

秋季北极海冰对 EP 型 ENSO 的非线性响应

祁莉*, 马威威, 何金海, 耿新

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合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044

* 联系人, E-mail: qili@nuist.edu.cn

2018-07-19 收稿, 2018-09-18 接受

国家自然科学基金资助项目(41475086); 长江学者和创新团队发展计划资助项目(PCSIRT); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

摘要 利用 1961—2015 年 Hadley 中心逐月海表温度资料、海冰密集度资料以及 NCEP/NCAR 再分析资料, 探讨了秋季北极海冰对于 EP 型 ENSO 事件的异常响应, 并进一步研究了这种异常响应的可能原因。结果表明, 秋季北极海冰对 EP 型 ENSO 的响应具有非线性, 特别是喀拉海海域($60^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{E}$, $70^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{N}$) 海冰无论在 EP 型 El Niño 或是 La Niña 位相, 均表现为显著的负异常。进一步研究发现, 不同 ENSO 位相造成该区域海冰异常偏少的机制有明显不同。EP 型 El Niño 年秋季菲律宾附近海域对流活动被抑制, 所激发的经向波列在高纬地区形成异常反气旋环流, 其南风分量向喀拉海输送暖平流, 造成海冰异常偏少。而 EP 型 La Niña 年喀拉海海域则主要受到来自大西洋开放性海域西风异常的影响, 合成结果和个例年均显示 EP 型 La Niña 年秋季北大西洋上空存在一个显著的西风急流中心, 有利于北大西洋开放性海域较暖海水向下游输送, 进而影响喀拉海海冰。这些结果表明, 热带外地区大气环流场对 EP 型 ENSO 的非线性响应导致了喀拉海海冰对 EP 型 ENSO 事件的响应也表现出明显的非线性。

关键词EP 型 ENSO;
北极海冰;
非线性响应;
波列;
西风急流

北极是全球气候系统中重要的组成部分之一, 也是全球海洋和大气物质能量交换的关键地区。海冰作为北极气候系统中最重要冷源存在, 是极地地区海洋和大气之间热量以及角动量的交换媒介(Aagaard and Carmack, 1989; Curry et al., 1995)。由于海冰具有较高的反照率, 导致海冰融化与气温升高之间存在正反馈机制, 所以在全球变暖的背景下, 北极增暖趋势是全球平均水平的两倍以上, 被称为“北极放大效应”(Screen and Simmonds, 2010; Cohen et al., 2014)。正是这种对于气候变化捕捉的敏感性, 海冰又被称作为全球气候变化的“指示器”(魏立新, 2008)。近年来, 北极海冰得到众多学者的关注, 从 20 世纪 70 年代末至今, 北极海冰(特别是一年中海冰覆盖最少的秋季)覆盖面积以及海冰厚度都表现为明显减少(Comiso et al., 2008; Kwok

and Rothrock, 2009)。在 2012 年秋季, 北极海冰达到了历史覆盖的最低值(Parkinson and Comiso, 2013)。冬季我国平均温度较常年偏低 0.4°C (谭晶等, 2016)。海冰发生异常变化后, 会通过冰-海-气系统的相互作用进而对全球气候系统, 特别是北半球中高纬地区的气候变化产生显著影响(劳汉琼等, 2006; Budikova, 2009; Zhou and Wang, 2014)。

海冰异常变化带来的气候效应, 在以往的研究中得到了很多关注(Deser et al., 2010; Hopsch et al., 2012; Jaiser et al., 2012; Peings and Magnusdottir, 2014)。而造成海冰异常变化的因子, 前人工作已经指出其中既有外界的人为强迫(Gillett et al., 2008; Polyakov et al., 2012), 也有气候系统内部自然变率的影响, 包括 AMO(Chylek et al., 2009)以及 AO、ENSO 等(Liu et al., 2004)。ENSO 作为全球气

引用格式: 祁莉, 马威威, 何金海, 等, 2019. 秋季北极海冰对 EP 型 ENSO 的非线性响应[J]. 大气科学学报, 42(1): 117-128.

Qi L, Ma W W, He J H, et al., 2019. Nonlinear response of Arctic sea ice to EP ENSO in autumn[J]. Trans Atmos Sci, 42(1): 117-128.
doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20180719001. (in Chinese).

候系统中年际尺度上海气相互作用的最强信号,它的影响不仅是局地的热带太平洋区域,还会通过遥相关的方式引起全球范围的气候异常(van Loon and Madden, 1981; Wallace et al., 1998; Alexander et al., 2002)。考虑到海冰对于气候变化响应的敏感性以及显著的年际变率,那么海冰的变异是否与 ENSO 之间存在联系? 这种联系的机理又是怎样的?

前人的研究关于海冰和 ENSO 之间联系的研究主要可以分为两类:一类是研究超前的海冰变化对滞后的 ENSO 事件发生的可能影响。Gloersen (1995)指出海冰面积变化具有准两年和准四年的变化周期,这与 ENSO 事件的周期有较好的一致性。钱步东等(1994)关注了冬季海冰面积的变化对后期赤道海温异常的影响,主要通过计算不同海区对于赤道中东太平洋的海温异常的超前滞后的交叉相关矩阵,发现冬季巴伦支海海区海冰对于滞后的赤道中东太平洋海温异常有着很好的正相关关系。武炳义等(1997)讨论了冬季格棱兰、喀拉海和巴伦支海海冰年际变化与 ENSO 事件的关系,发现当海冰面积变化超前大气变化 3 a 时,可以诱发大气高度场产生 PNA 型异常, ENSO 事件发生在海冰面积变化速度为极值点的冬季。朱艳峰和陈隆勋(2003)、陈锦年等(2004)也是通过超前滞后相关,进而发现极地海冰异常对滞后发生的 ENSO 之间的可能影响。另一类研究则是关注 ENSO 事件对于敏感的气候源——海冰的可能影响。Liu et al. (2004)通过指数回归,发现 ENSO 事件通过影响三圈环流中的费雷尔环流的经向输送,引起北太平洋与北极的接口区——楚科奇海以及南波弗特海的海冰异常,其中 El Niño 年由于费雷尔环流向极输送异常,导致该区域海冰减少, La Niña 年的异常响应则相反。值得注意的是最近 20 a 来,一种新型的 ENSO 事件频繁发生(Ashok and Yamagata, 2009; 冯娟等, 2010; Zhang et al., 2015a; 王美等, 2016; 张文君等, 2018),其异常海温中心位于中太平洋,本文称之为 CP 型 ENSO, ENSO 与海冰的关系有了进一步的认知。左涛等(2015)通过超前滞后相关,发现 CP 型 El Niño 可能通过调制 AO 进而影响到滞后 2 a 以上的北极海冰变化。Hu et al. (2016)关注的是发展年夏季,热带太平洋地区海温 REOF 的第二模态,即 CP 型 ENSO 模态与同期夏季海冰异常的线性相关关系,发现海冰变化对于 CP 型 ENSO 的响应在加拿大海盆区域存在显著通过检验的正相关。

需要指出的是,相对于 CP 型事件, EP 型 ENSO 位置更为稳定, EP El Niño 在强度上也明显强于 CP El Niño(李智玉等, 2015; 方陆俊等, 2016), 如此高强度、长维持性的 EP 型 ENSO 事件又与北极海冰存在什么联系呢? 因此本研究主要关注北极海冰对于 EP 型 ENSO 事件的异常响应,并分析这种异常响应的可能原因,以期进一步完善 ENSO 对高纬极地地区海冰的可能影响机制。

