

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 Sciences (in Chinese), 36 (4): 851-862.

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

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 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 本文利用美国 NCEP/NCAR 再分析资料、海温、降水和反映太阳活动强弱的太阳 10.7 cm 射电流流量资料, 研究了 1952~2010 年太阳活动 11 年周期对 ENSO 年海温异常演变以及与之相联系的东亚降水的影响, 在此基础上着重分析了 ENSO 发展期秋季东亚地区降水异常对太阳射电流流量高 (HS) /低 (LS) 的不同响应以及相关的物理过程。对海温的分析结果表明, HS (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小 (大), 且赤道东太平洋的正相关在次年春夏季衰减缓慢 (迅速)。特别是在 ENSO 发展期秋季, 随着赤道东太平洋海温的增暖, HS (LS) 年印度洋海温无 (有) 明显升高, 并在随后的 ENSO 盛期印度洋海温正异常明显偏弱 (偏强)。针对 ENSO 与东亚地区降水异常的研究发现, ENSO 对我国降水的显著影响主要出现在发展期的秋季和衰减期的春季。若考虑太阳射电流流量高、低不同年, 与 ENSO 相联系的东亚降水异常的差异则主要出现在 ENSO 发展期的秋季。HS 年 ENSO 发展期秋季我国大部分地区的降水异常信号较弱; 而 LS 年时我国长江以南和长江以北的反向降水变化就非常显著。进一步分析表明, 这种差别的原因在于对流层低层控制南、北方降水异常的两个重要环流系统——位于菲律宾附近的反气旋和我国华北北部的气旋的强度在太阳射电流流量高、低不同年有显著差异。LS 年南海及菲律宾地区附近出现的反气旋式环流异常偏强, 加强了我国南方地区的水汽供应; 而位于华北北部的气旋式环流异常也偏强, 其西侧的偏北风造成长江以北地区的降水负异常。与此相反, HS 年热带西太平洋反气旋和位于我国北方的气旋异常同时偏弱, 造成我国大部分地区的降水异常偏弱且不显著。ENSO 发展期秋季东亚大气环流对太阳射电流流量高、低的不同响应可能是由于太阳活动对热带海温的影响所致, HS (LS) 年时会在太平洋强迫出类 La Niña (El Niño) 的海温异常, 导致在热带中东太平洋上升并在热带西太平洋下沉的异常 Walker 环流明显偏弱 (偏强)。这样与 HS 年相比较, LS 年在热带西太平洋的低层辐散就更强, 热源导致的反气旋环流也就更强。

关键词 太阳活动 海温演变 ENSO 东亚降水 大气环流异常

文章编号 1006-9895(2012)04-0851-12

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11162

Influence of the 11-Year Solar Cycle on the Evolution of ENSO-Related SST Anomalies and Rainfall Anomalies in East Asia

ZHOU Qun^{1,2} and CHEN Wen¹

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

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

收稿日期 2011-09-13, 2011-12-21 收修定稿

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

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

Abstract By using NCEP/NCAR reanalysis data, the SST data, the rainfall data, and the 10.7 cm solar flux data which reflects the intensity of the solar activity, the impacts of solar activity on the seasonal SST anomalies and the related rainfall anomalies in East Asia during different phases of El Niño-Southern Oscillation (ENSO) are investigated in this paper. Particularly the authors focus on the different responses of the rainfall anomalies in East Asia in the fall of an ENSO developing year and the corresponding physical processes between the High Solar (HS) years and the Low Solar (LS) years. The SST analysis reveals that during the HS (LS) years, the intensity and scope of the SST anomalies in both the equatorial eastern Pacific and the tropical western Pacific are decreasing (increasing) in the developing phase of ENSO, and the positive correlation in the equatorial eastern Pacific weakens slowly (rapidly) in the following spring to summer. Especially in the HS phase, with the warming in the equatorial eastern Pacific, the Indian Ocean SST is found to have no apparent warming in the fall of an ENSO developing year and the Indian Ocean positive SST anomalies is significantly weaker in the following winter. The reverse situation tends to occur in the LS phase. According to the rainfall analysis results, the ENSO exerts its influence on the rainfall in China mostly in the preceding fall and the next spring. To put the solar activity in perspective, the main differences of the rainfall anomalies in East Asia occur in the preceding fall. The rainfall anomaly signals are insignificant in most of China during the preceding fall in the HS years, whereas in the LS years the reverse precipitation signals between the south and north of the Yangtze River are noticeable. Further research indicates that the rainfall differences originate from the differences of the two important circulation systems in the lower troposphere. During the LS years, the anticyclonic anomalies near the Philippines region tend to be stronger and thus intensify the supply of water vapor in the south of China. At the same time, the intensified northerly winds on the west side of the cyclone around the northern part of North China result in the less rainfall in the north of the Yangtze River. In contrast, both these two circulation systems are weaker and the associated rainfall anomalies are not significant during the HS years. The different circulation responses in the fall of an ENSO developing year may be attributed to the influences of the solar activity on the tropical SST. The results indicate that a La Niña (El Niño)-like SST pattern in the Pacific tends to be forced in the HS (LS) years, which is consistent with previous studies. Therefore, the anomalous Walker cell that rises in the tropical eastern Pacific and sinks in the tropical western Pacific is shown to be obviously weaker (stronger) in the HS (LS) phase. Compared with the HS years, in the LS years the divergence in the lower troposphere is strong in the tropical western Pacific and the induced anticyclonic circulation by the diabatic cooling is also strong.

Key words solar activity, SST evolution, ENSO (El Niño/Southern Oscillation), rainfall in East Asia, atmospheric circulation anomalies

1 引言

太阳辐射是地气系统的基本能量来源,太阳活动引起的辐射强度的任何微小变化都会对地表天气、气候产生重要影响 (Rind, 2002; Rind et al., 2008)。人们很早就注意到太阳活动的变动特征,并发现其有比较规律的 11 年周期变化。我国学者也对太阳活动影响地表气候作了不少研究,特别从不同角度分析了太阳活动与我国旱涝发生的关系 (孙长安和杨本有, 1992; 李可军等, 2000; 李春晖和杨志峰, 2005)。段长春和孙绩华 (2006)、段长春 (2008) 的研究指出太阳活动峰值年夏季,我国南方和东北少雨,黄河中上游流域、黄淮地区以及长江中上游多雨,他们还主要的环流系统如南亚高压、副热带高压以及西风急流等进行了分析。但是,太阳活动与我国旱涝关系之间的物理机制尚不完全清楚。

事实上,从 1979 年开始利用卫星观测太阳总

辐射的变化,人们就发现太阳活动峰、谷值年的变化范围在 0.1% 以内。长期以来,气象界就如此小的太阳活动 11 年周期变化如何对地球气候产生影响这一问题开展了大量讨论。近期的一系列研究结果 (Meehl et al., 2003, 2008, 2009; van Loon et al., 2004, 2007; van Loon and Meehl, 2008) 表明,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。具体来说,就是太阳活动峰值年时副热带少云地区吸收的太阳辐射增加,水汽蒸发也增加,加强了近地表辐合,引起赤道信风加强,进而南、北赤道辐合带地区降水增多并向两极移动,热带地区更多的冷水上翻,从而出现类 La Niña (Like La Niña) 事件的响应。这些变化还会导致赤道东太平洋冷舌不断西移,赤道西太平洋地区 SST 降低,与之相联系的 Hadley/Walker 环流亦发生相应改变。

