

研究论文

北半球夏季中高纬度大气阻塞对北极海冰变化的影响

肖贻青^{1 2} 黄斌³ 刁一娜² 罗德海⁴

(¹ 陕西省气象台, 陕西 西安 710014; ² 中国海洋大学海洋环境学院, 山东 青岛 266100;

³ 成都信息工程学院, 四川 成都 610225; ⁴ 中国科学院东亚区域气候环境重点实验室, 北京 100029)

摘要 利用 NCEP/NCAR 再分析逐日 500 hPa 高度场资料, 对北半球夏季中高纬度大气阻塞特征进行统计分析, 发现大气阻塞活动频率高的地区主要集中在白令海峡区域、鄂霍次克海区域、欧亚大陆区域及格陵兰区域。而通过 NSIDC 提供的卫星观测资料发现近 30 年夏季海冰容易减少的区域正好对应阻塞活动北部的高纬度地区。分别通过对以上 4 个区域有阻塞发生相对没有阻塞发生时的 500 hPa 位势高度场、地面温度场、850 hPa 经向瞬变热通量输送和平流输送等异常变化场进行对比分析, 结果发现夏季中高纬度阻塞频率的增加对海冰的减少有显著影响, 主要体现在阻塞的发生发展可通过增加高纬度地面温度、对极地的热量输送和暖平流输送来加快海冰的融化。这种阻塞引起的热力作用在鄂霍次克海和欧亚大陆区域效果更为显著。

关键词 北极海冰 北极增暖 阻塞

doi: 10.13679/j.jdyj.2015.4.364

0 引言

北极是全球气候系统的重要组成部分, 北极海冰变化在全球气候变化中起着重要作用。在过去几十年中, 北极地区增暖是全球增暖幅度的 2 倍左右, 这种现象称为“北极放大”^[1-2]。由于全球气候变暖及北极放大, 导致北极海冰总量减少, 最直观的表现是海冰覆盖范围的减少(图 1), 尤其是 21 世纪以来, 海冰覆盖范围减少速度显著地增加, 到 2012 年平均覆盖范围达到历史的最低, 为 $10.38 \times 10^6 \text{ km}^2$, 相对 1981—2010 年海冰平均覆盖范围减少了近 10%。海冰的存在可影响海洋和大气之间的热量、动量、能量循环, 是影响北极气候进而影响全球气候的重要因子之一, 近年来在气候变化中的重要性越来越受到人们的关注^[3-4], 因此研究海冰减少的原因具有重要的气候意义。

张璐等^[5]对近 30 年北极海冰异常变化进行了分析, 并认为海表面气温的增加、太平洋和大西洋流入北冰洋的水体的热盐性质及大气环流模态是造成海冰衰减的原因。Deser 和 Teng^[6]则认为近几十年海冰的减少是气候变化的显著信号, 大气环流的变化导致了海冰的变化。他们重点讨论了 1979—2007 年冬季和夏季由于大气环流的改变而对海冰造成的影响, 尤其是在北极涛动、北大西洋涛动及北半球环状模态的发展背景条件下海冰的变化情况, 并认为北极海冰的变化不能直接归因于某一种大气环流模型的作用。Francis 等^[7-9]通过观测资料分析发现北极变暖趋势的增加很大部分是被海冰减少驱动的, 并和中纬度持续性天气型导致的极端天气有很大关系。此外, 他们还发现夏季海冰的变化与接下来的秋季和冬季大尺度的天气特征有关, 而这种天气特征的影响超出了北极的范围; 且白令海和巴伦支海是冬季海冰减少的主要两个区域, 地面温度

[收稿日期] 2014 年 9 月收到来稿, 2014 年 9 月收到修改稿

[基金项目] 全球变化研究国家重大科学研究计划(2015CB953903) 和国家自然科学基金重点项目(41430533) 资助

[作者简介] 肖贻青, 女, 1990 年生, 硕士研究生, 主要从事气候动力学。E-mail: xxyyqq1222@163.com

增加是驱动这两个海域海冰显著减少的原因之一。一些模式研究发现在北太平洋海冰的变化可通过形成缓慢移动的罗斯贝波列来影响大气环流,而在北大西洋的海冰变化可通过放大风暴路径来改变大气环流特征^[4,10],也有研究发现北极海冰覆盖范围的变化与伴随北极涛动(AO)和北大西洋涛动(NAO)的大尺度天气变化有关^[11-12]。因此,北极海冰的变化和大气环流之间存在密切的关系。

大气阻塞(以下简称阻塞)是大气环流低频变化过程中的重要成员,是中高纬度地区准静止和持续时间长的高压系统,其影响范围大,不仅对高压南侧区域造成天气影响,还通过西风急流的南北分支影响北部区域,因而对阻塞区及相邻区域的天气将造成持续而深远的影响。通过卫星观测表明北极海冰的融化具有明显的区域性特征,而对北半球阻塞的长期统计结果表明阻塞的发生也具有显著的地域性特点^[13-14],是否北半球夏季阻塞对北极海冰减少有重要影响尚不清楚,特别是夏季阻塞如何影响海冰变化也是一个未解决的重要问题。因此本文主要探讨北半球中高纬度地区不同区域的阻塞对北极海冰变化的可能影响,这对于了解北极海冰的变化机制有重要意义。

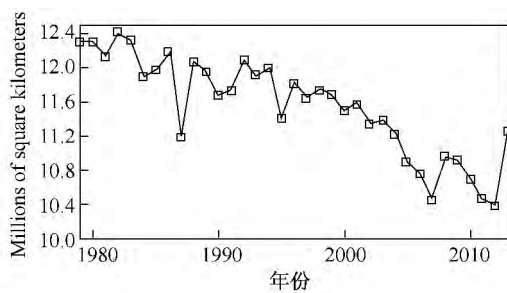


图 1 1979—2013 年北极海冰年平均覆盖范围(×10⁶ km²)。数据来源于 NSIDC 提供的 Sea Ice Index
Fig. 1. Annual average of Arctic sea ice extent from 1979 to 2013(×10⁶ km²)。Data from Sea Ice Index provided by NSIDC

1 数据和方法

本文采用的海冰数据包括海冰覆盖范围和海冰密集度,其中海冰覆盖范围的资料来自美国冰雪中心(NSIDC)提供的 Sea Ice Index,资料长度为 1979—2013 年;海冰密集度采用两种数据来源,一种是来自 NSIDC 提供的 Nimbus-7 SMMR 和 DMSF

SSM/I-SSMIS 被动微波数据,分辨率为 25 km × 25 km,时间长度为 1979—2013 年;另一种来自 NOAA/NSIDC Climate Data Record(CDR)提供的被动微波海冰密集度,分辨率为 25 km × 25 km,时间长度为 1979—2013 年。逐日再分析高度场、地面温度场、风场资料来自于美国国家环境预报中心和美国大气科学研究中心(NCEP/NCAR),分辨率为 2.5° × 2.5°,时间长度为 1950—2013 年。

本文所使用的阻塞指数采用 Davini 等^[15]提出的二维阻塞指数(以下简称为 DCGN 指数),其定义如下:

$$GHGS(\lambda_0, \phi_0) = \frac{Z_{500}(\lambda_0, \phi_0) - Z_{500}(\lambda_0, \phi_s)}{\phi_0 - \phi_s} \quad (1a)$$

$$GHGN(\lambda_0, \phi_0) = \frac{Z_{500}(\lambda_0, \phi_N) - Z_{500}(\lambda_0, \phi_0)}{\phi_N - \phi_0} \quad (1b)$$

其中 λ_0 和 ϕ_0 分别代表格点的经度和纬度, λ_0 的范围从 0°—360°, ϕ_0 的范围从 30°N—75°N, $\phi_s = \phi_0 - 15^\circ$, $\phi_N = \phi_0 + 15^\circ$ 。当格点 (λ_0, ϕ_0) 满足方程(2)时,即:

$$GHGS(\lambda_0, \phi_0) > 0, GHGN(\lambda_0, \phi_0) < -10 \text{ m/}^\circ\text{lat} \quad (2)$$

则定义该点为瞬时阻塞。当格点 (λ_0, ϕ_0) 满足方程(3)时,即:

$$GHGS2(\lambda_0, \phi_0) = \frac{Z_{500}(\lambda_0, \phi_s) - Z_{500}(\lambda_0, \phi_s - 15^\circ)}{15^\circ} < -5 \text{ m/}^\circ\text{lat} \quad (3)$$

则剔除了低纬度阻塞。本文研究的为中高纬度阻塞情况,因此可不考虑低纬度阻塞情况。

本文还采用了 Tibaldi 和 Molteni^[16]的经典一维阻塞指数(以下简称为 TM 指数)和 DCGN 进行了比较,以验证二维阻塞指数对北半球夏季阻塞识别的准确度,其定义如下:

$$GHGS = \frac{Z_{500}(\phi_0) - Z_{500}(\phi_s)}{\phi_0 - \phi_s} \quad (4a)$$

$$GHGN = \frac{Z_{500}(\phi_n) - Z_{500}(\phi_0)}{\phi_n - \phi_0} \quad (4b)$$

其中 $\phi_n = 80^\circ N + \Delta$, $\phi_0 = 60^\circ N + \Delta$, $\phi_s = 40^\circ N + \Delta$, $\Delta = -4^\circ$ 或 4° 。当任意经度上至少一个 Δ 的值满足方程:

$$GHGS > 0, GHGN < -10 \text{ m(deg lat)}^{-1} \quad (5)$$

则定义该经度上有阻塞发生。

文中对区域内是否存在阻塞的挑选规则为:计

算出区域里各格点的阻塞指数,若该点满足阻塞条件,则值设为 1,不满足条件值设为 0,当区域内所有格点之和为 0 时,则该区域无阻塞发生,若不为 0,则有阻塞存在。

