

20世纪80年代中期以来东亚冬季风年际变率的减弱及可能成因

贺圣平^{①②③}

① 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;

② 中国科学院气候变化研究中心, 北京 100029;

③ 中国科学院大学, 北京 100049

E-mail: hshp@mail.iap.ac.cn

2012-07-01 收稿, 2012-08-07 接受, 2012-12-14 网络版发表

国家自然科学基金(41130103)和国家重点基础研究发展计划(2009CB421406)资助

摘要 东亚冬季风的系统成员包括西伯利亚高压、阿留申低压、东亚大槽、对流层低层的偏北风以及高层的东亚急流. 分析结果表明, 自20世纪80年代中期以来, 上述东亚冬季风环流系统的年际变率均明显减小, 同时与西太平洋海表温度年际变率间的联系也显著减弱. 1956~1980年期间, 东亚冬季风的年际变率与东亚沿海(暖池)的冬季海表温度呈显著的负(正)相关关系. 然而, 上述统计相关在1986~2010年期间显著减弱. 研究显示, 自20世纪80年代中期以来, 北极涛动对东亚冬季风的年际变率主要起抑制作用. 此外, 全球变暖使得亚太地区冬季的海陆热力差异的变率在年代际和年际尺度上都有所减弱. 这两方面的因素都从一定程度上导致了东亚冬季风年际变率的减弱.

关键词

东亚冬季风
年际变率
海表温度
全球变暖

东亚冬季风是北半球冬季东亚地区最为显著的气候特征, 其强度的变化对东亚许多国家有着重要影响. 例如, 东亚冬季风偏强时, 经常有寒潮和暴雪席卷日本、韩国、朝鲜以及我国东北等地^[1-3], 同时也会给我国华南地区带来低温冷害天气^[4,5]. 有研究表明, 2008年1月发生在华南地区的冰冻灾害事件就与La Niña事件引起东亚冬季风环流异常有关^[6].

东亚冬季风一个最为显著的特征是西伯利亚冷高压, 其覆盖范围基本涵盖了整个欧亚大陆. 由于高压的辐散, 在西伯利亚高压东侧形成了一支强劲的西北风. 中国东部至日本一带的对流层中层为强大的东亚大槽所控制. 此外, 对流层高层盛行东亚急流, 急流最大值中心恰好位于日本南部上空. 众多研究表明上述系统的变化情况都能从一定程度上反映东亚冬季风的强度变化. 据不完全统计, 至今至少有18个东亚冬季风指数的定义(具体定义详见表1)是基

于上述系统, 例如利用气压^[7-13]、低层风场^[14-17]、东亚急流^[18,19]或者东亚大槽^[20,21]抑或基于多个系统的综合定义^[22-24]. 然而, 不管是采用何种定义, 东亚冬季风指数都会在20世纪80年代中期出现明显的年代际减弱特征^[24]. 东亚冬季风的年代际减弱会导致东亚冬季气温的升高以及寒潮频次的减少^[12,24,25]. 除了年代际变化, 东亚冬季风同样还存在年际变率. 近年来, 有不少研究关注了东亚冬季风年际变率及其驱动因子(例如北极涛动、厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)、哈德莱环流、南极涛动)^[26-29]. Wang等人^[30]指出, 由于东亚冬季风年际变率的减小以及印度洋-太平洋海表温度年际变率的改变, ENSO与东亚冬季风年际变率间的联系自20世纪70年代中期以来显著减弱. 在前人研究的基础上, 本文进一步揭示了自20世纪80年代中期以来东亚冬季风年际变率的减弱特征, 并试图阐述其中的可能机制.

引用格式: 贺圣平. 20世纪80年代中期以来东亚冬季风年际变率的减弱及可能成因. 科学通报, 2013, 58: 609-616

英文版见: He S P. Reduction of the East Asian winter monsoon interannual variability after the mid-1980s and possible cause. Chin Sci Bull, 2013, 58, doi: 10.1007/s11434-012-5468-5