ENSO (El Niño/ Southern Oscillation) 作为海—气耦合系统中最强的年际变化信号,是东亚气候预测的重要因子 (Chen et al., 2000; 黄荣辉等, 2003)。

ENSO 的发展/衰减期, 西太平洋暖池的热状况及其上空的对流活动的响应不同 (Huang and Li, 1989; Huang and Wu, 1989), 因此, 东亚季风区气候的异常也不同 (黄荣辉和陈文, 2002)。Wu et al. (2003) 进一步提出从 ENSO 发展期的秋季直至衰减期的夏季, 我国南方和中东部地区降水偏多, 这主要是受同期出现并不断向西发展的西北太平洋反气旋的控制; 而 ENSO 发展期的夏、秋季, 因为沿东亚沿岸有一个相当正压结构的气旋不断向西南移动, 所以我国北方降水明显偏少。此外, 自 20 世纪 80 年代至今, 气象学家和海洋学家通过大量观测分析认识到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) 的研究结果也证实, 由于赤道印度洋上空纬向季风环流和太平洋上空的 Walker 环流之间存在着显著的耦合关系, 赤道印度洋和赤道东太平洋的 SST 具有较为一致的变化。另一方面, Kodera (2004) 和 Kodera et al. (2007) 最近的研究发现, 太阳活动可以通过影响 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。

由以上的回顾不难发现, 此前关于太阳活动以及 ENSO 对东亚地区气候的影响的研究局限于考察其中之一效应。如果考虑到 ENSO 本身受太阳活动调制, 那么东亚地区气候对此将会有怎样的响应, 之前的研究还没有涉及过。为此, 本文将首先分析太阳活动对 ENSO 年海温异常演变的影响, 在此基础上进一步分析太阳活动对东亚地区降水异常和 ENSO 之间关系的影响以及其中的物理过程。

2 资料与方法

文中所使用的数据资料包括: (1) 英国气象局哈德莱中心(Met Office Hadley Center)的海温数据集 HadISST, 水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$; (2) 美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)的再分析资料(Kalnay et al., 1996); (3) 美国国家海洋局 (NOAA)气候预测中心(CPC)提供的月平均全球陆地降水资料(PREC-L); (4) NOAA 数据中心(<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/solar/solardataservices.html> [2011-04-11])提供的太阳 10.7 cm 射电流量月平均数据, 它被广泛作为指标用于反映太阳活动强弱, 单位为 s.f.u. ($1 \text{ s.f.u.} = 10^{-22} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$)。

季节的划分按惯例将 3~5 月作为春季, 6~8 月为夏季, 9~11 月为秋季, 12 月和次年 1、2 月为冬季。本研究选用 1952~2010 年共计 59 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。

从 1947 年起由 OTTAWA 天文台对 10.7 cm 波段 (2800 兆赫无线电波的波长) 太阳射电流量进行观测, 它与太阳黑子变化基本同步, 能很好地指示太阳活动的周期性变化 (见图 1)。按照冬季 [December-January-February (DJF)] 平均的 10.7 cm 射电流量高/低于多年平均值来划分太阳射电流量高 (High Solar, 简称 HS) /低 (Low Solar, 简称 LS) 年, 得到 HS 年为 26 年, LS 年为 33 年, 具体情况参见表 1。这里 1956 代表 1955/1956 年冬季, 其余类推。

表 1 太阳射电流量高 (HS) /低 (LS) 年分布
Table 1 Distribution of the high or low solar activity years

太阳活动	年份
HS	1956~1960, 1967~1971, 1979~1983, 1989~1993, 1999~2003
LS	1952~1955, 1961~1966, 1972~1978, 1984~1988, 1994~1998, 2004~2010

以往的研究表明, 20 世纪 70 年代中期前后 ENSO 事件的特征和对东亚季风区气候的影响发生了明显的变化(周连童和黄荣辉, 2003; Huang et al, 2004)。为消除这种长周期年代际变化的影响, 在进行统计分析之前, 我们先将所有变量做傅里叶分析, 滤除 15 年以上的周期。考虑到热带中太

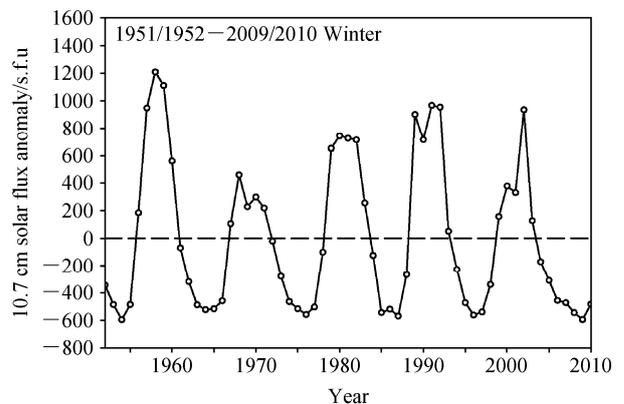


图 1 1952 ~ 2010 年冬季平均的太阳 10.7 cm 射电流量异常年际变化序列 (单位: s.f.u.)

Fig.1 Time series of the winter (DJF) mean 10.7 cm solar flux anomalies for the period of 1952~2010 (units: s.f.u., $1 \text{ s.f.u.} = 10^{-22} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$)

平洋增暖事件对东亚气候的影响与传统 ENSO 事件有显著差别 (Feng et al., 2011), 本文选取冬季 Niño3 区域 ($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$, $150^{\circ}\text{W}\sim 90^{\circ}\text{W}$) 的平均海温异常作为 ENSO 的指标。值得注意的是, 1952~2010 年该指标与 10.7 cm 射电流量相关系数仅为 -0.07 , 可见两者的直接关系十分微弱。后面, 我们计算从 ENSO 发展期的春季直到衰减期的夏季, 各季节平均海温和降水场等与 Niño3 指数的超前/滞后相关 (后文 0 和 1 代表 ENSO 发展期和衰减期), 然后再分成 HS/LS 年分别进行讨论。

3 太阳活动对 ENSO 事件海温异常演变的影响

图 2 给出的是 ENSO 演变过程中各个季节平均的海温场 (SST) 与冬季 Niño3 指数的超前/滞后相关分布情况, 由图可以清楚地看到, 对应于一个暖事件, 赤道东太平洋的正海温异常首先在发展期的

