

周群, 陈文. 2014. 太阳活动 11 年周期对东亚冬季风与随后东亚夏季风关系的影响及其过程 [J]. 气候与环境研究, 19 (4): 486–496, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13011. Zhou Qun, Chen Wen. 2014. Impact of the 11-year solar cycle on the relationship between the East Asian winter monsoon and the following summer monsoon and the related processes [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (4): 486–496.

太阳活动 11 年周期对东亚冬季风与随后东亚夏季风关系的影响及其过程

周群^{1,2} 陈文¹

¹ 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100190

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 利用长时间再分析资料和台站观测资料以及反映太阳周期活动的太阳黑子数资料, 研究了太阳活动 11 年周期对东亚冬季风与随后夏季风关系的影响和过程。结果表明, 弱 (强) 的东亚冬季风后的次年春、夏季在西北太平洋上空往往出现反气旋 (气旋) 式环流异常。通过将东亚冬季风指数分解为与 ENSO 有关的部分以及与 ENSO 无关的部分, 进一步证实东亚冬、夏季风之间的联系主要来自于与 ENSO 有关的东亚冬季风异常。在此基础上着重分析了太阳活动对东亚冬、夏季风关系的影响和过程。研究表明, 太阳活动显著影响了东亚冬季风与 ENSO 的关系, 在太阳活动偏低年 ENSO 与东亚冬季风的关系更为密切。并且, 对应与 ENSO 有关的东亚冬季风异常, 当太阳活动偏低 (LS) 时西北太平洋附近的异常反气旋明显增强, 范围扩大, 其西北侧的西南气流强度增强并向北延伸, 从而使春季多雨地区绵延到内蒙古乃至西北地区; 而夏季降水主要集中在长江流域中游, 表明是一个强的夏季风年。然而, 在太阳活动偏高 (HS) 年的次年春、夏季, 不论是环流异常还是降水场的异常都明显偏弱。这说明东亚冬季风与随后夏季风的关系在 LS 年要比 HS 年更紧密。对海温异常的分析则进一步表明, LS (HS) 年从冬至夏季与 ENSO 有关的东亚冬季风异常相联系的印度洋及热带西太平洋海温正相关范围明显偏大 (小); 而赤道东太平洋的显著正海温异常衰减迅速 (缓慢)。上述海温异常的差异是西北太平洋反气旋能否从冬季持续到夏季的重要原因, 并可以很好地解释太阳活动对东亚冬、夏季风关系的影响。

关键词 东亚冬季风 太阳活动 西北太平洋反气旋 东亚夏季风

文章编号 1006-9585 (2014) 04-0486-11

中图分类号 P461⁺.1

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13011

Impact of the 11-Year Solar Cycle on the Relationship between the East Asian Winter Monsoon and the Following Summer Monsoon and the Related Processes

ZHOU Qun^{1,2} and CHEN Wen¹

¹ Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Based on the long-term reanalysis and observational dataset as well as the sunspot number index, the influence of the 11-year solar cycle on the relationship between the East Asian winter monsoon (EAWM) and the following summer monsoon (EASM) are investigated. It is found that a weak (strong) EAWM corresponds to an

收稿日期 2013-01-16 收到, 2013-03-19 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2010CB428603, 国家自然科学基金项目 41025017、41230527

作者简介 周群, 女, 1986 年出生, 博士研究生, 主要从事气候动力学及平流层和对流层相互作用方面的研究。E-mail: zhouqun1224@163.com

通讯作者 陈文, E-mail: chenw@mail.iap.ac.cn

anomalous anticyclone (cyclone) over the western North Pacific (WNP), which can persist from winter into the following summer. By dividing the EAWM index (EAWMI) into an ENSO-related part (EAWMI-EN) and an ENSO-unrelated part (EAWMI-res), the authors demonstrate that such an EAWM-EASM link comes mainly from the EAWMI-EN part. Further examinations indicate that the EAWM-ENSO relationship depends on the solar cycle with more robust relationship in the low solar activity (LS) categories. Moreover, during positive EAWMI-EN phases, the WNP anticyclonic anomalies are enhanced when solar activity is low and the enhanced southwesterly to its northwest flank extends more northward. Hence, the regions with above-normal rainfall stretch to the Inner Mongolia and Northwest China in the spring, and a notable wet center is located in the middle reaches of the Yangtze River in the summer, which indicates a strong EASM years. However, in the high solar activity (HS) years, both the circulation and the rainfall anomalies are much weaker. There tends to be a much stronger EASM after a weak EAWM-EN during the LS phases than during the HS phases. The analysis of the sea surface temperature (SST) anomalies demonstrates that in LS (HS) years the ranges of positive correlation covering the Indian Ocean and the western tropical Pacific are larger (smaller) while the decaying of the SST anomalies in the eastern equatorial Pacific is rapid (slow) from the winter to the following summer. These SST anomalies contribute to differences in the persistence of the WNP anticyclone, and thus explain why a closer EAWM-EASM relationship is established during LS years than HS years.

Keywords East Asian winter monsoon (EAWM), Solar activity, Western North Pacific (WNP) anticyclone, East Asian summer monsoon (EASM)

1 引言

东亚位于欧亚大陆东岸, 东临太平洋, 西靠青藏高原。海陆热力差异显著, 加上高原的动力、热力作用, 使得东亚地区成为全球最大的季风区之一。在夏季, 东亚盛行偏南风并带来大量降水, 而冬季盛行偏北风并带来寒冷而干燥的天气。由于季风的异常引起的旱涝、冰冻雨雪灾害等, 对东亚地区的经济、工农业生产和人民生活造成严重影响 (Tao and Chen, 1987; Ding, 1994; Huang et al., 2003; Chen et al., 2009; Feng et al., 2010)。东亚冬、夏季风都是全球气候系统的重要组成部分, 且都有明显的年际变化和年代际变化。一些研究表明, 东亚冬季风 (East Asian winter monsoon, EAWM) 和东亚夏季风 (East Asian summer monsoon, EASM) 异常之间存在相互联系。Sun and Sun (1994) 首先分析了夏季江淮流域的旱年和涝年的前冬的大气环流异常, 揭示出 EASM 与前冬 EAWM 之间的联系。Chen et al. (2000) 则通过分析东亚冬季风的年际变化, 发现弱的 EAWM 后的夏季, 西太平洋副高往往偏南, 造成长江中游、华北降水偏多而淮河流域降水偏少; 而强的 EAWM 后的夏季情况大致相反。陈文 (2002) 的研究进一步指出, 与 ENSO 事件相联系的海温异常演变导致了东亚冬、夏季风密切相关; 相反, 若东亚冬季风异常不是由 ENSO 事件所引起时, 东亚冬、夏季风之间就没有显著的