2 夏季北极海冰及阻塞特征分析

2.1 海冰覆盖范围变化

Parkinson 和 Cavalieri^[17] 通过对 1979—2006 年北极海冰覆盖范围及海冰密集度的计算分析表明,北极海冰覆盖范围具有周期性变化,通常为 3 月份覆盖范围和密集度最大,而 9 月份达到最小。图 2 为 1979—2013 年 9 月海冰覆盖范围平均变化趋势,从图中可看出 9 月份海冰覆盖范围下降迅速且变化幅度较大,自 1979—2013 年,其变化趋势为每 10 年减少 14% 左右,且在 2012 年达到历史记录最低,仅

为 $3.58 \times 10^6 \text{ km}^2$,较同期海冰 30 年平均覆盖范围减少了 40% 之多;而 3 月份海冰覆盖范围变化却比较稳定,减少速度较慢,基本维持在每 10 年下降 3.0% 左右的速度,在 2006 年到达历史记录最低,为 $14.38 \times 10^6 \text{ km}^2$,仅较同期 30 年平均覆盖范围减少不到 10%。若以 9 月份海冰覆盖范围的变化来代表夏季海冰覆盖范围的变化特征及夏季气候变化对海冰的影响,而 3 月份海冰覆盖范围的变化来代表冬季海冰覆盖范围的变化特征及冬季气候变化对海冰的影响,可以得出夏季和冬季气候对海冰覆盖范围的变化有着不同的影响效果。虽然夏季平均温度较冬季高很多,但从其海冰减少速度的差异来看,这种不同季节对海冰的影响效果,其原因是复杂的,还有很多影响机制有待进一步考究,本文只研究北半球夏季阻塞对北极夏季海冰减少的可能影响。

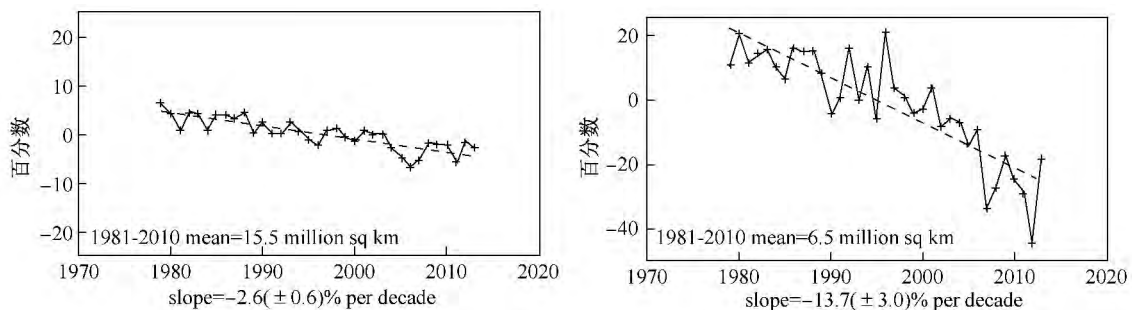


图 2 (a) 3 月和 (b) 9 月北极海冰平均覆盖范围变化(相对于 1981—2010 年平均)。数据来源于 NSIDC 提供的 Sea Ice Index
Fig. 2. Variation of Arctic sea ice extent in (a) March and (b) September from 1979 to 2013 (relative to the average from 1980 to 2010). Data from Sea Ice Index provided by NSIDC

2.2 海冰密集度变化

图 3a 为利用 NOAA/NSIDC CDR 的海冰密集度数据计算的 1979—2013 年 9 月份相对北极海冰密集度夏季(6—8 月,以下简称 JJA)平均的变化情况。从图中可看出大部分区域的海冰密集度都有不同程度的减少,并且主要集中在北冰洋沿岸地区,其中减少幅度最大的区域为白令海峡以北区域(150°W—180°W)、东西伯利亚海区域(120°E—160°E)、喀拉海区域(60°E—90°E)以及格陵兰西部海域(40°W—90°W),这和 Deser 和 Teng^[6]对海冰减少区域的研究结果基本一致。图 3b 为 NSIDC 提供的 1979—2013 年 9 月份海冰密集度每 10 年变化

趋势,从图中也可看到海冰密集度减少幅度最大的区域中心位于白令海峡北部(150°W—180°W),其次在西至加拿大以北波弗特海域到格陵兰东部海域(60°W—90°W),东至鄂霍次克海以北的拉普捷夫海域和西西伯利亚海域(60°E—90°E,120°E—160°E)均有不同程度的减少。图 3a 直接反映了夏季海冰密集度减少的大小和范围,而图 3b 则反映了海冰密集度减少的速率,因为描述的变量有所不同,所以存在一些差异,但根据这两套海冰密集度资料基本可以判定以上 4 个区域(图 3a 中黑框区域)是海冰容易减少的区域,其中白令海峡北部海冰减少最为显著。

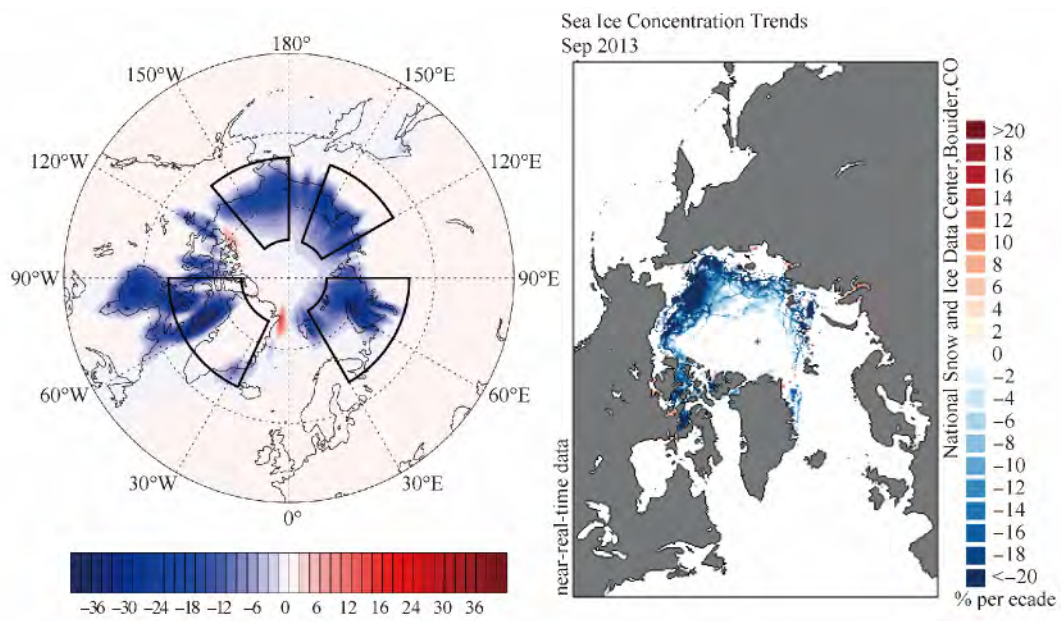


图 3 (a) 9 月海冰密集度相对 6—8 月变化情况(黑框里为海冰密集度减少显著区); (b) 9 月海冰密集度变化趋势
 Fig. 3. (a) Sea ice concentration anomaly in September relative to JJA from 1979 to 2013 (the areas in black boxes are significant for reduction of SIC); (b) SIC trends in September

2.3 两种阻塞指数对夏季阻塞特征分析

图 4 给出了利用 DCGN 二维阻塞指数计算的 1950—2013 年夏季 (JJA) 中高纬度 (60°N—75°N) 阻塞活动频率的分布。从阻塞频率的分布可以看出, 夏季中高纬度阻塞主要集中在 4 个区域: 白令海峡以东的加拿大地区 (120°W—180°W)、鄂霍次克海以北区域 (110°E—160°E)、欧亚大陆地区 (30°E—90°E) 及格陵兰地区 (20°W—60°W)。通过计算该 4 个区域平均的阻塞频率变化(图 5), 也可看出 1950—2013 年该 4 个区域夏季的阻塞活动是长期存在的, 其中白令海峡区域发生的阻塞频率最高, 夏季年平均阻塞频率为 11.0%, 自 1950 年至 1990 年有明显上升趋势, 而在近 20 年则呈下降趋势; 鄂霍次克海区域夏季阻塞的年平均频率为 10.95%, 自 1950 年以来有缓慢增加的趋势; 欧亚大陆夏季阻塞的年平均频率分别为 9.4%, 近 60 年来变化相对稳定, 没有明显的增加或减少; 格陵兰区域阻塞相对其他区域发生频率较低, 夏季年平均频率仅为 5.0%, 呈较为稳定地缓慢增加的趋势。这些区域的阻塞活动中心与对应的高纬度北极海冰明显减少的区域基本一致, 且阻塞发生频率最高的白令海峡区域, 也是海冰减少最显著的区域。