表1 东亚冬季风指数的不同定义

指数	定义的变量, 层次, 区域	参考文献
I_{XJ}	$P_s^{b) norm c)}$, 1000 hPa, (30°~40°N, 100°~120°E)–(30°~40°N, 130°~140°E)	徐淑英和季劲钧 ^[7]
I_{GQY}	P_s 梯度, 1000 hPa, (10°~60°N, 110°~160°E)	郭其蕴 ^[8]
I_{SN}	P_s 梯度, 1000 hPa, (20°~50°N, 110°~160°E)	施能等人 ^[9]
I_{WW}	P_s^{norm} 梯度, 1000 hPa, (20°~70°N, 110°~160°E)	Wu 和 Wang ^[10]
I_{CL}	P_s^{norm} , 1000 hPa, (30°~55°N, 100°~120°E)–(30°~55°N, 150°~170°E)	Chan 和 Li ^[11]
I_{WHG}	P_s^{norm} 梯度, 1000 hPa, (40°~70°N, 110°~160°E)	Wang 等人 ^[12]
I_{GWZ}	P_s , 1000 hPa, (40°~60°N, 70°~120°E)	Gong 等人 ^[13]
$I_{LC}^* a)$	$v^d)$, 1000 hPa, (7.5°~20°N, 107.5°~120°E)	Lu 和 Chan ^[14]
I_{CS}^*	v , 1000 hPa, (15°~30°N, 115°~130°E)	陈隽和孙淑清 ^[15]
I_{CHH}^*	v , 10 m, (10°~25°N, 110°~130°E)+(25°~40°N, 120°~140°E)	Chen 等人 ^[16]
I_{HLK}	$-v$, 10 m, (15°~40°N, 115°~130°E)	Hu 等人 ^[17]
I_{YLK}^*	v , 850 hPa, (20°~40°N, 100°~140°E)	Yang 等人 ^[18]
I_{JL}	$u^e)$, 300 hPa, (27.5°~37.5°N, 110°~170°E)–(50°~60°N, 80°~140°E)	Jhun 和 Lee ^[19]
I_{SL}^*	$h^f)$, 500 hPa, (30°~45°N, 125°~145°E)	孙柏明和李崇银 ^[20]
I_{CS}^*	h^{norm} , 500 hPa, (35°~40°N, 110°~130°E)	崔晓鹏和孙照渤 ^[21]
I_{ZLK}^*	P_s^{norm} 梯度, 1000 hPa, (10°~50°N, 110°~160°E) ($u_{850}-u_{200}$) ^{norm} , (0°~10°N, 100°~130°E)	Zhu 等人 ^[22]
I_{YZY}	$T_s^g)$, 2 m, (20°~40°N, 110°~135°E) h , 500 hPa, (25°~40°N, 115°~140°E) P_s 梯度, 1000 hPa, (10°~50°N, 110°~160°E)	晏红明等人 ^[23]
I_{HW}	P_s , 1000 hPa, (40°~60°N, 80°~125°E) h , 500 hPa, (25°~45°N, 110°~145°E) u , 300 hPa, (25°~40°N, 80°~180°E)–(45°~60°N, 60°~160°E)	贺圣平和王会军 ^[24]

a) *, 在指数原始定义的基础上乘以-1, 从而高指数代表东亚冬季风偏强; b) P_s , 海平面气压; c) norm, 变量标准化; d) u , 纬向风; e) v , 经向风; f) h , 位势高度; g) T_s , 表面温度

1 资料

本文所用的资料包括: (1) NCEP/NCAR 全球再分析月平均资料^[31]; (2) NOAA 扩展重建的 V3b 版本月平均海表温度资料^[32]; (3) 北太平洋涛动指数定义为北太平洋(20°~80°N, 120°~120°W)海平面气压场经验正交展开所得的第一模态的时间系数^[33]; (4) 北极涛动指数取自 http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao.shtml. 为了强调年际变率, 文中涉及的变量均已去除线性趋势. 主要的研究时段为 1956~2010 年冬季, 文中冬季平均的定义为 12 月、1 月和 2 月.

2 东亚冬季风年际变率的减弱

18 个东亚冬季风指数的 23 年滑动标准差如图 1 所示, 即以 23 年的滑动窗口计算得到标准差随时间的演变特征. 可以看到, 无论指数的定义是基于何种

系统要素, 其 23 年滑动标准差都呈现为明显的减弱特征, 而且自 20 世纪 80 年代中期以来减弱特征尤为显著. 这就意味着, 随着东亚冬季风强度年代际减弱的发生, 其环流场的年际变率同样减小. 为了说明东亚冬季风年际变率的年代际减弱特征, 基于图 1 的分析, 我们选取了两个时期: 1956~1980 (P1) 和 1986~2010 (P2), 分别包含 25 年.

图 2 给出了 1986~2010 与 1956~1980 年期间, 东亚冬季风环流系统年际变率(以标准差表示)的差异 (P2-P1). 结果清楚地表明, 相对于 1956~1980 年, 西伯利亚高压和阿留申低压的年际变率在后一时期明显减弱(图 2(a)). 在 500 hPa 位势高度场上, 差异幅度大于 3 的负值区包括了西伯利亚、日本以及北太平洋等大部分地区(图 2(b)), 表明 1986~2010 年东亚大槽的年际变率明显小于前一时期. 东亚对流层高层 300 hPa 纬向风场显示, 年际变率差异较大的区域主要集中在东亚急流区(图 2(c)). 此外, 1986~2010 年期间东