联系。最近的研究 (Chen et al., 2013) 通过将 EAWM 分为与 ENSO 有关的部分和与 ENSO 无关的部分, 进一步证实了 ENSO 在东亚冬、夏季风循环中扮演着不可或缺的角色, 而且异常的西北太平洋 (western North Pacific, WNP) 反气旋 (气旋) 环流是联系东亚冬季风与之后的夏季风的关键因子。

分别对东亚夏季风和东亚冬季风的研究也发现, 它们都有明显的年代际变化 (周连童和黄荣辉, 2003; Zhou et al., 2006; Wang et al., 2009)。Wang et al. (2008) 讨论了北太平洋海温年代际振荡 (Pacific Decadal Oscillation, PDO) 对 ENSO 与东亚冬季风的关系的调制作用, 发现 ENSO 与东亚冬季风之间的显著关系只在 PDO 低位相时成立。最近的研究发现, 与 ENSO 有关的东亚冬、夏季风循环也受到 PDO 的调制, 西北太平洋反气旋 (气旋) 环流的结构以及东亚夏季风降水的异常在 PDO 的不同位相表现不同 (Chen et al., 2013)。

众所周知, 太阳辐射是大气和海洋运动的基本能量来源。观测研究发现太阳活动存在比较规律的 11 年周期变化, 太阳活动引起辐射强度的任何微小变化都会对天气、气候产生重要影响 (Rind, 2002; 李崇银等, 2003; 段长春, 2008; Rind et al., 2008; Zhao et al., 2012)。研究 (Meehl et al., 2003, 2008, 2009; van Loon et al., 2004, 2007; van Loon and Meehl, 2008) 表明, 在太阳活动峰值年, 副热带少云地区吸收到更多的太阳辐射, 加剧海面上

空的蒸发,更多的水汽随信风到达赤道地区辐合上升,加强经向的 Hadley 环流,其在副热带地区的下沉支增强,造成副热带地区云量持续减少,形成正反馈。与此同时,加强的信风使得赤道东太平洋地区更多的冷水上翻,冷舌出现西移,纬向 Walker 环流也发生改变,即在太阳活动峰值年会出现类 La Niña (Like La Niña) 事件的地表气候响应。Kodera (2004) 和 Kodera et al. (2007) 也提出太阳活动可以通过影响热带 Walker 环流以及与之相联系的印度季风,在一定程度上调制 ENSO 循环。对与 ENSO 相联系的海温异常季节演变的详细分析则表明,太阳活动偏低 (Low Solar, LS) 年 ENSO 发展期各阶段赤道东太平洋以及热带西太平洋的海温异常的强度和范围都偏大,且赤道东太平洋的正相关在次年春、夏季衰减迅速,此时 ENSO 和东亚冬季风关系显著,冬季东南亚有显著的降水异常;相反,太阳活动偏高 (High Solar, HS) 年与 ENSO 相联系的海温异常以及东亚冬季风异常都偏弱(周群和陈文, 2012; Zhou et al., 2013)。既然太阳活动 11 年周期可以影响 ENSO 与东亚冬季风之间的关系,而与 ENSO 事件有关的海温异常会导致东亚冬、夏季风的密切联系,那么太阳活动 11 年周期是否会在东亚冬、夏季风循环之间起到一定调制作用就成为一个亟待研究的问题。

为此,本文将首先利用长期的大气环流和降水资料分析东亚冬、夏季风之间的联系,在此基础上根据太阳活动高、低位相进行分类,进一步讨论东亚冬季风对随后夏季风的年代际影响以及其中的物理过程。

2 资料与方法

本文所使用的数据资料包括: 1) 欧洲中期数值预报中心(ECMWF)提供的自 1957 年 9 月至 2002 年 8 月逐月平均的再分析资料 ERA-40。2) NCEP/NCAR 的再分析资料 (Kalnay et al., 1996), 其水平分辨率是 2.5° (纬度) $\times 2.5^{\circ}$ (经度)。3) 中国气象局提供的中国 160 个台站的月平均降水资料,资料时段为 1951 年 1 月至 2011 年 12 月。4) 英国气象局哈德莱中心的海温数据集 HadISST, 水平分辨率为 1° (纬度) $\times 1^{\circ}$ (经度)。由于在 20 世纪 70 年代以前, NCEP/NCAR 再分析资料在东亚地区存

在一定误差 (Wu et al., 2005), 本文将使用 ERA-40 再分析资料续接 NCEP/NCAR 再分析资料, 也即自 2002 年 8 月之后续接 NCEP/NCAR 再分析资料, 用来描述和计算各个季节大气环流的异常情况。这一方面是由于 ERA-40 再分析资料的起止时段为 1957 年 9 月至 2002 年 8 月, 长度不是很长; 另一方面, 考虑到在 1979 年后的两套再分析资料差别非常少, 因此在 ERA-40 再分析资料之后续接 NCEP/NCAR 再分析资料, 这样就可以有较长时间的资料针对太阳活动 11 年周期加以分析。

本文选取 Chen et al. (2000) 定义的东亚冬季风指数 (East Asian winter monsoon index, EAWMI) 来表征东亚冬季风的强弱, 即采用中国东海 ($25^{\circ}\text{N}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$) 和中国南海 ($10^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 130^{\circ}\text{E}$) 的 10 m 高度从 11 月到次年 3 月 (NDJFM) 的平均标准化经向风距平。这个指数和东亚 500 hPa 高度场有很好的相关, 利用这个指数可以很好地描述东亚冬季风的变化 (Wang and Chen, 2010)。从图 1a 可以清楚地看到 EAWMI 的年际变化是非常明显的, 且若指数为负, 则表示为北风异常, 代表 EAWMI 偏强。为了考察 ENSO 在东亚冬、夏季风循环过程中的作用, 参照 Chen et al. (2013) 的方法将 EAWMI 线性回归到同期 Niño 3 区域 ($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$, $150^{\circ}\text{W}\sim 90^{\circ}\text{W}$) 的平均海温异常, 得到与 ENSO 有关 (EAWMI-EN) 的部分, 再用总的 EAWMI 减去 EAWMI-EN 得到与 ENSO 无关 (EAWMI-res) 的部分 (见图 1b 和 1c)。另外, 利用 NDJFM 平均的太阳黑子数数据作为描述太阳活动的表征指数 (见图 2)。因为一个较小的太阳活动周期的峰值也不及最大的周期的平均值, 故而我们选取每个太阳活动周期的 4 个最大/小年作为太阳活动偏高 (HS)/低 (LS) 年。这里 1957 代表 1957/1958 年冬季, 其余类推。通过计算各序列的方差发现, EAWMI-EN 和 EAWMI-res 对 EAWMI 方差贡献率分别为 63.5% 和 36.5%。进一步分别计算太阳活动高低不同位相下 EAWMI-EN 对 EAWMI 的方差贡献, 发现在 HS 年仅为 43.6%, 而 LS 年高达 70.3%。由此可知, 太阳活动偏低年 ENSO 事件对东亚冬季风的方差贡献更大。

