在西伯利亚地区得到加强, 而亚洲东岸的北风也使得 20 世纪 90 年代的寒潮强度总体偏强。而 21 世纪新地岛以西至格陵兰岛和亚洲东岸有弱北风分量, 使寒潮强度弱于 20 世纪 90 年代, 但强于 20 世纪 80 年代。

4.3 表面温度异常的年代际变化

图 7 分别给出了 20 世纪 80 年代、20 世纪 90 年代及 21 世纪初的春季地面气温 (surface air temperature, SAT) 距平, 阴影区为通过 90% 可置信度检验。可以看出 20 世纪 80 年代 (图 7a) 北半球高纬地区的 SAT 基本为负距平, 21 世纪初 (图 7c) 则为正距平, 二者距平中心均位于新地岛附近。而 20 世纪 90 年代 (图 7b) 格陵兰岛附近 SAT 为负距平, 而新地岛附近的 SAT 为正距平, 新地岛以南的 SAT 为负距平, 这种情况十分不利于冷空气的南下。

由 SAT 的 EOF 分析 (图 8) 也可以看出, EOF1 (图 8a) 显示, SAT 的变化在高纬较为明显, 极大值中心位于新地岛附近, 与之对应的 PC1 在 20 世纪 80 年代末存在由负到正的转折, 即从 20 世纪 80 年代末开始高纬地区明显增温。由 EOF2 (图 8b) 可以看出, 格陵兰岛附近和新地岛附近的 SAT 呈相反变化, 对应的 PC2 也在 20 世纪 80 年代末有明显转折, 即从 20 世纪 90 年代, 新地岛附近 SAT 升高而格陵兰岛附近 SAT 上升不显著。而与前文所述的 20 世纪 90 年代的 SAT 距平特征较为一致。21 世纪初, PC2 由负转为正, 即新地岛的增暖趋势有所减缓。

综上所述, 20 世纪 80 年代新地岛附近高度场的

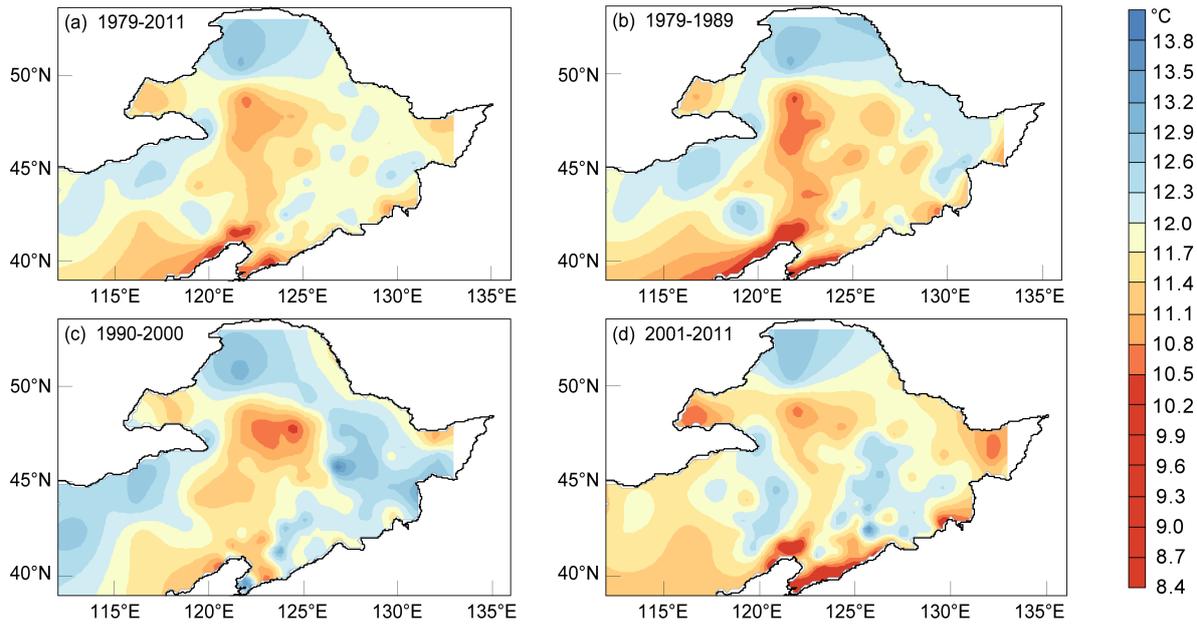


图3 东北地区春季寒潮强度的年代际变化

Fig. 3 Decadal changes in the intensity of cold surges in Northeast China during the spring