1 资料与方法

使用的资料包括:1)英国 Hadley 中心提供的月平均海表温度(HadISST)资料和月平均海冰密集度资料(Rayner, 2003);2)美国国家环境预报中心/大气研究中心(NCEP/NCAR)月平均再分析资料(Kalnay et al., 1996);3)NOAA 提供的美国气候预测中心(CPC)CMAP 全球月平均降水数据(Xie and Arkin, 1997)。所有资料均取 1961 年 1 月—2015 年 12 月。需要特别指出的是,北极海冰具有明显的季节循环的特征,秋季是北极地区海冰覆盖范围最小,也是极地气候系统最不稳定,年际变率最大的时期(隋翠娟等, 2015)。虽然 ENSO 成熟阶段在冬春季节,但此时正值北极海冰冻结期,海冰对大气的影 响比大气对海冰的影响作用更大(Alexander et al., 2004)。因此,本文将主要关注 EP 型 ENSO 发展年秋季北极海冰的异常变化。对于秋季的时间界定,结合前人的工作(谢永坤等, 2014),以及区域平均的北极地区($0^{\circ} \sim 360^{\circ} \text{E}$, $65^{\circ} \sim 90^{\circ} \text{N}$)海冰密集度的逐月方差变化(图略),选择一年中年际方差变率最大的 9—10 月作为海冰的秋季。同时考虑到秋季北极海冰存在年代际变化(何金海等, 2015),为了突出年际变率,所有秋季平均气象要素和指数均进行了傅里叶谐波滤波,滤掉年代际信号的干扰,保留 8 a 以内的年际信号。经过滤波处理后,线性趋势和年代际分量均全部去除,同时参考李刚等(2012)计算滤波处理后的自由度变化,发现滤波对自由度的影响较小。

本文主要采用合成方法分析 EP 型 ENSO 事件对同期秋季北极海冰的影响,以 t 检验方法对统计结果进行显著性检验。对于 EP 型 ENSO 事件的选取,本文主要参考了前人的工作(王磊等, 2014; Zhang et al., 2015),包括 6 次 EP 型 El Niño 事件:1965/1966 年、1972/1973 年、1976/1977 年、1979/1980 年、1882/1983 年、1997/1998 年以及 5 次 EP 型 La Niña 事件:1964/1965 年、1971/1972 年、

1984/1985 年、1995/1996 年、2005/2006 年。因为关注 ENSO 发展年的海冰和环流场异常,2015—2016 年这次事件作为典型的 EP 型 El Niño 事件,也在本文的研究时段之内。值得注意的是,1982 年 3 月墨西哥厄尔奇冲火山爆发 (Robock, 2000; Shindell, 2004; Fischer et al., 2007), 由于火山爆发所产生的气溶胶等输送至平流层后,会使北半球经向温差加大 (Graf and Timmreck, 2001; Stenchikov et al., 2006; Driscoll, et al., 2012)。考虑到海冰对于气温异常的敏感性,1982/1983 年这次 ENSO 事件不做探讨。考虑到 ENSO 事件的起始时间存在差异,同时排除了发展较晚的 ENSO 事件。如图 1a 所示,1979/1980 年这次 EP El Niño 事件发展较晚,秋季中东太平洋海域海温异常范围很小,来自西太暖池区域的西风异常偏弱,El Niño 仍处于起始阶段,因此对于热带及热带外大气,特别是高纬的极地地区的影响较小,而 1997/1998 年 (图 1b) 是秋季已经明显发展起来的 El Niño 事件,此时中东太平洋海域海温以及风场异常十分显著,对流活动响应增强,进而通过遥相关的途径影响热带外区域,造成热带外地区环流异常。

因此本文筛选得到秋季已经发展起来的 EP 型 ENSO 事件。筛选标准为:EP 型 El Niño 事件发展年秋季标准化 Niño3 指数大于 0.6, EP 型 La Niña 事件发展年秋季标准化 Niño3 指数小于 -0.6。最终筛选得到 5 次 EP 型 El Niño 事件:1965/1966 年、1972/1973 年、1976/1977 年、1997/1998 年、2015/2016 年;5 次 EP 型 La Niña 事件:1964/1965 年、1971/1972 年、1984/1985 年、1995/1996 年、

2005/2006 年。EP 型 ENSO 事件异常海温和风场的合成场如图 2 所示。可以看出,EP ENSO 事件的海温异常中心均位于中东太平洋的 Niño3 海区 ($150^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{W}$, $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$), 秋季时 ENSO 事件已完全发展,海温异常中心已向西伸展至子午线附近,然而 El Niño 事件海温异常的强度明显强于 La Niña 事件,即不同位相 EP ENSO 事件在强度上存在不对称性。本文的诊断分析中还同时使用指数定量描述 ENSO 事件,采用较为常用的标准化的 Niño3 指数 ($150^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{W}$, $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$) 表征 EP 型 ENSO 事件。

2 EP 型 ENSO 事件发展年秋季海冰的异常特征

图 3 给出了秋季标准化 Niño3 指数和同期海冰异常的相关,发现秋季北极海冰与同期 EP 型 ENSO 的线性相关几乎没有通过检验的区域,即 EP 型 ENSO 事件与同期秋季海冰异常的线性相关关系并不显著。这与 CP 型 ENSO 截然不同, Hu et al. (2016) 指出加拿大海盆区域的海冰变化与 CP 型 ENSO 存在显著的正相关。那么,图 3 给出的相关结果是否意味着 EP ENSO 对北极海冰没有影响? 这里需要特别指出的是,相关系数反映的是北极海冰对于 EP ENSO 的线性响应,也就是 EP El Niño 和 EP La Niña 对称性响应的部分。然而,大气环流场对于 ENSO 的响应存在较强的非线性 (Zhang et al., 2014; Zhang et al., 2015b), 那么,有理由猜测图 3 中不显著的线性相关可能是由于北极海冰对 EP ENSO 的非线性响应造成。因此,下文中将合成分析 EP El Niño 和 EP La Niña 事件中北极海冰的异常特征。

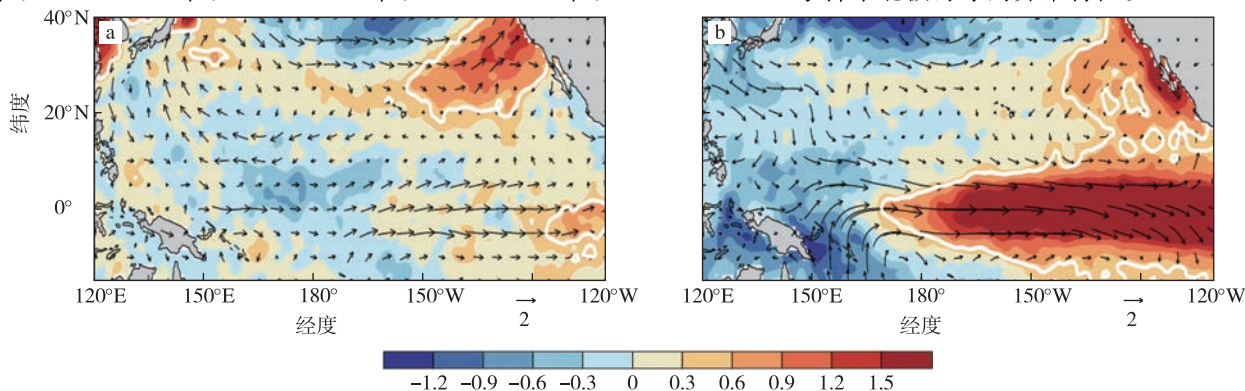


图 1 EP 型 ENSO 个例年秋季热带太平洋区域海温异常 (阴影区, 单位: $^{\circ}\text{C}$; 白色等值线标记区域表示海温异常大于 0.5°C) 和 850 hPa 风场异常 (箭矢; 单位: m/s): (a) 1979 年; (b) 1997 年

Fig.1 Autumn SST anomalies (shaded areas, units: $^{\circ}\text{C}$). Regions marked by white contours indicate SST anomalies greater than 0.5°C and 850 hPa wind speed anomalies (arrows; units: m/s) in the tropical Pacific for the case years of EP ENSO: (a) 1979; (b) 1997