夏季 JJA (0) 产生, 在随后的秋季持续增强, 到冬季盛期达到最强, 并在次年春、夏季逐渐减弱。注意到在 JJA (0), 中国南海及台湾以东的西太平洋海温有一个显著的负相关区, 太平洋地区 SST 异常形成了典型的“马鞍”型 (图 2b)。到了发展期秋季 SON (0) 时, 印度洋地区出现显著正相关区, 西太平洋地区及南、北太平洋有大范围的显著负相关区 (图 2c), 由于热带西太平洋地区为暖池, 全球约 90% 的暖海水集中于此, 因此暖池的热力状态及其上空的对流活动对我国东部降水起着重要的作用 (Huang and Wu, 1989)。到了 ENSO 盛期的冬季, 赤道东太平洋显著的正相关区明显向南、北和西部扩大, 从南海向西直至几乎整个印度洋也为显著的正相关区 (图 2d)。到衰减期的春季 MAM (1), 热带西太平洋的正相关向东北方延伸直达日本以东洋面, 东太平洋海温异常开始减弱 (图 2e)。一般而言, ENSO 衰减的速度相对比较快, 到了衰减期的

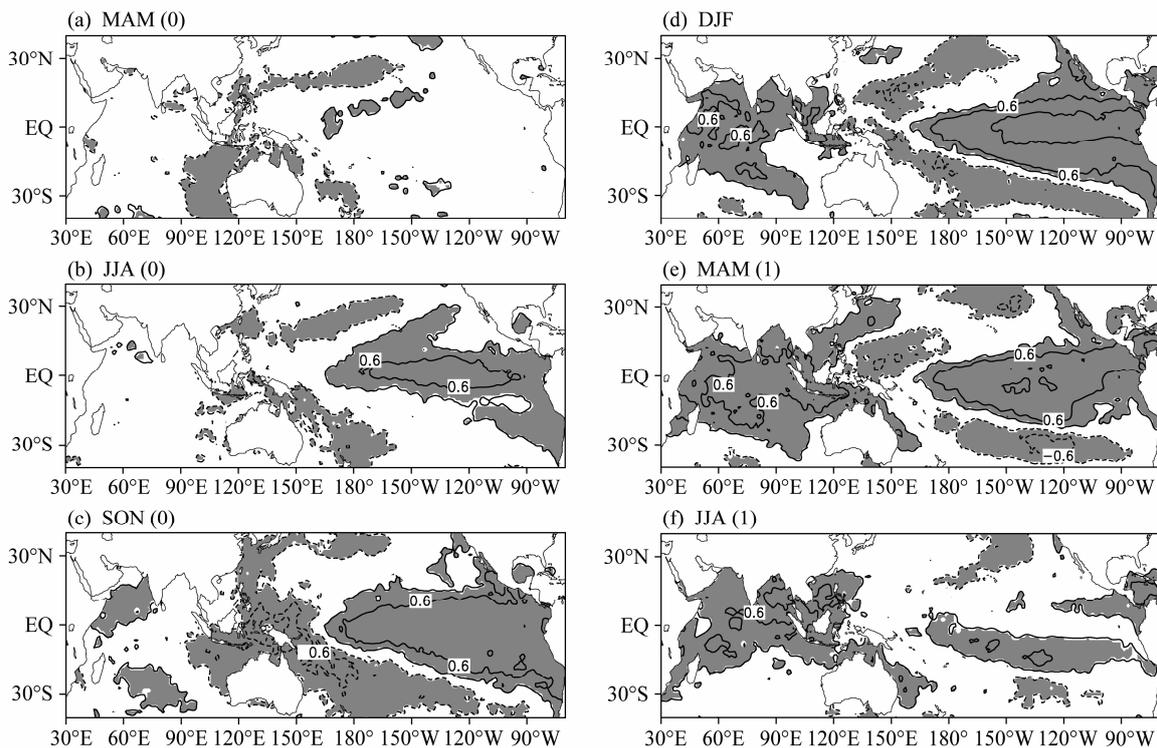


图 2 1952~2010 年冬季 Niño3 指数与各季节平均海温的超前/滞后相关图 (已略去零等值线): (a) 发展期春季; (b) 发展期夏季; (c) 发展期秋季; (d) 盛期冬季; (e) 衰减期春季; (f) 衰减期夏季。等值线间隔: 0.3; 阴影: 通过了 95% 的信度检验

Fig.2 Lead/lag correlation patterns between the DJF Niño3 index and the seasonal mean SST in (a) MAM (Mar–Apr–May) (0), (b) JJA (Jun–Jul–Aug) (0), (c) SON (Sep–Oct–Nov) (0), (d) DJF, (e) MAM (1), and (f) JJA(1) for the period of 1952–2010. Zero contour lines are omitted; contour interval is 0.3; shadings indicate the 95% confidence level according to Student's t test; 0 and 1 in parentheses refer to the developing and decaying years of ENSO, respectively

夏季 JJA (1), 赤道东太平洋的显著正相关区迅速缩小, 但西太平洋暖池区包括南海及菲律宾附近海域以及印度洋仍有显著正相关区 (图 2f)。由此可见, 图 2 基本上反映了一个 ENSO 事件的不同阶段热带海温异常的演变特征。

为为了进一步考察太阳活动对 ENSO 年海温异常演变的影响, 我们对 HS/LS 年分别进行了类似计算 (结果见图 3)。HS 年 ENSO 发展期各阶段赤道东太平洋的正相关的强度和范围都有所减弱 (图 3b、c), 而 ENSO 衰减期赤道东太平洋正相关可持