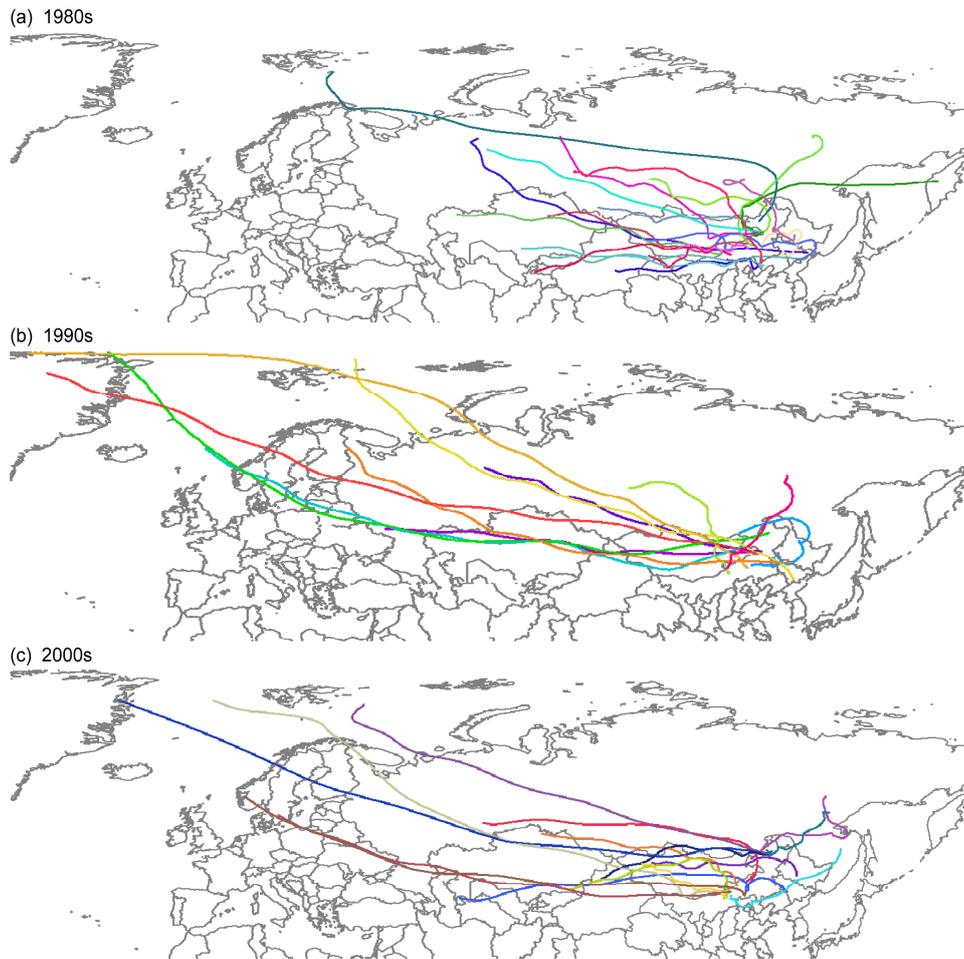


图4 20世纪 (a) 80年代、(b) 90年代以及 (c) 2000年代各次区域寒潮的路径追踪

Fig. 4 Tracks of regional cold surges during the (a) 1980s, (b) 1990s, and (c) 2000s

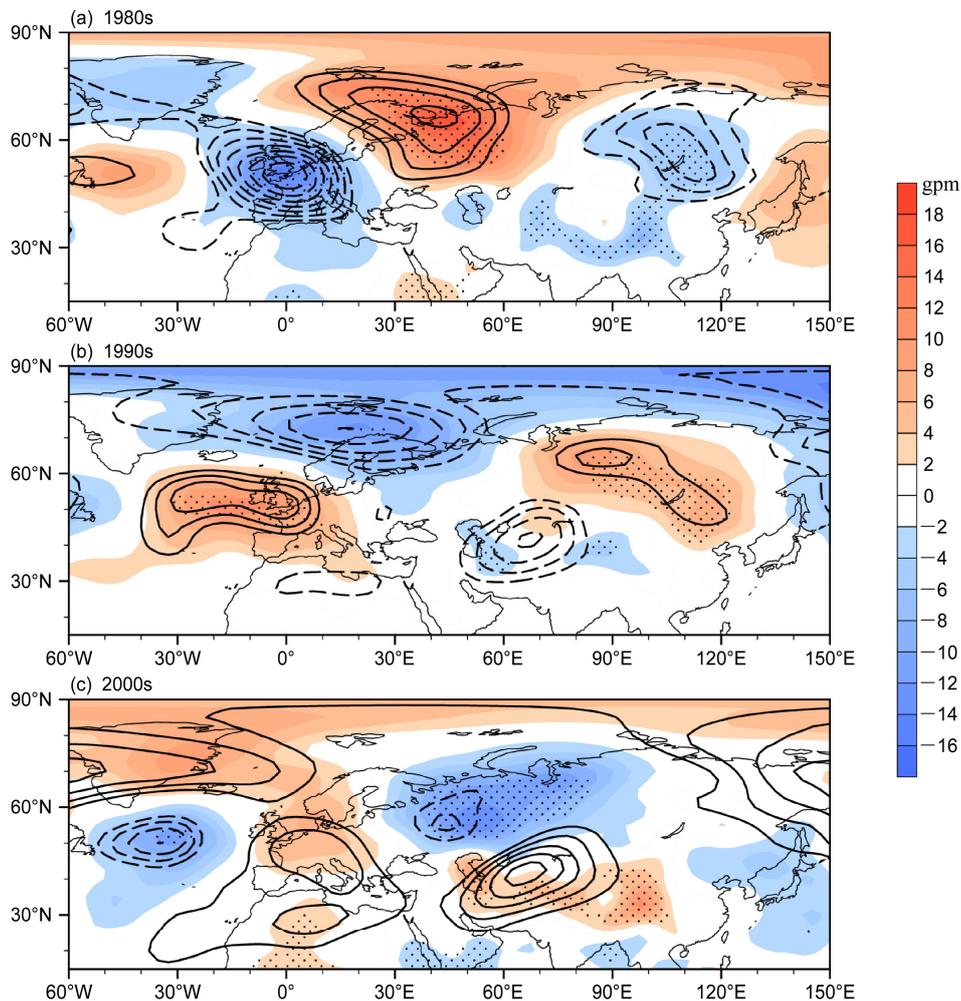


图 5 20 世纪 (a) 80 年代、(b) 90 年代及 (c) 2000 年代的 300 hPa (等值线间隔为 4 gpm) 和 850 hPa (填色区) 位势高度距平 (带点区通过 90% 信度检验)
Fig. 5 Composite anomalies of geopotential height at 300 hPa (contours at intervals of 4 gpm) and 850 hPa (shadings) during (a) the 1980s, (b) 1990s, and (c) 2000s (areas with dots: above the 90% confidence level)

负距平使冷空气易从此处南下，但西伯利亚高压和东亚大槽均偏弱，冷空气强度偏弱。而 20 世纪 90 年代开始，新地岛附近高度场距平由负转正，使得此处冷空气不易南下，但由于西伯利亚高压和东亚大槽的偏强，冷空气强度增强。

SAT 在 3 个年代的不同特征，可能是影响冷空气的源地以及路径，以及频次和强度等的主要原因。图 9 为新地岛和格陵兰岛去趋势后的春季 SAT 变化折线图。由图 9a 可以看出，20 世纪 90 年代开始，新地岛附近 (70°N~80°N, 40°E~60°E) SAT 明显增暖，该地区高度场表现为负距平，且有气流的辐合上升，而格陵兰岛地区 (60°N~80°N, 60°W~20°W) SAT (图 9b) 去趋势后甚至有下降趋势，有气流的辐散下沉，与前文所述的高度场和

风场的年代际变化一致。而 SAT 的这种年代际变化特征可能和海冰等下垫面因子有关。

5 北极海冰变化对东北寒潮的影响

5.1 影响东北寒潮活动变化的海冰关键区

已有研究表明，海冰可影响冷空气的活动特征 (朱晨玉等, 2014; 狄慧, 2014; 谢永坤等, 2014)，故海冰为影响寒潮频次和强度的关键因子之一。图 10 给出了东北地区 1979~2011 年春季单站寒潮频次 PC1 与海冰密集度的相关，时间从 12 月到次年 5 月，每三个月视为一个阶段。由图 10 可以看出，与东北地区春季寒潮频次呈显著正相关的区域为新地岛附近 (70°N~80°N, 40°E~60°E) 范围内，