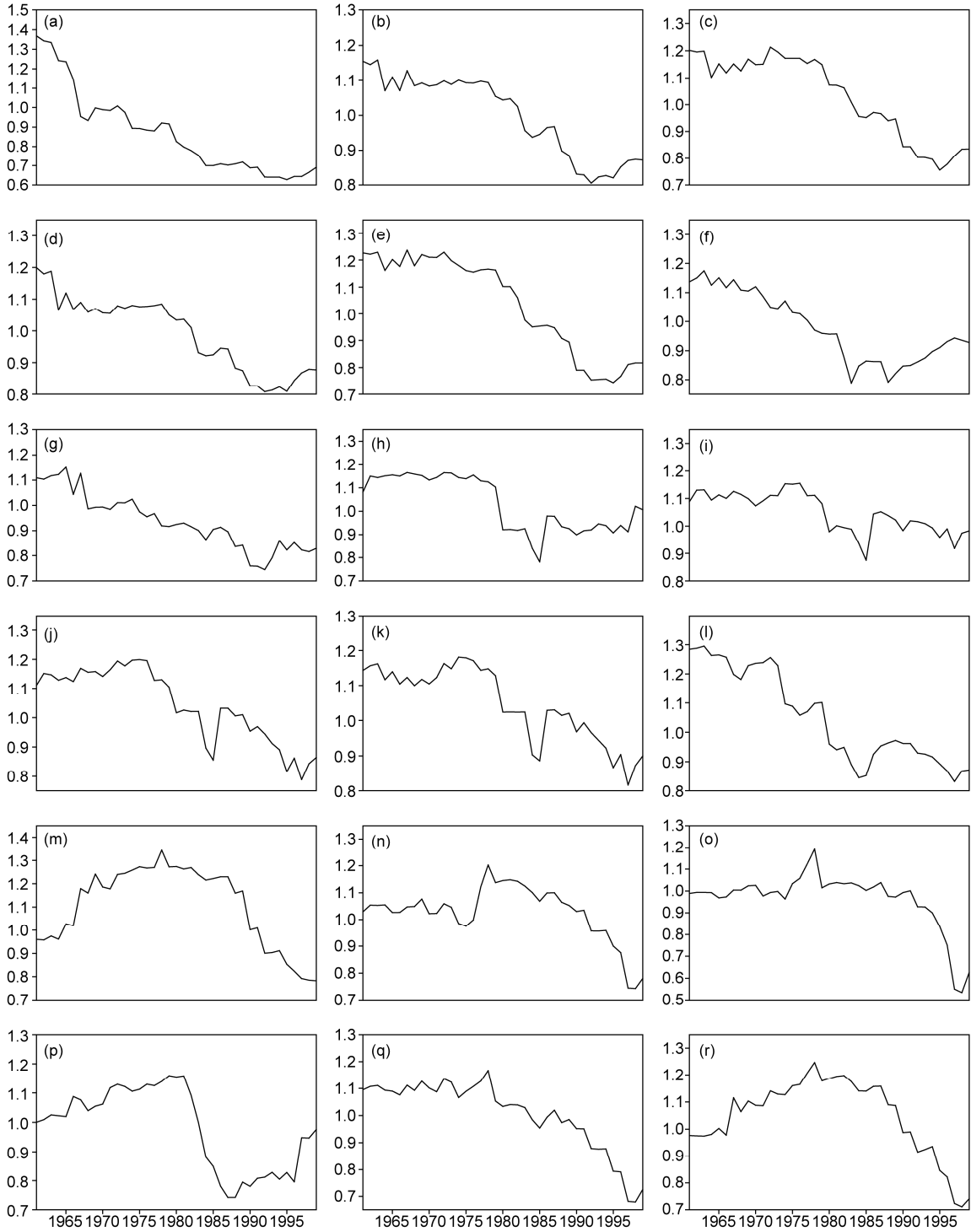


图 1 18 个东亚冬季风指数(表 1)的 23 年滑动标准差

亚地区 850 hPa 经向风的年际变率明显比 1956~1980 年期间幅度的小(图 2(d)). 上述分析基本明确了发生在 20 世纪 80 年代中期东亚冬季风年际变率减弱的

事实.