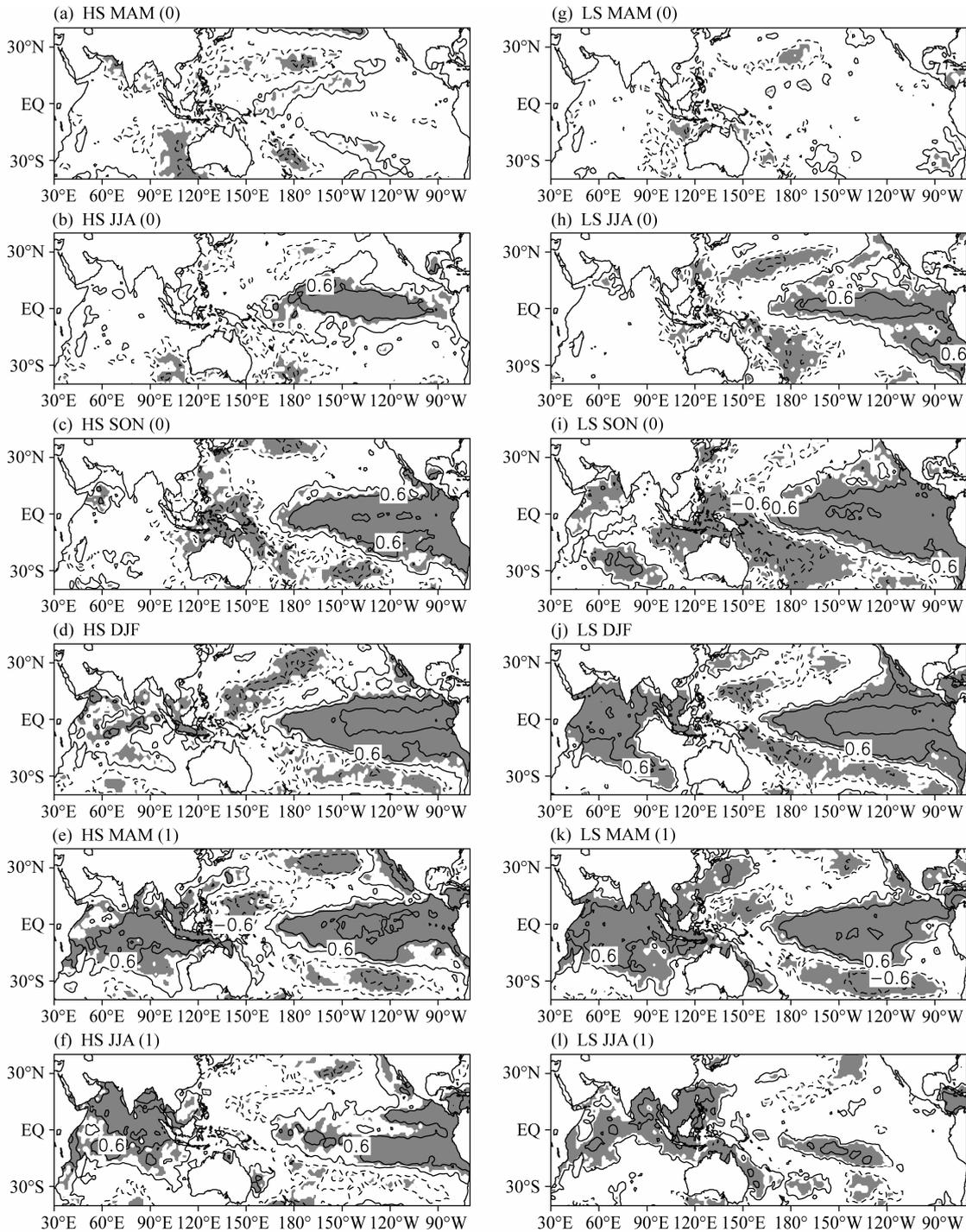


图3 同图2, 但为 HS 年 (a-f) 和 LS 年 (g-l) 情况
Fig.3 The same as in Fig.2, but for (a-f) the HS years and (g-l) the LS years

续到次年夏季,即海温异常的衰减变慢(图 3e、f)。与此不同的是,LS 年 ENSO 衰减期赤道东太平洋的正相关区迅速缩小,至 JJA (1) 基本消失不见(图 3l)。特别是在 LS 年 JJA (0) 时期中国南海及台湾以东洋面已有显著的负相关区出现,太平洋“马鞍”型 SST 分布基本建立起来(图 3h),并在随后的秋季得到加强,尤其是西太平洋到澳大利亚以东洋面有范围较大的显著负相关区(图 3i)。但 HS 年 ENSO 发展期 SON (0) 时期西太平洋的海温信号就很弱(图 3c)。此外,注意到 SON (0) 时期,LS 年伴随赤道东太平洋增暖,印度洋 SST 明显升高(图 3i),与此相反,HS 年 SON (0) 时期印度洋 SST 异常基本未能通过信度检验(图 3c)。因此,HS 年和 LS 年无论是在与 ENSO 有关的海温异常的强度还是海温异常的形态的演变上都有明显的不同,如果从热带西太平洋和印度洋海温来看,最大的差别出现在 ENSO 发展期的秋季。

4 太阳活动对 ENSO 和东亚降水关系的影响

我们首先考察了东亚各个季节降水占全年总降水量百分比的分布情况。由图 4 可见,东亚地区的降水主要集中在夏季,尤其是华北北部、内蒙古以及东北地区,夏季降水占全年降水的 70% 以上。对于长江以南地区,春季降水同样很重要,部分地区可以占到全年降水的 40% 以上。而对于长江中上游以北地区,秋季降水有着重要的地位,可以占到全年降水的 30% 左右。显然,对于整个东亚地区,冬季都不是主要的降水季节,各地降水基本上都在全年总降水的 10% 以下。考虑到与 ENSO 有关的海温异常是自发展期夏季才开始建立,这里主要选取了 ENSO 事件前夏 JJA (0)、前秋 SON (0) 以及次年春 MAM (1)、夏 JJA (1) 四个季节降水的关系进行分析。

图 5 给出的是 1952~2010 年各季节东亚地区降

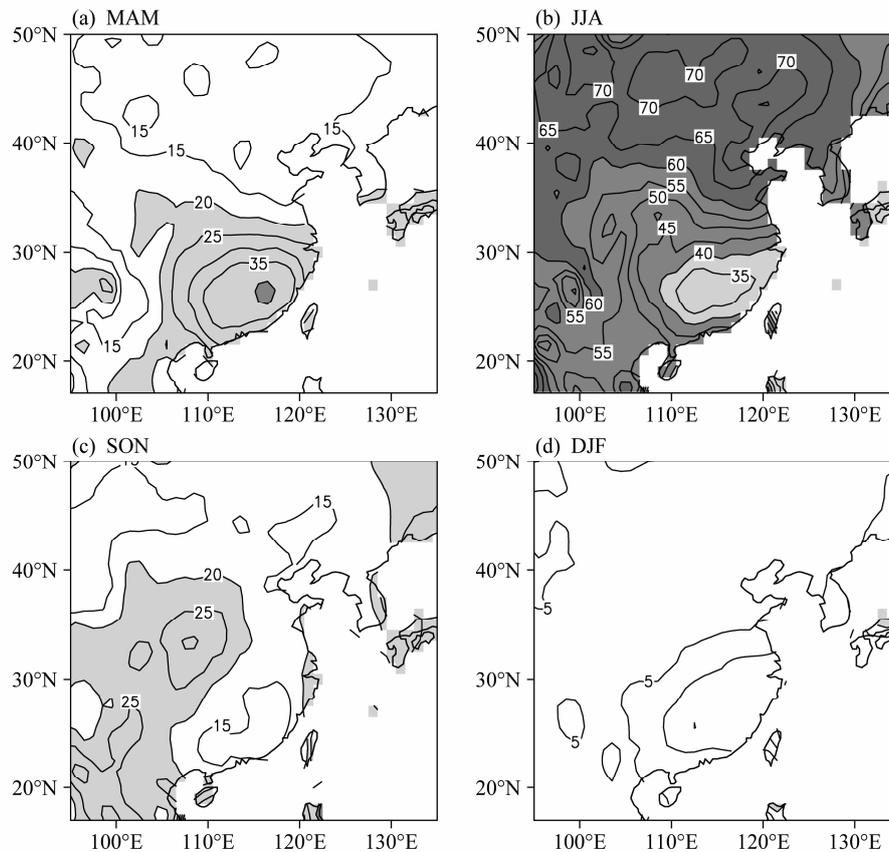


图 4 各季节的降水占全年降水量百分比分布图: (a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季。等值线间隔: 5%; 浅、中、深阴影: 降水百分比高于 20%、40%、60% 的区域