本文选用 1957/1958~2010/2011 年共计 54 年的资料进行统计分析, 采用的方法主要是线性回归和相关分析, 并利用 t 检验来验证其显著性。季节的划分按惯例将 12 月和次年 1、2 月为冬季, 3~5

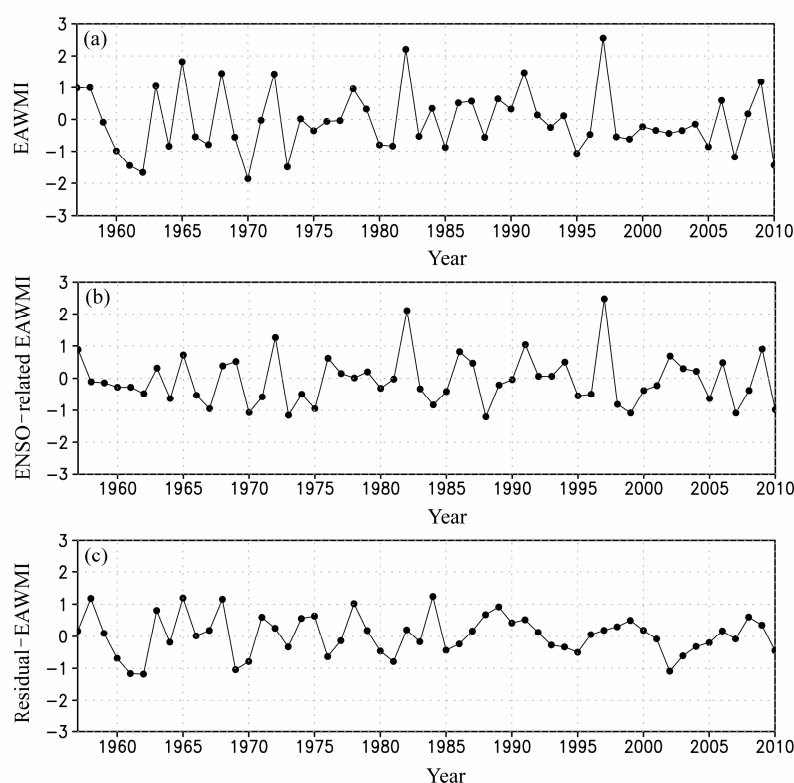


图1 1957/1958~2010/2011 年(a)标准化的东亚冬季风指数(EAWMI)、(b)与 ENSO 有关的部分(EAWMI-EN)、(c)与 ENSO 无关的部分(EAWMI-res) 的年际变化

Fig. 1 The time series of (a) the normalized East Asian winter monsoon index (EAWMI), (b) the ENSO-related part, and (c) the ENSO-unrelated part of the EAWMI for the period of 1957/1958–2010/2011

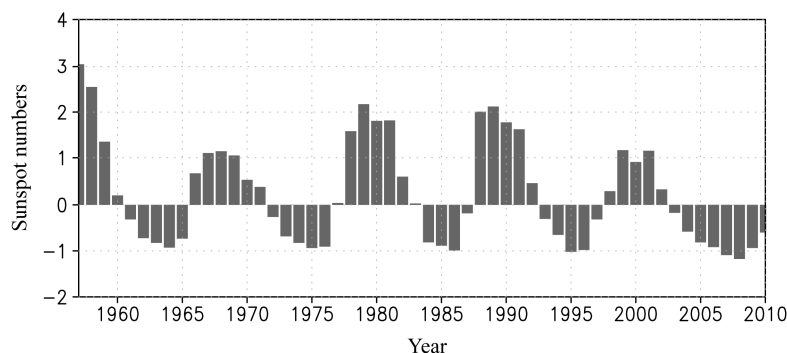


图2 1957/1958~2010/2011 年标准化的 11 月至次年 3 月平均的太阳黑子数年际变化序列

Fig. 2 Standardized time series of the mean sunspot numbers from Nov to next Mar (NDJFM) during 1957/1958–2010/2011

月作为春季，6~8 月为夏季。

3 东亚冬季风与之后东亚夏季风的关系

以往的研究表明，弱东亚冬季风所引起的西北太平洋反气旋环流的维持主要是由 El Niño 事件来完成的，在没有 ENSO 事件发生的冬季，不论冬季

风的异常情况如何，就不会对之后夏季风产生影响（陈文，2002；Huang et al., 2004；Chen et al., 2013）。利用更长序列的资料，分别将各季节 850 hPa 风场回归到 EAWMI、EAWMI-EN 和 EAWMI-res（见图 3）。结果表明，对于东亚冬季风异常，弱的东亚冬季风对应着明显的西北太平洋反气旋（图 3a），并且该反气旋可以持续到次年夏季（图 3c），导致夏季我国南方有西南风异常，夏季风偏强，这样就建