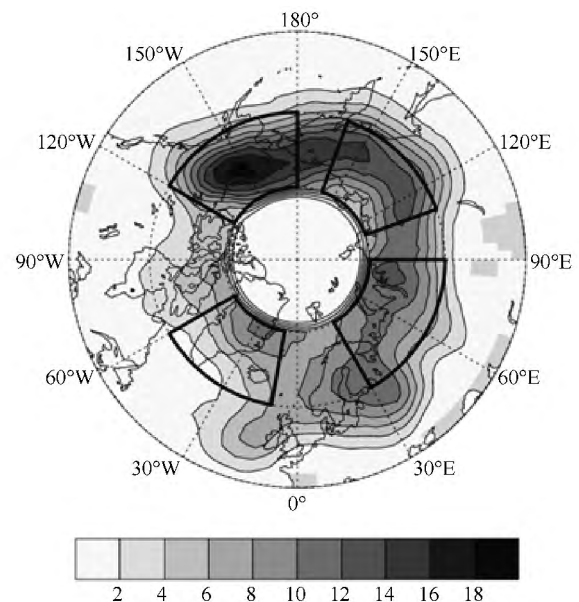


图 4 1950—2013 年夏季 (JJA) 阻塞频率分布(黑框区域为阻塞高频区)
 Fig. 4. Horizontal distribution of blocking frequency in summer (JJA) from 1950 to 2013 (the areas in black boxes represent the high value region of blocking frequency)

图 5 的结果与 Barriopedro 等^[13] 和 Diao 等^[14] 对北半球夏季阻塞特征分析的结果基本一致, 但各区域阻塞发生的频率大小略有不同, 这可能是不同的阻塞指数识别原理不同而造成的差异, 并且他们的

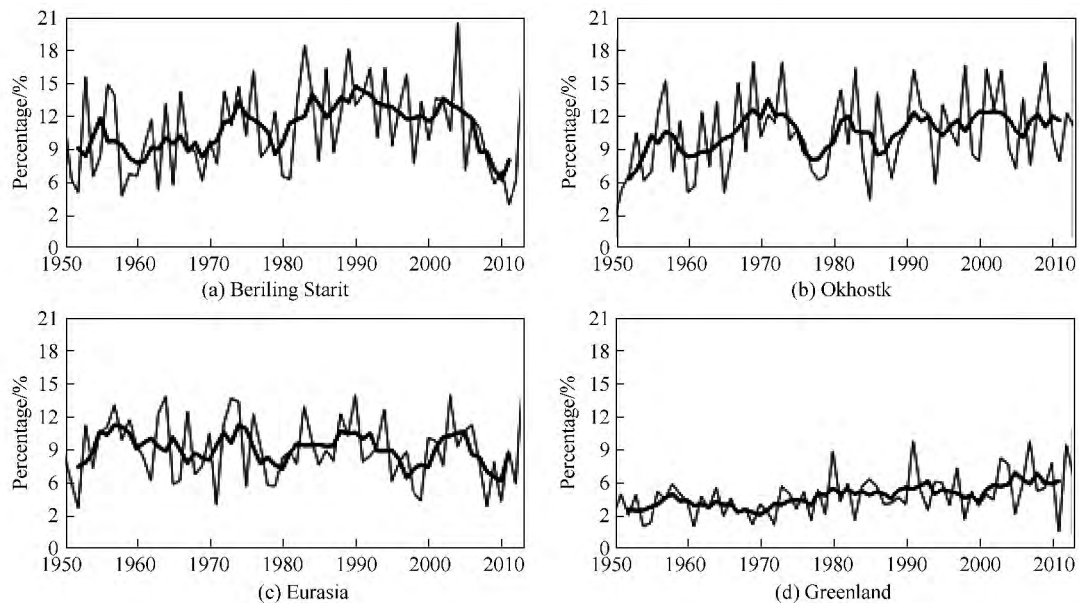


图 5 四个区域 1950—2013 年夏季 (JJA) 年平均阻塞频率变化。(a) 白令海峡区域; (b) 鄂霍次克海区域; (c) 欧亚大陆区域; (d) 格陵兰区域(黑色粗线为平滑趋势线)

Fig. 5. Variations of annual average blocking frequency in summer from 1950 to 2013 over four regions. (a) Bering Strait; (b) Okhotsk Sea; (c) Eurasia; (d) Greenland. Thick black line is result from smooth line

计算结果均显示格陵兰区域阻塞活动中心纬度偏低。鉴于海冰存在于高纬度地区,为了更好地研究中高纬度阻塞对其的影响,故在此采用了具有对中高纬度阻塞识别能力较强、并可剔除低纬度阻塞的 DCGN 指数。为了验证其指数计算结果的可靠性,通过将其在纬度上平均得到一维阻塞频率的分布变化,并与经典的 TM 阻塞指数进行比较(如图 6 所示),发现 TM 指数在欧洲大陆区域(0° — 50° E)和鄂霍次克海区域(120° E— 180° E)比 DCGN 指数计算的频率略有增加,其他范围的频率分布变化几乎一致,且也有 4 个区域阻塞活动中心,分别为欧亚大陆区域(30° E— 70° E)、白令海峡区域(130° W— 170° W)、鄂霍次克海区域(110° E— 170° E)和格陵兰区域(20° W— 60° W),这与用 DCGN 的指数方法计算结果基本是一样的。另外利用 TM 指数计算了该 4 个阻塞活动中心的频率变化趋势(如图 7 所示),发现其变化趋势与利用 DCGN 指数计算的结果也几乎一致,只是在频率大小上存在差异, TM 指数计算的频率均比 DCGN 计算的频率高。这是因

为 TM 指数的计算原理是只考虑经度情况的,只要有一个经度点上的值满足了阻塞条件,便可定义为该经度上的所有点发生了阻塞,可以近似被认为是 DCGN 计算得到该经度上所有格点的频率的最大值,而且 DCGN 指数计算的频率变化趋势为区域平均的结果,因而必然小于 TM 指数,但两个指数计算的阻塞活动中心和变化趋势是一致的。因此下文的计算分析均采用 DCGN 二维阻塞指数。

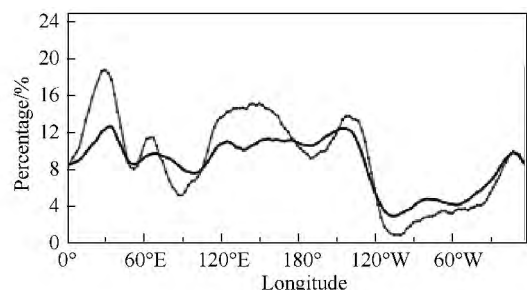


图 6 TM 指数和 DCGN 指数计算的阻塞频率比较(细线为 TM 指数 粗线为 DCGN 指数)

Fig. 6. The longitudinal distributions of the blocking frequency for TM and DCGN indices. The thin line is result from TM index, and the bold line is result from DCGN index

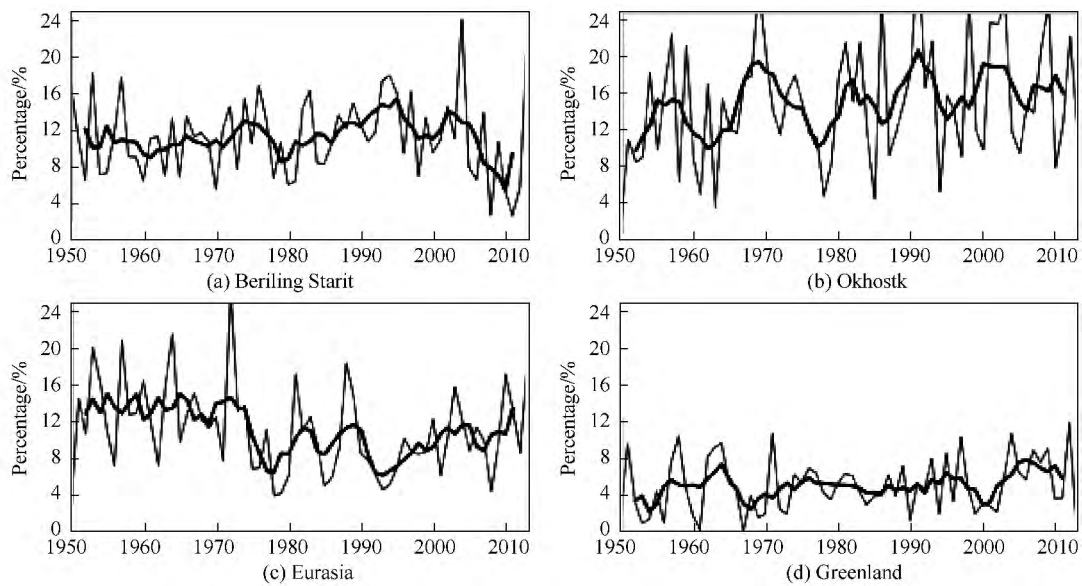


图 7 利用 TM 指数计算的四个区域 1950—2013 夏季 (JJA) 年平均阻塞频率变化. (a) 白令海峡区域; (b) 鄂霍次克海区域; (c) 欧亚大陆区域; (d) 格陵兰区域(黑色粗线为平滑趋势线)
 Fig. 7. Variation of annual average blocking frequency in summer from 1950 to 2013 used by TM index over four regions. (a) Bering Strait; (b) Okhotsk Sea; (c) Eurasia and (d) Greenland. Thick black line is result from the smooth line