为了揭示年际关系是否也发生了显著变化, 我们分别给出了 1956~1980 和 1986~2010 年期间东亚冬

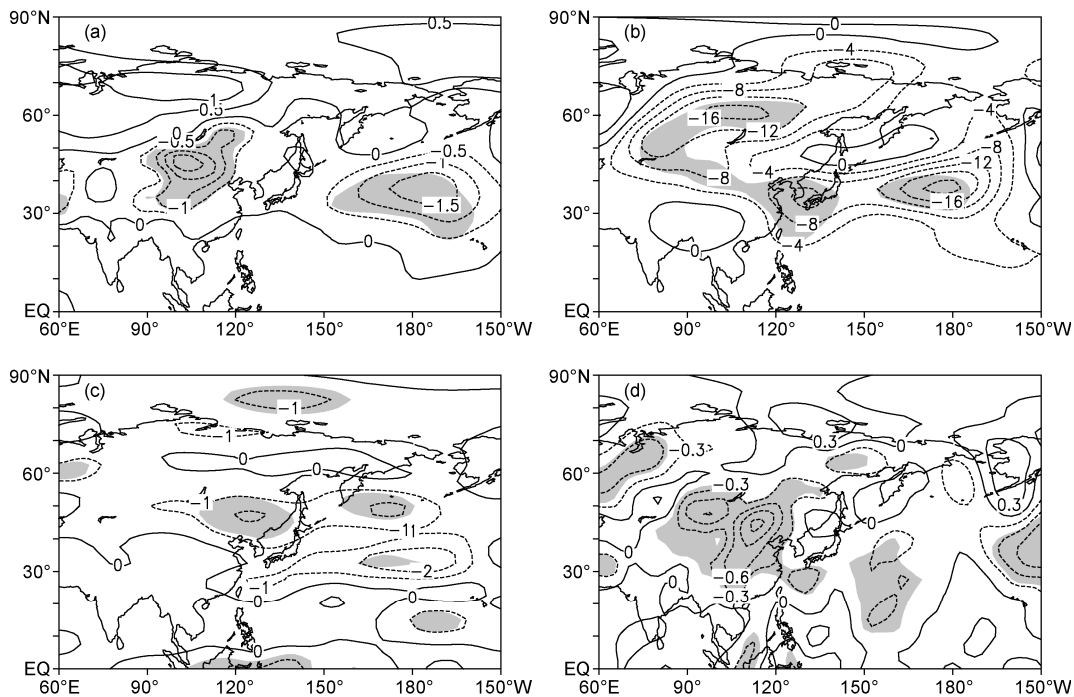


图2 冬季大气环流场年际变率的差异(P2 - P1)

(a) 海平面气压场; (b) 500 hPa 位势高度场; (c) 300 hPa 纬向风; (d) 850 hPa 经向风. 阴影区通过 95% 信度检验

季风指数(EAWMI)与西太平洋海表温度异常(SSTA)年际变率之间的相关系数分布图,如图3所示.东亚冬季风指数所选取的定义为500 hPa位势高度场在(25°~45°N, 110°~145°E)内的区域平均值^[24].由图3可以清楚地看出,随着东亚冬季风年际变率的减弱,两个时期的年际关系有着显著的不同.在1956~1980年期间,显著的负相关区主要分布在东亚的邻近海域,包括日本海、东海和南海等海域;同时,显著的正相关分布在暖池区(图3(a)).东亚冬季风与西太平洋海温间相关系数的上述分布型在前人的研究成果

中已有所体现^[34,35].然而,在1986~2010年期间,情形则完全不同,东亚冬季风与东亚临海海表温度年际变率间的负相关关系不再显著,与暖池海表温度年际变率间的显著正相关区域范围也明显缩小(图3(b)).显然,自20世纪80年代中期开始,东亚冬季风与西太平洋海表温度年际变率间的联系也明显减弱.

为进一步证实东亚冬季风与西太平洋海表温度年际变率间关系的时间演变特征,我们定义了3个海表温度异常指数,分别为南海(5°~25°N, 105°~120°E)、

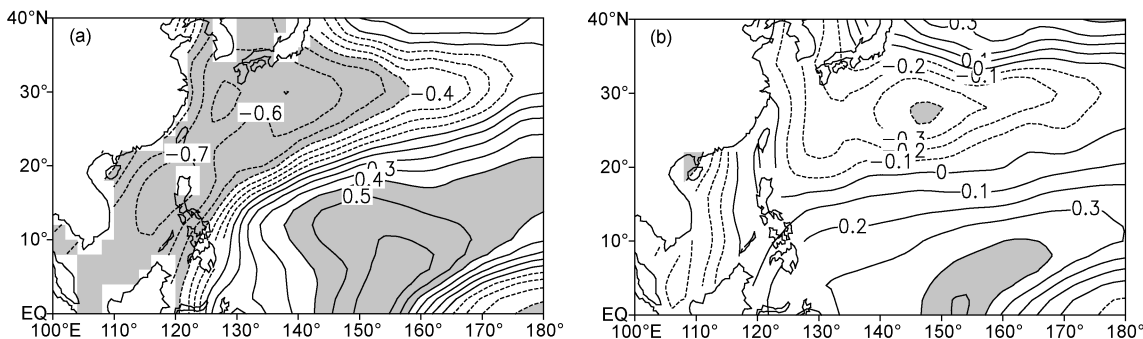


图3 东亚冬季风指数与西太平洋冬季 SSTA 的相关系数分布

(a) 1956~1980年; (b) 1986~2010年. 阴影区通过 95% 信度检验

黑潮区(10°~30°N, 120°~130°E)和暖池区(0~16°N, 140°~160°E) SSTA 的区域平均值, 记为 SCI, KCI 和 WPI. 图 4(a)~(c)分别为 SCI, KCI 和 WPI 与 EAWMI 的 23 年滑动相关系数. 结果与图 3 基本一致, 即在 20 世纪 80 年代以前, 东亚冬季风的年际变率与我国南海、黑潮区 SSTA 的年际变率呈显著的负相关, 与暖池 SSTA 则呈显著的正相关; 20 世纪 80 年代中期以后这些海域的相关系数则明显减小. 更多的证据则来自于 EAWMI 与上述 3 个 SSTA 指数间在不同时期