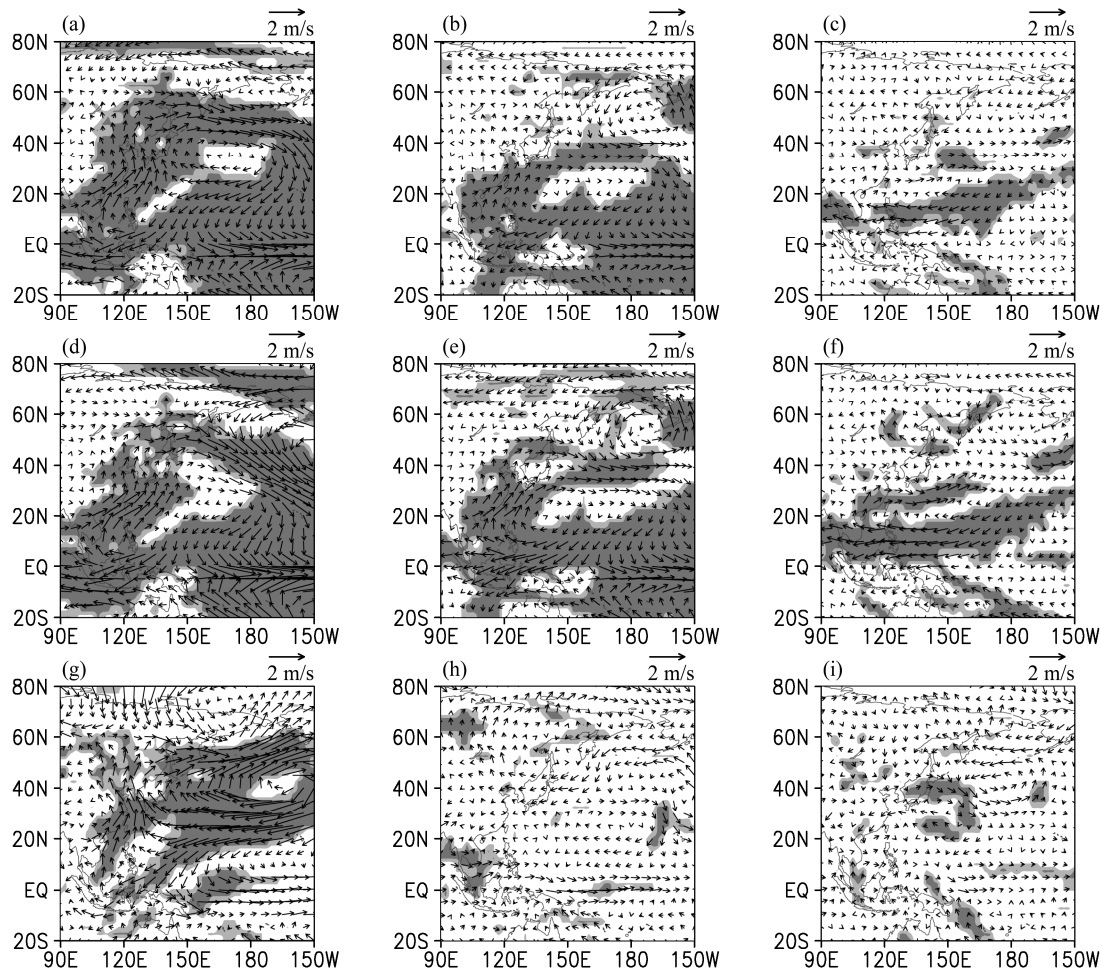


图3 (a-c) EAWMI、(d-f) EAWMI-EN、(g-i) EAWMI-res 分别与同期冬季 (DJF, 左列)、次年春季 (+MAM, 中列)、次年夏季 (+JJA, 右列) 平均的 850 hPa 风场回归分布 (浅色和深色阴影分别表示通过 90%和 95%信度检验的区域)

Fig. 3 Regression patterns of the seasonal-mean 850-hPa winds in winter (DJF, left panel), next spring (+MAM, middle panel), and next summer (+JJA, right panel) on the (a-c) EAWMI, (d-f) EAWMI-EN, and (g-i) EAWMI-res (dark and light shadings denote the regions above 95% and 90% confidence levels, respectively)

立了东亚冬季风与随后夏季风的联系。进一步将东亚冬季风分成与 ENSO 有关和无关两部分之后, 对于与 ENSO 有关的弱东亚冬季风情况, 850 hPa 风场在 WNP 附近有明显的反气旋环流异常从冬季一直持续到次年夏季 (图 3d-3f), 并且其强度较图 3a-3c 中要强, 其西北侧的偏南气流是我国东部降水的主要水汽来源。值得注意的是, 夏季在东亚地区似乎存在一个经向上的波列, 导致日本以东洋面有一个弱的气旋式环流异常, 其北部的偏东风能够为我国东北地区输送水汽 (图 3f)。在上述两者的共同作用下, 会使得我国夏季风降水异常较明显, 形成较强的夏季风异常。然而, 对于与 ENSO 无关的弱东亚冬季风, 冬季在 WNP 附近也有异常的反气旋式环流, 并且 40°N 以北的北太平洋地区的反气旋式环流异常也存在 (图 3g)。但是随着冬季风

的结束, 无论是低纬度还是中高纬度的上述环流异常在次年春季均基本消失不见 (图 3h), 至次年夏季, 只是在日本南部及其东南海域有一个较弱的反气旋式环流异常 (图 3i), 这与图 3c 迥然不同, 甚至相反。这说明东亚冬季风与随后夏季风的联系主要来自于与 ENSO 有关的东亚冬季风的贡献, 而与 ENSO 无关的东亚冬季风基本上不起作用, 甚至起反作用。所以, 用更长时间的资料进一步验证了东亚冬季风与随后夏季风之间的联系以及 ENSO 在其中的作用。

4 太阳活动对东亚冬、夏季风关系的影响

由于东亚冬、夏季风之间的联系来自于 ENSO

的作用, 因此在研究太阳活动对东亚冬、夏季风关系的影响时, 只针对东亚冬季风里与 ENSO 有关的部分 (EAWMI-EN) 进行。分别对 HS 和 LS 年进行了与上一节相同的计算(结果见图 4), 与图 3d-3f 类似, 不论在 HS 年还是在 LS 年, 如果在冬季, ENSO 导致一个弱的东亚冬季风, 在西北太平洋上空会出现一个反气旋式异常环流, 同时阿留申低压减弱; 次年春、夏季, 阿留申地区的反气旋异常环流逐渐减弱、消失, 但低纬度的反气旋异常环流可以一直持续到夏季, 从而对东亚地区夏季气候造成

影响。然而, 如果将 HS 年的情况与 LS 年相比较就可以发现, HS 年冬季西北太平洋上空的反气旋式异常环流的强度和范围较 LS 年明显偏弱、偏小; 并且次年春、夏季, 西北太平洋上空的反气旋异常环流强度减弱也快, 表现为夏季影响我国的西南风异常也明显减弱。因此, 太阳活动偏低年东亚冬、夏季风之间的联系要比太阳活动偏高年更好。

由于 WNP 反气旋环流异常对中国东部降水异常的分布起着重要作用(Wang et al., 2000; Wu et al., 2003; Feng et al., 2011), 因此上述太阳活动对东亚