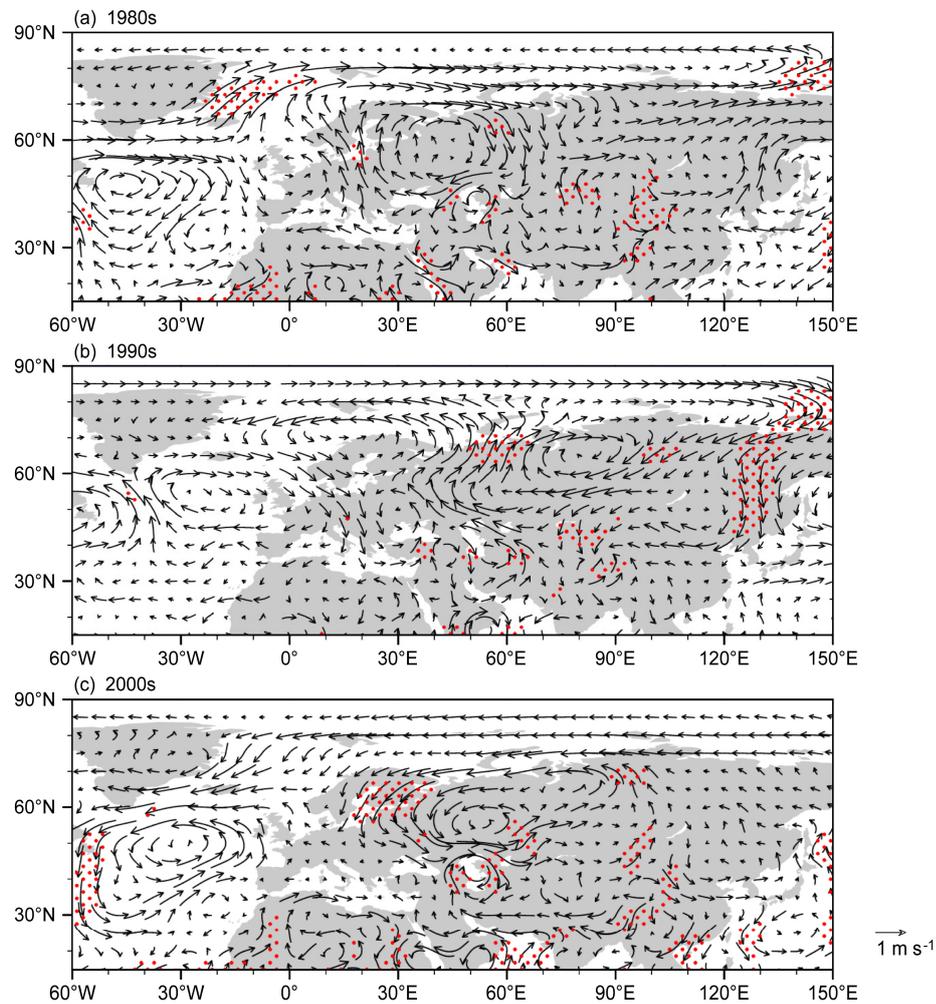


图6 20世纪(a)80年代、(b)90年代及(c)2000年代的850 hPa风场距平(带点区通过90%信度检验)

Fig. 6 Composite anomalies of winds at 850 hPa during the (a) 1980s, (b) 1990s, and (c) 2000s (areas with dots above the 90% confidence level)

且这种正相关从冬季一直维持到春季。所以我们将这个地区视为所研究的海冰关键区。

由图11可以看出,虽然从1979年后海冰密集度总体来说呈下降趋势,但去趋势后的结果则显示,海冰密集度在21世纪初有所上升,即21世纪后海冰减少趋势减缓。海冰关键区与新地岛附近的SAT呈明显的负相关,相关系数最大达0.8以上,通过99%可信度检验(图略),即海冰为影响此地区SAT的最关键因子之一。海冰的增加会使下垫面反照率增加,此区域的SAT下降,反之亦然。

5.2 关键区海冰与大气环流的关系

为了进一步分析关键区海冰对大气环流的影响,图12给出了超前一个月的关键区平均海冰密集度与SLP(图12a)和500 hPa高度场(图12b)的相关,以及同期海冰密集度与SLP(图12c)和

500 hPa高度场(图12d)的相关。可以看出,关键区的海冰密集度与该地区的SLP呈明显的正相关,这种正相关在高纬度的大部分地区都有体现,即海冰的减少对应高纬度SLP下降,冷空气不易南下,冷空气活动次数减少。这与朱晨玉等(2014)得出的结论一致,即全球变暖导致的北极海冰的减少是冷空气活动频次减少的主要原因。

而500 hPa高度场与海冰的相关极大值区位于东亚大槽附近,且这种正相关不仅在高低空都有体现,而且从冬季一直维持到春季(图略)。这种正相关表明,当前期海冰偏多时,东亚大槽偏弱,槽前西北气流偏弱,南下的冷空气强度较弱,反之若前期海冰偏少,冷空气强度则较强。而也有研究表明海冰还可以通过影响西伯利亚高压来影响冷空气活动。谢永坤等(2014)指出,前期海冰的偏多