的具体相关系数. 1956~2010 年期间, EAWMI 与 SCI, KCI 和 WPI 的相关系数分别为-0.45, -0.46 和 0.34, 均能通过 99% 的信度检验, 看起来东亚冬季风与西太平洋海表温度间的年际关系还是比较紧密的. 然而, 如果我们分不同时期来考察它们之间的联系的话, 情形则完全不同. 例如, 在 1956~1980 年期间, EAWM 与西太平洋海温年际变率的变化非常一致, 其强度与 SCI, KCI 和 WPI 的相关系数分别为-0.69, -0.75 和 0.63; 到了 1986~2010 年期间, 则分别降至 -0.16, 0.01 和 0.29.

3 讨论

上文所揭示的东亚冬季风年际变率的改变令我们不禁思考两点: (1) 引起东亚冬季风年际变率的改变的因素是什么? (2) 为什么东亚冬季风与西太平洋海表温度间的年际关系在 1956~1980 年期间如此显著, 到了 1986~2010 年期间却迅速减弱呢?

第一个问题可能与北极涛动有关. 前人的研究表明, 冬季北极涛动与东亚冬季风有很好反位相变化关系^[36-38]. 事实上, 北极涛动自 20 世纪 80 年代中期以正位相为主, 使得东亚冬季风持续偏弱^[39]. 另外, 由图 5 我们可以看到, 北极涛动指数与东亚冬季风指数、北太平洋涛动指数间的相关系数在近 30 年变得更加显著. 这些观测事实表明, 北极涛动事件在 1986~2010 年期间对东亚冬季风的发展主要起抑制作用. 由于西伯利亚高压在联系北极涛动和东亚冬季风中的重要作用^[26], 随着西伯利亚高压年际变率的减小(图 1(g)), 东亚冬季风的年际变率也因此被抑制.

关于第一个问题, 另一个原因可能与全球变暖有关. 在全球变暖背景下, 大陆和海洋都有增温趋势^[40](图略). 由于海洋巨大的热容量, 西太平洋海表面温度的年际增温幅度小于东亚大陆的增温幅度. 因此, 海陆热力梯度减小, 从而导致东亚冬季风年际变率的减小. 为了证实海陆热力梯度的减小, 我们引入了一个海陆热力差异指数. 其定义为东亚大陆(20°~40°N, 105°~130°E)范围内表面温度的区域平均与西太平洋(10°~20°N, 105°~120°E 和 20°~36°N, 120°~150°E)范围内 SSTA 的区域平均值之差. 图 6 显示, 该海陆热力差异指数的年际变化(实线)和 23 年滑动标准差(实心点)在 80 年代中期都有明显的减弱过程. 这就表明, 最近几十年东亚大陆与西太平洋间的海陆热力差异的年际变率确实是减小了, 这也很可能

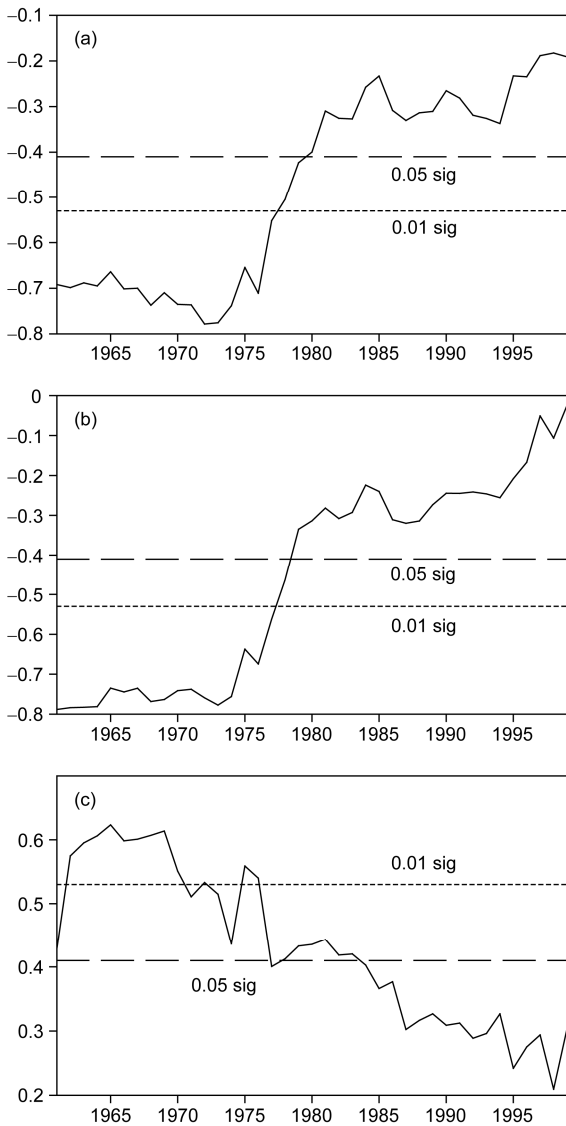


图 4 东亚冬季风指数与西太平洋不同海域 SSTA 指数间的 23 年滑动相关系数
 (a) SCI; (b) KCI; (c) WPI. 水平长、短虚线分别代表 95% 和 99% 信度检验的临界值

