

赵树云, 陈丽娟, 崔童. 2017. ENSO 位相转换对华北雨季降水的影响 [J]. 大气科学, 41 (4): 857–868. Zhao Shuyun, Chen Lijuan, Cui Tong. 2017. Effects of ENSO phase-switching on rainy-season precipitation in North China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (4): 857–868, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1701.16226.

# ENSO 位相转换对华北雨季降水的影响

赵树云<sup>1,2</sup> 陈丽娟<sup>1,2,3</sup> 崔童<sup>1</sup>

1 国家气候中心气候研究开放实验室, 北京 100081

2 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

3 南京大学中国气象局—南京大学气候预测研究联合实验室, 南京 210023

**摘 要** 利用国家气候中心华北地区站点雨季降水数据及美国国家环境预报中心和大气研究中心 (NCEP/NCAR) 的再分析数据等资料, 采用统计诊断方法, 分析了 1961~2014 年华北雨季降水异常偏多 (少) 年对应的 Niño3.4 指数变化特征, 发现华北雨季降水异常偏多年通常发生在 El Niño 结束且当年转为 La Niña 的年份, 而华北雨季降水异常偏少年通常发生在赤道中东太平洋冷水位相结束且当年发展成 El Niño 事件的年份。并且在华北雨季降水异常偏多年, 7~8 月华北平均日降水量超过 10 mm 的天数约占 25%, 日降水量在 4~10 mm 的天数也约占 25%, 两者所占比率远高于华北雨季降水异常偏少年。对华北雨季降水异常偏多年的同期环流特征分析显示: 西北太平洋副热带高压 (副高) 北跳偏早且有明显阶段性偏北情况, 同时东亚高空副热带西风急流北移, 从而造成华北雨季天气过程频繁、降水偏多。进一步诊断环流特征与 ENSO 位相转换的关系发现: 相比 El Niño 衰减年, 在 El Niño 转为 La Niña 的年份, 7~8 月 500 hPa 日本海到渤海正位势高度距平加强, 更符合华北雨季降水偏多年的典型环流特征; 同时热带沃克环流显著加强, 造成东亚高空副热带西风急流北移更为显著, 从而更有利于华北盛夏和雨季降水偏多。文中揭示的现象启示我们在做华北盛夏降水和雨季降水的预测时, 需要关注 ENSO 事件前期的变化速度以及未来的演变特征。

**关键词** 华北雨季 ENSO 位相转换

文章编号 1006-9895(2017)04-0857-12

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1701.16226

## Effects of ENSO Phase-Switching on Rainy-Season Precipitation in North China

ZHAO Shuyun<sup>1,2</sup>, CHEN Lijuan<sup>1,2,3</sup>, and CUI Tong<sup>1</sup>

1 Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration (CMA), Beijing 100081

2 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

3 CMA–NJU Joint Laboratory for Climate Prediction Studies, Nanjing University (NJU), Nanjing 210023

**Abstract** The changing characteristics of Niño3.4 index during 1961–2014 corresponding to much more (less) RSPNC (rainy-season precipitation in North China) were statistically analyzed using RSPNC station data and NCEP/NCAR

收稿日期 2016-09-07; 网络预出版日期 2017-01-20

作者简介 赵树云, 女, 1985 年出生, 助理研究员, 从事短期气候预测和气候变化研究。E-mail: zhaoshuyun@cma.gov.cn

通讯作者 陈丽娟, E-mail: chenlj@cma.gov.cn

项目资助 国家重点基础研究发展计划 (2015CB453203), 国家自然科学基金面上项目 41275073, 中国气象局气候研究开放课题青年基金 2016 年度资助项目

Funded by National Basic Research Program of China (Grant 2015CB453203), National Natural Science Foundation of China (Grant 41275073), LCS Open Funds for Young Scholars (2016)

