

Hadley 环流变化与白令海海冰异常的关系

周波涛 王会军

(中国气象局国家气候中心, 北京 100081; 中国科学院大气物理研究所竺可桢-南森国际研究中心, 北京 100029.
E-mail: zhoubt@cma.gov.cn)

摘要 利用 NCEP/NCAR 再分析资料和 Hadley 中心提供的海冰资料, 分析了 3~4 月 Hadley 环流(HC) 变化和白令海海冰异常之间的联系, 发现 HC 与白令海海冰面积之间具有显著的反相关关系, HC 偏强(弱)对应着白令海海冰减少(增加). 进一步分析了 HC 与白令海海冰联系的大尺度环流背景. 结果表明, 当 HC 处于正位相时, 阿留申低压位置偏西, 北太平洋东部盛行异常偏南气流, 白令海地区气温偏高, 这种大气环流条件和热力状况都不利于白令海海冰的形成, 因此白令海海冰面积减少, 反之亦然. 研究还揭示, 东亚-北太平洋-北美(ANA)遥相关波列可能是联系低纬度 HC 和高纬度白令海地区大气环流及海冰变化的一个重要纽带.

关键词 Hadley环流 白令海海冰 大气环流 遥相关

海冰是气候系统的一个重要组成部分. 它不但可以通过消融和凝结作用吸收和释放能量, 改变海洋与大气之间的热量、动量和质量交换, 还可通过改变地表反照率和海水盐度等性质影响有关的大气与海洋过程. 因此, 海冰在气候变化中的重要性日益受到重视.

白令海海冰作为北极海冰的一部分, 它的变化同样对大气环流和区域气候具有明显的影响. Agnew^[1]研究发现白令海海冰异常可通过改变海洋向上热通量的大小, 强迫产生局地上空大气环流和热力状况的异常. 我国学者在这方面也进行了不少研究^[2~6]. 研究结果表明, 一些大气环流特征指数如北太平洋副热带高压强度指数、北太平洋副热带高压西伸脊点所在经度、东亚大槽强度指数、亚洲经向和纬向环流指数等与喀拉海、鄂霍次克海以及白令海海冰面积关系密切. 方之芳等人^[7]也指出, 冬春季白令海、波弗特海一带的海冰异常可通过洋流作用影响后期北太平洋副热带高压. 谢倩、杨修群等人^[4,8]的研究结果揭示冬季白令海及其以北区域的海冰异常可激发出PNA遥相关型. Zhao等人^[9]还探讨了春季白令海和鄂霍次克海海冰面积变化与东亚夏季降水异常之间的关系, 发现春季白令海和鄂霍次克海海冰面积异常减少(增多)可导致中国东南部夏季降水增多(减少). 鉴于白令海海冰的重要性, 它的变化值得我们密切关注.

海冰的变化与大尺度大气环流密切相关^[10,11]. 研究揭示影响白令海海冰面积变化的高纬大气环流因子主要包括北太平洋涛动, 阿留申低压强度和位置, 北太平洋风暴轴路径等^[11~14]. 由于大气环流是一个相互影响、相互制约的整体, 热带地区的大气环流可以通过遥相关对全球大气环流以及全球气候产生影响^[15~17]. 作为热带大气中一个显著的大尺度环流因子, HC通过角动量、水汽和能量输送, 不仅影响着低纬大气活动, 而且也能影响到中高纬大气环流和气候的变化^[18~22]. 那么, HC异常与白令海海冰面积变化之间是否存在联系? 因此, 本文将着眼于HC, 研究HC与白令海海冰的关系问题.

1 资料介绍

本文所用的海冰资料来自哈德莱气候预报中心(Hadley Centre for Climate Prediction and Research)^[23], 水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$. 大气资料来自美国国家环境预报中心和大气研究中心(NCEP/NCAR)^[24], 主要变量包括海平面气压、纬向风、经向风、垂直速度和气温, 水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$. 海表温度由美国国家海洋和大气局(NOAA)提供, 水平分辨率为 $2^\circ \times 2^\circ$. 分析的时间长度为 1954~2003 年.