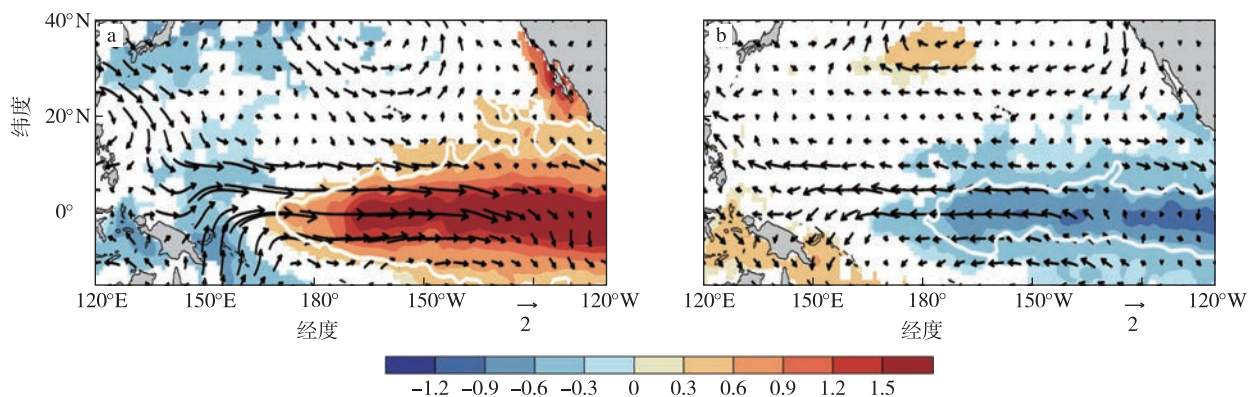


图 2 EP 型 ENSO 年合成的秋季热带太平洋区域海温异常(单位:℃;阴影区表示通过 90%置信度的显著性检验;白色等值线标记区域表示海温异常大于 0.5 °C 或小于 -0.5 °C)和 850 hPa 风场异常(箭头;单位:m/s):(a)EP 型 El Niño 年;(b)EP 型 La Niña 年

Fig.2 Composite autumn SST anomalies(units:℃.Shaded areas show that the anomalies are significant at 90% confidence level. Regions marked by white contours indicate SST anomalies greater than 0.5 °C or less than -0.5 °C) and 850 hPa wind speed anomalies(arrows;units:m/s) in the tropical Pacific for EP ENSO years:(a) EP El Niño years;(b) EP La Niña years

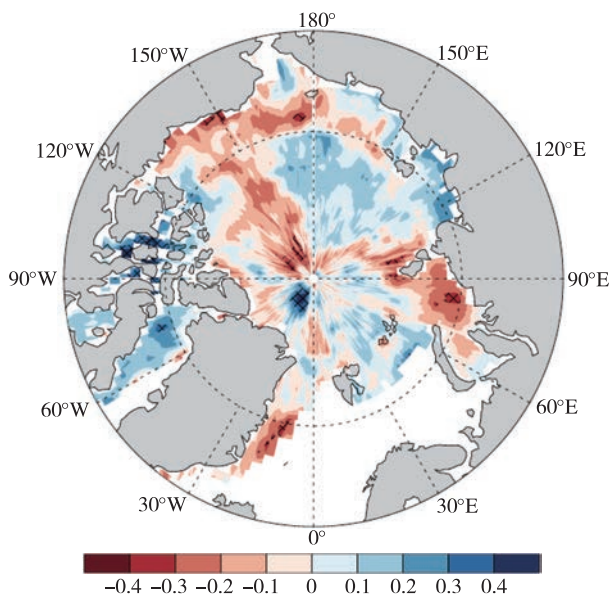


图 3 1961—2015 年秋季标准化 Niño3 指数与同期海冰密集度异常的相关系数(网格标记区域表示通过 90%置信度的显著性检验)

Fig.3 Correlation coefficients of sea ice concentration anomalies with normalized Niño3 index in autumn from 1961 to 2015 (Cross-hatched regions indicate that the coefficients are significant at 90% confidence level)

图 4 给出了不同位相 EP ENSO 事件合成的北极海冰异常特征,可以清晰地发现秋季海冰对于 EP ENSO 的两个位相均存在明显通过检验的响应区域,这与图 3 有明显的不同。EP 型 El Niño 年秋季海冰异常主要集中于喀拉海海域,而 EP 型 La Niña

年海冰异常区域也为这个区域,但略广,向东延伸至拉普捷夫海海域,在东西伯利亚海域也有小部分通过检验的区域。但最为有趣的是,无论在 El Niño 还是 La Niña 年,新地岛以东喀拉海海域的海冰始终表现为显著的负距平。取该区域(60°~90°E, 70°~80°N)平均的海冰异常,绘制所有 EP ENSO 典型事件的散点分布,如图 5 所示,可见 10 次典型事件中该区域的海冰均为一致的负异常,而且仅有两次事件中海冰的标准化指数没有达到 -0.8。这表明该区域海冰异常对 EP ENSO 的响应不仅在不同位相中是一致的偏少,而且是显著的,即它对 EP ENSO 存在不可忽视的非线性响应。这恰恰是图 3 中两者相关系数不显著的主要原因。

以上的结果表明北极海冰对 EP ENSO 异常响应是明显存在的,并且是显著的非线性。无论在 EP El Niño 还是 La Niña 事件发展年秋季喀拉海海冰均异常偏少。那么,在不同的 ENSO 位相中,造成该地区海冰显著负异常的机制又是否一致呢? 其中的物理过程又是否相同? 本文将进一步从 EP ENSO 年大尺度环流场异常响应的角度来探讨喀拉海海冰非线性响应存在的可能原因。

3 EP ENSO 发展年大尺度环流场的非线性响应

3.1 EP El Niño 年秋季热带外大气环流异常

图 6 给出了 EP El Niño 年秋季喀拉海附近的近地面环流场——2 m 气温和 10 m 风场异常的合成,

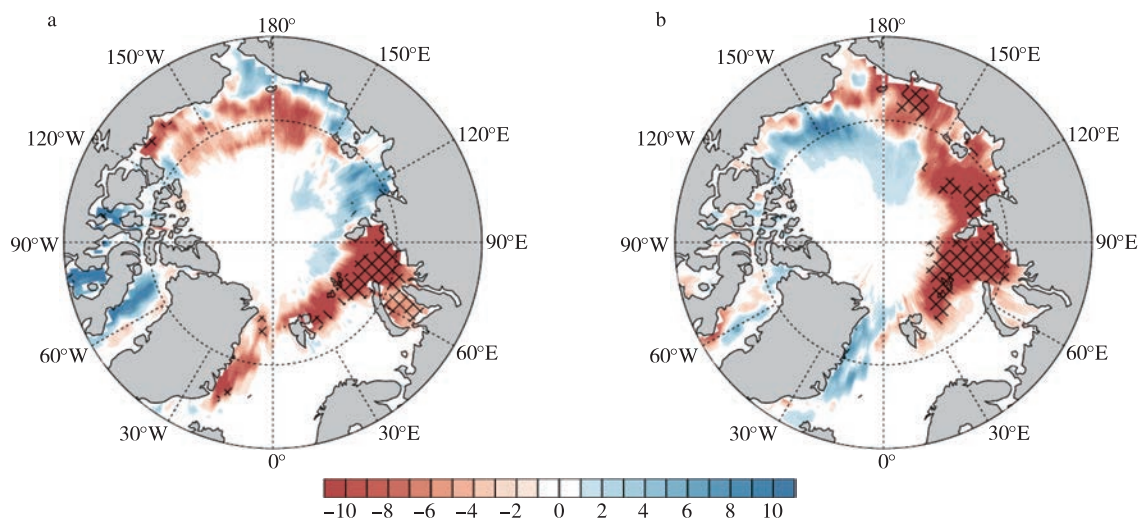


图4 合成的 EP 型 El Niño 年(a)和 EP 型 La Niña 年(b)秋季海冰密集度异常(阴影区,单位:%;网格标记区域表示通过 90%置信度的显著性检验)

Fig.4 Composite sea ice concentration anomalies(shaded areas;units:%) for (a) EP El Niño years and (b) EP La Niña years (Cross-hatched regions indicate that the anomalies are significant at 90% confidence level)

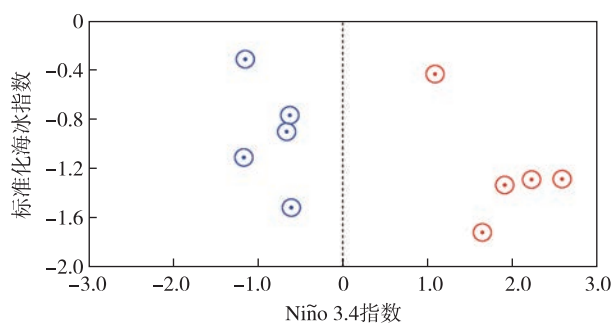


图5 EP 型 El Niño 年(红点)和 EP 型 La Niña 年(蓝点)秋季标准化 Niño3.4 指数和喀拉海区域(60°~90°E,70°~80°N)海冰密集度的散点图

Fig.5 Scatter plot of the normalized Niño3.4 index in autumn and the normalized area-averaged sea ice concentration in the Kara Sea region (70°—80° N, 60°—90°E) for EP El Niño years (red dots) and EP La Niña years (blue dots)

可以看出喀拉海区域 2 m 气温距平场通过显著性检验,近地面风场合成结果显示喀拉海地区受到一个异常的反气旋环流西侧向极输送的南风分量影响,形成了由较暖的中高纬地区向更冷的喀拉海区域的暖平流输送,导致该地区气温异常升高,造成海冰消融。可见,该异常反气旋性环流对于喀拉海海冰的异常偏少十分的关键。那么,它的形成是否与 EP El Niño 存在联系?