(National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) reanalyzed data, etc. It was found that most of the years with much more RSPNC were coincident with the ENSO phase-switching years from El Niño to La Niña, and most of the years with much less RSPNC corresponded to the years when the sea surface temperature anomalies over the central and eastern tropical Pacific changed from negative to positive for El Niño phase. In the years with much more RSPNC, days with regional mean rainfall more than 10 mm over North China during July and August accounted for about 25% of the total days, and days with regional mean rainfall between 4–10 mm also accounted for about 25% of the total. Both are far more than that in the years with much less RSPNC. The earlier than normal northward shift of the NWPSH (northwestern Pacific subtropical high), the evident maintenance of NWPSH at the location more north than its normal position, and the northward shift of the East Asian subtropical jet stream were major reasons for the frequent and heavy rainfall in July and August in the years with much more RSPNC. Compared with the El Niño decaying years, the years when ENSO switched from El Niño to La Niña had stronger positive geopotential height anomaly over 500 hPa near the Japan Sea during July and August, which was more in accordance with the typical circulation pattern in higher RSPNC years. In addition, compared with the El Niño decaying years, the years when ENSO switched from El Niño to La Niña had stronger Walker circulation during July and August. As a result, the East Asian subtropical jet stream shifted northward more significantly, which was also in favor of more precipitation over North China. The phenomenon inspired us to pay close attention to the changing speed of ENSO event in the past and future, which might be helpful for forecasting rainy-season precipitation in North China.

**Keywords** Rainy-season in North China, ENSO, Phase-switching

## 1 引言

华北雨季受东亚夏季风向北推进的影响, 每年7月中下旬到8月中上旬是降水最活跃的时期, 平均降雨量一般可占到夏季总降雨量的50%。华北雨季降水的多少是中国东部夏季降水异常分布格局中的重要一环(赵振国, 1999)。

华北雨季降水的多少与东亚夏季风的强弱有很好的对应关系(竺可桢, 1934; 郭其蕴和王继琴, 1988)。黄荣辉等(2005)指出, 从年际变化上看, 南海夏季风爆发偏早有利于黄河流域、华北和东北夏季降水正常或偏多。但江志红等(2006)从年代际尺度上分析发现, 20世纪70年代后南海夏季风建立时间较早, 对应华北雨季并不明显。丁一汇和刘芸芸(2008)通过研究亚洲—太平洋地区的遥相关型, 还发现华北夏季降水与西北太平洋夏季风和印度夏季风强度均存在正相关关系。除了受东亚夏季风系统成员的直接影响外, 华北雨季降水还间接地受热带太平洋海温、印度洋海温、北大西洋海温、南大西洋海温、南极涛动、北极海冰及其导致的异常波列等因素的影响(陈文, 2002; 宋华和孙照渤, 2003; Wang and Fan, 2005; 陈文等, 2006; 范可和王会军, 2006; 刘娜和李双林, 2015; 阮成卿和李建平, 2016; 郭恒和张庆云, 2016)。这其中最受关注的还是 ENSO 循环的影响。

人们很早就认识到 ENSO 对东亚季风的影响, 如陶诗言和张庆云(1998)发现 El Niño 年东亚冬

季风偏弱, 夏季风也偏弱; 而陈文(2002)将 El Niño 或者 La Niña 事件进一步细化为四个阶段: 爆发前冬季、发展期夏季、盛期冬季和衰亡期夏季, 并指出正是由于 El Niño 和 La Niña 事件, 东亚冬、夏季风之间才存在紧密的联系。赤道中东太平洋海温的变化通过影响东亚夏季风的强弱、副热带高压和副热带西风急流的位置, 进而对华北雨季降水产生影响(廖清海等, 2004; 郝立生等, 2011; 郝立生和丁一汇, 2012)。赵汉光(1994)发现赤道东太平洋海温偏低时, 华北雨季强度偏强的现象。王丽华和陈乾金(2000)分析了华北平原代表站点 1951~1995 年的降水资料, 发现华北 6~8 月严重涝年多发生在赤道东太平洋海温的下降阶段, 而严重干旱年多发生在赤道东太平洋海温的上升阶段。陈文等(2006)通过分析 1951~2000 年中国夏季降水不同模态与海温的关系发现, 当热带太平洋出现 El Niño 事件时, 华北和东北南部降水偏少; 而热带太平洋出现 La Niña 事件时, 华北和东北南部降水偏多。范可等(2008)利用 6 月的 Niño3 指数, 结合前冬至夏季的环流指数, 建立利用年际增量方法预测华北汛期降水的模型。黄平和黄荣辉(2010)发现 El Niño 衰减年, 7 月华北地区易多雨, 但从整个夏季来看, 更有利于长江流域出现洪涝。