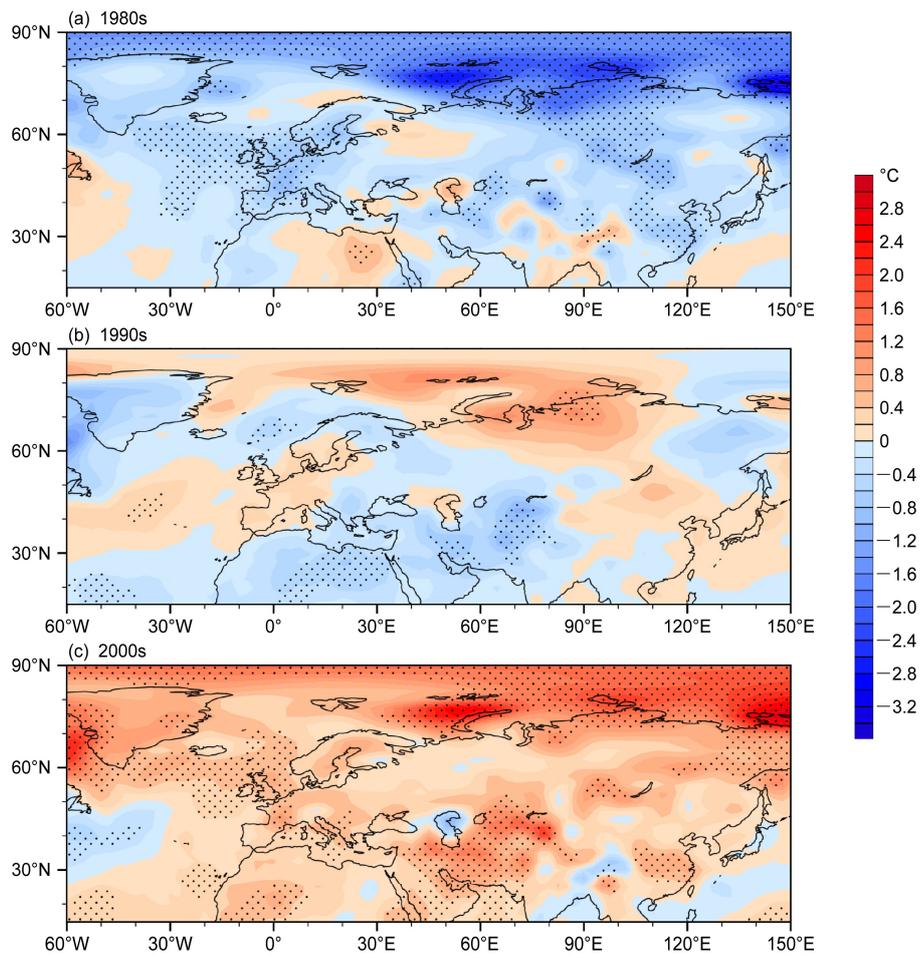


图 7 20 世纪 (a) 80 年代、(b) 90 年代及 (c) 2000 年代的地面气温距平 (带点区通过 90% 信度检验)

Fig. 7 Composite anomalies of surface air temperature (SAT) during the (a) 1980s, (b) 1990s, and (c) 2000s (areas with dots above the 90% confidence level)

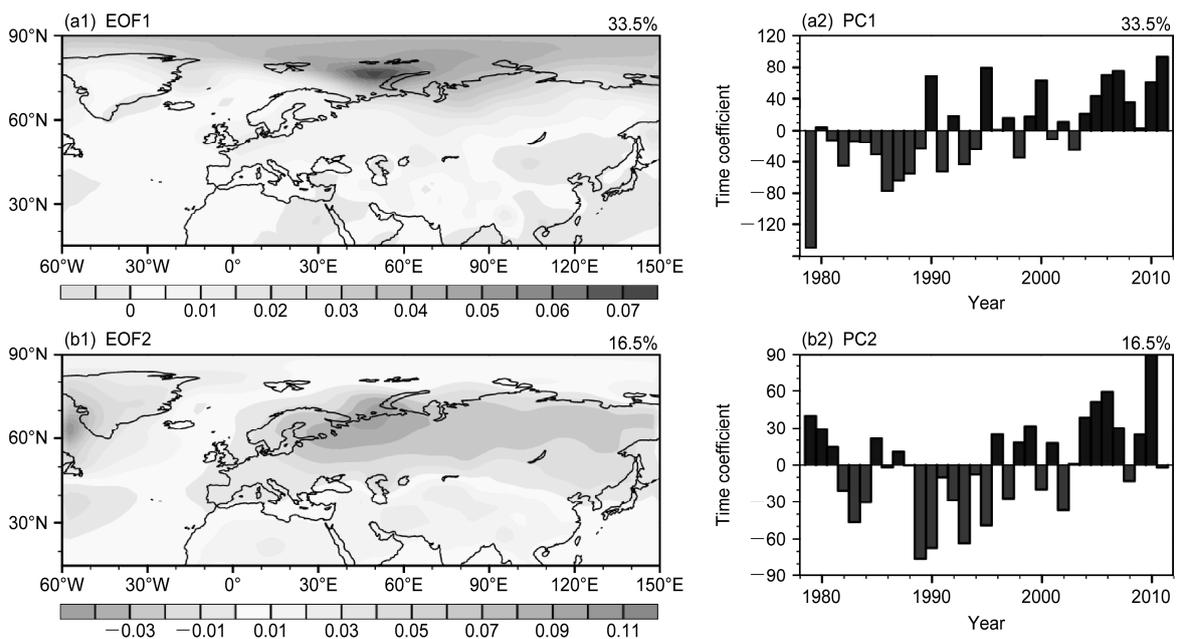


图 8 1979~2011 年 SAT 的 (a1) EOF1 和 (a2) PC1、(b1) 正交分解第二特征向量 (EOF2) 和 (b2) 时间系数 (PC2)

Fig. 8 The (a1) EOF1 and (a2) PC1 and (b1) EOF2 and (b2) PC2 of the SAT during 1979–2011

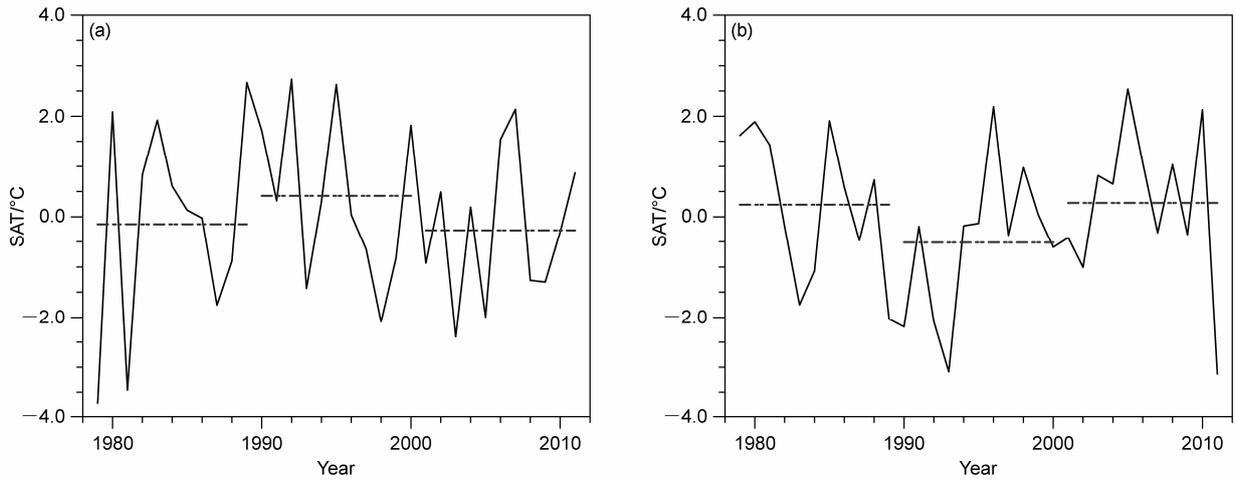


图 9 1979~2011 年 (a) 新地岛和 (b) 格陵兰岛去趋势后的区域平均 SAT
Fig. 9 Detrended regionally averaged SAT over (a) Novaya Zemlya and (b) Greenland during 1979–2011