Fig.4 Distributions of the percentages of (a) MAM, (b) JJA, (c) SON, and (d) DJF rainfall in annual rainfall. Contour interval is 5%; light, moderate, and dark shadings indicate percentages over 20%, 40%, and 60%, respectively

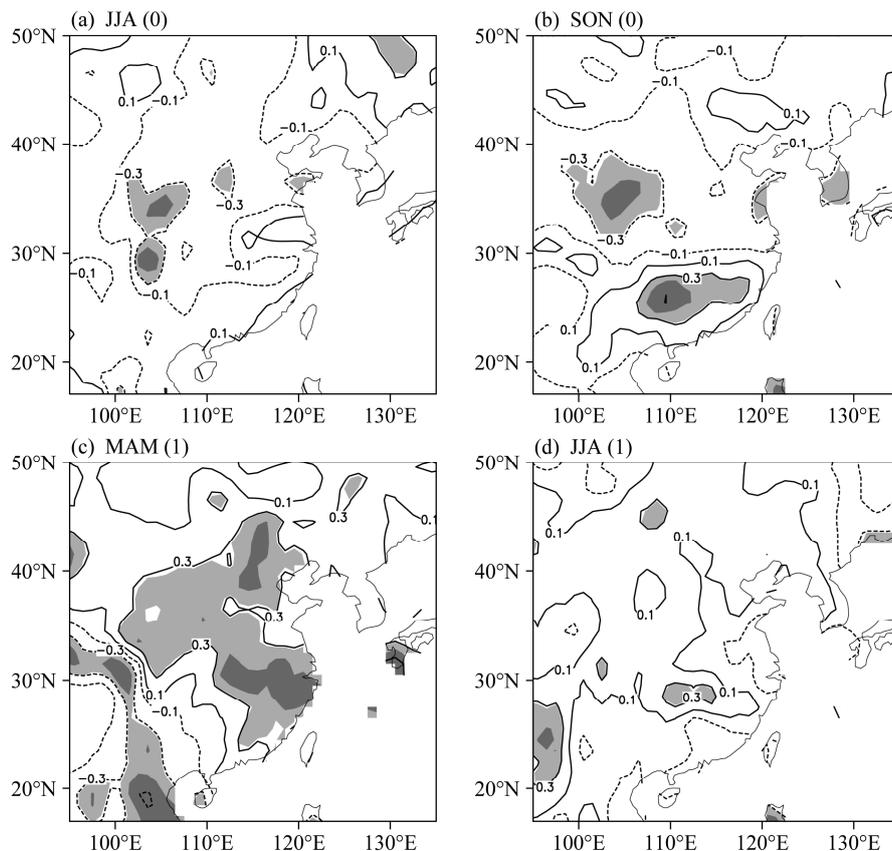


图 5 1952~2010 年冬季 Niño3 指数与各季节平均降水场的超前/滞后相关分布图: (a) ENSO 发展期夏季; (b) ENSO 发展期秋季; (c) ENSO 衰减期春季; (d) ENSO 衰减期夏季。等值线间隔: 0.2 (已略去零等值线); 浅、深阴影: 通过 95%、99% 信度检验的区域

Fig.5 Lead/lag correlation patterns between the DJF Niño3 index and the seasonal mean rainfall in (a) JJA (0), (b) SON (0), (c) MAM (1), and (d) JJA (1) for the period of 1952-2010. Zero contour lines are omitted; contour interval is 0.2; light and dark shadings indicate the 95% and 99% confidence levels, respectively

水与冬季 Niño3 指数的超前/滞后相关分布。ENSO 发展期的夏季 (图 5a), 在长江上游地区有显著的负相关区, 说明降水偏少; 而衰减期的夏季 (图 5d), 在长江中游和西南地区有显著的正相关区, 说明降水偏多, 这与陈文 (2002) 的结果也是一致的。事实上, ENSO 对我国降水影响最显著的时间是在发展期的秋季 (图 5b) 和衰减期的春季 (图 5c)。在 ENSO 发展期的秋季 (图 5b), 长江以南为显著的正相关区, 而长江以北的中部地区为显著的负相关区, 说明往往会出现长江以南多雨而长江以北少雨的形势。而在 ENSO 衰减期的春季 (图 5c), 我国东部往往普遍降水偏多, 只是在西南和高原东部降水偏少。为了揭示太阳活动对 ENSO 事件不同阶段东亚降水的影响, 图 6 和图 7 分别给出了 HS 和 LS 年各季节东亚地区降水与冬季 Niño3 指数的相关分布。从中可以看出, 总的来说, 太阳活动高值年

ENSO 事件与我国降水的关系不如太阳活动低值年好。HS 年 ENSO 与不同阶段东亚的降水相关较弱, 大多未通过信度检验 (图 6); 而 LS 年大多数的降水异常都能达到 95% 的信度检验 (图 7)。特别在 SON (0), HS 年虽然江南有正的相关, 但没有通过信度检验 (图 6b); 但 LS 年江南和东北的正相关以及中间的负相关均通过了信度检验 (图 7b), 而且与图 5b 比较可以看出, ENSO 发展期秋季的降水异常基本上来自于 LS 年的贡献。此外, 与全部年份 MAM (1) 有较强的降水异常不同, 无论是太阳射电流量高年还是低年, 东亚降水异常信号均减弱, 只是主要信号出现的位置略有不同; 具体说来, 同为 MAM (1), HS 年时降水正异常信号主要出现在长江以北的华北中部地区, 而 LS 年主要出现在长江中下游地区和华北北部地区 (图 6c 和 7c)。因此, 太阳射电流量高、低不同年, 东亚地区与 ENSO