3 阻塞发生时行星波特征对海冰可能造成的影响

海冰的减少可影响大气环流的变化,大气环流的改变也可对海冰的变化产生影响,很多研究也已经表明异常的高压可能对海冰减少有所贡献^[7, 18-19]。行星波是大尺度 Rossby 波的 1—4 波,其移动缓慢,振幅跨度约为 10—20 个纬距,而阻塞亦是行星尺度的系统,阻塞发生时大气环流最显著的变化即可通过行星波反映出来。Francis 和 Vavrus^[9]认为较高的波幅可能使大尺度的 Rossby 波从西向东进程变得缓慢,使得中高纬度天气型更持续,进而增加极端天气出现的可能性,如热浪、干旱,这种极端天气和北极增暖加强有密切的联系。为研究阻塞发生时行星波的平均状态,挑出 1950—2013 年夏季上述 4 个区域阻塞存在相对不存在时的 500 hPa 平均位势高度进行合成分析。从图 8 中可看出在该 4 个区域发生阻塞时,其对应区域位势高度均有显著的增加,即阻塞发生发展期间,大尺度行星波的振幅有显著加强。这种显著升高的波幅放大了气流路径,加剧了出现缓慢天气型的可能性,它可能是近几年夏季欧洲热浪频繁发生的主要原因^[20],进而可能加剧海冰的减少。Zhang 等^[21]则认为在全球变暖的背景下,北极

气旋是向北极输送热量和水汽的重要机制,其活动的趋势和强度变化对北极增暖有重要作用。从图 8 也可明显看出各区域发生阻塞时,其对应的极地地区位势高度均有显著降低,形成以北极为中心的气旋型环流,这种南部高值北部低值的位势高度分布场,可能更有利于热量从中高纬度向高纬度极地地区的输送,进而引起北极海冰的变化。

Rigor 等^[22]认为海冰运动的改变将影响夏季海冰密集度的变化,大部分的海冰都通过弗拉姆海峡输送到格陵兰海,此外也有研究表明白令海峡的海冰变化与异常东南风有关^[7, 23]。高层风场是控制大气环流场的主要形态,也可驱动地面风场。阻塞发生时这种南部高值北部低值的位势高度场分布在格陵兰岛附近引起南部呈反气旋性流场,北部呈气旋性流场,两种流场接合部分的空气运动加速,可能将海冰加快从弗拉姆海峡输出;在白令海峡出现这种流场结构引起显著异常的东南风,有利于将中高纬度开阔水源从海峡通道流入至高纬度海洋,使海洋反照率降低,从而吸收更多太阳辐射,提高海域表面温度,加快海冰融化。此外夏季大气环流异常引起海冰变化与 Ekman 漂移在北极边缘海域的作用也有很大关系^[24],而各区域发生阻塞时形成以北极为中心的气旋性环流,也可引起海表面 Ekman 漂移的

对海冰的拖曳作用,将更多海冰从高纬度海域输送到南部中高纬度地区,从而融化海冰。因此阻塞的

发生必将会引起海冰的一系列变化,下面我们就阻塞发生时对海冰的热力学影响进行分析讨论。

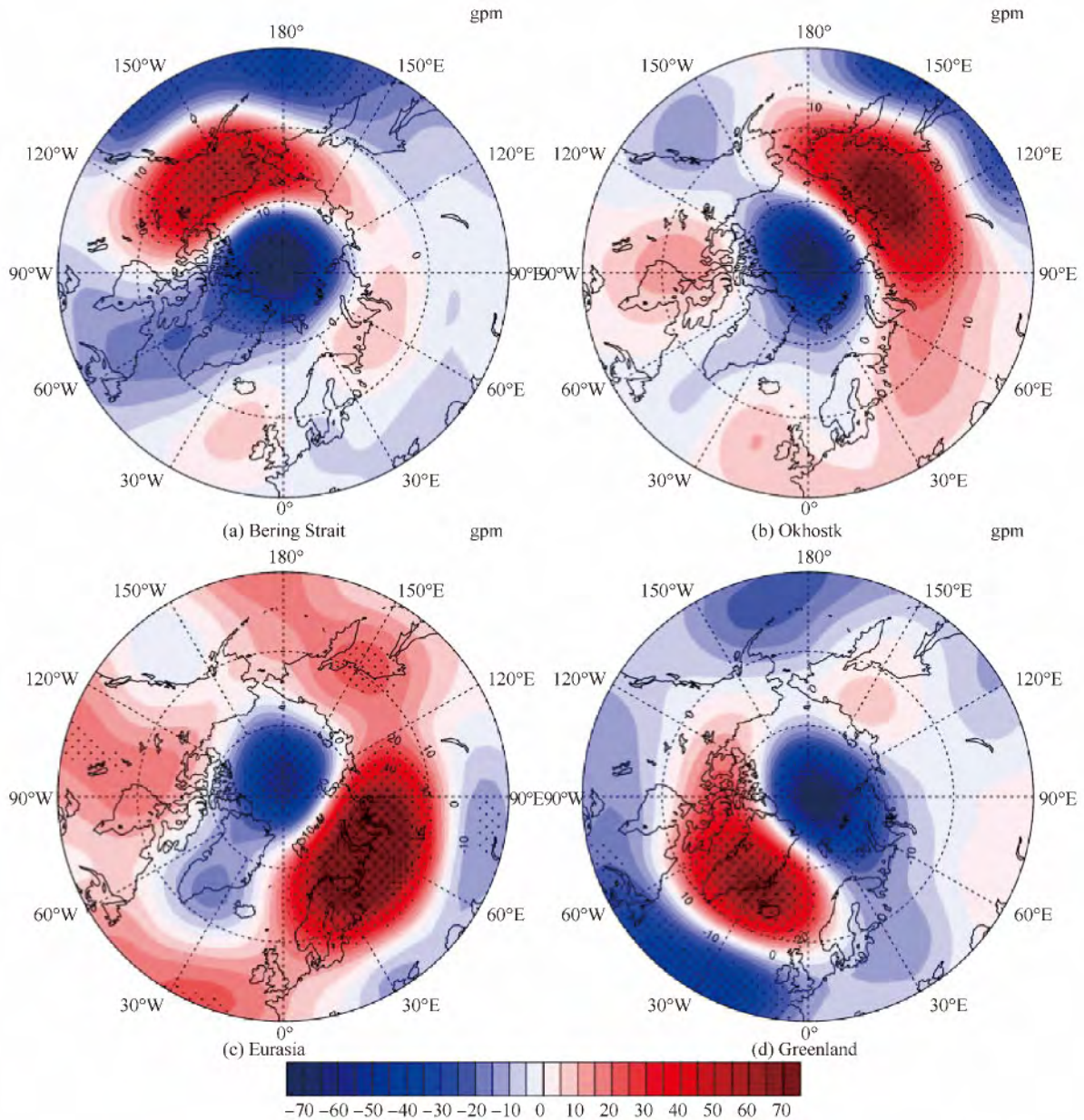


图 8 1950—2013 年夏季 (JJA) 阻塞发生相对未发生时 500 hPa 高度异常场。(a) 白令海峡区域; (b) 鄂霍次克海区域; (c) 欧亚大陆区域; (d) 格陵兰区域(阴影部分通过了 95% 的显著性检验)

Fig. 8. The difference of geopotential height anomaly at 500 hPa between days with and without blocking in summer from 1950 to 2013 over four regions. (a) Bering Strait; (b) Okhotsk Sea; (c) Eurasia; (d) Greenland. The shading regions are statistically significant at the 95% significance level according to the Student's *t* test

4 阻塞对海冰的热力学影响

4.1 地面温度变化

已观测到的海冰减少在一定程度上反映了热力

学原因和动力学原因的结合,其热力学原因涉及了地面温度、辐射通量等^[25]。Screen 和 Simmonds^[2]通过使用 ERA-Interim 资料计算发现 1989—2008 年这段时间北极近地面有明显的升温,并认为海冰减少对北极温度增加起主导作用,而且越往大气低层这

种增温效果越大。他们还运用大气环流模型验证了大气改变对海冰减少的响应,发现这种响应在北冰洋边缘地区及海岸效果最显著,并且证明了大气增温在中高纬度(65N°以北)850 hPa 以下大气层更加明显。Serreze 和 Francis^[26] 研究结果表明北半球高纬度地面温度升高是北极放大及海冰削减明显的信号,并且受大气低频流变化的强烈影响。Ogi 和 Wallace^[24] 认为自 1979 年以来北冰洋边缘海域地面

温度异常,并且这些温度异常区域和海冰减少的区域相关联,尤其在夏季海冰覆盖范围和地面温度有密切关系。

分别挑出白令海峡区域、鄂霍次克海区域、欧亚大陆区域和格陵兰区域 1950—2013 年夏季阻塞发生时及未发生时的地面温度,对其进行合成对比分析。从图 9 中可看出该四个区域发生阻塞时,各对应区域均有明显的温度正异常中心,其中鄂霍次克