总结前人的研究, El Niño (La Niña) 事件的不同阶段对应的华北雨季降水的多少并不完全相同。多数认为 El Niño 发展年夏季, 华北雨季的强度偏弱; 而 El Niño 衰减年夏季, 华北雨季强度偏

强。但实际情况并非总是如此,例如 1983 年和 1992 年均均为 El Niño 衰减年,但华北汛期降水却显著偏少(陆日宇, 2002)。分析发现 1983 年和 1992 年虽然为 El Niño 衰减年,但 El Niño 的衰减速度很慢,而 El Niño 衰减速度快的 1973 年和 1995 年,华北汛期降水显著偏多(陆日宇, 2002)。这提示我们华北雨季降水不仅与 ENSO 循环的阶段有关系,还可能与 ENSO 循环中的细节,如位相的转换速度、事件的强度等有密切的关系,需要进一步研究。另外,已有研究中,华北地区的站点多采用 17 个代表站(宋华和孙照渤, 2003),代表性有限。国家气候中心 2014 年制定了新的华北雨季监测标准(气预函(2014) 117 号, 2014),所采取的站点范围与 17 站所代表的区域也有所区别(见第 2 节)。因此,从华北雨季监测、异常诊断角度上讲,华北雨季降水与 ENSO 循环的关系及其机理都值得做进一步的分析和研究。

## 2 资料和方法

本文所用数据主要包括:国家气候中心 1961~2014 年华北雨季降水的监测数据;国家气象信息中心的中国地面气象要素月(日)值数据集,从中提取出华北地区 236 站 7~8 月的降水数据,其中月值数据时间范围为 1951~2013 年,日值数据时间范围为 1951~2014 年;NCEP 的日和月平均再分析数据(Kalnay et al., 1996),时间范围为 1948~2015 年,空间分辨率为  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ;美国气候预测中心(CPC)的三个月滑动平均的 Niño3.4 指数(Huang et al., 2015);NOAA 月平均降水数据 PREC/L(Chen et al., 2002),时间范围为 1948~2015 年,空间分辨率为  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。气候值均采用 1981~2010 年平均。分析方法主要有合成分析、相关分析、显著性检验等统计诊断方法。

图 1 给出国家气候中心目前业务中华北雨季监测标准(气预函(2014) 117 号, 2014)中所采用的 236 个代表站,覆盖了山西、北京、天津、河北和内蒙古的部分地区。相比国家“九五”科技项目“我国短期气候预测系统的研究”中规定的 17 个代表站(承德、北京、天津、石家庄、德州、邢台、安阳、烟台、青岛、潍坊、济南、临沂、菏泽、郑州、长治、太原、临汾),新的监测标准中对华北地区的定义范围相对偏北一些。

根据国家气候中心的监测数据,华北雨季平均

开始时间为 7 月 18 日,平均结束时间为 8 月 18 日。但华北雨季的开始/结束时间和雨期有很强的年际变化,年与年之间差异很大,给环流分析带来诸多不便。为此我们首先检验了华北 7~8 月(盛夏)降水量与华北雨季降水量的关系。从图 2 可以看出,1961~2013 年华北雨季降水与华北 7~8 月降水的年际变化有很好的一致性,两者的相关系数可以达到 0.78,通过了 99% 的信度水平检验。同时 1961~2013 年华北雨季降水与华北 7~8 月降水的距平(相对于 1981~2010 年的平均值)同号率达到 77%。华北 7~8 月降水与华北雨季降在年际变化上较好