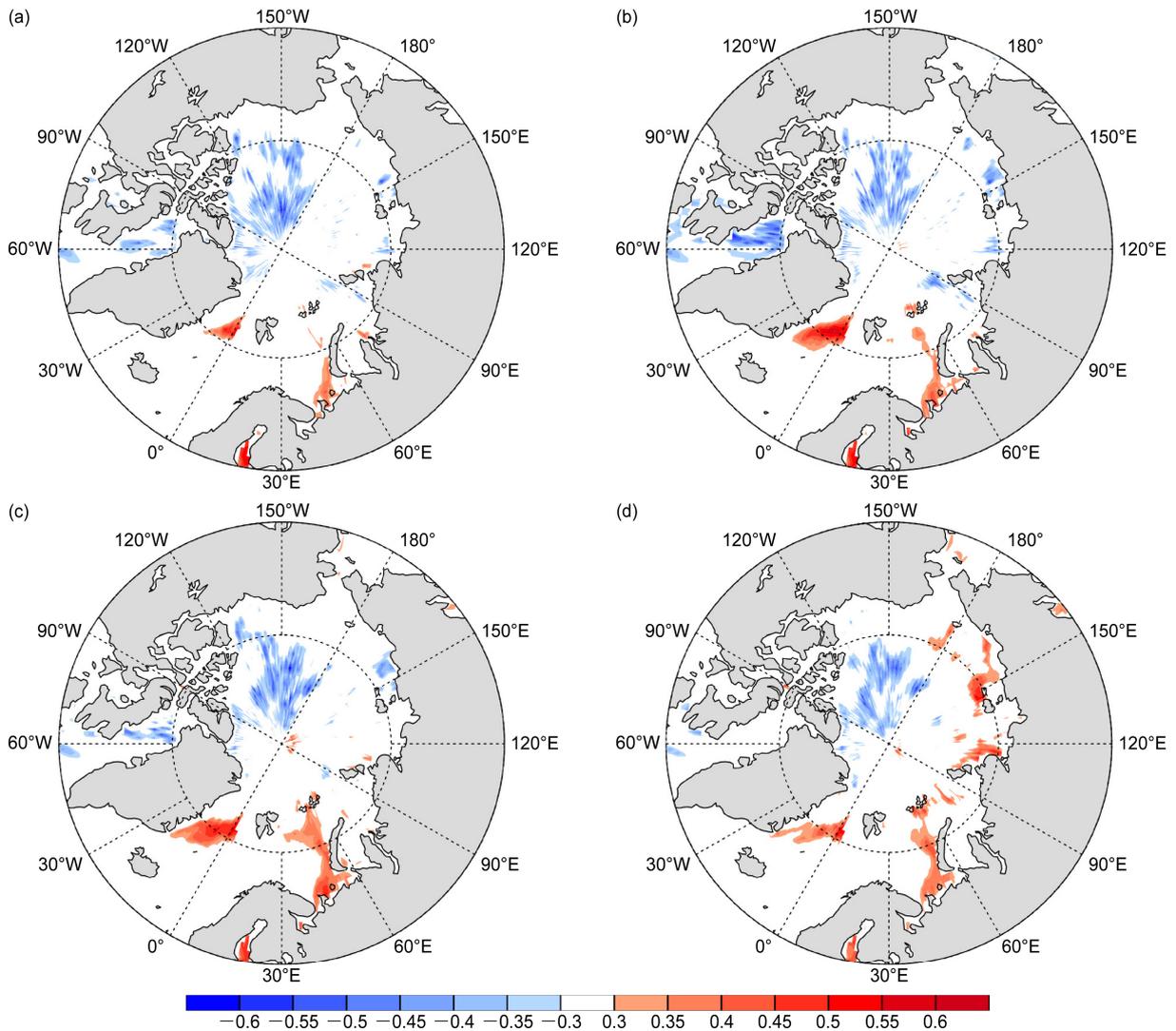


图 10 1979~2011 年东北春季单站寒潮频次 PC1 与 (a) 12 月至次年 2 月、(b) 1~3 月、(c) 2~4 月、(d) 3~5 月海冰密集度的相关 (填色区通过 90% 信度检验)

Fig. 10 Correlation coefficient between the PC1 of cold surge frequency and the sea ice concentration during (a) Dec to next Feb, (b) Jan–Mar, (c) Feb–Apr, and (d) Mar–May (shadings: above the 90% confidence level)