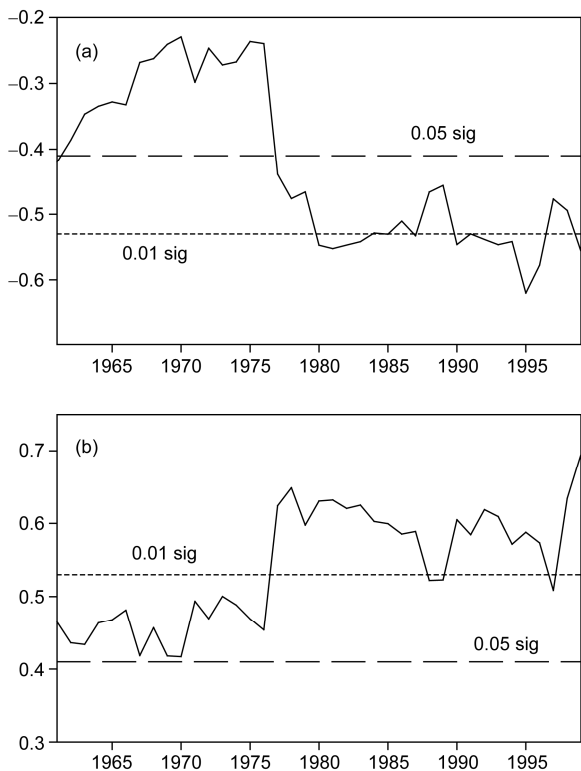


图5 北极涛动指数与冬季风大气环流指数间的23年滑动相关系数

(a) 东亚冬季风指数; (b) 北太平洋涛动指数. 水平长、短虚线分别代表95%和99%信度检验的临界值

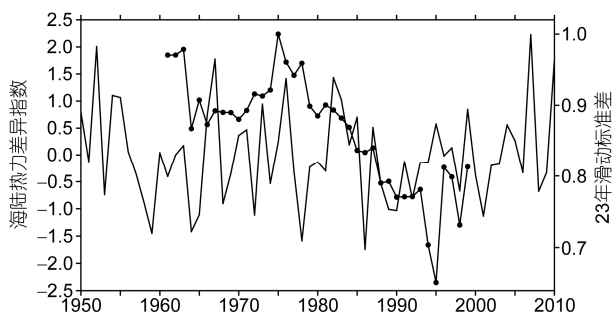


图6 1950~2010年期间海陆热力差异指数的年际变化(实线)及其23年滑动标准差(实心点)

导致东亚冬季风年际变率的减小.

图7显示的是EAWMI与10 m 涡度场的相关系数分布. 在1956~1980年期间, 显著的负相关分布在华东及其邻近海域、暖池西部, 同时显著的正相关分布菲律宾以东地区(图7(a)). 这种相关分布表明, 当东亚冬季风偏强时, 在华东地区和暖池西部分别盛行东北风和西南风. 然而, 在1986~2010年期间, 东