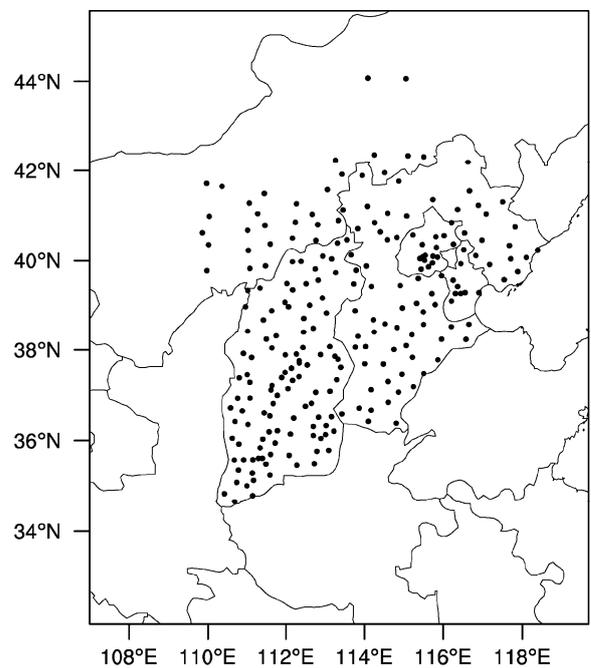


图 1 华北地区 236 个代表站地理分布示意图

Fig. 1 Geographic distribution of the 236 representative stations in North China

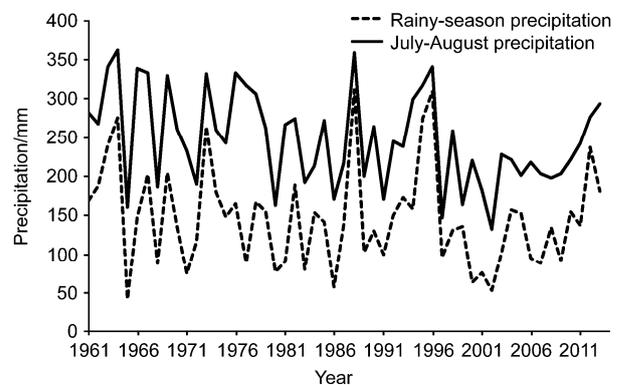


图 2 华北雨季降水与华北 7~8 月降水量(单位: mm)的时间序列  
Fig. 2 Time series of precipitation (units: mm) during the rainy season and during July–August in North China

的一致性为后面做诊断分析和机理解释提供了方便。

### 3 ENSO 位相转换对华北雨季降水的影响及机理分析

#### 3.1 华北雨季降水与 ENSO 位相转换的关系

根据国家气候中心对华北雨季降水的监测数据,从 1961~2014 共 53 年中选出华北雨季降水最多的 5 年(约占总数的 10%),按偏多的程度排序,分别为 1988 年、1996 年、1964 年、1995 年和 1973 年;选出华北雨季降水最少的 5 年,按偏少的程度排序为 1965 年、2002 年、1986 年、2000 年和 2014 年。根据 CPC 的 Niño3.4 指数和定义 ENSO 事件的标准,华北雨季 5 个降水异常偏多年,除 1996 年外,其余 4 年均处于 El Niño 结束且当年转为 La Niña 的年份,而且这 4 年中 El Niño 均结束于冬末春初(2~3 月)(图 3a)。而根据 CPC 的 ENSO 标准,1961~2014 年 El Niño 结束且当年转为 La Niña 的年份共有 8 年,除 2007 年外,华北雨季降水均为正常或偏多。华北雨季 5 个降水异常偏少年,除 2000 年外,其余 4 年均均为 La Niña 结束或者赤道中东太平洋冷位相结束并当年发展为 El Niño 的年份,且这种冷暖位相转换发生的时间也比较早(图 3b)。