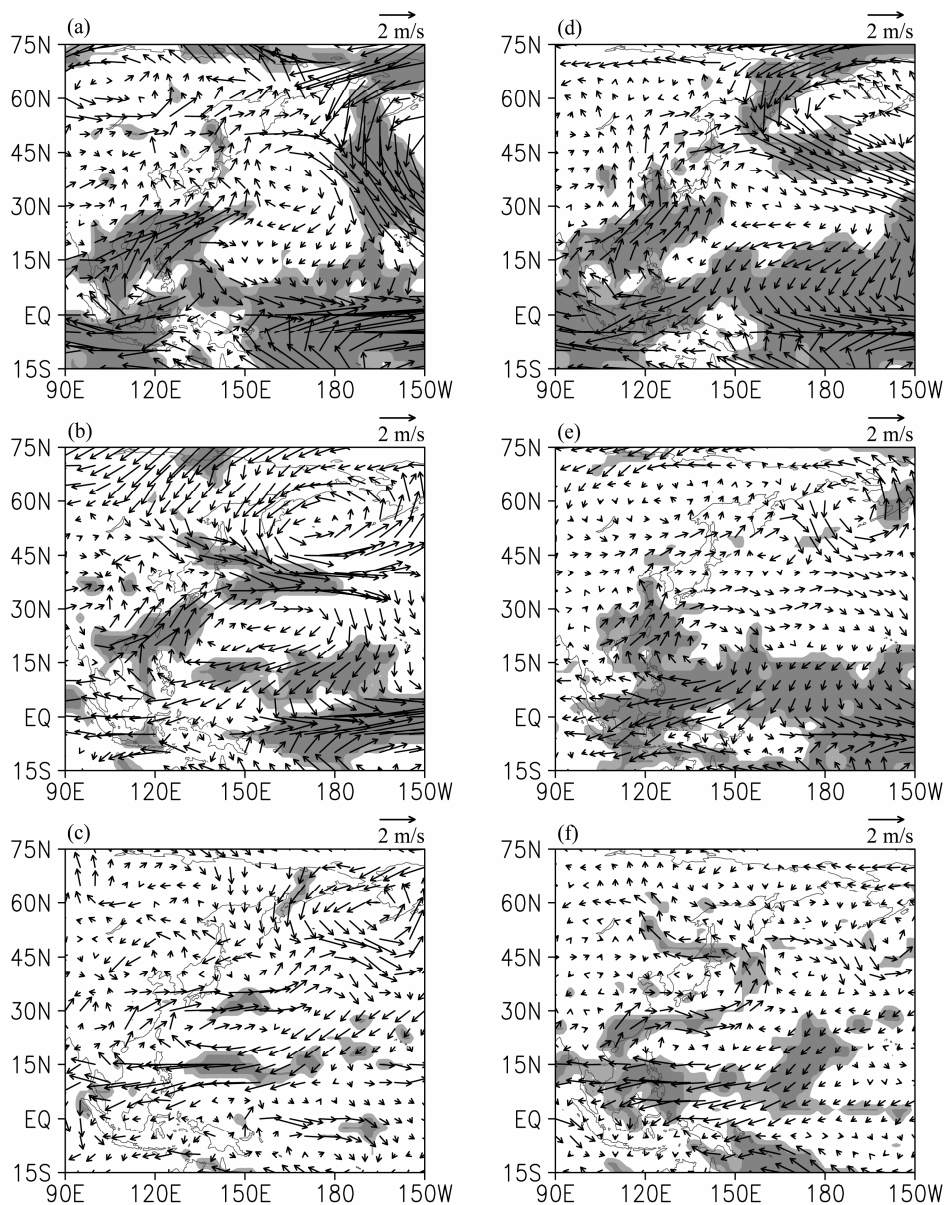


图 4 太阳活动高峰年(左列)和低谷年(右列)EAWMI-EN 与(a、d)同期冬季、(b、e)次年春季、(c、f)次年夏季平均的 850 hPa 风场的相关分布(浅色和深色阴影分别表示通过 90%和 95%信度检验的区域)

Fig. 4 Regression patterns of the seasonal-mean 850-hPa winds in (a, d) DJF, (b, e) +MAM, and (c, f) +JJA on the EAWMI-EN during the HS (left panel) phases and the LS (right panel) phases (dark and light shadings denote the 95% and 90% confidence levels, respectively)

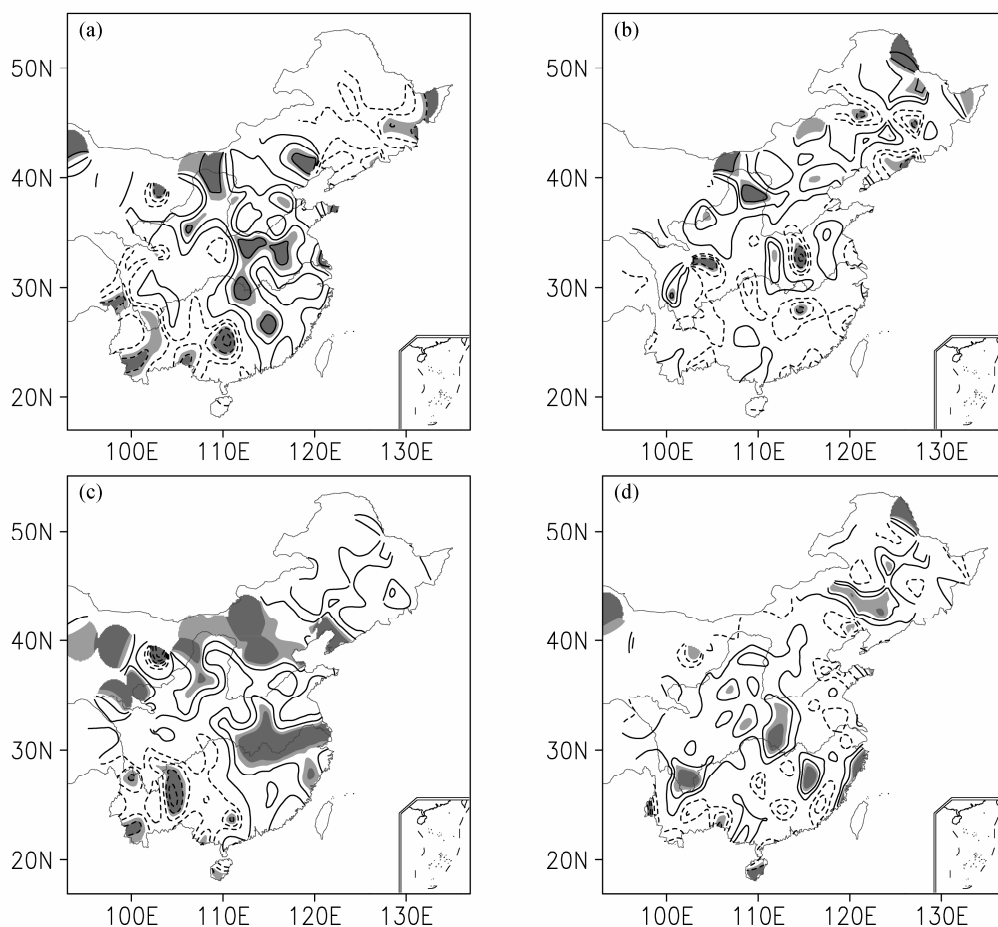


图5 太阳活动 (a、b) 高峰年和 (c、d) 低谷年 EAWMI-EN 与次年春季 (左列) 和夏季 (夏季) 平均的中国 160 站降水场的相关分布 (等值线间隔为 0.15; 浅色和深色阴影分别表示通过 90% 和 95% 信度检验的区域)

Fig. 5 Correlations between the EAWMI-EN and the +MAM (left panel) and +JJA (right panel) rainfall from 160 stations in China during (a, b) the HS phases and (c, d) the LS phases (contour interval is 0.15; light and dark shadings are above 90% and 95% confidence levels, respectively)

冬、夏季风关系的影响在中国春、夏季节降水异常上也可以得到证实。图 5 给出了不同太阳活动位相时 EAWMI-EN 与随后春、夏季我国降水异常的关系。由图 5a 和图 5c 可见, 与 HS 年相比, LS 年春季降水异常通过信度检验的区域更大, 主要的降水正相关区域位于江淮流域、华北北部和内蒙古中部地区一直向西延伸到甘肃、新疆等地。造成这种降水异常差异的主要原因是此时的 WNP 反气旋异常环流强度更强、影响范围更广, 其西北侧的西南风异常可以为中国东部地区提供充足的水汽。在 LS 年夏季, 对应 EAWMI-EN 正位相, 我国长江流域中游和东北降水偏多, 易发生洪涝灾害, 而华南地区降水偏少 (图 5d); 这种降水异常分布型与图 4f 中环流异常配置有关, 华南地区此时受 WNP 反气旋环流的控制, 以下沉气流为主, 所以降水偏少, 而其西北侧的水汽通道则为长江流域的降水正异