2 结果分析

图 1 为 3~4 月(简称为MA)HC与同期海冰的相关分布. 其中HC按照文献^[25]的定义(即 $0^\circ \sim 30^\circ \text{N}$ 区域

里最大质量流函数值)来计算. 图 1 中显示, 白令海区域为显著的负相关, 最大相关为-0.6, 这说明 HC 异常偏强时, 白令海海冰减少; 反之, HC 异常偏弱时, 白令海海冰增多. 选取显著相关区域(170°~160°W, 55°~65°N)里平均的海冰面积作为白令海海冰面积指数(BSI), 以此代表白令海海冰的变化. 图 2 给出了 HC 与 BSI 各自随时间演变的图像. 如图 2 所示, HC 和 BSI 的反位相变化特征十分明显, 而且两者都具有明显的年际和年代际变化特征. 约在 20 世纪 70 年代末期之前, HC 大多处于负位相阶段, 而 BSI 大多位于正位相阶段; 70 年代末期之后, HC 转为正位相, BSI 则以负位相为主. 此外, 1954~2003 年间 HC 呈现出上升趋势, 而 BSI 呈现出下降趋势. 扣除线性趋势前, HC 和 BSI 的相关系数为-0.57, 超过 99% 显著性水平. 扣除线性趋势后, 两者的相关为-0.28, 仍达到 95% 信度. 这意味着 HC 异常与白令海海冰变化在年际和年代际时间尺度上均存在显著联系. 不过值得注意的是, 一些研究指出由于 70 年代后期卫星资料的增多和同化方法的改进, NCEP/NCAR 资料会产生虚假的年代际变化信号, 因此 HC 与 BSI 在年代际时间尺度上的联系还需要以后利用数值模式进行证实. 因

此本文重点研究两者在年际时间尺度上的联系, 所以在随后的分析中均扣除了线性趋势.

为了阐述 HC 与 BSI 负相关关系背后的大尺度环流背景, 我们分析了扣除线性趋势后的 HC 分别为正距平和负距平(标准化值 >1 和 <-1 的年份)时的海平面气压场分布(图 3), 其中强(弱) HC 为 1958 年, 1959 年, 1970 年, 1973 年, 1983 年, 1993 年, 1998 年, 2000 年, 2001 年(1972 年, 1982 年, 1985 年, 1989 年, 1991 年, 1994 年, 1997 年)共 9(7)年. 已有的研究结果 [14,26,27] 表明, 在白令海区域, 阿留申低压的强度和位置尤其是阿留申低压的位置对白令海海冰变化具有显著影响. 阿留申低压位置偏西时, 白令海海冰减少; 反之, 阿留申低压位置偏东时, 白令海海冰增多. 由图 3 可以看到, 在 HC 正位相年份, 阿留申低压中心强度为 1003 hPa, 低压中心位置(图 3 中“D”所示)位于白令海西部 (175°W, 53°N) 附近, 这种环流型类似于 Rodionov 等人 [27] 提出的大气环流 W1 型分布. 在这种环流背景下, 白令海海冰不易形成, 海冰减少. 在 HC 负位相年份, 阿留申低压中心强度为 1006 hPa, 较强 HC 年减弱 3 hPa, 而且低压中心一分为二, 一个中心位于北太平洋西北部, 另一个中心位于阿拉斯加湾, 环流型分布与 Rodionov 等人 [27] 提出的大气环流 C1 型相吻合. 这种环流形式为白令海海冰的形成提供了有利的背景场. 因此, 图 3 从海平面气压分布的角度很好地反映出了 HC 和 BSI 的反相关关系.