图 7a 给出了 EP El Niño 发展年秋季热带地区的降水异常,可以看到整个太平洋区域东西两侧均出现了降水异常。中东太平洋区域由于海温的异常

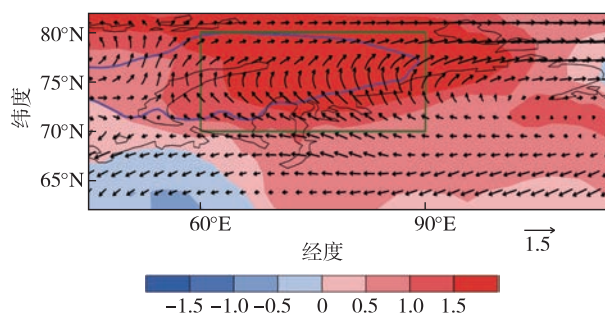


图6 合成的 EP 型 El Niño 年秋季喀拉海附近 2 m 气温场(阴影区;单位:℃)和 10 m 风场(箭头;单位:m/s)的异常(蓝色等值线标记区域表示 2 m 气温通过 90%置信度的显著性检验,绿色方框标记区域为喀拉海区)

Fig.6 Composite autumn 2 m air temperature anomalies (shaded areas;units:℃) and 10 m wind speed anomalies (arrows;units:m/s) near the Kara Sea region for EP El Niño years (Region marked by blue contour indicates that the temperature anomalies are significant at 90% confidence level, and region marked by green box is the Kara Sea area)

增暖引起对流性降水明显增强,而该区域对流活动的增强通常会影响到大尺度的大气环流场,包括 ITCZ 以及三圈环流等(Liu et al., 2004),但较少能影响到本文关注的喀拉海地区。值得注意的是,在 EP El Niño 发展的同时,西太暖池区域菲律宾附近海域的对流性活动减弱,导致降水显著减少。抑制的对流在其西北部对流层低层产生反气旋式的

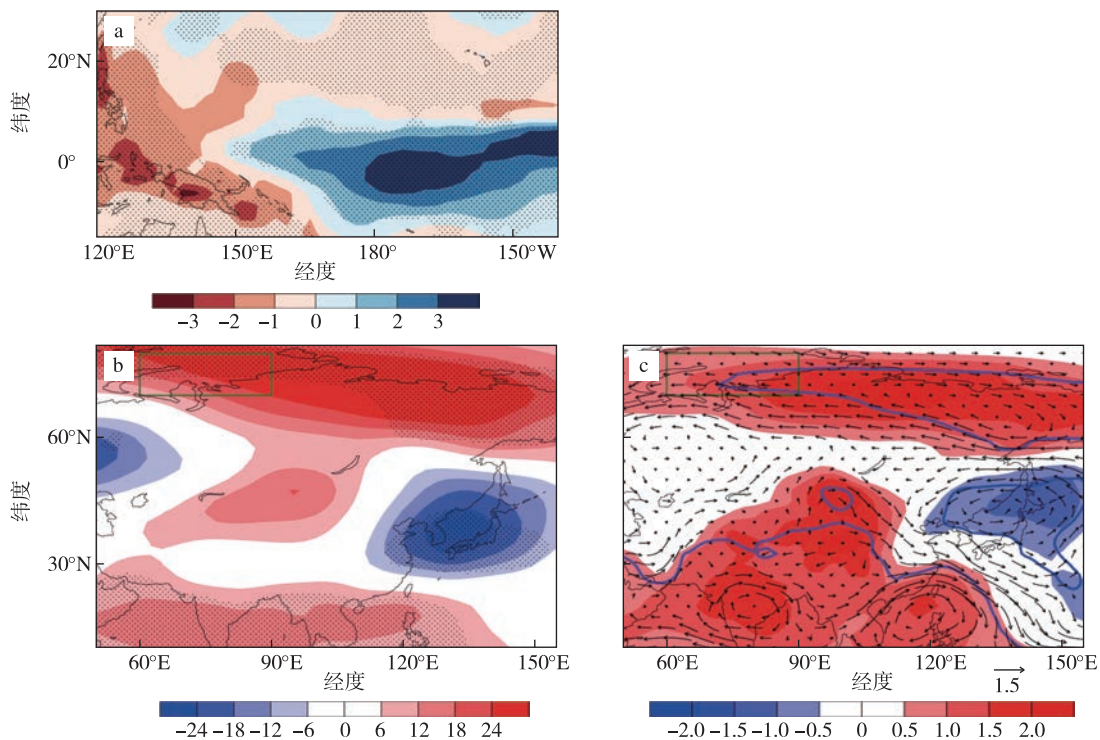


图 7 合成的 EP 型 El Niño 年秋季环流场异常(黑色打点区域或者蓝线标记区域表示通过 90% 置信度的显著性检验,绿色方框标记区域为喀拉海区):(a) 热带地区降水场(阴影区;单位: mm/d);(b) 热带外地区 500 hPa 高度场(阴影区;单位: gpm);(c) 热带外地区海平面气压场(阴影区;单位: hPa) 和 850 hPa 风场(箭头;单位: m/s)

Fig.7 Composite autumn circulation anomalies for EP El Niño years(Regions marked by black dots or blue contours indicate that the values are significant at 90% confidence level, and region marked by green box is the Kara Sea area):(a) precipitation anomalies (shaded areas; units: mm/d) in the tropical area;(b) 500 hPa height anomalies (shaded areas; units: gpm) in the extratropical area;(c) sea level pressure anomalies (shaded areas; units: hPa) and 850 hPa wind speed anomalies (arrows; units: m/s) in the extratropical area

Rossby 波单体 (Gill, 1980), 还将激发出负位相的太平洋-日本 (PJ) 波列 (Nitta, 1987), 这是一个从低纬到高纬传播的经向三级子波列, 即 500 hPa 高度场在东亚 30°N 以南为显著正异常, 东亚东北部为显著负异常, 在鄂霍次克海附近为高度场负异常 (孙旭光和杨修群, 2007)。500 hPa 高度场异常的合成结果 (图 7b) 显示 EP El Niño 发展年秋季高度场上确实出现了“+-”的经向三级子波列, 虽然在之前的工作中主要研究夏季的 PJ 波列 (张蓬勃等, 2010; 柯元惠, 2015), 但秋季的 PJ 波列模态也有被学者关注 (黄菲等, 2011)。就 EP El Niño 发展年秋季 500 hPa 高度场异常合成 (图 7b) 来看, 从低纬至高纬的经向三级子波列明显存在, 并通过了显著性检验, 波列所在的位置与前人提出的负位相的 PJ 波列也十分吻合。低层风场 (850 hPa) 和海平面气压场异常的合成结果 (图 7c) 与 500 hPa 合成结果 (图 7b) 基本一致, 可见该 PJ 波列基本是准正压的结构, 该波列在高纬地区形成的异常反气旋性环流正是图 6 中

指出的关键反气旋环流, 其西侧向极输送的南风分量, 形成由较暖的中高纬地区向更冷的极区的异常暖平流, 导致了喀拉海海冰的异常减少。因此, EP El Niño 发展年秋季造成喀拉海海冰异常偏少的物理过程主要位于太平洋区域, 西太暖池附近被抑制的对流激发出负位相的 PJ 波列, 从低纬至高纬传播的经向三级子波列对应于低层反气旋-气旋-反气旋的准正压环流响应, 在高纬地区形成的异常反气旋环流形成了由较暖的中高纬地区向喀拉海区的暖平流输送, 导致海冰异常偏少。

3.2 EP La Niña 年秋季热带外大气环流异常

上文结果指出 EP El Niño 年造成喀拉海海冰异常偏少的主要物理过程发生于太平洋地区, 那么 EP La Niña 年是否也是如此? 图 8 给出了 EP La Niña 年秋季喀拉海附近的近地面环流场的合成, 喀拉海地区 2 m 气温距平场同样通过了显著性检验但气温异常区域较 EP El Niño 年西伸更明显 (图 6)。