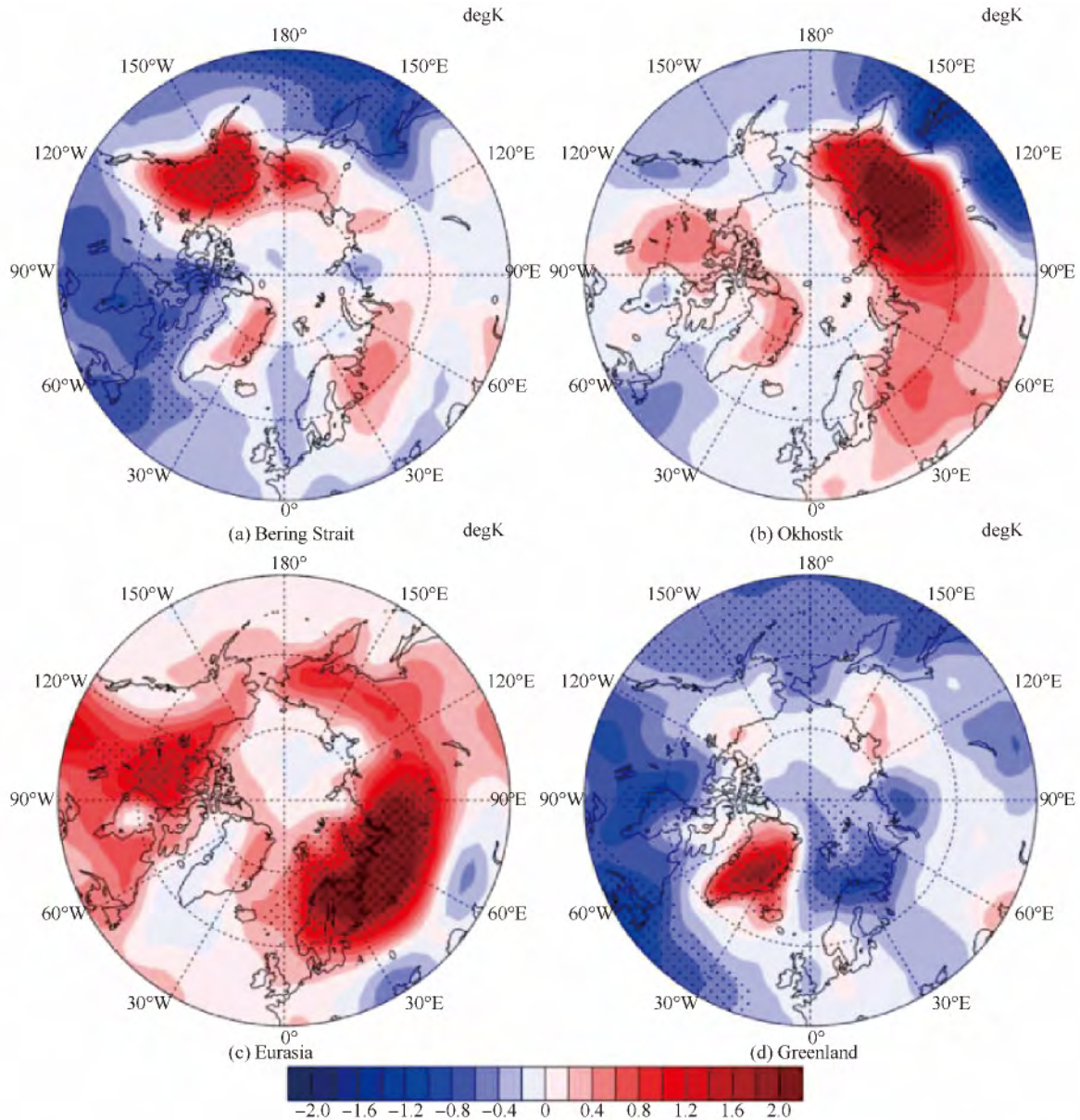


图 9 1950—2013 年夏季有阻塞和无阻塞地面温度场之差。(a) 白令海峡区域; (b) 鄂霍次克海区域; (c) 欧亚大陆区域; (d) 格陵兰区域(阴影部分通过了 95% 的显著性检验)

Fig. 9. The difference of surface air temperature anomaly between days with and without blocking in summer from 1950 to 2013 over four regions. (a) Bering Strait; (b) Okhotsk Sea; (c) Eurasia; (d) Greenland. The shading regions are statistically significant at the 95% significance level according to the Student's *t* test

海区域和欧亚大陆区域地面温度增加幅度较大,白令海峡和格陵兰区域增温幅度较小。计算该 4 个区域因阻塞而引起的年平均温度变化(图 10),可看出自 1950—2013 年,大部分年份阻塞发生时都引起了该区域地面温度增加,其中欧亚大陆区域和鄂霍次克海区域年平均升温较高,分别为 2.30 和 1.82 K,白令海峡区域平均温度升高 0.89 K,格陵兰区域为 0.62 K。这种由于阻塞而引起的地面温度升高

在鄂霍次克海和欧亚大陆区域近 30 年有增加的趋势,引起温度增加的最大值达到了 6 K 左右,而在白令海峡和格陵兰区域的引起的地面温度增加幅度较小且变化趋势相对稳定。该 4 个区域由阻塞引起的地面增温事实在过去的 60 多年中是显著存在的,仅个别年份出现温度下降的情况,这可能是存在其他天气学原因使得地面温度下降,这里暂不考虑。

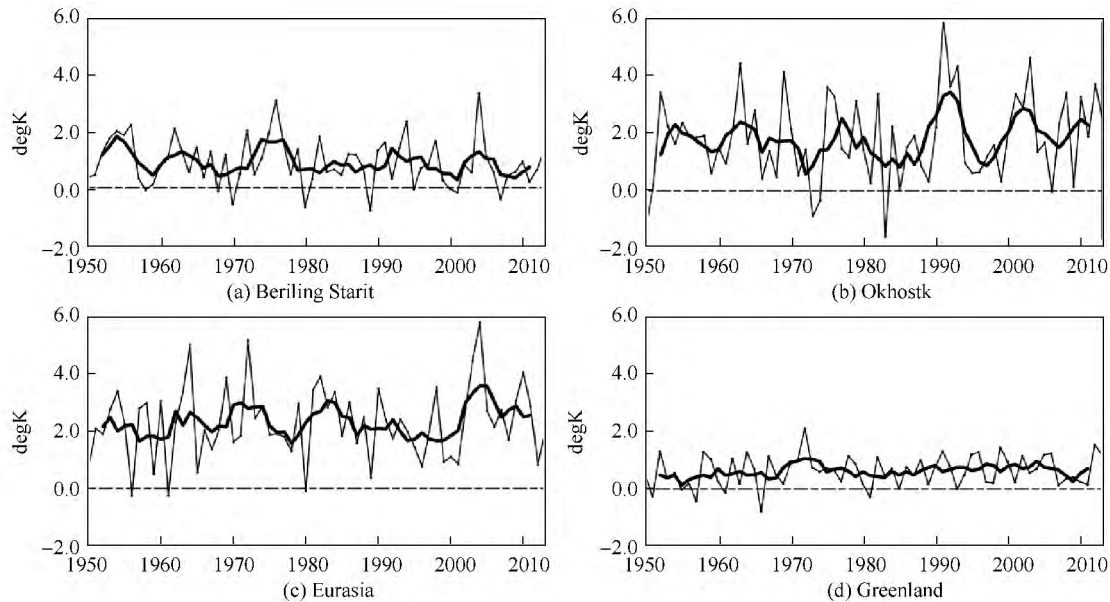


图 10 各区域由于阻塞造成的平均地面温度变化(单位: K)。(a) 白令海峡区域; (b) 鄂霍次克海区域; (c) 欧亚大陆区域; (d) 格陵兰区域(图中黑色粗线为平滑趋势线)

Fig. 10. Surface temperature anomaly caused by blocking in summer from 1950 to 2013 over four regions(unit: K) . (a) Bering Strait; (b) OkhotskSea; (c) Eurasia; (d) Greenland. Thick black line is result from the smooth line

接着我们挑出了各区域阻塞发生频率高的年份,讨论相对阻塞发生频率低的年份地面温度是否依然有明显的增加,以此来更有力地证明阻塞的存在确实对中高纬度地面温度增加有所贡献。计算各区域年平均阻塞频率并对其标准化处理,挑出各区域标准化的阻塞频率 > 0.6 和 < -0.6 的年份(如图 11 所示),并对其地面温度场进行合成(如图 12 所示)。结果发现各区域阻塞发生频率较高的年份相对频率较低的年份,依然存在地面温度升高的现象。因此我们可以断定在中高纬度阻塞的发生发展期间,各区域在阻塞高压的控制下,可直接引起该区域的地面温度的显著增加。

北半球高纬度地面温度增加是海冰明显削减的

信号^[24]。这种中高纬度阻塞发生引起的地面温度增加,不仅可直接引起海冰减少,减少的海冰又导致表面反照率降低,从而增加表面对太阳辐射的吸收,可更进一步加速海冰的融化。

4.2 经向瞬变热通量输送变化

大气对极地的热量输送可引起极地地面温度增加,尤其在北大西洋和北太平洋区域,是北极放大的一个重要原因^[27-28]。瞬变加热是大气热源的重要部分,在全球大部分区域的中高纬度对流层高层中起重要支配作用,可重新分配非绝热加热造成的大气热量空间分布,从而为高纬度和中高层大气获得更多热量,对于中高纬度季节气候及其变异有不可忽视的作用^[29]。刁一娜等^[30]认为在阻塞的生命过

程中,天气尺度的瞬变扰动与阻塞流场存在相互作用,阻塞频发的季节是瞬变扰动活跃的季节,天气尺度瞬变扰动产生于急流强斜压区,而急流的出口处正是阻塞的发生位置。陆日宇^[31]结果表明,阻塞