为了进一步考察 HC 与低层大气环流的关系, 我们分析了 HC 与 850 hPa 风场的相关系数分布(图 4). 相关矢量的纬向分量是 HC 与纬向风的相关系数, 经向分量是 HC 与经向风的相关系数. 图 4 揭示, 与 HC 同期相关的主要系统是热带西太平洋的反气旋异常

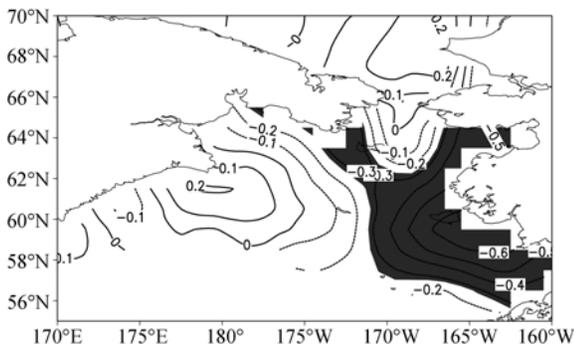


图 1 MA HC 与海冰的相关系数分布
阴影区表示信度超过 95% 的区域

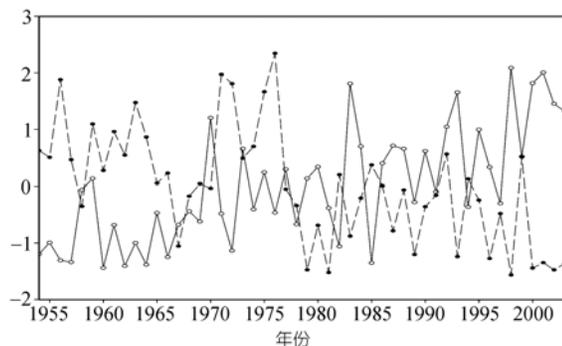


图 2 MA HC(实线)与 BSI(虚线)的标准化时间序列

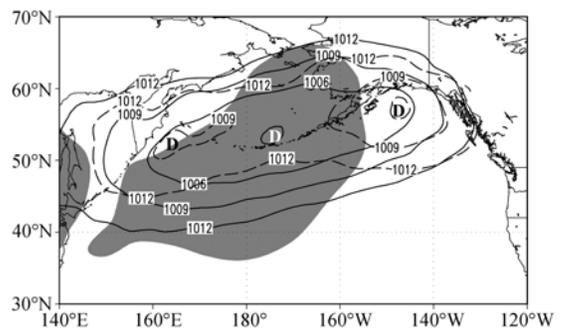


图 3 MA 强 HC 年(实线)与弱 HC 年(虚线)海平面气压的分布

为清晰起见, 图中只给出了 1003, 1006, 1009, 1012 hPa 等值线. 阴影区表示信度超过 95% 的区域

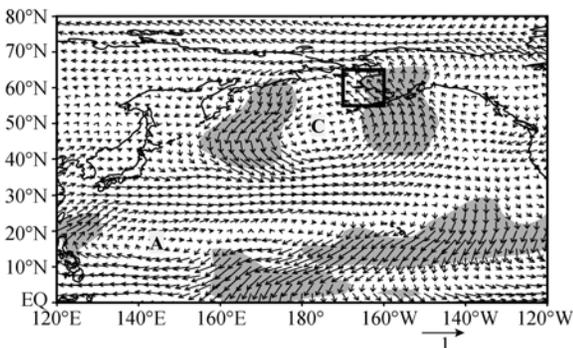


图4 MA HC与850 hPa风场的相关系数分布
阴影区表示HC与经向风的相关超过95%信度

流场和北太平洋地区的气旋异常流场。尤其值得注意的是，北太平洋东部盛行异常偏南气流，该支异常气流将中纬度暖空气输送到北美西海岸和白令海地区，造成这些地区气温升高。这点可以从HC与表面气温的相关分布(图5)得到证实。图5显示在北美西部和白令海地区为显著的正相关，当HC异常偏强时，白令海表面温度升高，不利于海冰的形成，因此白令海海冰减少，反之亦然。