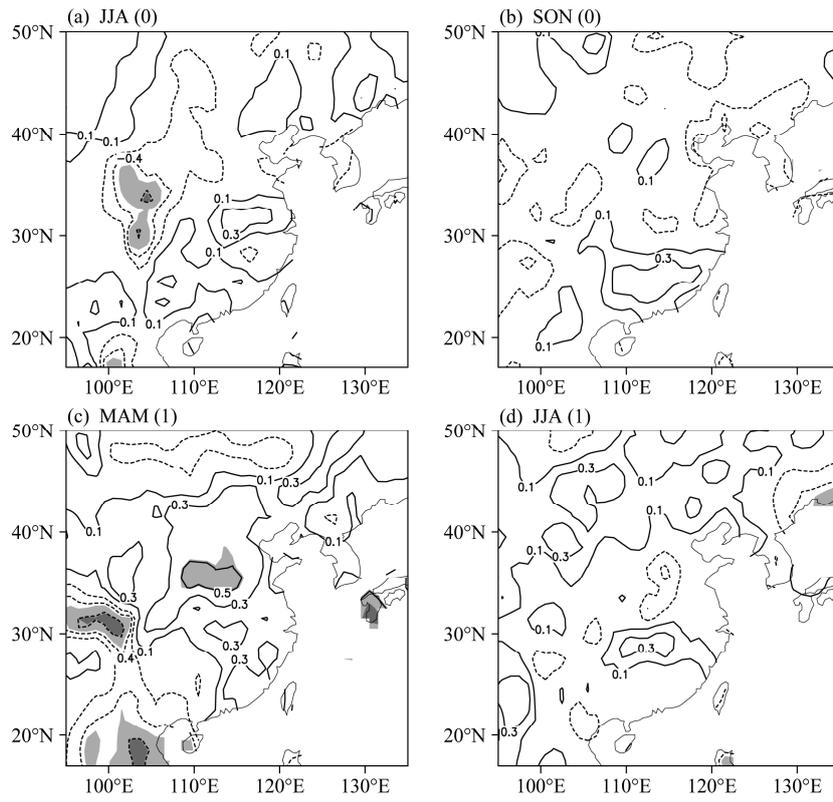


图6 同图5, 但为HS年情况
Fig.6 The same as in Fig.5, but for the HS years

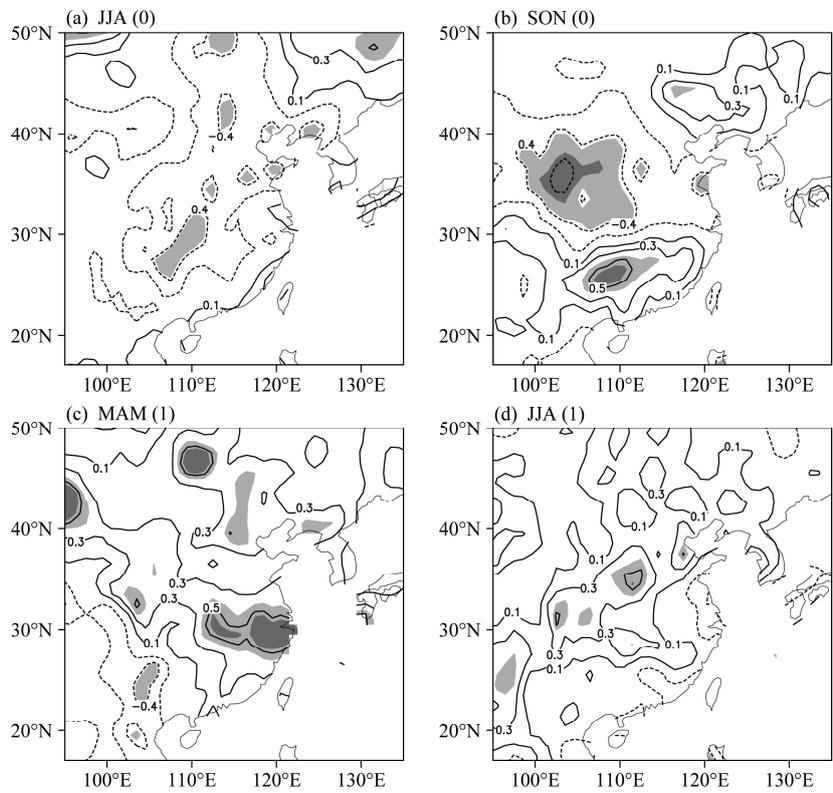


图7 同图5, 但为LS年情况
Fig.7 The same as in Fig.5, but for the LS years

相联系的降水异常的差异主要出现在发展期的秋季, HS 年时我国降水异常较弱且不显著, 而 LS 年时与 ENSO 相联系的我国的降水异常则很强且显著, 与全部年份的结果相比较, 南方降水正异常区、北方负异常区的强度和范围都明显增大。

5 太阳活动影响 ENSO 发展期秋季东亚地区降水的过程

ENSO 的发生主要通过激发出异常的 Rossby 波导致在热带西太平洋产生异常的反气旋来影响东亚季风 (Wang et al., 2000)。图 8 分别给出了 HS 年和 LS 年 ENSO 发展期秋季 850 hPa/200 hPa 风场对冬季 Niño3 指数的回归。高低空风场在 ENSO 发展期秋季很明显的表现出在热带西太平洋低层辐散、高层辐合的异常 (图 8a、d), 并且这种辐合/辐散的异常在 LS 年表现的更明显 (图 8c、f)。特别是

LS 年 SON (0) 时在南海及菲律宾地区附近出现一个反气旋式环流异常, 其强度较 HS 年偏强 (图 8b、c)。该反气旋西北侧的西南风将水汽从南海输送到我国南方, 有利于南方正降水异常的出现; HS 年此反气旋异常偏弱, 所以我国南方的降水异常不显著。此外, 由图 8b 和 8c 也可以看到, 位于我国华北北部的气旋式环流异常在 HS/LS 年 SON (0) 时也存在差异, 具体表现为: LS 年 (图 8c) 时此气旋式环流异常的强度较强, 其西侧的偏北风也偏强; 而 HS 年时, 其强度较弱且不显著 (图 8b)。根据 Wu et al. (2003) 的研究结果, 此气旋式环流异常西侧的偏北风对 ENSO 发展期我国北方地区出现的降水负异常起到重要作用。前面的分析已经指出, 同为 ENSO 发展期秋季, HS 年我国北方没有明显的降水异常出现, 相反, LS 年我国北方存在显著的少雨区。这一降水差异的特征与这里讨论的气