常做出贡献; 东北上空为气旋环流, 所以降水也偏多。而在 HS 年夏季, 前冬的冬季风异常与次年的夏季风降水异常的关系明显减弱 (图 5b), 这主要是由于与 EAWMI-EN 相联系的 WNP 反气旋异常强度偏小, 持续性也差所致。这样由前面的分析可以得到, 由 ENSO 引起的东亚冬季风异常与随后的东亚春、夏季气候异常的联系受到太阳活动 11 年周期的调制作用, 即在太阳活动偏高年与东亚冬季风相联系的春、夏季环流和降水异常明显偏弱, 因此东亚冬季风与随后的夏季风之间的联系在太阳活动偏低年要比太阳活动偏高年更显著。

5 太阳活动影响东亚冬、夏季风联系的过程

为了揭示太阳活动如何影响东亚冬、夏季风之

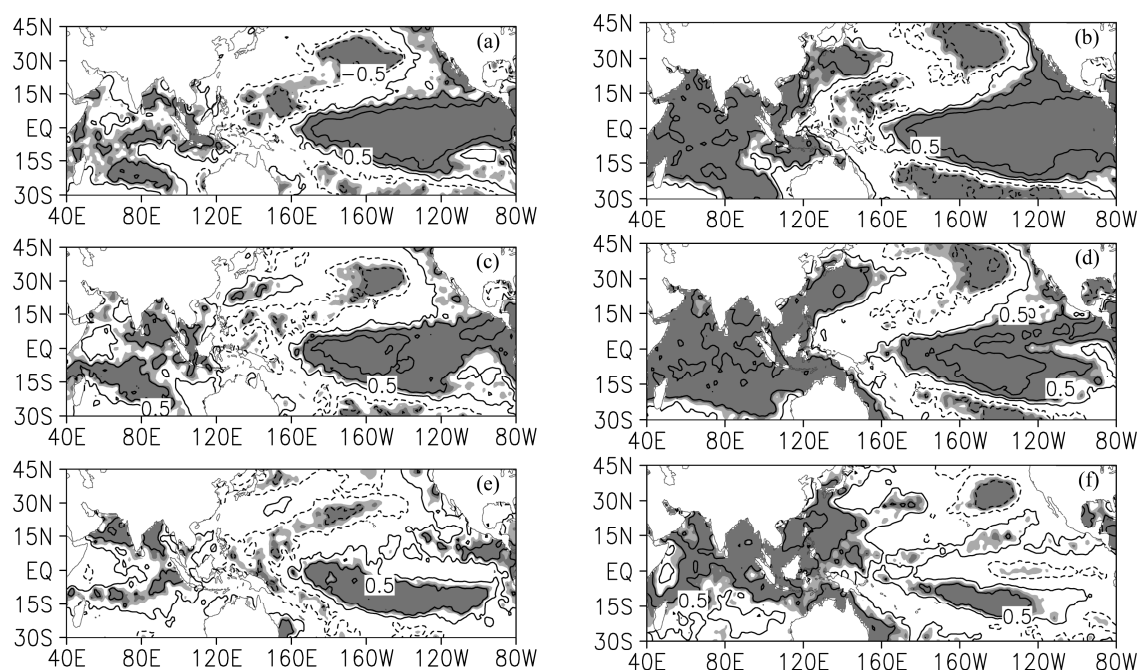


图 6 太阳活动高峰年(左列)和低谷年(右列) EAWMI-EN 与 (a、b) 同期冬季、(c、d) 次年春季、(e、f) 次年夏季平均的海温场的相关分布(等值线间隔为 0.25; 浅色和深色阴影分别表示通过 90% 和 95% 信度检验的区域)

Fig. 6 Correlations between the EAWMI-EN and the (a, b) DJF, (c, d) +MAM, and (e, f) +JJA sea surface temperature during the HS (left panel) phases and the LS (right panel) phases (contour interval is 0.25; light and dark shadings are above 90% and 95% confidence levels, respectively)

间的联系, 本节主要分析太阳活动对与 ENSO 有关的东亚冬季风相联系的海温异常演变的影响。由图 6 可见, 无论是 HS 年还是 LS 年, 与 EAWMI-EN 相联系的海温异常演变特征都表现为类似 ENSO 事件从盛期到衰减期的海温异常信号。比较两者间的差别可以看出, 在 LS 年, 对应一个 ENSO 导致的弱东亚冬季风在冬季赤道东太平洋有范围更广的正海温异常, 太平洋“马鞍”型海面温度距平分布更加显著, 特别是从我国东海、南海向西一直到几乎整个印度洋都有显著的正海温异常(图 6d); 随后春季赤道东太平洋的正相关区迅速缩小, 但印度洋和热带西太平洋的正异常海温有所增强并向东扩展到澳大利亚以东洋面(图 6e); 至夏季, 赤道东太平洋海温异常正信号进一步减弱, 甚至有负异常出现, 但印度洋和西太平洋的正海温异常信号仍然很显著(图 6f)。而在 HS 年, 最大的差异在于尽管热带东太平洋的海温正异常信号有更好的持续性, 但印度洋和西太平洋的海温异常信号的强度偏弱、范围偏小(图 6a–6c)。因此, 在 HS 年和 LS 年无论是与 EAWMI-EN 有关的海温异常的强度还是海温异常形态的演变上都有明显的不同。这与前人的研究结果(Meehl et al., 2003, 2008, 2009)一致,

即太阳活动的影响可以通过热带地区海—气耦合作用得到强化, 在太阳活动峰值年时出现类似 ENSO 冷事件的响应。

自 20 世纪 80 年代以来, 气象学家和海洋学家通过大量观测分析就发现热带东印度洋上空对流层下层环流和纬向风的异常与 ENSO 循环有相互调制的作用(Yasunari, 1990; 吴国雄和孟文, 1998)。特别是近期的一些工作强调了印度洋海温异常对 WNP 反气旋异常的作用(Xie et al., 2009; Huang et al., 2010), 他们发现, 热带印度洋的海温异常能够激发东传的暖 Kelvin 波, 由于边界层摩擦效应, 在赤道西太平洋两侧形成辐散; 而夏季热带 WNP 区域对流强盛, 水汽充足, 边界层辐散会使降水减弱; 对流潜热释放减弱会在大气中形成冷源, 从而在其西北侧形成低层反气旋异常; 而反气旋异常又能抑制局地对流发展。这种局地的正反馈过程使 WNP 反气旋能够进一步维持和发展, 造成东亚夏季降水异常。Chen et al. (2012) 利用海—气耦合模式研究也发现赤道东太平洋 ENSO 型海温异常的衰减速度可以对 WNP 反气旋的维持起到重要作用, 当赤道东太平洋海温异常衰减较快(也即次年夏季由正转负)有利于 WNP 反气旋的维持, 反之当赤道东太