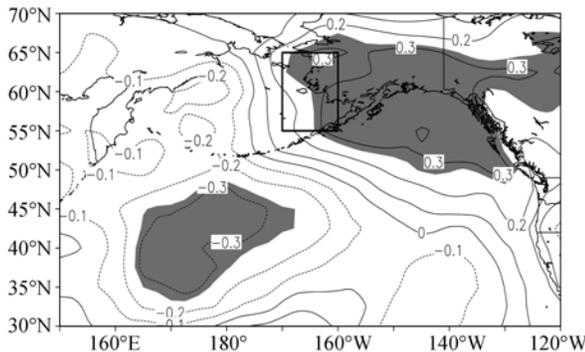


图5 MA HC与表面气温的相关系数分布
阴影区表示信度超过95%的区域

图6为170°~160°W纬向平均的气温、经向风和垂直速度分别投影到BSI与HC的回归系数分布。从图6(a)可以看到，与白令海海冰异常增加相联系的气温和风场变化表现为50°~80°N气温降低(降温中心位于60°N附近)，降温区从1000 hPa一直延伸到400 hPa。此外，白令海海域400 hPa以下各层面为一致的偏北气流，北风气流的热输送作用在白令海海冰形成过程中起着非常重要的作用。图6(b)揭示的与HC相联系的温度场和大气环流场的分布和图6(a)大致相反。当HC异常加强时，50°N以北区域为增温区(增温中心位于60°N附近)，而且40°~70°N为异常南风

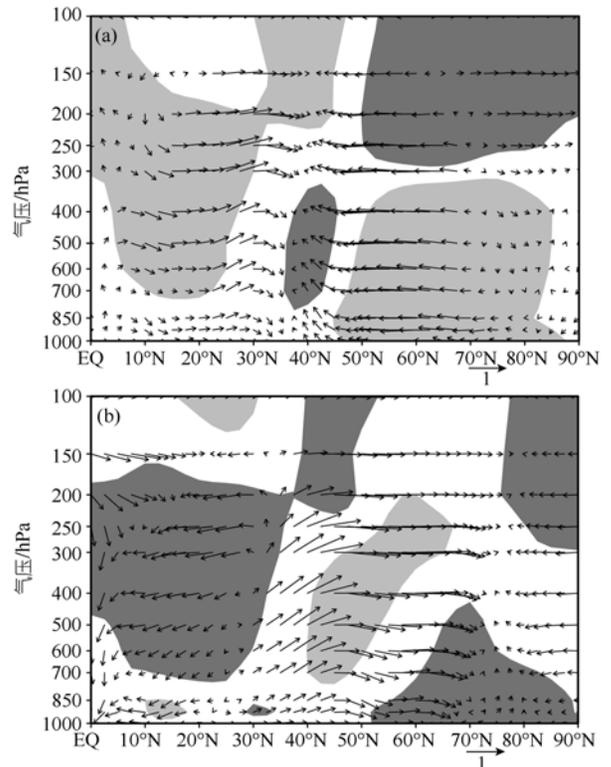


图6 170°~160°W纬向平均的气温(T)、经向风(v)和垂直速度(ω)投影到BSI(a)和HC(b)的回归系数分布
阴影表示 T ()，其中深(浅)阴影代表 T 值大于(小于)0.2 (-0.2) 的区域。矢量图表示 $v(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ 与 $\omega(10^{-4} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1})$

控制。即HC正位相时白令海上空的大气环流条件和热力条件不利于海冰形成，白令海海冰因而减少；反过来，在HC负位相时则正好相反。

上述的分析结果均证实HC与BSI之间的确存在反相关关系。那么HC是如何影响白令海地区大气环流异常的呢？图7给出了HC分别与1000和200 hPa散度的相关分布。结果表明，菲律宾以东的热带西太平洋地区，低层为显著的正相关，高层为显著的负相关。这意味着HC异常偏强时，菲律宾以东洋面低层大气异常辐散，高空大气异常辐合，该地区的对流活动受到抑制，反之亦然。菲律宾周围的对流活动异常可激发出异常的ANA遥相关波列 [28,29] (ANA遥相关波列在高度场上表现为：西太平洋为负变高，欧亚大陆东部为正变高，白令海附近为负变高，北美西海岸为正变高)。负ANA遥相关波列结构在HC与200 hPa位势高度的相关图(图略)上体现得十分清楚，自西太平洋，经欧亚大陆东部、白令海、北美西海岸到东太平洋分别为“+ - + - +”相关波列。ANA异常进一步影响北太平洋地区大气环流的变化。当ANA波列