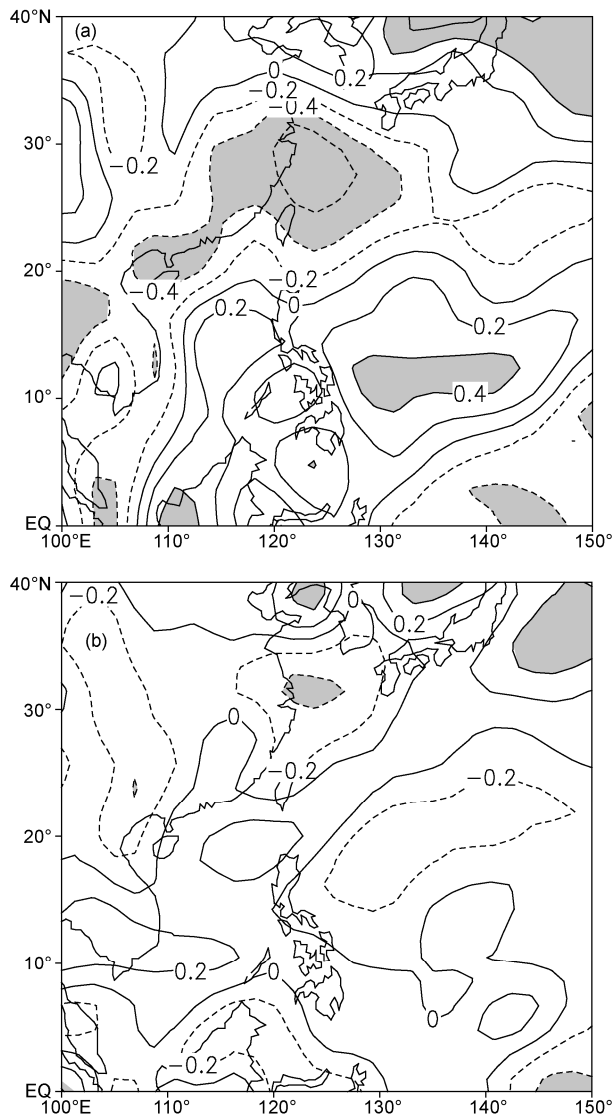


图7 东亚冬季风指数与10 m 涡度场的相关系数分布 (a) 1956~1980年; (b) 1986~2010年. 阴影区通过95%信度检验

亚冬季风与华东地区、菲律宾以东的涡度场的联系几近中断(图7(b)), 从而使得东亚冬季风与西太平洋SSTA年际变率间联系的减弱.

4 结论

本文的分析结果表明, 现有的大部分东亚冬季风指数的年际变率自20世纪80年代中期以来有一个明显的减弱过程, 与东亚冬季风的年代际减弱几乎同时发生. 同时, 与东亚冬季风有关的大气环流系统也出现了类似明显的变化. 与1956~1980年相比, 1986~2010年期间西伯利亚高压和阿留申低压的年

际变率明显减弱. 并且, 东亚大槽、东亚急流以及 850 hPa 经向风在 1986~2010 年期间的年际变率也明显较前期小. 上述观测事实表明, 最近 20 多年内东亚冬季风的年际变率已经减弱. 本文还揭示了自 20 世纪 80 年代以来东亚冬季风与西太平洋 SSTA 间年际关系减弱的现象. 在 1956~1980 年期间, 显著的负相关区位于日本海至南海一带及其邻近海域, 同时在暖池西部分布有显著的正相关. 然而在 1986~2010 年期间, 上述相关系数的数值以及覆盖范围大幅减小.

深入的分析表明, 最近 30 年北极涛动与东亚冬季风年际变率间的联系明显增强. 由于北极涛动自 20 世纪 80 年代以来冬季以正位相为主, 从而抑制了

东亚冬季风的发展. 随着连接北极涛动和东亚冬季风的重要纽带——西伯利亚高压^[26]年际变率的减弱, 北极涛动很可能导致了东亚冬季风年际变率的减弱. 引起上述变化的另一个因素则很可能与全球变暖有关. 在全球变暖背景下, 东亚大陆的增温幅度明显大于西太平洋的增温幅度, 从而导致海陆热力差异变率(包括年代际尺度和年际尺度)减弱. 需要指出的是, 如果将分析过程中 EAWMI 的定义替换为东亚冬季风综合指数^[24], 同样可以得到类似的结果. 未来的研究可以更多地关注冬季与东亚冬季风有关的极端气候事件的长期变化趋势^[41]及其与北极气候变化的联系.

致谢 感谢中国科学院大气物理研究所王会军研究员对本工作的悉心指导.

参考文献

- Huang R H, Chen J L, Huang G. Characteristics and variations of the East Asian monsoon system and its impacts on climate disasters in China. *Adv Atmos Sci*, 2007, 24: 993–1023
- Wang H J, Yu E T, Yang S. An exceptionally heavy snowfall in Northeast China: Large-scale circulation anomalies and hindcast of the NCAR WRF model. *Meteorol Atmos Phys*, 2011, 113: 11–25
- Wang H J, Sun J Q. Variability of northeast China river break-up date. *Adv Atmos Sci*, 2009, 26: 701–706
- Sun J Q, Wang H J, Yuan W, et al. Spatial-temporal features of intense snowfall events in China and their possible change. *J Geophys Res*, 2010, 115: D16110
- Li F, Wang H J. Predictability of the East Asian winter monsoon interannual variability as indicated by the DEMETER CGCMS. *Adv Atmos Sci*, 2012, 29: 441–454
- 付建建, 李双林, 王彦明. 前期海洋热状况异常影响 2008 年 1 月雪灾形成的初步研究. *气候与环境研究*, 2008, 13: 478–490
- 徐淑英, 季劲钧. 我国冬季风来临的天气气候学研究. *地理期刊*, 1965, 9: 85–101
- 郭其蕴. 东亚冬季风的变化与中国气温异常的关系. *应用气象学报*, 1994, 5: 218–225
- 施能, 鲁建军, 朱乾根. 东亚冬、夏季风百年强度指数及其气候变化. *南京气象学报*, 1996, 19: 168–177
- Wu B Y, Wang J. Winter Arctic Oscillation, Siberian high and East Asian winter monsoon. *Geophys Res Lett*, 2002, 29, doi: 10.1029/2002GL015373
- Chan J C L, Li C Y. The East Asian monsoon. In: Chang C P, ed. *East Asian Monsoon*. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2004. 54–106
- Wang L, Huang R H, Gu L, et al. Interdecadal variations of the East Asian winter monsoon and their association with quasi-stationary planetary wave activity. *J Clim*, 2009, 22: 4860–4872
- Gong D Y, Wang S W, Zhu J H. East Asian winter monsoon and Arctic Oscillation. *Geophys Res Lett*, 2001, 28: 2073–2076
- Lu E, Chan J C L. A unified monsoon index for South China. *J Clim*, 1999, 12: 2375–2385
- 陈隽, 孙淑清. 东亚冬季风异常与全球大气环流变化 I. 强弱冬季风影响的对比研究. *大气科学*, 1999, 23: 101–111
- Chen W, Graf H F, Huang R H. The interannual variability of East Asian winter monsoon and its relation to the summer monsoon. *Adv Atmos Sci*, 2000, 17: 48–60
- Hu Z Z, Lennart B, Arpe K. Impact of global warming on the Asian winter monsoon in a coupled GCM. *J Geophys Res*, 2000, 105: 4607–4624
- Yang S, Lau K M, Kim K M. Variations of the East Asian jet stream and Asian-Pacific-American winter climate anomalies. *J Clim*, 2002, 15: 306–325
- Jhun J G, Lee E J. A new East Asian winter monsoon index and associated characteristics of the winter monsoon. *J Clim*, 2004, 11: 711–726