平洋海温异常衰减较慢时则不利于 WNP 反气旋的维持。考虑到太阳活动的影响可以通过热带地区海—气耦合作用得到强化,导致类 El Niño 或类 La Niña 型的海温异常,从而影响与 EAWMI-EN 相联系的海温异常演变(图 6)。因此,我们针对海温的分析加上前人的研究结果,可以认为太阳活动影响东亚冬、夏季风之间的联系正是通过与 ENSO 有关的海温异常进而通过一系列大气过程来实现的。与 HS 年相比,对应 EAWMI-EN 的正异常,在 LS 年后期海温的异常更有利于激发并维持 WNP 反气旋式异常环流,从而在次年春季我国江淮流域、华北北部以及内蒙、西北地区降水偏多;而夏季往往在长江流域中游和东北地区多雨,华南地区少雨。因此,与 EAWMI-EN 相联系的海温异常演变在不同太阳活动位相时的差异,能够很好地解释随后夏季 WNP 反气旋异常环流的差异,并且与 LS 位相时 EAWM 与随后的 EASM 存在着更紧密的联系相吻合。

6 结论

本文在利用更长时间资料针对东亚冬季风的研究证实东亚冬季风有一定的持续性,一般来说,弱东亚冬季风可以引起次年春、夏季西北太平洋地区的反气旋式环流异常,强东亚冬季风与上述情况相反,可以引起气旋式环流异常。并且,这种持续性主要来自于与 ENSO 有关的东亚冬季风异常,与该部分异常相联系的西北太平洋反气旋或气旋异常环流可以持续到次年夏季,而与 ENSO 无关的东亚冬季风异常及相联系的环流就几乎没有持续性。在验证了东亚冬季风与随后夏季风关系以及 ENSO 在其中的作用的基础上,主要分析了在太阳活动 11 年周期不同位相下与 ENSO 事件有关的东亚冬季风与次年春、夏季东亚气候异常的联系的差异,并对相关的物理过程及可能的机理作了讨论。得到如下一些主要结论:

(1) 1957~2011 年 54 个冬季里,东亚冬季风强度变化指数中与 ENSO 有关和无关的部分分别可以解释总方差的 63.5%和 36.5%,表明 ENSO 对东亚冬季风变异起着主导作用。进一步分析还发现,在太阳活动高峰年期间,与 ENSO 有关的东亚冬季风异常可以解释总方差的 43.6%,而在太阳活动低谷年期间则可以解释总方差的 70.3%。因此,太阳活动显著影响了东亚冬季风与 ENSO 的关系,在太

阳活动偏低年 ENSO 与东亚冬季风的关系更为密切。

(2) 东亚冬季风与随后东亚夏季风的关系受到太阳活动 11 年周期的明显影响。在太阳活动偏低年,如果由 ENSO 引起的弱东亚冬季风,这时西北太平洋上空的异常反气旋明显偏强,其西北侧的偏南风给我国东部地区带来丰沛的水汽,它的持续性导致春季多雨地区绵延到内蒙古乃至西北地区,夏季主要降水集中在长江流域中游,而华南地区则受 WNP 反气旋的控制,降水明显偏少。与此不同的是,在太阳活动偏高年,同样是 ENSO 引起的弱东亚冬季风,次年春、夏季 WNP 反气旋异常环流就明显偏弱,这种情况下次年春、夏季我国东部降水异常也较弱。因此,东亚冬、夏季风的关系在太阳活动 11 年周期的低位相时更加紧密。

(3) 对海温异常的进一步分析表明,在太阳活动的不同位相下,无论是与 ENSO 有关的东亚冬季风相联系的海温异常的强度还是海温异常的形态的演变都有明显的不同。在 LS 年,从冬季到夏季尽管热带太平洋的海温异常衰减较快,但印度洋及热带西太平洋一直有显著的大范围正相关区域;与此相反,在 HS 年,赤道东太平洋海温异常衰减缓慢,但印度洋和热带西太平洋海温异常通过信度检验的区域明显减小。以往的研究指出,热带印度洋海温异常以及赤道东太平洋的 ENSO 型海温异常衰减快慢会对 WNP 反气旋的生成、维持和发展起到重要作用。因此,不同太阳活动位相下与东亚冬季风相联系的海温异常演变的差异是 WNP 反气旋异常环流是否可以从冬季持续到夏季的重要原因,它可以很好地解释东亚冬、夏季风的关系在太阳活动 11 年周期的低位相时比高位相时更加紧密。

需要说明的是,本研究只是从统计角度出发分析了太阳活动对与 ENSO 事件有关的东亚冬季风异常与次年春、夏季东亚降水和环流异常关系的影响,并试图从海温的季节演变给出合理的解释。进一步的研究还需要利用海—气耦合模式加以验证。众所周知,维持地球大气系统的能量几乎全部来自于太阳,鉴于太阳活动气候效应的重要性,以及它对短期气候预测的可能影响,今后有必要加强太阳活动影响的研究。

参考文献 (References)