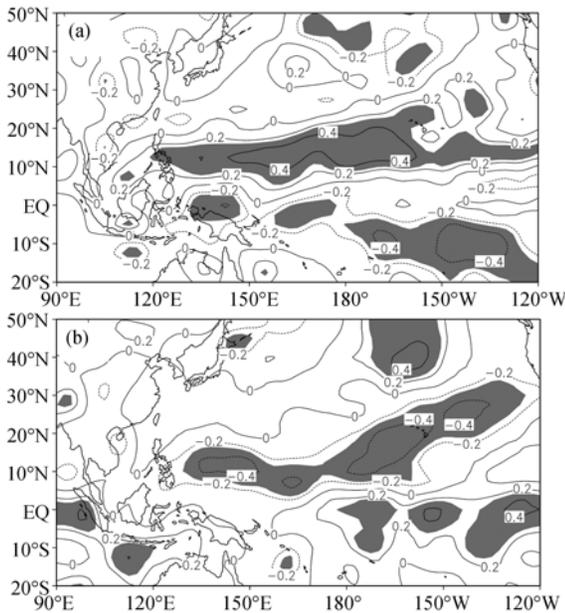


图 7 MA HC 与 1000 hPa (a) 和 200 hPa (b) 散度场的相关系数分布
阴影区表示信度超过 95% 的区域

位于正(负)位相时, 北美西海岸正(负)距平发展, 其北部负(正)距平发展, 南北气压梯度加大(减小), 急流和北太平洋风暴轴加强(减弱)并偏北(南)偏东(西), 进而影响白令海海冰形成。我们分析了 300 hPa 瞬变动能分别投影到 BSI 和 HC 的回归系数分布(图略)。瞬变动能与 BSI 的回归分布显示北太平洋地区存在东北-西南向分布的两条异常带, 北太平洋南部为负异常, 北部为正异常, 表明北太平洋风暴轴偏东偏北情形下, 白令海海冰偏多, 反之亦然。瞬变动能与 HC 的回归分布型与此基本相反, 北太平洋南部为正异常, 北部为负异常。下面分别计算了 ANA (指数按照文献 [29] 的定义) 与 HC 和 BSI 的相关系数。扣除线性趋势前后, ANA 与 HC 的相关系数分别为 -0.48 (超过 99% 信度) 和 -0.33 (通过 95% 信度), ANA 与 BSI 的相关系数分别为 0.43 (超过 99% 信度) 和 0.29 (通过 95% 信度)。因此, ANA 遥相关波列可能是联系 HC 与 BSI 负相关关系的一条关键纽带。强(弱) HC 可以引起 ANA 遥相关波列负(正)异常, 通过 ANA 遥相关波列影响到白令海地区大气环流变化, 从而导致白令海海冰减少(增多)。不过, 这只是其中的一种可能机制。Hadley 环流也可能直接通过影响中高纬基本气流和急流的变化影响白令海海冰异常, 而且还可能有其他途径联系 HC-BSI 的关系。

3 结论和讨论

本文研究了 3~4 月 Hadley 环流变化和白令海海冰异常之间的关系。结果表明, HC 与白令海海冰面积之间存在显著的反相关关系。在扣除线性趋势前后, 两者的相关系数分别为 -0.57 和 -0.28, 即 HC 偏强时, 白令海海冰减少。反之, HC 偏弱时, 白令海海冰增加。我们还普查了其他月份 HC 与 BSI 的关系, 发现 12~2 月的相关也很显著, 但扣除线性趋势后两者的相关并不是很明显, 这也是我们只分析 MA 时段的原因所在。为什么 3~4 月 Hadley 环流与 BSI 的关系最显著? 其原因还有待于进一步研究。

文章进一步分析了 HC 异常和白令海海冰变化联系背后的大尺度环流背景。在 HC 正位相年份, 阿留申低压中心位置偏西, 北太平洋东部盛行异常偏南气流, 从而由北太平洋中纬地区向白令海海域提供更多的暖空气输送, 白令海表面温度因此升高, 这些条件均不利于海冰的形成, 所以白令海海冰减少。反过来, HC 负位相年份时所对应的大气环流条件和热力条件则与 HC 正位相年时的情况相反, 这些条件有利于白令海海冰的生成, 白令海海冰因而增多。