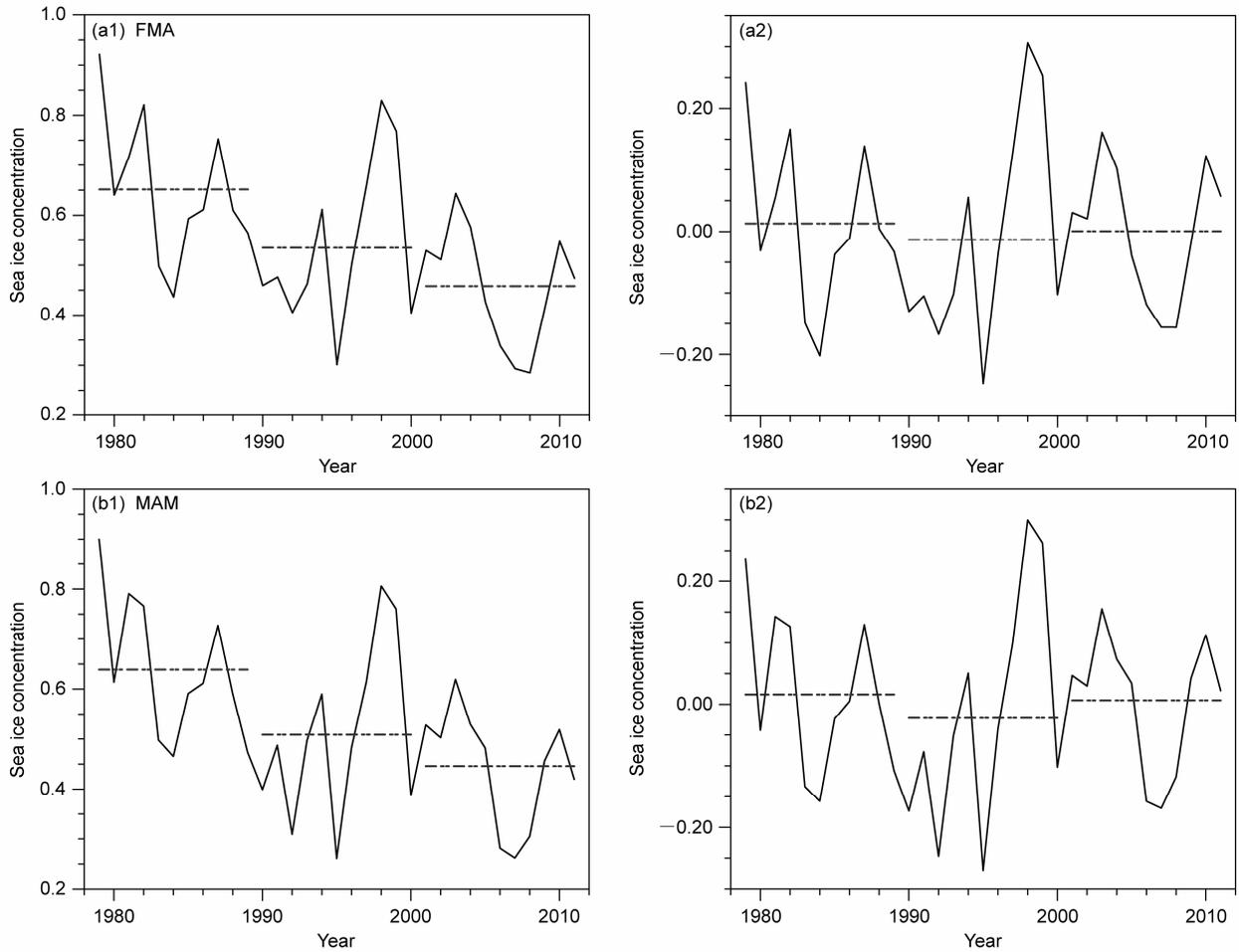


图 11 (a1、a2) 超前一个月以及 (b1、b2) 同期的关键区平均海冰密集度原始值 (左列) 和去趋势后的海冰密集度折线图 (右列)
Fig. 11 The sea ice concentration (left panel) and the detrended sea ice concentration (right panel) over the key region for (a1, a2) one month leading time and (b1, b2) contemporaneous period

会导致冷空气强度的减弱，而狄慧 (2014) 证明加速消融的北极海冰通过影响西伯利亚高压加强，进而造成中高纬度欧亚大陆极端低温增多。即海冰的减少会导致冷空气强度的增强，与本文结论一致。

综上所述，新地岛附近海冰的变化直接影响了冷空气的活动特征。冬季至次年春季的海冰在 20 世纪 80 年代末迅速减少，90 年代海冰覆盖率偏低，新地岛附近 SAT 偏暖，SLP 偏低，冷空气不易南下。同时关键区海冰的偏少会导致东亚大槽偏强，使得冷空气虽然频次偏少，但强度增强。而 21 世纪初，海冰减少的趋势减缓，冷空气频次相对 20 世纪 90 年代有所增加而强度偏弱，但频次仍不如 20 世纪 80 年代。这种变化也使得寒潮的源地和路径发生了变化，即 20 世纪 90 年代来自新地岛的冷空气明显减少，而来自格陵兰岛的冷空气增加。

6 结论与讨论

通过对我国东北春季寒潮年代际变化特征及其可能原因的分析，得到以下主要结论：

(1) 东北地区春季寒潮频次和强度在 20 世纪 80 年代末出现转折，频次减少，同时单次寒潮的强度增强，而 21 世纪初开始，寒潮频次有所增加，强度减弱。而区域寒潮的路径也发生了改变，20 世纪 80 年代多来源于新地岛附近，20 世纪 90 年代来源于新地岛的冷空气明显减少，来自格陵兰岛的冷空气增加，21 世纪初来自格陵兰岛的冷空气又有所减少。