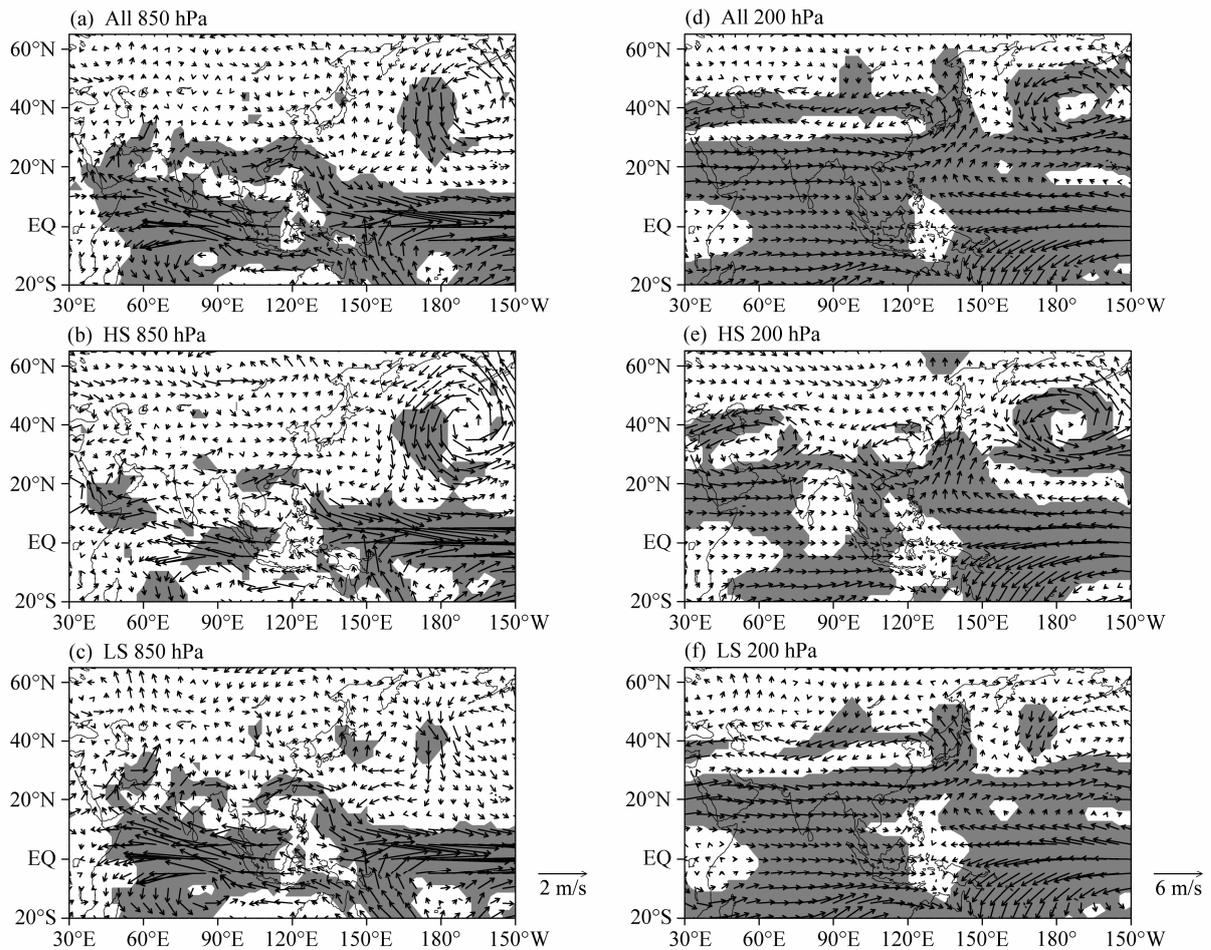


图 8 冬季 Niño3 指数对 ENSO 发展期秋季 SON (0) 平均 850 hPa (a-c, 单位: 2 m/s) 和 200 hPa (d-f, 单位: 6 m/s) 风场的回归: (a、d) 1952-2010 年; (b、e) HS 年; (c、f) LS 年。阴影表示通过 95% 信度检验的区域

Fig.8 Regressions of the SON(0) mean (a-c) 850 hPa (units: 2 m/s) and (d-f) 200 hPa (units: 6 m/s) winds on the DJF Niño3 index for (a, d) the period of 1952-2010, (b, e) HS years, and (c, f) LS years. Shadings indicates the 95% confidence level

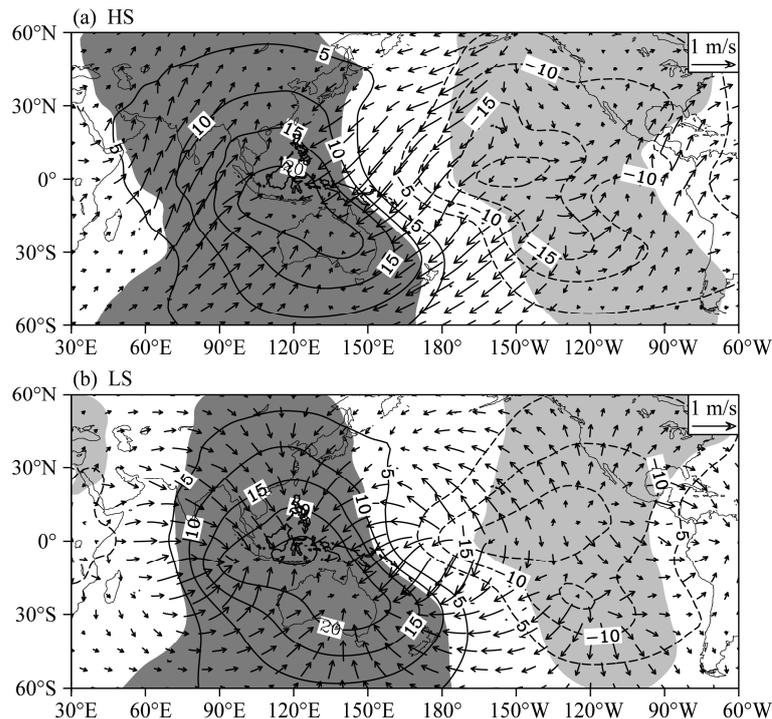


图9 冬季 Niño3 指数对 ENSO 发展期秋季 SON (0) 平均的 200 hPa 速度势函数 [等值线间隔: $5 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{s}$ (已略去零等值线)] 以及辐散风场 (箭头, 单位: m/s) 的回归: (a) HS 年; (b) LS 年。浅、深阴影: 负、正值通过 95% 信度检验的区域

Fig.9 Regressions of the SON(0) mean 200-hPa velocity potential [contour; interval: $5 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{s}$ (Zero contour lines are omitted)] and the divergent wind field (vectors; units: m/s) on the DJF Niño3 index for (a) HS years and (b) LS years. Light and dark shadings indicate the areas with negative and positive values at the 95% confidence level, respectively

旋式环流异常在 HS/LS 年表现出来的强弱异常相一致。值得指出的是, 此气旋式环流异常具有相当正压结构, 即从对流层低层直至高层均能表现出来 (图 8b-f)。

前面第 3 节的研究已经揭示出太阳活动对 ENSO 海温异常演变的影响, 在 ENSO 的发展期, 由于太阳活动导致类 El Niño 或类 La Niña 型的海温异常, 从而在 HS 年时 ENSO 发展期的海温异常被削弱, 在 LS 年时海温异常则增强。因此, HS 年 (LS 年) ENSO 发展期秋季热带海洋上东西向的海温梯度明显减弱 (增强) (图 3c、i), 这样就会引起东西方向上的 Walker 环流出现异常。图 9 分别给出了 HS/LS 年 SON (0) 200 hPa 的速度势函数及其辐散风场对 Niño3 指数的回归, 从图中一方面可以看出异常的大尺度上升下沉运动, 另一方面也可以反映异常的 Walker 环流。无论是 HS 年还是 LS 年, 与 ENSO 相联系的速度势都表现出一个东西向的偶极子型, 辐散风场表明在热带中东太平洋上空有明显的辐散, 而在热带西太平洋上空有显著的辐合, 因此出现在热带中东太平洋上升并在热带西太平

洋下沉的异常 Walker 环流。比较两者间的差别可以看出, 在 LS 年, 热带西太平洋上空的辐合明显偏强 (图 9b), 说明该地区的下沉运动比 HS 年显著增强。这与图 3c、i 中对应的 HS 年和 LS 年 ENSO 发展期秋季热带太平洋东西向的海温梯度也是一致的, 特别在 LS 年印度洋有与西太平洋相反的海温异常, 更进一步加强了西太平洋地区异常的低空辐散及下沉运动。异常的下沉运动对应着异常的大气冷源, 根据 Feng et al. (2011) 的研究, 大气异常冷源的强弱对西太平洋地区的异常反气旋环流的强弱起着决定性的作用。因此, LS 年 ENSO 发展期出现的偏强的热带西太平洋反气旋环流可能是与该地区异常强的下沉运动对应的大气异常冷源联系在一起的。