研究还揭示, ANA 遥相关波列可能是 HC 和高纬大气环流以及白令海海冰之间联系的一个重要桥梁。当 HC 异常偏强时, 菲律宾以东洋面对流活动减弱, 激发出异常的 ANA 遥相关波列, 通过 ANA 遥相关波列影响到北太平洋高纬度地区大气环流异常, 进而导致白令海海冰面积减少。HC 异常偏弱时的情景则刚好相反。不过, 这只是 HC-BSI 联系的一种可能机制。事实上, Hadley 环流与白令海海冰变化之间的物理过程是十分复杂的, Hadley 环流有可能通过其他途径影响白令海海冰的变化。由于 Hadley 环流是全球纬向平均的经圈环流, 反映整个热带地区的平均环流状况。不同区域的局地经圈环流对 Hadley 环流的贡献是不一样的, 甚至相反。如 Huang 等人 [30] 指出与阻塞异常相联系的西太平洋地区和东太平洋地区的局地 Hadley 环流常常呈现反位相变化特征, 太平洋地区局地经圈环流的这种反位相变化可能影响海冰的分布。海洋-大气的相互作用可能是另一种影响途径。从 HC 与海温的相关分布(图 8) 可见, 在印度洋和赤道东太平洋地区为显著的正相关, 赤道西太平洋地区为显著的负相关, 而且在太平洋区域, 从低纬到高纬分别出现“- + - +”的相关波列。因此, Hadley 环流异常可以通过海气耦合作用影响太平洋海温变

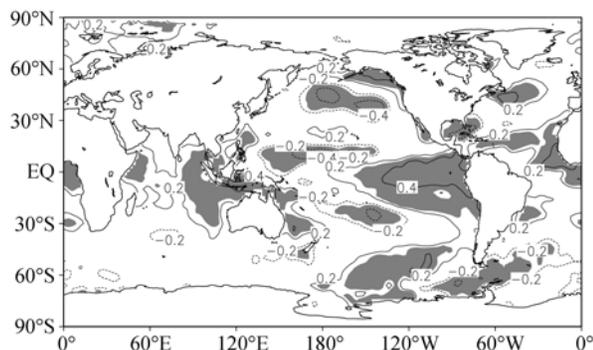


图8 MA HC与海表温度的相关分布
阴影区表示信度超过95%的区域

化, 而太平洋海温异常又可影响北太平洋上空的大气状况以及北太平洋风暴轴的强度和位置变化^[31,32], 从而导致白令海海冰异常. 不过, 其中的具体物理过程和动力机制还不是很清楚, 因此, 这些问题都有待进一步深入研究.