陈文. 2002. El Niño 和 La Niña 事件对东亚冬、夏季风循环的影响 [J]. 大

- 气科学, 26 (5): 595–610. Chen Wen. 2002. The impacts of El Niño and La Niña on the cycle of East Asian winter and summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (5): 595–610.
- Chen W, Graf H F, Huang R H. 2000. The interannual variability of East Asian winter monsoon and its relation to the summer monsoon [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 17 (1): 48–60.
- Chen W, Feng J, Wu R G. 2013. Roles of ENSO and PDO in the link of the East Asian winter monsoon to the following summer monsoon [J]. J. Climate, 26 (2): 622–635, doi:10.1175/JCLI-D-12-00021.1.
- Chen W, Wang L, Xue Y K, et al. 2009. Variabilities of the spring river runoff system in East China and their relations to precipitation and sea surface temperature [J]. International Journal of Climatology, 29 (10): 1381–1394, doi:10.1002/joc.1785.
- Chen W, Park J K, Dong B W, et al. 2012. The relationship between El Niño and the western North Pacific summer climate in a coupled GCM: Role of the transition of El Niño decaying phases [J]. J. Geophys. Res., 117, D12111, doi:10.1029/2011JD017385.
- Ding Y H. 1994. Monsoons over China [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 420pp.
- 段长春. 2008. 太阳活动对夏季大气环流异常及云南降水的影响 [J]. 高原山地气象研究, 28(3): 37–43. Duan Changchun. 2008. Impacts of solar activities on abnormality of general circulation and Yunnan rainfall in summer [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 28 (3): 37–43.
- Feng J, Chen W, Tam C Y, et al. 2011. Different impacts of El Niño and El Niño Modoki on China rainfall in the decaying phases [J]. International Journal of Climatology, 31 (14): 2091–2101, doi:10.1002/joc.2217.
- Feng J, Wang L, Chen W, et al. 2010. Different impacts of two types of Pacific Ocean warming on Southeast Asian rainfall during boreal winter [J]. J. Geophys. Res., 115, D24122, doi:10.1029/2010JD014761.
- Huang G, Hu K M, Xie S P. 2010. Strengthening of tropical Indian Ocean teleconnection to the northwest Pacific since the mid-1970s: An atmospheric GCM study [J]. J. Climate, 23 (19): 5294–5304.
- Huang R H, Zhou L T, Chen W. 2003. The progresses of recent studies on the variabilities of the East Asian monsoon and their causes [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 20 (1): 55–69.
- Huang R H, Chen W, Yan B L, et al. 2004. Recent advances in studies of the interaction between the East Asian winter and summer monsoons and ENSO cycle [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 21 (3): 407–424.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77 (3): 437–472.
- Kodera K. 2004. Solar influence on the Indian Ocean monsoon through dynamical processes [J]. Geophys. Res. Lett., 31, L24209, doi:10.1029/2004GL020928.
- Kodera K, Coughlin K, Arakawa O. 2007. Possible modulation of the connection between the Pacific and Indian Ocean variability by the solar cycle [J]. Geophys. Res. Lett., 34, L03710, doi:10.1029/2006GL027827.
- 李崇银, 翁衡毅, 高晓清, 等. 2003. 全球增暖的另一可能原因初探 [J]. 大气科学, 27 (5): 789–797. Li Chongyin, Weng Hengyi, Gao Xiaoping, et al. 2003. Initial investigation of another possible reason to cause global warming [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (5): 789–797.
- Meehl G A, Washington W M, Wigley T M L, et al. 2003. Solar and greenhouse gas forcing and climate response in the 20th century [J]. J. Climate, 16 (3): 426–444.
- Meehl G A, Arblaster J M, Branstator G, et al. 2008. A coupled air–sea response mechanism to solar forcing in the Pacific region [J]. J. Climate, 21 (12): 2883–2897.
- Meehl G A, Arblaster J M, Matthes K, et al. 2009. Amplifying the Pacific climate system response to a small 11 year solar cycle forcing [J]. Science, 325 (5944): 1114–1118.
- Rind D. 2002. The sun's role in climate variations [J]. Science, 296(5568): 673–677.
- Rind D, Lean J, Lerner J, et al. 2008. Exploring the stratospheric/tropospheric response to solar forcing [J]. J. Geophys. Res., 113, D24103, doi:10.1029/2008JD010114.
- Sun B, Sun S. 1994. The analysis on the features of the atmospheric circulation in preceding winters for the summer drought and flooding in the Yangtze and Huaihe River valley [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 11 (1): 79–90.
- Tao S Y, Chen L X. 1987. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China [M]//Chang C P, Krishnamurti T N. Monsoon Meteorology. Oxford: Oxford University Press, 60–92.
- van Loon H, Meehl G A. 2008. The response in the Pacific to the sun's decadal peaks and contrasts to cold events in the Southern Oscillation [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 70 (7): 1046–1055.
- van Loon H, Meehl G A, Arblaster J M. 2004. A decadal solar effect in the tropics in July–August [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 66 (18): 1767–1778.
- van Loon H, Meehl G A, Shea D J. 2007. Coupled air–sea response to solar forcing in the Pacific region during northern winter [J]. J. Geophys. Res., 112, D02108, doi:10.1029/2006JD007378.
- Wang B, Wu R G, Fu X H. 2000. Pacific–East Asian teleconnection: How does ENSO affect east Asian climate? [J]. J. Climate, 13: 1517–1536.
- Wang L, Chen W. 2010. How well do existing indices measure the strength of the East Asian winter monsoon? [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 27 (4): 855–870, doi:10.1007/s00376-009-9094-3.
- Wang L, Chen W, Huang R H. 2008. Interdecadal modulation of PDO on the impact of ENSO on the East Asian winter monsoon [J]. Geophys. Res. Lett., 35, L20702, doi:10.1029/2008GL035287.
- Wang L, Huang R H, Gu L, et al. 2009. Interdecadal variations of the East Asian winter monsoon and their association with quasi-stationary planetary wave activity [J]. J. Climate, 22 (18): 4860–4872.
- 吴国雄, 孟文. 1998. 赤道印度洋—太平洋地区海气系统的齿轮式耦合和 ENSO 事件 I. 资料分析 [J]. 大气科学, 22 (4): 470–480. Wu Guoxiong, Meng Wen. 1998. Gearing between the Indo-monsoon circulation and the Pacific-Walker circulation and the ENSO. Part I: Data analysis [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 22 (4): 470–480.
- Wu R G, Hu Z Z, Kirtman B P. 2003. Evolution of ENSO-related rainfall anomalies in East Asia [J]. J. Climate, 16 (22): 3742–3758.
- Wu R, Kinter III J L, Kirtman B P. 2005. Discrepancy of interdecadal

- changes in the Asian region among the NCEP-NCAR reanalysis, objective analyses, and observations [J]. *J. Climate*, 18 (15): 3048–3067.
- Xie S P, Hu K, Du Y, et al. 2009. Indian Ocean Capacitor effect on Indo-Western Pacific climate during the summer following El Niño [J]. *J. Climate*, 22 (3): 730–747.
- Yasunari T. 1990. Impacts of Indian monsoon on the coupled atmosphere/ocean system in the tropical Pacific [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 44 (1–4): 29–41.
- Zhao L, Wang J S, Zhao H J. 2012. Solar cycle on decadal variability in monsoon precipitation over China [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 90 (1): 1–9, doi:10.2151/jmsj.2012-101.
- 周连童, 黄荣辉. 2003. 关于我国夏季气候年代际变化特征及其可能成因的研究 [J]. *气候与环境研究*, 8 (3): 274–290.
- Zhou Liantong, Huang Ronghui. 2003. Research on the characteristics of interdecadal variability of summer climate in China and its possible cause [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 8 (3): 274–290.
- 周群, 陈文. 2012. 太阳活动 11 年周期对 ENSO 事件海温异常演变和东亚降水的影响 [J]. *大气科学*, 36 (4): 851–862, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11162.
- Zhou Qun, Chen Wen. 2012. Influence of the 11-year solar cycle on the evolution of ENSO-related SST anomalies and rainfall anomalies in East Asia [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese)*, 36 (4): 851–862.
- Zhou Q, Chen W, Zhou W. 2013. Solar cycle modulation of the ENSO impact on the winter climate of East Asia [J]. *J. Geophys. Res.*, 118 (11): 5111–5119.
- Zhou W, Li C Y, Chan J C L. 2006. The interdecadal variations of the summer monsoon rainfall over South China [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 93 (3–4): 165–175, doi:10.1007/s00703-006-0184-9.