6 结论

本文在讨论了太阳活动影响 ENSO 事件海温异常演变的基础上, 分析了在太阳射电流量高、低不同年与 ENSO 相联系的东亚地区降水异常分布, 特别对 ENSO 发展期秋季东亚地区降水异常对太阳射

电流量高、低的不同响应以及相关的物理过程做了研究。得到的主要结论有以下几点:

(1) 在太阳射电流量高和低年,无论是与 ENSO 有关的海温异常的强度还是海温异常的形态的演变上都有明显的不同。HS 年 ENSO 发展期各阶段赤道东太平洋以及热带西太平洋的正、负相关的强度和范围都有所减小,但 ENSO 衰减期赤道东太平洋的正相关衰减缓慢,显著信号可持续到次年夏季;与此不同的是,LS 年 ENSO 衰减期赤道东太平洋的正相关区迅速减小,至次年夏季基本消失不见。特别在 ENSO 发展期秋季,随着赤道东太平洋海温的增暖,HS 年热带西太平洋海温异常较弱,印度洋 SST 异常基本上未能通过信度检验;而 LS 年热带西太平洋海温异常较强,且印度洋显著偏暖。因此,从热带西太平洋和印度洋海温的异常来看,太阳射电流量高、低年最大的差别出现在 ENSO 发展期的秋季。

(2) 尽管东亚地区的降水主要集中在夏季,但对于长江中上游以北地区,秋季降水可以占到全年降水的 30%左右,同样占有重要的地位。并且,分析表明 ENSO 对我国降水影响最显著的时间段是在发展期的秋季和衰减期的春季,若考虑太阳射电流量高、低不同年,与 ENSO 相联系的东亚降水异常的差异则主要出现在 ENSO 发展期的秋季。HS 年 ENSO 发展期秋季我国大部分地区的降水异常信号较弱,而 LS 年时我国长江以南和长江以北的反向降水变化就非常显著。而在 ENSO 衰减期的春季,我国东部往往普遍降水偏多,只是在西南和高原东部地区存在少雨区,但此时无论是太阳射电流量高年还是低年,东亚降水异常信号均较弱。

(3) 针对 HS 和 LS 年 ENSO 发展期秋季东亚高低空风场的分析表明,在热带西太平洋地区存在低层辐散、高层辐合的异常,且这种辐合/辐散的异常在 LS 年表现得更加显著;表明 LS 年发展期秋季在南海及菲律宾地区附近出现的反气旋式环流异常明显偏强,从而给我国南方地区带来丰沛的水汽,增加了上述地区降水。同时,LS 年位于华北北部的气旋式环流异常也偏强,其西侧的偏北风造成长江以北地区的降水负异常。与上述相反的是,HS 年热带西太平洋反气旋和位于我国北方的气旋异常均明显偏弱,从而导致我国大部分地区的降水异常较弱且不显著。进一步的分析还表明,热带西太平

洋反气旋环流异常的差异与 ENSO 发展期秋季 Walker 环流的异常的差异是一致的。与 HS 年相比,LS 年热带西太平洋上空的辐合明显增强,说明该地区上空的下沉运动偏强。ENSO 发展期秋季东亚大气环流对太阳射电流量高低的不同响应很可能是由于太阳活动对热带海温的影响所致,HS (LS) 年时会在太平洋强迫出类 La Niña (El Niño) 型的海温异常,导致在热带中东太平洋上升并在热带西太平洋下沉的异常 Walker 环流明显偏弱(偏强)。这样与 HS 年相比较,LS 年在热带西太平洋的低层辐散就更强,热源导致的反气旋环流也就更强。

太阳辐射是地球大气环流能量的主要来源,因而对太阳活动响应的研究是十分必要的。本研究只是从统计角度出发分析了太阳活动对 ENSO 事件海温异常演变以及与之相联系的东亚降水和环流的影响,主要的分析集中在 ENSO 发展期的秋季。事实上,太阳活动对海温、东亚降水异常的影响不局限于秋季,这从第 3 和第 4 节中都可以看到,与此相关的大气环流过程及其中的物理机制都还需要今后进一步加以研究。

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. Impacts of El Niño and La Niña on the cycle of the 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.
- 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.
- 段长春, 孙绩华. 2006. 太阳活动异常与降水和地面气温的关系 [J]. 气象科技, 34 (4): 381-386. Duan Changchun, Sun Jihua. 2006. Relationship between abnormal solar activities and precipitation and temperature in China [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 34 (4): 381-386.
- 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.
- Huang R H, Li L. 1989. Numerical simulation of the relationship between the anomaly of subtropical high over East Asia and the convective activities in the western tropical Pacific [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 6 (2): 202-214.

- Huang R H, Wen C, 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.
- Huang R H, Wu Y F. 1989. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 6 (1): 21-32.
- 黄荣辉, 陈文. 2002. 关于亚洲季风与 ENSO 循环相互作用研究最近的进展 [J]. *气候与环境研究*, 7 (2): 146-159. Huang Ronghui, Chen Wen. 2002. Recent progresses in the research on the interaction between Asian monsoon and ENSO cycle [J]. *Climate and Environmental Research (in Chinese)*, 7 (2): 146-159.
- 黄荣辉, 陈文, 丁一汇, 等. 2003. 关于季风动力学以及季风与 ENSO 循环相互作用的研究 [J]. *大气科学*, 27 (4): 484-502. Huang Ronghui, Chen Wen, Ding Yihui, et al. 2003. Studies on the monsoon dynamics and the interaction between monsoon and ENSO cycle [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27 (4): 484-502.
- 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.
- 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.
- 李春晖, 杨志峰. 2005. 太阳活动与黄河流域降水关系分析 [J]. *气象*, 31 (11): 42-44. Li Chunhui, Yang Zhifeng. 2005. Relationship between solar activities and precipitation in the Yellow River basin [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 31 (11): 42-44.
- 李可军, 向福元, 李建勇, 等. 2000. 中纬度地区的洪水与太阳活动关系的研究 [J]. *云南天文台台刊*, (2): 45-50. Li Kejun, Xiang Fuyuan, Li Jianyong, et al. 2000. Relationship between solar activities and large flood in the middle latitude regions of the earth [J]. *Publication of Yunnan Observatory (in Chinese)*, (2): 45-50.
- 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.
- 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.
- 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.
- 孙长安, 杨本有. 1992. 太阳活动与长江中下游地区旱涝的规律 [J]. *天文学报*, 33 (2): 179-185. Sun Chang'an, Yang Benyou. 1992. The solar activity and the regularities of droughts and waterloggings in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Acta Astronomica Sinica (in Chinese)*, 33 (2): 179-185.
- 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 (9): 1517-1536.
- 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 analyses [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.
- Yasunari T. 1990. Impact of Indian monsoon on the coupled atmosphere/ocean system in the tropical Pacific [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 44 (1-4): 29-41.
- 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]. *Climate and Environmental Research (in Chinese)*, 8 (3): 274-290.