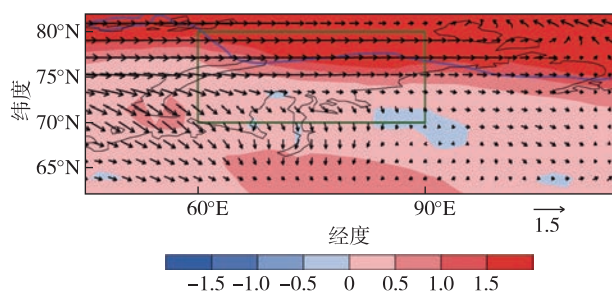


图 8 合成的 EP 型 La Niña 年秋季喀拉海附近 2 m 气温 (阴影区; 单位: $^{\circ}\text{C}$) 和 10 m 风场 (箭头; 单位: m/s) 的异常 (蓝线等值线标记区域表示 2 m 气温场通过 90% 置信度的显著性检验, 绿色方框标记区域为喀拉海区)

Fig.8 Composite autumn 2 m air temperature anomalies (shaded areas; units: $^{\circ}\text{C}$) and 10 m wind speed anomalies (arrows; units: m/s) near the Kara Sea area for EP La Niña years (Region marked by blue contour indicates that the temperature anomalies are significant at 90% confidence level, and region marked by green box is the Kara Sea area)

然而, 此时风场异常主要为来自大西洋开放性海域明显的西风异常, 这与 EP El Niño 年显著的南风异常形成了鲜明的不同。众所周知, 秋季作为北极海冰覆盖面积最少的季节, 此时在北大西洋与北极的接口区, 以及新地岛以西的巴伦支海海域基本都是无冰覆盖, 所以低层的西风异常往往驱动无冰覆盖的开放性海域的暖水向喀拉海区域输送, 导致了该地区海冰的异常减少。为了进一步证实该西风异常对海冰变化的影响, 我们诊断了喀拉海地区的温度平流 (图 9), 诊断结果显示喀拉海水平温度平流输送异常主要受纬向风平流异常的影响, 即使在同一纬度带上, 异常的西风把平均温度更高的无冰覆盖的开放性海域暖水输送到喀拉海, 加速了融冰进程, 导致海冰异常减少。

不仅在低层, 对流层高层也出现了显著的西风异常。图 10 为 EP ENSO 年和气候平均态的 200 hPa 纬向风合成分布, 可见, 在 EP 型 La Niña 年秋季北大西洋上空存在一个明显的急流中心 (风速大于 30 m/s ; 图 10b; 任雪娟和张耀存, 2007; 方晓洁等, 2009), 风速大于 20 m/s 的范围也明显东伸, 急流中心的存在会更有利于 EP La Niña 年大气波动在北大西洋开放海域的传播, 导致北大西洋开放性海域海水向下游输送, 进而影响到喀拉海海区。与 EP La Niña 年相比, EP El Niño 年 (图 10a) 在北大

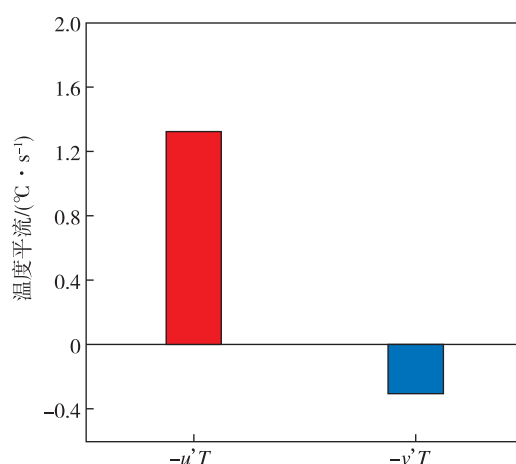


图 9 EP 型 La Niña 年秋季喀拉海区水平温度平流的诊断结果 (单位: $^{\circ}\text{C/s}$)

Fig.9 Diagnostic results of autumn horizontal temperature advection in the Kara Sea area for EP La Niña years (units: $^{\circ}\text{C/s}$)

西洋海域并没有明显的大值中心存在, 风速大于 20 m/s 的范围也比气候平均态略向西退, 即西风急流弱于 EP La Niña 年。Feng et al. (2017) 的研究结果表明, EP ENSO 对于下游北大西洋开放性区域的影响具有非对称性, EP La Niña 年对于下游的影响更为显著, 而 EP El Niño 年几乎没有信号。同时给出 5 次 EP La Niña 个例年的 200h Pa 纬向风模态 (图 11), 可以看出在每一次典型 EP La Niña 年秋季北大西洋上空都存在一个纬向风速大于 30 m/s 的西风急流中心, 这进一步论证了 EP La Niña 年秋季北大西洋上空西风急流的明显存在。前人工作指出 (Lin and Derome, 2004; Li and Lau, 2012), La Niña 年热带太平洋海温异常通过涡流相互作用, 导致北大西洋区域的环流异常明显强于 El Niño 年, 在北大西洋区域激发的类似于 NAO 正位相的模式更有利于该区域西风异常的维持。何花等 (2009) 引入扰动动能方程, 研究发现 La Niña 年北大西洋地区风暴轴强度明显增强, 西风急流加强, 而 El Niño 年则情况相反, 这与本文的研究结论一致。与此同时, 在低层环流场上喀拉海附近也是明显的西风异常 (图 8), 表明大气环流在该区域的响应也是准正压的。综上所述, 与 EP El Niño 年相比, EP La Niña 年秋季北大西洋上空存在一个明显的西风急流中心, 与低层西风异常形成准正压响应, 有利于北大西洋高纬地区开放性海域的暖水向喀拉海区域输送, 加速了融冰进程, 导致该地区海冰异常减少。

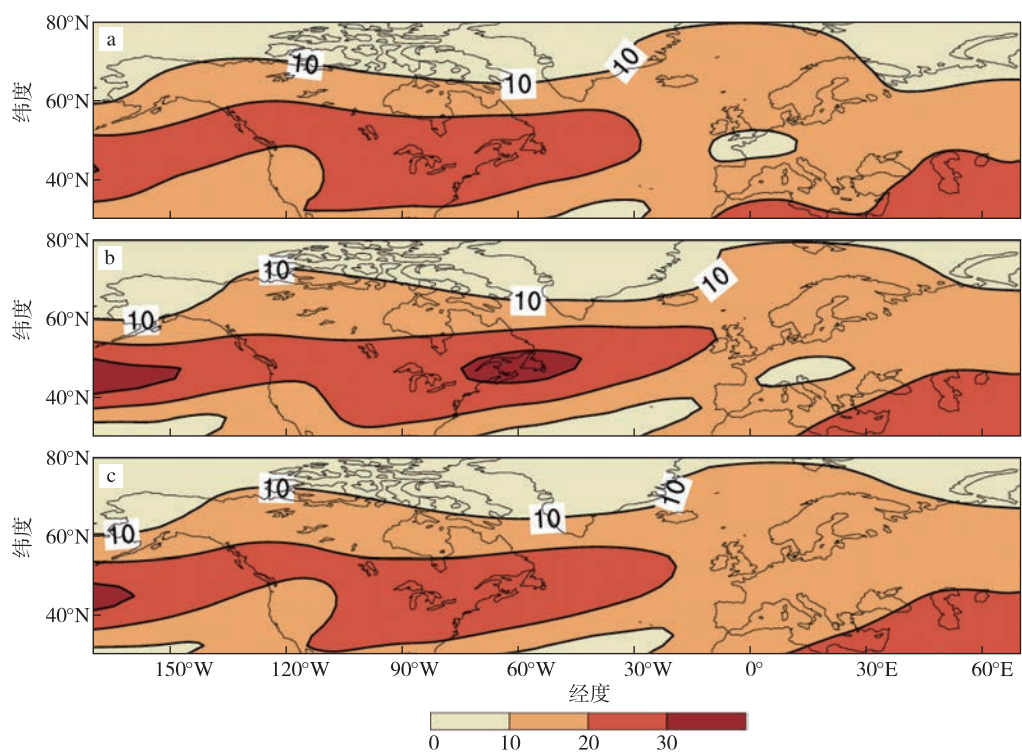


图 10 秋季 200 hPa 纬向风速 (阴影区;单位:m/s):(a) EP El Niño 年;(b) EP La Niña 年;(c) 气候平均态
Fig.10 200 hPa zonal wind speed in autumn (shaded areas;units:m/s):(a) EP El Niño years;(b) EP La Niña years;(c) the climatology