(2) 从环流场来看，20 世纪 80 年代，新地岛附近高度场呈正距平，利于冷空气的南下，寒潮频

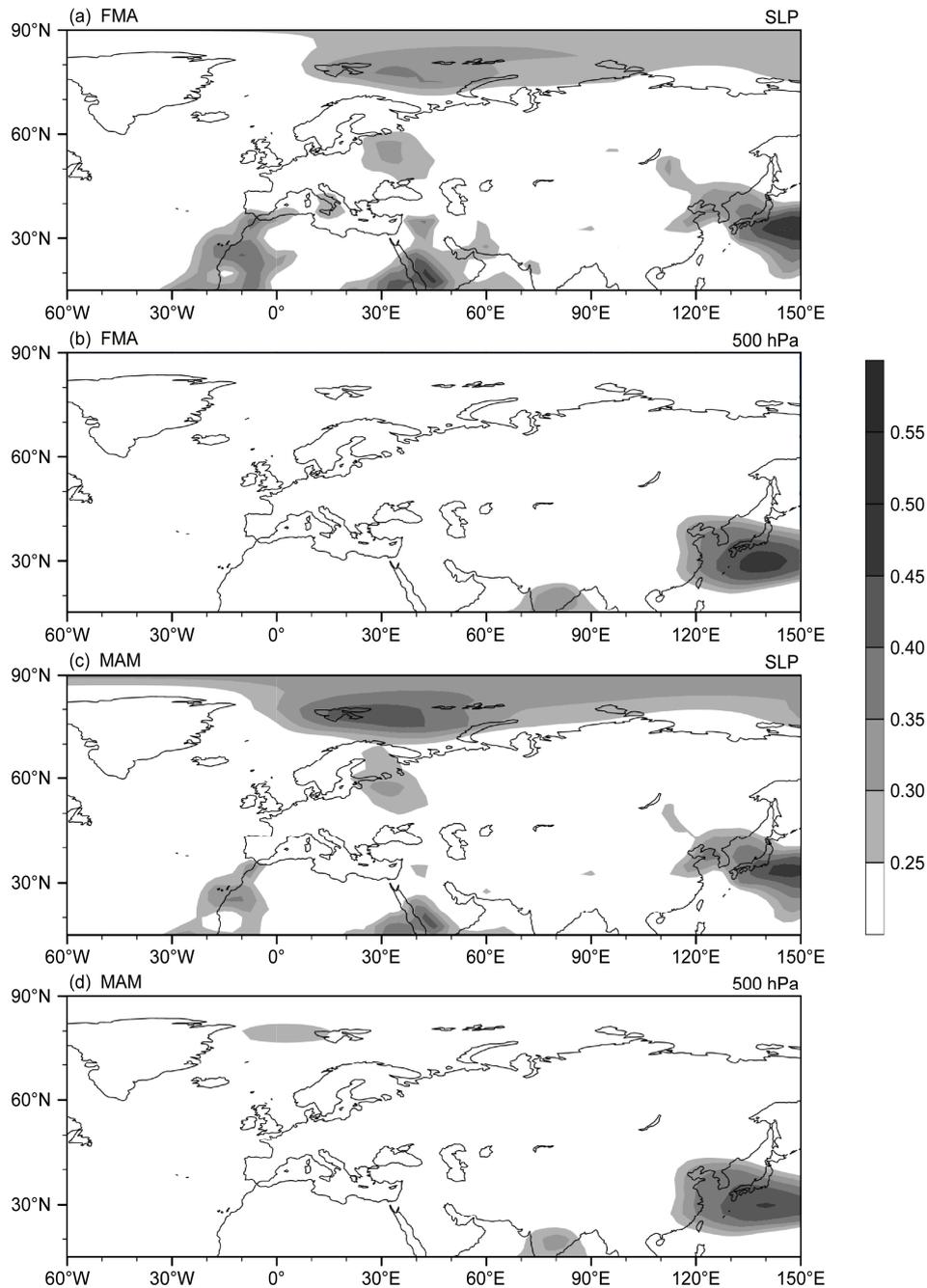


图 12 超前一个月的关键区平均海冰密集度与 (a) SLP 和 (b) 500 hPa 高度场的相关, 以及同期海冰密集度与 (c) SLP 和 (d) 500 hPa 高度场的相关 (填色区为通过 90% 信度检验)

Fig. 12 Correlation coefficients of the sea ice concentration over the key region with (a, c) SLP and (b, d) geopotential height at 500 hPa in (a, b) one month leading time and (c, d) contemporaneous time (shadings are above the 90% confidence level)

次偏多; 而西伯利亚高压和东亚大槽的偏弱使得冷空气强度偏弱。20 世纪 90 年代, 新地岛附近 SAT 增暖, 高度场表现为负距平, 寒潮频次明显减少, 尤其是来自新地岛的冷空气减少; 西伯利亚高压和东亚大槽均偏强, 冷空气强度偏强。21 世纪初, 新地岛附近高度场负距平减弱, 寒潮频次有所回升;

东亚大槽偏强, 使得寒潮强度强于 20 世纪 80 年代。

(3) 新地岛附近海冰的变化是导致东北寒潮频次和强度变化的可能原因之一。前期海冰与高纬 SLP 呈正相关, 而与东亚大槽则呈负相关。所以, 当 20 世纪 80 年代前期海冰偏多时, 高纬 SLP 偏高, 东亚大槽偏弱, 冷空气频次增加, 强度减弱。反之,

当 20 世纪 90 年代前期海冰偏少, 高纬 SLP 偏低, 东亚大槽偏强, 冷空气频次减少, 强度增加。而 21 世纪初海冰的下降趋势减缓, 使得 21 世纪初的寒潮频次又有所增加, 强度减弱。这种变化导致了上文所述环流场特征的形成, 而这种关系也对我国东北地区的寒潮有一定的前期预报意义。

本文通过观测分析发现, 新地岛地区可能是影响着我国东北春季寒潮年代际变化的海冰关键区, 其在 20 世纪 90 年代的迅速减少可能会导致 SAT 明显升高而 SLP 偏低, 此处冷空气不易南下, 总体频次减少, 尤其是来自新地岛的冷空气明显减少。同时, 关键区海冰的减少会导致冷空气强度的增加, 这与以往一些研究结论一致 (狄慧, 2014; 谢永坤等, 2014)。21 世纪初关键区海冰减少趋势减缓, 冷空气频次又有所增加, 强度减弱。但是, 本文的这些结论都是基于观测资料统计分析得出的, 需要进一步采用数值模式进行关键区海冰变化的敏感性试验去验证。而且, 关键区海冰的变化通过何种途径影响东亚大槽也尚不明确, 也有待于未来进一步研究。

参考文献 (References)