流型引导的天气尺度波在热量的南北输送中占主要地位,而且相对于阻塞流型来说,天气尺度波造成的热量输送更加强烈明显,表现出向北输送热量或向南输送冷空气的特征。

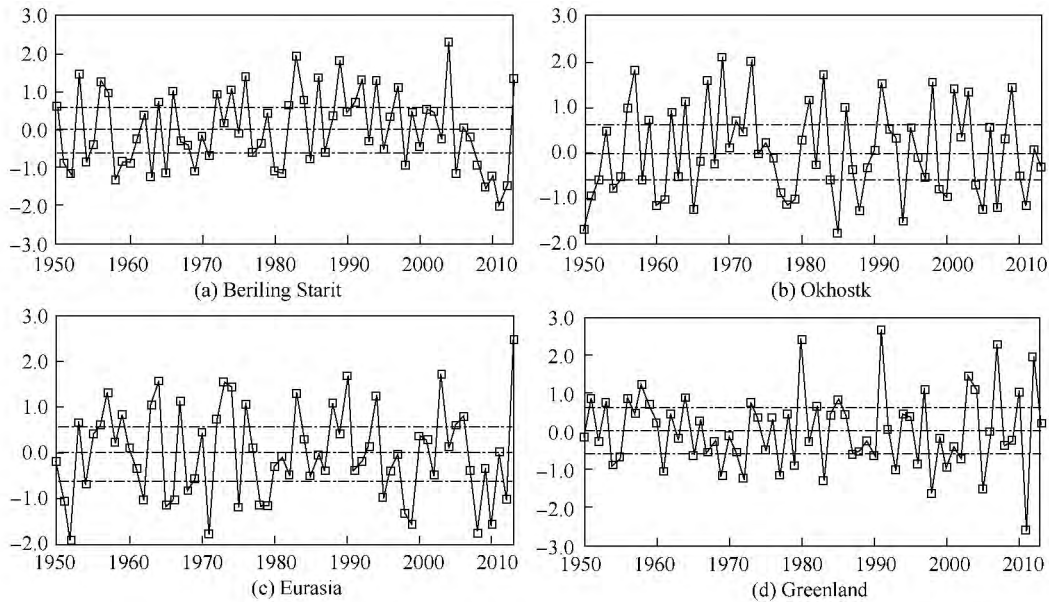


图 11 4 个区域去掉趋势后标准化的年平均阻塞频率。(a) 白令海峡区域; (b) 鄂霍次克海区域; (c) 欧亚大陆区域; (d) 格陵兰区域(图中虚线为 ± 0.6 的标准线)
 Fig. 11. Normalized of annual average blocking frequency without linear trend over four regions. (a) Bering Strait; (b) OkhostkSea; (c) Eurasia; (d) Greenland. Dotted line is ± 0.6 referenced line

为研究阻塞发生时瞬变波对极地的热量输送,滤出 850 hPa 天气尺度波(2—7 d)的瞬变扰动经向速度 v 和温度 T ,分别计算以上 4 个区域阻塞发生相对未发生时的瞬变波对热量的经向输送。之所以选择 850 hpa 高度层是因为 Screen 和 Simmonds^[2]已经证明大气改变对海冰减少响应在大气低层更加明显,而它在某种意义上可以代表近地面边界层的顶端,对地面有很强的相关性。从图 13 中可明显看出阻塞发生时瞬变天气波的活动可将热量从中高纬地区输送到高纬度极地地区,各区域均出现南部冷却、北部加热的偶极型分布,其中鄂霍次克海和欧亚大陆北部区域加热剧烈,白令海峡和格陵兰北部区域加热效果相对较弱。Holland 等^[32]研究结果表明海洋对极地的热量输送将触发和导致海表面反照率对大气反馈作用的加强,从而使更多太阳辐射被海洋表面吸收,以此加速海冰融化。由此可知,在中高纬度阻塞发生发展期间,天气尺度瞬变扰动与阻塞流

场相互作用,使得瞬变波对热量的经向输送作用显著,可在其阻塞区域南侧的中纬度造成冷却、北侧的高纬度和极地地区造成加热,使高纬度地区和极地地区获得更多热量,以此来引起北极温度增加,加速海冰消融。

4.3 经向温度平流变化

在不考虑非绝热加热作用下,大尺度温度的局地变化主要取决于经向风异常导致的温度平流作用^[33]。温度平流除了能直接引起大气热力结构变化,还会引起其他大气物理属性的改变,在天气系统的发生发展过程中有重要作用。Rigor^[25]研究表明夏季温度平流对海冰的变化有重要作用,海洋上的暖平流可造成海冰的大量减少。Deser 等^[34]也认为在格陵兰和巴伦支海上空的来自南部的异常暖平流将会加速海冰融化。为研究温度平流对的变化与海冰关系,计算 4 个区域有阻塞相对于无阻塞发生时的经向温度平流变化场,如图 14 所示。从图 14 中可

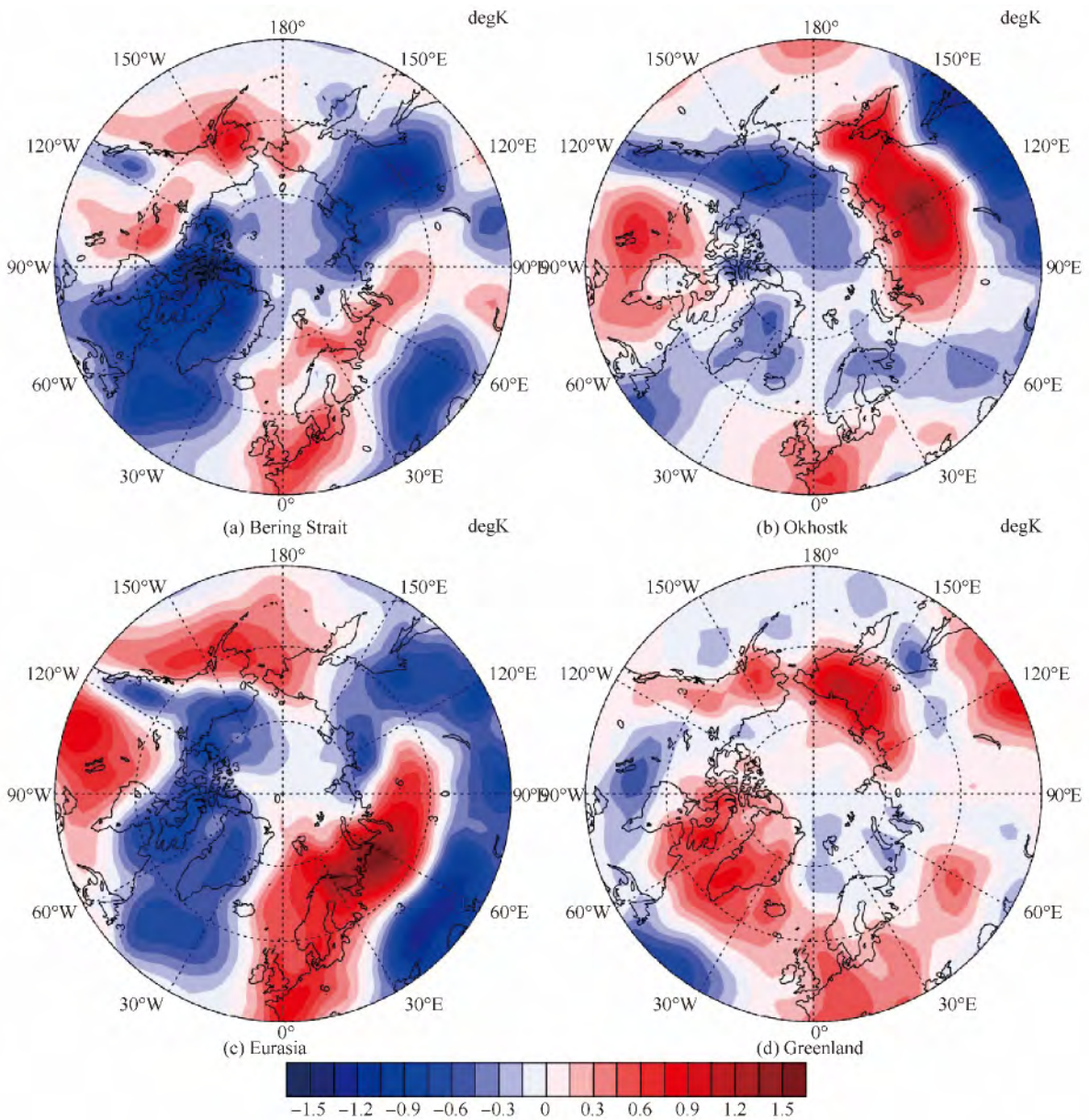


图 12 1950—2013 年各区域阻塞频率较高的年份相对阻塞频率较低年份的地面温度场之差。(a) 白令海峡区域; (b) 鄂霍次克海区域; (c) 欧亚大陆区域; (d) 格陵兰区域

Fig. 12. The difference of surface air temperature anomaly between summer high and low blocking frequency years from 1950 to 2013 over four regions. (a) Bering Strait; (b) OkhostkSea; (c) Eurasia; (d) Greenland

看出在白令海峡、鄂霍次克海、欧亚大陆区域的阻塞发生时,其对应区域及南部均有较明显负距平,而北部极地地区呈现较为明显的正距平。这是由于中高纬度阻塞发生发展期间,行星尺度波呈现“南高北低”的异常分布特征,气压梯度力表现为正,在此作用下有异常的南风,因而出现向极的温度平流。这样使得中高纬度暖空气被带入极地地区,而极地地区冷空气南下,可引起高纬度极地地区温度升高,从而使海冰融化。而格陵兰区域阻塞引起的温度平流

异常场相对其他区域而言变化甚微,这可能因为格陵兰区域阻塞发生的频率较低,时间较短;另外从阻塞发生时 500 hPa 高度异常场(图 8)也可看出,格陵兰区域因阻塞发生的位势高度相对其他区域增加较少,使得由南到北的气压梯度力相对较小,因而对经向温度平流的输送显得不明显。但从其他三个区域的情况来看,阻塞的发生确实引起了温度平流向极的输送,以此来提高极地温度,加速海冰融化。