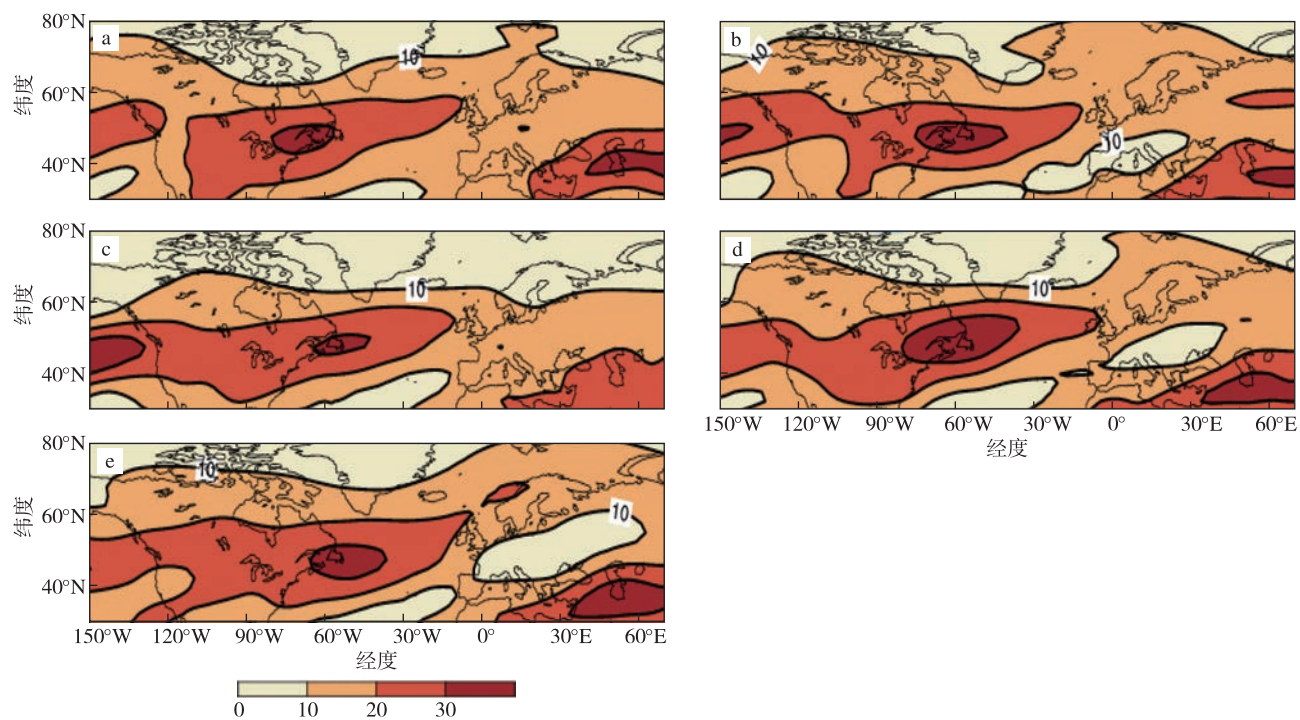


图 11 5 次 EP 型 La Niña 事件的秋季 200 hPa 纬向风速 (阴影区;单位:m/s):(a) 1964 年;(b) 1971 年;(c) 1984 年;
(d) 1995 年;(e) 2005 年
Fig.11 200 hPa zonal wind speed in autumn of five EP La Niña events (shaded areas;units:m/s):(a) 1964;(b) 1971;
(c) 1984;(d) 1995;(e) 2005

4 结论

作为巨大的热源和冷源, ENSO 与北极海冰存在显著的相互作用。本文利用 1961—2015 年 Hadley 中心逐月海表温度资料、逐月海冰密集度资料以及 NCEP/NCAR 再分析资料等, 合成分析了秋季北极海冰对于 EP 型 ENSO 事件的异常响应特征, 并进一步讨论了存在这种异常响应的可能原因。主要得到如下结论:

1) EP 型 ENSO 事件发展年秋季与同期海冰异常的线性相关关系不显著, 然而合成结果显示, 在新地岛以东喀拉海海域 ($60^{\circ} \sim 90^{\circ} \text{E}$, $70^{\circ} \sim 80^{\circ} \text{N}$) 的海冰, 无论在 EP El Niño 还是 EP La Niña 年, 始终表现为显著的负距平。这表明该区域海冰异常对 EP ENSO 的响应在不同位相中是一致的偏少, 即它对 EP ENSO 存在不可忽视的非线性响应。

2) 进一步从 EP ENSO 年大尺度环流场异常响应的角度来探讨喀拉海海冰非线性响应存在的可能原因。EP El Niño 发展年秋季造成喀拉海海冰异常偏少的物理过程主要位于太平洋区域, 西太暖池附近被抑制的对流激发出负位相的 PJ 波列, 从低纬至

高纬传播的经向三级子波列对应于低层反气旋-气旋-反气旋的准正压环流响应, 在高纬地区形成的异常反气旋环流形成了由较暖的中高纬地区向喀拉海区的暖平流输送, 导致海冰异常偏少。

3) 不同于 EP El Niño 年, EP La Niña 年秋季喀拉海区域主要为来自大西洋开放性海域明显的西风异常, 个例分析显示每一次典型的 EP La Niña 年秋季北大西洋上空存在一个明显的西风急流中心, 与低层西风异常形成准正压响应, 有利于北大西洋高纬地区开放性海域的暖水向喀拉海区域输送, 加速了融冰进程, 导致该地区海冰异常减少。

本研究重点关注了喀拉海海域海冰对 EP ENSO 的非线性响应, 即 EP 型 ENSO 冷暖位相年秋季该海区海冰均表现为显著的负异常, 这就势必会对该海域海冰的年代际下降趋势提供相应的贡献, 即 EP 型 ENSO 对海冰的非线性影响, 可能是除了北极放大效应外海冰急剧消融的另一个重要原因。考虑到气候系统内部热带与高纬极地地区的内在联系还存在一些有待解决的科学问题, 今后还将通过模式进一步探究和完善。

参考文献 (References)

- Aagaard K, Carmack E C, 1989. The role of sea ice and other fresh water in the Arctic circulation [J]. *J Geophys Res*, 94 (C10): 14485-14498.
- Alexander M A, Bladé I, Newman M, et al., 2002. The atmospheric bridge: the influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans [J]. *J Climate*, 15 (16): 2205-2231.
- Alexander M A, Bhatt U S, Walsh J E, et al., 2004. The atmospheric response to realistic Arctic sea ice anomalies in an AGCM during winter [J]. *J Climate*, 17 (5): 890-905.
- Ashok K, Yamagata T, 2009. The El Niño with a difference [J]. *Nature*, 461 (7263): 481-484.
- Budikova D, 2009. Role of Arctic sea ice in global atmospheric circulation; a review [J]. *Global and Planetary Change*, 68 (3): 149-163.
- 陈锦年, 褚健婷, 许兰英, 2004. ENSO 循环过程与南极海冰变化 [J]. *水科学进展*, 15 (1): 56-60. Chen J N, Chu J T, Xu L Y, 2004. ENSO events associated with the variation of the Antarctic Sea ice extent [J]. *Advances in Water Science*, 15 (1): 56-60. (in Chinese).
- Chylek P, Folland C K, Lesins G, et al., 2009. Arctic air temperature change amplification and the Atlantic multidecadal oscillation [J]. *Geophys Res Lett*, 36 (14): L14801.
- Cohen J, Screen J A, Furtado J C, et al., 2014. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather [J]. *Nature Geosci*, 7 (9): 627-637.
- Comiso J C, Parkinson C L, Gersten R, et al., 2008. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover [J]. *Geophys Res Lett*, 35: L01703.
- Curry J A, Schramm J L, Ebert E E, 1995. Sea ice-albedo climate feedback mechanism [J]. *J Climate*, 8 (2): 240-247.
- Deser C, Tomas R, Alexander M, et al., 2010. The seasonal atmospheric response to projected Arctic sea ice loss in the late twenty-first century [J]. *J Climate*, 23 (2): 333-351.
- Driscoll S, Bozzo A, Gray L J, et al., 2012. Coupled Model Intercomparison Project 5 (CMIP5) simulations of climate following volcanic eruptions [J]. *J Geophys Res*, 117 (D17): 17105.
- 方陆俊, 管兆勇, 王美, 等, 2016. 北半球夏季海洋性大陆区域气候与 EP 型 ENSO: 直接与间接联系 [J]. *大气科学学报*, 39 (3): 289-299. Fang L J, Guan Z Y, Wang M, et al., 2016. Influences of eastern Pacific-type ENSO on climate variations over the Maritime Continent region: direct and indirect connections [J]. *Trans Atmos Sci*, 39 (3): 289-299 (in Chinese).
- 方晓洁, 曾晓枚, 陈雪芹, 2009. 东亚夏季 200 hPa 西风急流时空分布特征与我国夏季降水关系的初步分析 [J]. *气象与环境科学*, 32 (2): 11-15.
- Fang X J, Zeng X M, Chen X Q, 2009. Spatial and temporal distribution characteristics of westerly jet in 200 hPa in east Asia and the analysis of relationship between it and summer precipitation in China [J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 32 (2): 11-15. (in Chinese).