参 考 文 献

- 1 Agnew T. Simultaneous winter sea-ice and atmospheric circulation anomaly patterns. *Atmos-Ocean*, 1993, 31(2): 259—280
- 2 方之芳. 北半球副热带高压与北极海冰的相互作用. *科学通报*, 1986, 31(4): 286—289
- 3 杨修群, 黄土松. 外强迫引起的夏季大气环流异常及其机制讨论. *大气科学*, 1993, 17(6): 697—702
- 4 谢倩, 黄土松. 冬季赤道中东太平洋海温和北极海冰异常对大气环流影响的研究. *气象科学*, 1990, 10(4): 325—328
- 5 武炳义, 黄荣辉, 高登义. 冬季北极喀拉海、巴伦支海海冰变化对东亚冬季风的影响. *大气科学*, 1999, 23(3): 267—275
- 6 武炳义, 黄荣辉, 高登义. 与北大西洋接壤的北极海冰和年际气候变化. *科学通报*, 2000, 45(18): 1993—1997
- 7 方之芳, 高玉庄, 代民. 极地海冰对北太平洋副热带高压影响的可能途径. *海洋学报*, 1986, 8(5): 558—565
- 8 杨修群, 谢倩, 黄土松. 北极海冰异常对亚洲夏季风影响的数值模拟. *海洋学报*, 1994, 16(5): 34—40
- 9 Zhao P, Zhang X D, Zhou X J, et al. The sea ice extent anomaly in the north Pacific and its impact on the East Asian summer monsoon rainfall. *J Clim*, 2004, 17: 3434—3447[DOI]
- 10 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. *J Clim*, 2004, 17: 877—889[DOI]
- 11 Fang Z F, Wallace J M. Arctic sea ice variability on a timescale of weeks and its relation to atmospheric forcing. *J Clim*, 1994, 7: 1897—1914[DOI]
- 12 Overland J E, Pease C H. Cyclone climatology of the Bering Sea and its relation to sea ice extent. *Mon Wea Rev*, 1982, 110(1): 5—13[DOI]
- 13 Niebauer H J, Day R H. Cause of interannual variability in the sea ice cover of the eastern Bering Sea. *GeoJournal*, 1989, 18: 45—59[DOI]
- 14 Niebauer H J. Variability in Bering Sea ice cover as affected by a regime shift in the North Pacific in the period 1947—1996. *J Geophys Res*, 1998, 103(C12): 27717—27737[DOI]
- 15 Lau N C. Interactions between global SST anomalies and the mid-latitude atmospheric circulation. *Bull Am Meteorol Soc*, 1997, 78: 21—33[DOI]
- 16 Alexander M A, Blade I, Newman M, et al. The atmospheric bridge: The influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans. *J Clim*, 2002, 15: 2205—2231[DOI]
- 17 Yang H J, Liu Z Y. Tropical-extropical climate interaction as revealed in idealized coupled climate model experiments. *Clim Dyn*, 2005, 24: 863—879[DOI]
- 18 Oort A H, Peixoto J P. Global angular momentum and energy balance requirements from observations. *Adv Geophys*, 1983, 25: 355—490
- 19 吴国雄, Tibaldi S. 平均经圈环流在大气角动量和感热收支中的作用. *大气科学*, 1988, 12(1): 8—17
- 20 Hou A Y, Molod A. Modulation of dynamic heating in the winter extratropics associated with the cross-equatorial Hadley circulation. *J Atmos Sci*, 1995, 52(15): 2609—2626[DOI]
- 21 Hou A Y. Hadley circulation as a modulator of the extratropical climate. *J Atmos Sci*, 1998, 55(14): 2437—2457[DOI]
- 22 Zhou B T, Wang H J. Relationship between the boreal spring Hadley circulation and the summer precipitation in the Yangtze River valley. *J Geophys Res*, 2006, 111: D16109, doi:10.1029/2005JD007006[DOI]
- 23 Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J Geophys Res*, 2003, 108: 4407, 10.1029/2002JD002670[DOI]
- 24 Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Am Meteorol Soc*, 1996, 77: 437—471[DOI]
- 25 Oort A H, Yienger J J. Observed interannual variability in the Hadley circulation and its connection to ENSO. *J Clim*, 1996, 9: 2751—2767[DOI]
- 26 Luchin V A, Semiletov I P, Weller G E. Changes in the Bering Sea region: Atmosphere-ice-water system in the second half of the twentieth century. *Prog Oceanogr*, 2002, 55: 23—44[DOI]
- 27 Rodionov S N, Overland J E, Bond N A. The Aleutian Low and winter climatic conditions in the Bering Sea. Part I: Classification. *J Clim*, 2005, 18: 160—177[DOI]
- 28 Lau K M. East Asia summer monsoon rainfall variability and climate teleconnection. *J Meteor Soc Japan*, 1992, 70: 211—241
- 29 胡增臻, 黄荣辉. 冬季热带西太平洋对流活动异常的年际变化及其对北太平洋风暴轴的影响. *大气科学*, 1997, 21(5): 513—522
- 30 Huang F, Zhou F X, England M H. Atmospheric circulation associated with anomalous variations in North Pacific wintertime blocking. *Mon Wea Rev*, 2004, 132(5): 1049—1064[DOI]
- 31 Wang B, Wu R G, Li T. Atmosphere-Warm Ocean interaction and its impact on Asian-Australian Monsoon variation. *J Clim*, 2003, 16: 1195—1211[DOI]
- 32 Zhu W J, Sun Z B, Zhou B. The impact of Pacific SSTA on the interannual variability of Northern Pacific Storm Track during winter. *Adv Atmos Sci*, 2001, 18(5): 1029—1042