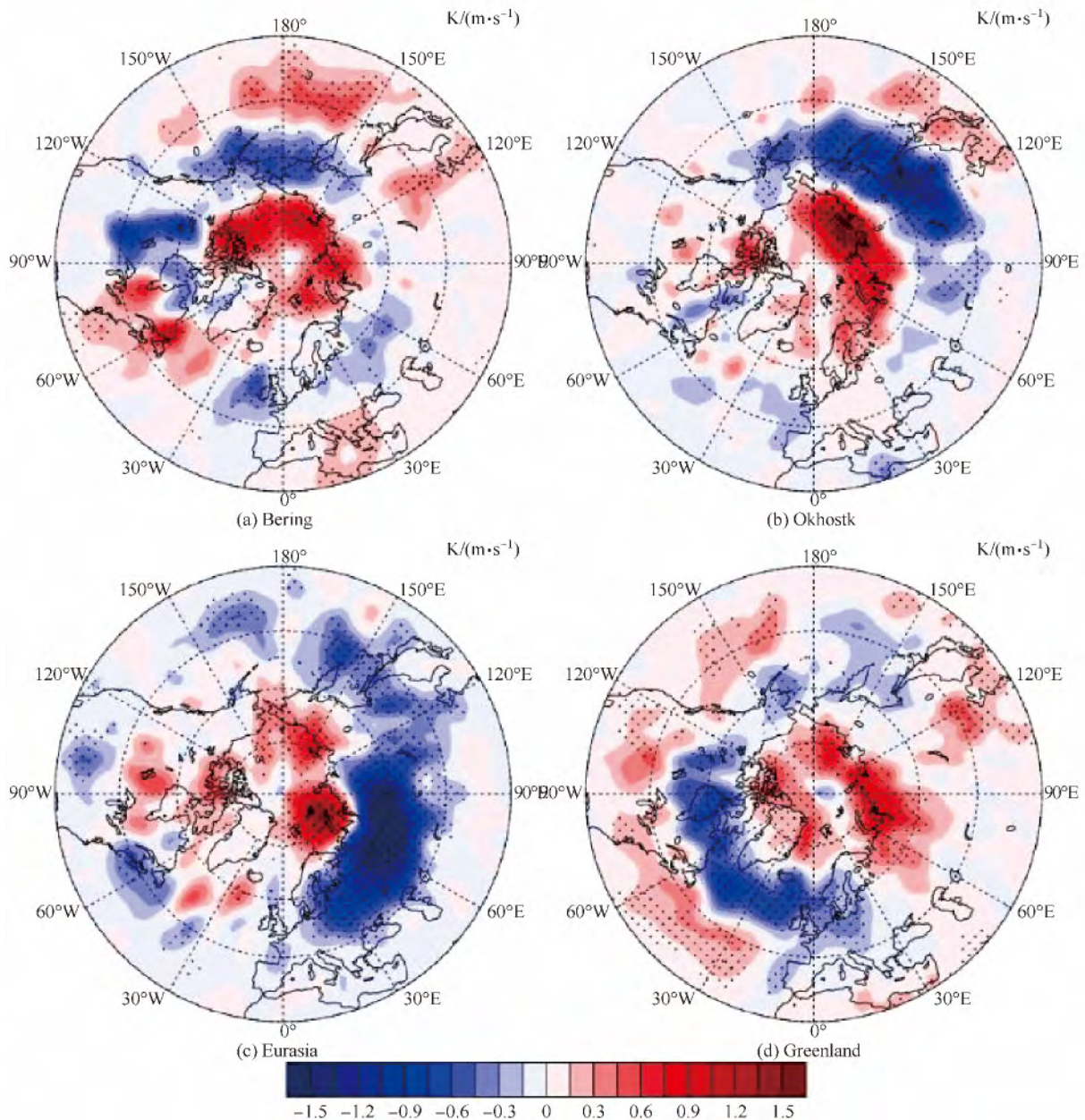


图 13 1950—2013 年夏季各区域发生阻塞较未发生时 850 hPa 平均经向瞬变热输送异常场。(a) 白令海峡区域; (b) 鄂霍次克海区域; (c) 欧亚大陆区域; (d) 格陵兰区域(阴影部分通过了 95% 的显著性检验)

Fig. 13. The difference of meridional transient heat flux anomaly at 850 hPa between days with and without blocking in summer from 1950 to 2013 over four regions. (a) Bering Strait; (b) Okhotsk Sea; (c) Eurasia; (d) Greenland. The shading regions are statistically significant at the 95% significance level according to the Student's *t* test

5 结果和讨论

本文通过对夏季北极海冰覆盖范围、海冰密集度及中高纬度阻塞的计算,对阻塞和海冰的关系进行了对比分析,发现夏季海冰减少明显的区域和中

高纬度阻塞频发区域十分相似,分别是白令海峡区域(120°W—180°W),鄂霍次克海区域(110°E—150°E),欧亚大陆区域(30°E—90°E)和格陵兰区域(20°W—60°W)。对夏季各区域阻塞发生相对未发生时的高度场、温度场、热量输送和平流输送场进一步分析表明,中高纬度阻塞的发生发展对海冰的融

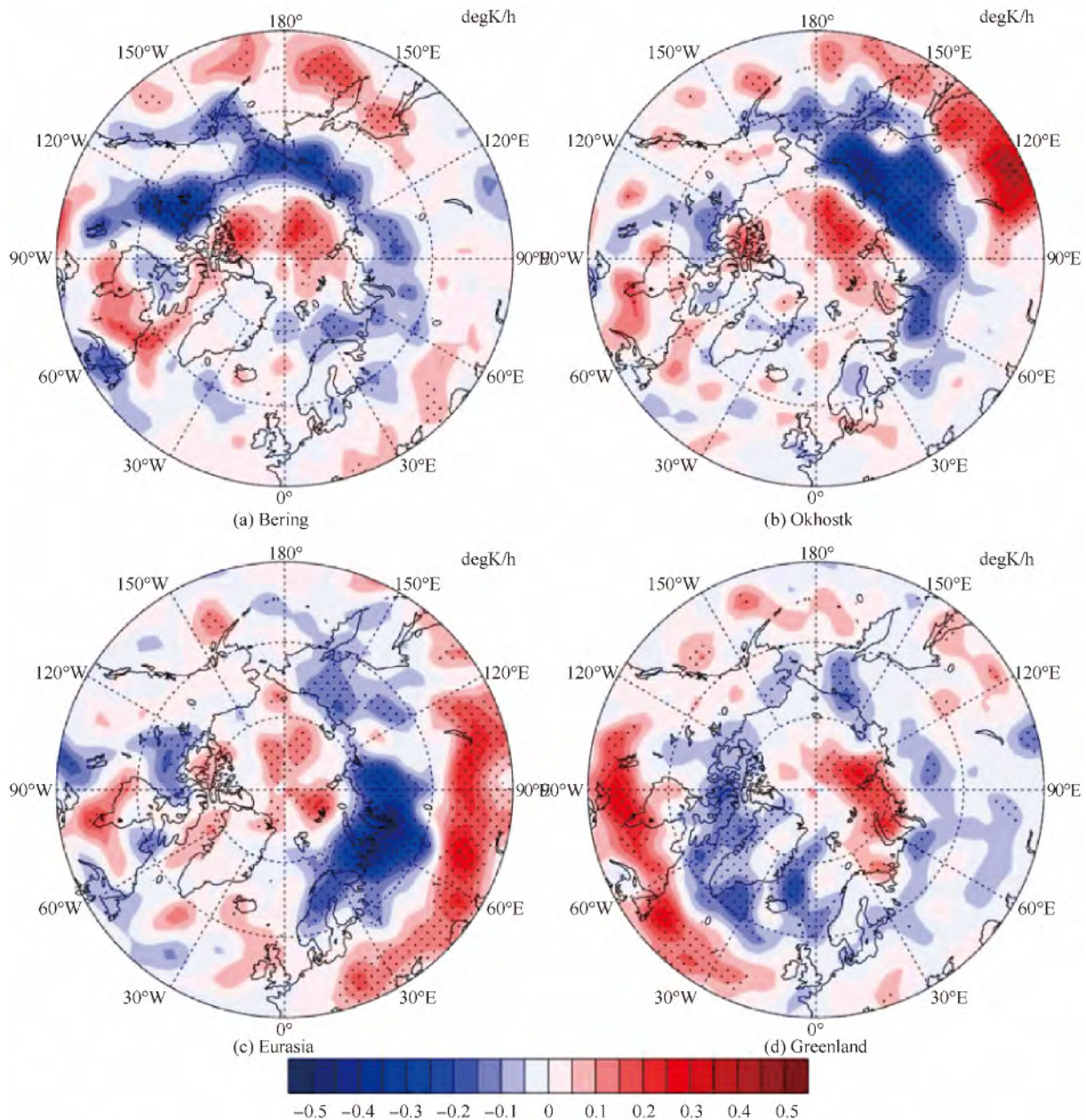


图 14 1950—2013 年夏季各区域阻塞发生较未发生时 850 hPa 平均经向温度平流输送异常场。(a) 白令海峡区域; (b) 鄂霍次克海区域; (c) 欧亚大陆区域; (d) 格陵兰区域(阴影部分通过了 95% 的显著性检验)

Fig. 14. The difference of meridional temperature advection anomaly at 850 hPa between days with and without blocking in summer from 1950 to 2013 over four regions. (a) Bering Strait; (b) Okhotsk Sea; (c) Eurasia; (d) Greenland. The shading regions are statistically significant at the 95% significance level according to the Student's *t* test

化有明显的加速作用。主要研究结论如下:

(1) 各区域有阻塞相对无阻塞发生时的 500 hPa 均呈现南部高值北部低值的偶极分布特征,南部中高纬度地区大尺度行星波振幅的显著增加,北部极地地区位势高度的显著减少,形成以北极为中心的气旋性环流更有利于热量向北极输送,从而

造成对海冰的影响。这种流场结构在格陵兰区域可加速海冰从弗拉姆海峡的输出,在白令海峡区域可使开阔水源流至高纬度地区,降低海洋反照率,以此来增加海温融化海冰;另外极地显著的气旋性环流还可通过 Ekman 输送作用使更多海冰被输送到南部,以加速海冰融化;

(2) 对各区域有阻塞相对于无阻塞发生时、阻塞频率较高的年份相对阻塞频率较低年份的地面温度场进行合成对比分析, 均发现其地面温度场有显著的正异常, 即阻塞的发生发展显著增加了该区域的地面温度, 以此来影响北极增暖, 进而加速海冰融化。而 850 hPa 经向瞬变热通量进行合成分析结果表明, 阻塞发展时与瞬变天气波的相互作用, 使各区域均出现北部加热、南部冷却的偶极分布, 热量集中在北部高纬度地区, 这种分布说明阻塞发生时的瞬变天气波对热量的输送也可能是造成海冰融化的原因。850 hPa 经向温度平流合成分析还发现, 发展中的阻塞可将暖平流带入极地高纬度地区, 也对海冰

的融化起到一定作用;

(3) 阻塞对海冰的热力学方面影响在鄂霍次克海和欧亚大陆区域非常显著, 而在白令海峡和格陵兰区域效果则相对较弱。但海冰密集度显示白令海峡区域海冰减少最为明显, 阻塞的频率分布也在白令海峡区域表现为一高值中心, 且已有研究表明白令海峡和格陵兰区域海冰减少与大气动力学过程有很重要的关系, 这说明白令海峡区域的海冰减少可能与阻塞的动力学特征也有密切关系; 而白令海峡东部的弗拉姆海峡是海冰向外输送的出口, 其区域内阻塞的发生对海冰的影响, 也可能以动力学原因为主, 以后将再做具体分析研究讨论。

参考文献

- 1 Serreze M C, Barrett A P, Stroeve J C, et al. The emergence of surface-based Arctic amplification. *The Cryosphere*, 2009, 3(1): 11—19.
- 2 Screen J A, Simmonds I. The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification. *Nature*, 2010, 464(7293): 1334—1337.
- 3 Deser C, Magnusdottir G, Saravanan R, et al. The effects of North Atlantic SST and sea ice anomalies on the winter circulation in CCM3. Part II: Direct and indirect components of the response. *Journal of Climate*, 2004, 17(5): 877—889.
- 4 Alexander M A, Bhatt U S, Walsh J E, et al. The atmospheric response to realistic Arctic sea ice anomalies in an AGCM during winter. *Journal of Climate*, 2004, 17(5): 890—905.
- 5 张璐, 张占海, 李群, 等. 近 30 年北极海冰异常变化趋势. *极地研究*, 2009, 21(4): 344—352.
- 6 Deser C, Teng H Y. Evolution of Arctic sea ice concentration trends and the role of atmospheric circulation forcing, 1979—2007. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(2): L02504.
- 7 Francis J A, Hunter E. Drivers of declining sea ice in the Arctic winter: A tale of two seas. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(17): L17503.
- 8 Francis J A, Chan W H, Leathers D J, et al. Winter Northern Hemisphere weather patterns remember summer Arctic sea-ice extent. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(7): L07503.
- 9 Francis J A, Vavrus S J. Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(6): L06801.
- 10 Honda M, Yamazaki K, Nakamura H, et al. Dynamic and thermodynamic characteristics of atmospheric response to anomalous sea-ice extent in the Sea of Okhotsk. *Journal of Climate*, 1999, 12(12): 3347—3358.
- 11 Thompson D W J, Wallace J M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(9): 1297—1300.
- 12 Hurrell J W, Kushnir Y, Ottersen G, et al. The North Atlantic Oscillation: Climate Significance and Environmental Impact. *Geophysical Monograph Series*. Washington, DC: American Geophysical Union, 2003, 134: 279.
- 13 Barriopedro D, Garcia-Herrera R, Lupo AR, et al. A climatology of Northern Hemisphere blocking. *Journal of Climate*, 2006, 19(6): 1042—1063.
- 14 Diao Y N, Li J P, Luo D H. A new blocking index and its application: Blocking action in the Northern Hemisphere. *Journal of Climate*, 2006, 19(19): 4819—4839.
- 15 Davini P, Cagnazzo C, Gualdi S, et al. Bidimensional diagnostics, variability, and trends of Northern Hemisphere Blocking. *Journal of Climate*, 2012, 25(19): 6496—6509.
- 16 Tibaldi S, Molteni F. On the operational predictability of blocking. *Tellus A*, 1990, 42(3): 343—365.
- 17 Parkinson C L, Cavalieri D J. Arctic sea ice variability and trends: 1979—2006. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(C7): C07003.
- 18 Sorteberg A, Kvingedal B. Atmospheric forcing on the Barents Sea winter ice extent. *Journal of Climate*, 2006, 19(19): 4772—4784.
- 19 Inoue J, Hori M E, Takaya K. The role of Barents Sea ice in the wintertime cyclone track and emergence of a warm-arctic cold-Siberian anomaly. *Journal of Climate*, 2012, 25(7): 2561—2568.

- 20 Jaeger E B , Seneviratne S I. Impact of soil moisture-atmosphere coupling on European climate extremes and trends in a regional climate model. *Climate Dynamics* ,2011 ,36(9) : 1919—1939.
- 21 Zhang X D , Walsh J E , Zhang J , et al. Climatology and interannual variability of Arctic cyclone activity: 1948—2002. *Journal of Climate* ,2004 ,17(12) : 2300—2317.
- 22 Rigor I G , Wallace J M , Colony R L. Response of sea ice to the Arctic oscillation. *Journal of Climate* ,2002 ,15(18) : 2648—2663.
- 23 Rigor I G , Wallace J M. Variations in the age of Arctic sea-ice and summer sea-ice extent. *Geophysical Research Letters* ,2004 ,31(9) : L09401.
- 24 Ogi M , Wallace J M. Summer minimum Arctic sea ice extent and the associated summer atmospheric circulation. *Geophysical Research Letters* ,2007 ,34(12) : L12705.
- 25 Serreze M C , Holland M M , Stroeve J. Perspectives on the Arctic's shrinking sea-ice cover. *Science* ,2007 ,315(5818) : 1533—1536.
- 26 Serreze M C , Francis J A. The Arctic amplification debate. *Climate Change* ,2006 ,76(3) : 241—264.
- 27 Graversen R G. Do changes in the midlatitude circulation have any impact on the Arctic surface air temperature trend? *Journal of Climate* ,2006 ,19(20) : 5422—5438.
- 28 Graversen R G , Mauritsen T , Tjernström M , et al. Vertical structure of recent Arctic warming. *Nature* ,2008 ,451(7174) : 53—56.
- 29 张灵玲, 谢倩, 房佳蓓, 等. 全球大气季节平均热源的三维分布-非绝热加热与瞬变加热之对比. *热带气象学报* ,2012 ,28(3) : 321—329.
- 30 刁一娜, 李建平, 罗德海. 阻塞流场与瞬变涡动相互作用的动力学研究. *大气科学* ,2004 ,28(6) : 901—924.
- 31 陆日宇. 夏季东北亚阻塞形势维持时的天气尺度波. *大气科学* ,2001 ,25(3) : 289—302.
- 32 Holland M M , Bitz C M , Tremblay B. Future abrupt reductions in the summer Arctic sea ice. *Geophysical Research Letters* ,2006 ,33(23) : L23503.
- 33 孙诚, 李建平. 2009/2010 年北半球冬季异常低温分析. *气候与环境研究* ,2012 ,17(3) : 259—273.
- 34 Deser C , Walsh J E , Timlin M S. Arctic sea ice variability in the context of recent atmospheric circulation trends. *Journal of Climate* ,2000 ,13(3) : 617—633.

EFFECT OF NORTHERN HEMISPHERE MID-HIGH LATITUDE BLOCKING ON THE VARIATION OF SUMMER ARCTIC SEA ICE

Xiao Yiqing^{1 2} , Huang Bin³ , DiaoYina¹ , Luo Dehai⁴

(¹Shanxi Meteorological Observatory , Xi'an 710014 , China;

²Ocean Environmental College , Ocean University of China , Qingdao 266100 , China;

³Chengdu University of Information Technology , Chengdu 610225 , China;

⁴Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100029 , China)

Abstract

The relationship between mid-high latitude blocking in the northern hemisphere and the decline in Arctic summer sea ice was investigated using National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research daily 500 hPa geopotential height reanalysis data. Results show that there are high blocking frequencies over the Bering Strait , the Okhotsk Sea , Eurasia , and Greenland , which correlate closely with the areas of reduced Arctic summer sea ice in the past 30 years as observed from satellite data. Differences in surface temperature , meridional heat transport and temperature advection in 850 hPa anomaly fields between days with and without blocking were calculated and the results show that mid-high latitude blocking has a significant impact on the reduction in sea ice. An increase in blocking frequency in northern hemisphere mid-high latitudes will increase the surface air temperature , poleward heat transport , and temperature advection , further accelerate the melting of Arctic sea ice. Therefore , thermodynamic effects caused by blocking over the Okhotsk Sea and Eurasia could result in a marked reduction in Arctic sea ice.

Key words Arctic sea ice , Arctic amplification , blocking