- 冯娟,管兆勇,王黎娟,等,2010.夏季热带中太平洋 SST 异常型与中国东部夏季气候异常的关系[J].大气科学学报,33(5):547-554. Feng J, Guan Z Y, Wang L J, et al., 2010. Impact of central equatorial Pacific SSTA pattern on precipitation and temperature in East China in summer [J]. Trans Atmos Sci, 33(5):547-554 (in Chinese).
- Feng J, Chen W, Li Y J, 2017. Asymmetry of the winter extra-tropical teleconnections in the Northern Hemisphere associated with two types of ENSO [J]. Clim Dyn, 48(7/8):2135-2151.
- Fischer E M, Luterbacher J, Zorita E, et al., 2007. European climate response to tropical volcanic eruptions over the last half millennium [J]. Geophys Res Lett, 34(5):306-316.
- Gill A E, 1980. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 106(449):447-462.
- Gillett N P, Stone D A, Stott P A, et al., 2008. Attribution of polar warming to human influence [J]. Nature Geosci, 1(11):750-754.
- Gloersen P, 1995. Modulation of hemispheric sea-ice cover by ENSO events [J]. Nature, 373(6514):503-506.
- Graf H F, Timmreck C, 2001. A general climate model simulation of the aerosol radiative effects of the Laacher See eruption (10900 B.C.) [J]. J Geophys Res, 106(D14):14747-14756.
- 何花,聂绩,谭本旭, 2009. 北半球冬季风暴轴与 ENSO 循环的关系及其能量平衡特征 [J]. 气象学报, 67(2):210-217. He H, Nie J, Tan B K, 2009. Northern Hemisphere storm tracks in winter seasons and their energy budgets during the ENSO events [J]. Acta Meteorologica Sinica, 67(2):210-217. (in Chinese).
- 何金海,武丰民,祁莉, 2015. 秋季北极海冰与欧亚冬季气温在年代际和年际尺度上的不同联系 [J]. 地球物理学报, 58(4):1089-1102. He J H, Wu F M, Qi L, 2015. Decadal/interannual linking between autumn Arctic sea ice and following winter Eurasian air temperature [J]. Chinese Journal of Geophysics, 58(4):1089-1102. (in Chinese).
- Hopsch S, Cohen J, Dethloff K, 2012. Analysis of a link between fall Arctic sea ice concentration and atmospheric patterns in the following winter [J]. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 64(1):18624.
- Hu C D, Yang S, Wu Q G, et al., 2016. Shifting El Niño inhibits summer Arctic warming and Arctic sea-ice melting over the Canada Basin [J]. Nat Commun, 7:11721.
- 黄菲,邢雯,李元妮,等, 2011. 1990s 年代际转型前后南海季风系统的季节变化 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 41(S1):9-15. Huang F, Xing W, Li Y N, et al., 2011. Seasonal variability of the south China Sea monsoon system before and after the decadal shift in 1990s [J]. Periodical of Ocean University of China, 41(S1):9-15. (in Chinese).
- Jaiser R, Dethloff K, Handorf D, et al., 2012. Impact of sea ice cover changes on the Northern Hemisphere atmospheric winter circulation [J]. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 64(1):11595.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al., 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull Amer Meteor Soc, 77(3):437-471.
- 柯元惠, 2015. 夏季热带印度洋海温对 PJ 遥相关型年际及年代际变化的影响研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学. Ke Y H, 2015. Study of summer tropical Indian Ocean SST influence on interannual and interdecadal variation of the PJ teleconnection pattern [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology. (in Chinese).
- Kwok R, Rothrock D A, 2009. Decline in Arctic sea ice thickness from submarine and ICESat records: 1958—2008 [J]. Geophys Res Lett, 36(15):1958-2008.
- 劳汉琼,朱伟军,张唯, 2006. 冬季格陵兰以东区域海冰异常对北大西洋风暴轴的影响研究 [J]. 气象与减灾研究, 29(4):6-11. Lao H Q, Zhu W J, Zhang W, 2006. Relationships of winter East Greenland sea ice anomaly and winter Atlantic storm-tracks [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 29(4):6-11. (in Chinese).
- 李刚,李崇银,谭言科,等, 2012. 北半球冬季南太平洋海表温度异常的主要模态及其与 ENSO 的关系 [J]. 海洋学报, 34(2):48-56. Li G, Li C Y, Tan Y K, et al., 2012. Principal modes of the boreal wintertime SSTA in the South Pacific and their relationships with the ENSO [J]. Acta Oceanologica Sinica, 34(2):48-56. (in Chinese).
- Li Y, Lau N C, 2012. Contributions of downstream eddy development to the teleconnection between ENSO and the atmospheric circulation over the north Atlantic [J]. J Climate, 25(14):4993-5010.
- 李智玉,张文君,徐海明, 2015. 两类 ENSO 事件非对称性特征分析 [J]. 气象学报, 73(6):1019-1038. Li Z Y, Zhang W J, Xu H M, 2015. Analysis of the analysis of the asymmetric features for the two types of ENSO [J]. Acta Meteorologica Sinica, 73(6):1019-1038. (in Chinese).
- Lin H, Derome J, 2004. Nonlinearity of the extratropical response to tropical forcing [J]. J Climate, 17(13):2597-2608.
- Liu J P, Curry J A, Hu Y Y, 2004. Recent arctic Sea ice variability: connections to the arctic oscillation and the ENSO [J]. Geophys Res Lett, 31(9):925-929.
- Nitta T, 1987. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation [J]. J Meteor Soc Japan, 65(3):373-390.
- Parkinson C L, Comiso J C, 2013. On the 2012 record low Arctic sea ice cover: combined impact of preconditioning and an August storm [J]. Geophys Res Lett, 40(7):1356-1361.
- Peings Y, Magnusdottir G, 2014. Response of the wintertime Northern Hemisphere atmospheric circulation to current and projected Arctic sea ice decline: a numerical study with CAM5 [J]. J Climate, 27(1):244-264.