- Bueh C, 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.
- 陈海山, 刘蕾, 朱月佳. 2012. 中国冬季极端低温事件与天气尺度瞬变波的可能联系 [J]. *中国科学: 地球科学*, 42 (12): 1951–1965. Chen Haishan, Liu Lei, Zhu Yuejia. 2013. Possible linkage between winter extreme low temperature events over China and synoptic-scale transient wave activity [J]. *Science China (Earth Sciences)*, 56 (7): 1266–1280, doi: 10.1007/s11430-012-4442-z.
- Decker M, Brunke M A, Wang Z, et al. 2012. Evaluation of the reanalysis products from GSFC, NCEP, and ECMWF using flux tower observations [J]. *J. Climate*, 25 (6): 1916–1944, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00004.1.
- 狄慧. 2014. 北极海冰年代际转型及其对冬季极端低温的影响 [D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 61pp. Di Hui. 2014. Decadal regime shift of Arctic Sea ice and corresponding effects on extreme low temperature [D]. M. S. thesis (in Chinese), Ocean University of China, 61pp.
- 丁一汇, 柳艳菊, 梁苏洁, 等. 2014. 东亚冬季风的年代际变化及其与全球气候变化的可能联系 [J]. *气象学报*, 72 (5): 835–852. Ding Yihui, Liu Yanju, Liang Sujie, et al. 2014. Interdecadal variability of the East Asian winter monsoon and its possible links to global climate change [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 72 (5): 835–852.
- Easterling D R, Wehner M F. 2009. Is the climate warming or cooling? [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36 (8): L08706, doi: 10.1029/2009GL037810.
- Hong C C, Hsu H H, Chia H H, et al. 2008. Decadal relationship between the North Atlantic Oscillation and cold surge frequency in Taiwan [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35: L24707, doi: 10.1029/2008GL034766.
- Jeong J H, Ho C H. 2005. Changes in occurrence of cold surges over East Asia in association with Arctic Oscillation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32: L14704, doi: 10.1029/2005GL023024.
- 康志明, 金荣花, 鲍媛媛. 2010. 1951–2006 年期间我国寒潮活动特征分析 [J]. *高原气象*, 29 (2): 420–428. Kang Zhiming, Jin Ronghua, Bao Yuanyuan. 2014. Characteristic analysis of cold wave in China during the period of 1951–2006 [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 29 (2): 420–428.
- 李峰, 矫梅艳, 丁一汇, 等. 2006. 北极区近 30 年环流的变化及对中国强冷事件的影响 [J]. *高原气象*, 25 (2): 209–219. Li Feng, Jiao Meiyuan, Ding Yihui, et al. 2006. Climate change of Arctic atmospheric circulation in last 30 years and its effect on strong cold events in China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 25 (2): 209–219.
- 梁苏洁, 丁一汇, 赵南, 等. 2014. 近 50 年中国大陆冬季气温和区域环流的年代际变化研究 [J]. *大气科学*, 38 (5): 974–992. Liang Sujie, Ding Yihui, Zhao Nan, et al. 2014. Analysis of the interdecadal changes of the wintertime surface air temperature over mainland China and regional atmospheric circulation characteristics during 1960–2013 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 38 (5): 974–992, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13234.
- Park T W, Ho C H, Yang S. 2011. Relationship between the Arctic Oscillation and cold surges over East Asia [J]. *J. Climate*, 24 (1): 68–83, doi: 10.1175/2010JCLI3529.1.
- 钱维宏, 张玮玮. 2007. 我国近 46 年来的寒潮时空变化与冬季增暖 [J]. *大气科学*, 31 (6): 1266–1278. Qian Weihong, Zhang Weiwei. 2007. Changes in cold wave events and warm winter in China during the last 46 years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31 (6): 1266–1278, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2007.06.21.
- 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.*, 108 (D14): 4407, doi:10.1029/2002JD002670.
- 任国玉, 封国林, 严中伟. 2010. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望 [J]. *气候与环境研究*, 15 (4): 337–353. Ren Guoyu, Feng Guolin, Yan Zhongwei. 2010. Progresses in observation studies of climate extremes and changes in mainland China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 15 (4): 337–353, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2010.04.01.
- Saha S, Moorthi S, Pan H L, et al. 2010. The NCEP climate forecast system reanalysis [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91 (8): 1015–1057, doi: 10.1175/2010BAMS3001.1.
- 沈柏竹. 2013. 21 世纪以来欧亚冷冬频发与冬季 AO、极涡的联系及其机理 [D]. 兰州大学博士学位论文, 164pp. Shen Baizhu. 2013. The contact and effect of Arctic Oscillation and polar vortex in winter on frequent cold winter occurred in Eurasia since 21th century [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Lanzhou University, 164pp.
- 时晓曦. 2014. 中高纬海洋对中国东北部气候变化影响的研究 [D]. 中国海洋大学博士学位论文, 148pp. Shi Xiaoxi. 2014. The impact of the mid-high latitude oceans on climate change over North and Northeast China [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Ocean University of China, 148pp.

- Stohl A. 1998. Computation, accuracy and applications of trajectories—A review and bibliography [J]. *Atmos. Environ.*, 32(6): 947–966, doi: 10.1016/S1352-2310(97)00457-3.
- Stohl A, Seibert P. 1998. Accuracy of trajectories as determined from the conservation of meteorological tracers [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 124 (549): 1465–1484, doi: 10.1002/qj.49712454907.
- 王遵娅, 丁一汇. 2006. 近 53 年中国寒潮的变化特征及其可能原因 [J]. *大气科学*, 30 (6): 1068–1076. Wang Zunya, Ding Yihui. 2006. Climate change of the cold wave frequency of China in the last 53 years and the possible reasons [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (6): 1068–1076, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.06.02.
- 魏凤英. 2008. 气候变暖背景下我国寒潮灾害的变化特征 [J]. *自然科学进展*, 18 (3): 289–295. Wei Fengying. 2008. Change of the cold wave frequency of China in global warming [J]. *Progress in Natural Science (in Chinese)*, 18 (3): 289–295.
- Woo S H, Kim B M, Jeong J H, et al. 2012. Decadal changes in surface air temperature variability and cold surge characteristics over Northeast Asia and their relation with the Arctic Oscillation for the past three decades (1979–2011) [J]. *J. Geophys. Res.*, 117 (D18): D18117, doi: 10.1029/2011JD016929.
- Wu B Y, Zhang R H, D'Arrigo R. 2006. Distinct modes of the East Asian winter monsoon [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134 (8): 2165, doi: 10.1175/MWR3150.1.
- 谢永坤, 刘玉芝, 黄建平. 2014. 秋季北极海冰对中国冬季气温的影响 [J]. *气象学报*, 72 (4): 703–710. Xie Yongkun, Liu Yuzhi, Huang Jianping. 2014. The influence of the autumn Arctic sea ice on winter air temperature in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 72 (4): 703–710.
- Xu W H, Li Q X, Wang X L, et al. 2013. Homogenization of Chinese daily surface air temperatures and analysis of trends in the extreme temperature indices [J]. *J. Geophys. Res.*, 118 (17): 9708–9720, doi: 10.1002/jgrd.50791.
- 叶丹, 张耀存. 2014. 冬季东亚副热带急流和温带急流协同变化与我国冷空气活动的关系 [J]. *大气科学*, 38 (1): 146–158. Ye Dan, Zhang Yaocun. 2014. Association of concurrent variation between the East Asian polar front and subtropical jets with winter cold air activity in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 38 (1): 146–158, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13110.
- 朱晨玉, 黄菲, 石运昊, 等. 2014. 中国近 50 年寒潮冷空气的时空特征及其与北极海冰的关系 [J]. *中国海洋大学学报*, 44 (12): 12–20. Zhu Chenyu, Huang Fei, Shi Yunhao, et al. 2014. Spatial-temporal patterns of the cold surge events in China in recent 50 years and its relationship with Arctic sea ice [J]. *Periodical of Ocean University of China (in Chinese)*, 44 (12): 12–20.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 2008. 寒潮等级 (GB/T 21987-2008) [S]. 北京: 中国标准出版社, 3pp. The State Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration Commission. 2008. Grades of cold wave (GB/T 21987-2008) (in Chinese) [S]. Beijing: China Standards Press, 3pp.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 2006. 冷空气等级 (GB/T 20484-2006) [S]. 北京: 中国标准出版社, 3pp. The State Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration Commission. 2006. Grading of cold air (GB/T 20484-2006) (in Chinese) [S]. Beijing: China Standards Press, 3pp.
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 2000. 天气学原理和方法 (3 版) [M]. 北京: 气象出版社, 649pp. Zhu Qianguan, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 2000. *Synoptic Meteorology Principle and Method (3rd ed)* (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 649pp.