- 20 孙柏民, 李崇银. 冬季东亚大槽的扰动与热带对流活动的关系. 科学通报, 1997, 42: 500–503
- 21 崔晓鹏, 孙照渤. 东亚冬季风强度指数及其变化分析. 南京气象学报, 1999, 22: 321–325
- 22 Zhu C W, Lee W S, Kang H W, et al. A proper monsoon index for seasonal and interannual variations of the East Asian monsoon. *Geophys Res Lett*, 2005, 32, doi: 10.1029/2004GL021295
- 23 晏红明, 周文, 杨辉, 等. 东亚冬季风指数的定义及其年际年代际异常. 大气科学学报, 2009, 32: 367–376
- 24 贺圣平, 王会军. 东亚冬季风综合指数及其表达的东亚冬季风年际变化特征. 大气科学, 2012, 36: 523–538
- 25 Chang C, Wang Z, Hendon H. The Asian winter monsoon. In: Wang B, ed. *The Asian Monsoon*. Berlin: Springer-Verlag, 2006. 89–127
- 26 Gong D Y, Wang S W, Zhu J H. East Asian winter monsoon and Arctic Oscillation. *Geophys Res Lett*, 2001, 28: 2073–2076
- 27 Wang B, Wu R, Fu X. Pacific-east Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? *J Clim*, 2000, 13: 1517–1536
- 28 Zhou B T, Wang H J. Interdecadal change in the connection between Hadley circulation and winter temperature in East Asia. *Adv Atmos Sci*, 2008, 25: 24–30
- 29 范可, 王会军. 南极涛动的年际变化及其对东亚冬春季气候的影响. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36: 385–391
- 30 王会军, 贺圣平. ENSO 和东亚冬季风之关系在 20 世纪 70 年代中期之后的减弱. 科学通报, 2012, 57: 1713–1718
- 31 Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Amer Meteorol Soc*, 1996, 77: 437–471
- 32 Smith T M, Reynolds R W, Peterson T C, et al. Improvements to NOAA’s historical merged land-ocean surface temperature analysis (1880–2006). *J Clim*, 2008, 21: 2283–2296
- 33 Linkin M E, Nigam S. The North Pacific Oscillation-west Pacific teleconnection pattern: Mature-phase structure and winter impacts. *J Clim*, 2008, 21: 1979–1997
- 34 秦正坤, 孙照渤. 冬季风异常对西北太平洋海温影响的区域性特征. 大气科学, 2006, 30: 257–267
- 35 李崇银, 穆明权. 东亚冬季风-暖池状况-ENSO 循环关系. 科学通报, 2000, 45: 678–685
- 36 武炳义, 黄荣辉. 冬季北大西洋涛动极端异常变化与东亚冬季风. 大气科学, 1999, 23: 641–651
- 37 Liu J P, Curry J A, Wang H J, et al. Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2012, 109: 6781–6783
- 38 孙建奇, 王会军. 北极涛动与北太平洋年代际振荡的关系. 科学通报, 2005, 50: 1648–1653
- 39 武炳义, 卞林根, 张人禾. 冬季北极涛动和北极海冰变化对东亚气候变化的影响. 极地研究, 2004, 16: 211–220
- 40 Wang H J, Zhang Y. Model Projections of East Asian summer climate under the “Free Arctic” scenario. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 2012, 3: 176–180
- 41 Wang H J, Sun J Q, Chen H P, et al. Extreme climate in China: Facts, simulation and projection. *Meteorol Z*, 2012, doi: 10.1127/0941-2948/2012/0330