- Polyakov I V, Walsh J E, Kwok R, 2012. Recent changes of Arctic multiyear sea ice coverage and the likely causes[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 93(2): 145-151.
- 钱步东, 范钟秀, 彭公炳, 等, 1994. 北极海冰与赤道东太平洋海温的相互影响及其与 El Niño 的联系[J]. *热带气象学报*, (4): 325-334. Qian B D, Fan Z X, Peng G B, et al., 1994. Interaction between the Arctic sea ice and the equatorial eastern Pacific sea surface temperature and the relation to El Niño[J]. *J Trop Meteor*, (4): 325-334. (in Chinese).
- Rayner N A, 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.
- 任雪娟, 张耀存, 2007. 冬季 200 hPa 西太平洋急流异常与海表加热和大气瞬变扰动的关系探讨[J]. *气象学报*, 65(4): 550-560. Ren X J, Zhang Y C, 2007. Association of winter western Pacific jet stream anomalies at 200 hPa with ocean surface heating and atmospheric transient eddies[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 65(4): 550-560. (in Chinese).
- Robock A, 2000. Volcanic eruptions and climate[J]. *Rev Geophys*, 38(2): 191-219.
- Screen J A, Simmonds I, 2010. Increasing fall-winter energy loss from the Arctic Ocean and its role in Arctic temperature amplification[J]. *Geophys Res Lett*, 37(16): 127-137.
- Shindell D T, 2004. Dynamic winter climate response to large tropical volcanic eruptions since 1600[J]. *J Geophys Res*, 109(D5): D05104.
- Stenchikov G, Hamilton K, Stouffer R J, et al., 2006. Arctic oscillation response to volcanic eruptions in the IPCC AR4 climate models[J]. *J Geophys Res*, 111(D7): D07107.
- 隋翠娟, 张占海, 吴辉庭, 等, 2015. 1979—2012 年北极海冰范围年际和年代际变化分析[J]. *极地研究*, 27(2): 174-182. Sui C J, Zhang Z H, Wu H D, et al., 2015. Interannual and interdecadal variability of Arctic sea ice extent from 1979—2012[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 27(2): 174-182. (in Chinese).
- 孙旭光, 杨修群, 2007. El Niño 对东亚气候年际异常影响的数值模拟[J]. *海洋学报*, 29(5): 21-30. Sun X G, Yang X Q, 2007. Numerical simulations of the interannual climate responses of East Asia to an El Niño event[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 29(5): 21-30 (in Chinese).
- 谭晶, 蔡怡, 张海东, 等, 2016. 2012/2013 年冬季中国气温异常成因分析[J]. *大气科学学报*, 39(3): 289-299. Tan J, Cai Y, Zhang H D, et al., 2016. Analysis of the cause of the 2012/2013 winter temperature anomaly in China[J]. *Trans Atmos Sci*, 39(3): 361-369 (in Chinese).
- van Loon H, Madden R A, 1981. The southern oscillation. part I: global associations with pressure and temperature in northern winter[J]. *Mon Wea Rev*, 109(6): 1150-1162.
- Wallace J M, Rasmusson E M, Mitchell T P, et al., 1998. On the structure and evolution of ENSO-related climate variability in the tropical Pacific: lessons from TOGA[J]. *J Geophys Res*, 103(C7): 14241-14259.
- 王磊, 张文君, 祁莉, 等, 2014. 两类 La Niña 季节演变过程的海气耦合特征对比[J]. *海洋学报*, 36(1): 72-85. Wang L, Zhang W, Qi L, et al., 2014. Contrasting air-sea features associated with two types of La Niña during the seasonal evolution[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 36(1): 72-85. (in Chinese).
- 王美, 管兆勇, 皮冬勤, 2016. 冬季赤道太平洋不同类型海温异常表征指数的再构建[J]. *大气科学学报*, 39(4): 455-467. Wang M, Guan Z Y, Pi D Q, 2016. Reconstruction of equatorial Pacific SST anomaly indices for two types of ENSO during boreal winter[J]. *Trans Atmos Sci*, 39(4): 455-467 (in Chinese).
- 魏立新, 2008. 北极海冰变化及其气候效应研究[D]. 青岛: 中国海洋大学. Wei L X, 2008. Study on the variation of Arctic sea ice and its effect on global climate[D]. Qingdao: Ocean University of China. (in Chinese).
- 武炳义, 高登义, 黄荣辉, 1997. 冬季格陵兰、喀拉海和巴伦支海海冰年际变化与 ENSO 事件[J]. *科学通报*, 42(18): 1979-1981. Wu B Y, Gao D Y, Huang R H, 1997. ENSO events and interannual variations of winter sea-ice in the Greenland, the Kara and the Barents Seas[J]. *Chinese Science Bulletin*, 42(18): 1979-1981 (in Chinese).
- Xie P P, Arkin P A, 1997. Global precipitation: a 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 78(11): 2539-2558.
- 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 Y K, Liu Y Z, Huang J P, 2014. The influence of the autumn Arctic sea ice on winter air temperature in China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 72(4): 703-710. (in Chinese).
- Yeh S W, Kug J S, Dewitte B, et al., 2009. El Niño in a changing climate[J]. *Nature*, 461(7263): 511-514.
- 张蓬勃, 管兆勇, 孙密娜, 等, 2010. SVD 分析揭示的澳大利亚高压年际变化对中国夏季降水的可能影响[J]. *气象学报*, 68(6): 908-917. Zhang P B, Guan Z Y, Sun M N, et al., 2010. Possible impacts of the interannual variability of the Australian High on summertime rainfall in China as revealed by the SVD analysis[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 68(6): 908-917. (in Chinese).
- Zhang R H, Li T R, Wen M, et al., 2015. Role of intraseasonal oscillation in asymmetric impacts of El Niño and La Niña on the rainfall over southern China in boreal winter[J]. *Clim Dyn*, 45(3/4): 559-567.
- Zhang T, Perlwitz J, Hoerling M P, 2014. What is responsible for the strong observed asymmetry in teleconnections between El Niño and La Niña? [J]. *Geophys Res Lett*, 41(3): 1019-1025.
- Zhang W J, Wang Y L, Jin F F, et al., 2015a. Impact of different El Niño types on the El Niño/IOD relationship[J]. *Geophys Res Lett*, 42(20): 8570-8576.

- Zhang W J, Wang L, Xiang B Q, et al., 2015b. Impacts of two types of La Niña on the NAO during boreal winter[J]. *Clim Dyn*, 44(5/6):1351-1366.
- 张文君, 雷徐奔, 耿新, 等, 2018. ENSO 对中国南方降水低频变率的可能影响[J]. *大气科学学报*, 41(5):585-595. Zhang W J, Lei X B, Geng X, et al., 2018. Possible impacts of ENSO on the intra-seasonal variability of precipitation over southern China[J]. *Trans Atmos Sci*, 41(5):585-595 (in Chinese).
- Zhou M Z, Wang H J, 2014. Late winter sea ice in the Bering sea: predictor for maize and rice production in Northeast China[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 53(5):1183-1192.
- 朱艳峰, 陈隆勋, 2003. 北极海冰与 ENSO 事件在准四年时间尺度上的可能联系[J]. *大气科学*, 27(5):834-846. Zhu Y F, Chen L X, 2003. Potential relationship between Arctic sea-ice and ENSO events on timescales of quasi-quadrennial-year[J]. *Chin J Atmos Sci*, 27(5):834-846. (in Chinese).
- 左涛, 陈锦年, 王凡, 2015. 中部型 El Niño 与北极海冰变化的联系[J]. *海洋湖沼通报*(3):1-13. Zuo T, Chen J N, Wang F, 2015. The contribution of central Pacific El Niño to the Arctic sea ice variation[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*(3):1-13. (in Chinese).

Nonlinear response of Arctic sea ice to EP ENSO in autumn

QI Li, MA Weiwei, HE Jinhai, GENG Xin

Key Laboratory of Meteorological Disaster, 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, China

Based on the monthly Hadley Center sea surface temperature data, Hadley Center Arctic sea ice concentration data, and NCEP/NCAR reanalysis data during 1961—2015, this paper analyzed the abnormal response of Arctic sea ice to EP (eastern Pacific) ENSO events in autumn, and further discussed the possible causes of such an abnormal response. Results show that the response of Arctic sea ice to EP ENSO in autumn is nonlinear. Particularly, the sea ice concentration anomalies in the Kara Sea area (70° — 80° N, 60° — 90° E) are significantly negative both in the EP El Niño and EP La Niña phases. Further analyses reveal that the mechanisms of sea ice anomalies in different EP ENSO phases are significantly different. For EP El Niño years, the suppression of convective activity in the waters near the Philippines stimulates the meridional wave train in the extratropical area. Meanwhile, the southward wind component of the anomalous anticyclonic circulation in response to the wave train in the high latitudes forms warm convection transport to the Kara Sea area and causes sea ice retreat as a result. However, the Kara Sea area is mainly influenced by the westerly anomalies from the open Atlantic Ocean during EP La Niña years. Moreover, both the composite results and the analysis results of individual EP La Niña event show that there is a remarkable westerly jet center over the North Atlantic in autumn, which is conducive to downstream transport of warmer seawater from the open North Atlantic, affecting sea ice in the Kara Sea as a result. The above results show that the nonlinear response of circulation field in the extratropical areas to EP ENSO leads to a significant nonlinear response of Arctic sea ice to EP ENSO in turn.

eastern Pacific ENSO; Arctic sea ice; nonlinear response; wave train; westerly jet

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20180719001

(责任编辑:张福颖)