为什么 1996 年和 2000 年的海温背景与其他个例明显不同呢?反查这两年华北地区 7~8 月逐日降水资料和天气气候事件发现,1996 年华北雨季降水异常偏多主要是 9608 号台风造成的,该台风是为数不多的北上影响台风,于 1996 年 8 月初影响河北和山西,造成了这些地区自“63.8”以来最强的一次暴雨过程(孙建华等,2006)。从图 3a 可以看出,1996 年是赤道中东太平洋冷位相持续的年份。“75.8”河南特大暴雨也是由台风北上引起的(丁一汇,2015),而且 1975 年也是一个 La Niña 持续的年份。有研究表明,相比 El Niño 年,La Niña 年西北太平洋有更多的台风生成与登陆影响我国(黄勇等,2008),而个别北上台风的活动对华北雨季的气候特征来讲是噪音。从图 2 可以看出,2000 年华北 7~8 月总的降水量偏少并不明显,而造成华北雨季降水异常偏少的原因是 2000 年 7 月底到 8 月初华北地区有一段降水的间歇期(图略),导致华北地区提前达到了雨季结束的标准。事实上 2000 年 8 月上旬和中旬前期华北地区仍有一段降水的集中期。

排除 1996 年和 2000 年两个特殊的年份,可以发现华北雨季降水异常偏多年均发生在 El Niño 结束且当年转为 La Niña 的过程中,而异常偏少年均发生在赤道中东太平洋冷水状态结束且当年发展成 El Niño 事件的过程中。这种现象揭示出 ENSO 位相转换过程对华北雨季降水的影响尤为突出。

#### 3.2 华北雨季降水异常特征和对应的环流型

利用逐日降水资料计算得到,华北雨季降水异常偏多年,华北区域 7~8 月平均日降水量在 10 mm 以上的天数大约占 25%,平均日降水量在 4~10 mm 的天数也普遍在 25%左右(图 4a),远远多于华北雨季降水异常偏少年(图 4b)。这说明在华北雨季降水异常偏多年,华北地区发生有明显降水的天气过程比较频繁,也即对流活动活跃。

进一步分析造成华北雨季降水多少的环流特征,以对流层上层 200 hPa 风场和 500 hPa 位势高度场作为代表。东亚副热带高空急流对东亚地区的天气和气候有着重要的影响(陆日宇等,2013)。陆日宇(2002)发现华北涝年,东亚地区上空的急流位置偏北。杜银等(2009)发现盛夏期间,副热带西风急流中心偏西、偏南不利于华北雨季降水,而有利于长江中下游地区入梅提前和梅雨期偏长。从气候平均上看,7~8 月东亚副热带高空西风急流轴从华北上空穿过(图略)。我们计算了华北雨季降水与 7~8 月 200 hPa 纬向风的相关(图 5b),在华北以南至长江流域呈显著的负相关,而在东北北部呈显著的正相关(去掉线性趋势)。这种相关分布反映了东亚副热带高空西风急流轴的北移。

分别绘制 4 个华北雨季降水异常偏多年 7~8 月 200 hPa 纬向风距平场(图 6),一致的特征是,华北以北地区西风增强,而华北以南地区西风减弱,即东亚副热带西风急流轴北移和华北上空南—北向的西风梯度加强。这样使得华北更多地区处于西风急流轴的南侧,有利于高空气流辐散和低空气流辐合,最终有利于华北地区的对流发展。由此可见,在 4 个华北雨季降水异常偏多年,东亚副热带西风急流北移的特征非常典型。

进一步计算华北雨季降水与盛夏(7~8 月)的 500 hPa 位势高度场的相关系数(去掉线性趋势,图 5a),可以看到通过显著性检验的区域有欧亚大陆的乌拉尔山地区、巴尔喀什湖与贝加尔湖之间区域、渤海湾到日本列岛区域,沿纬向呈现“+ - +”

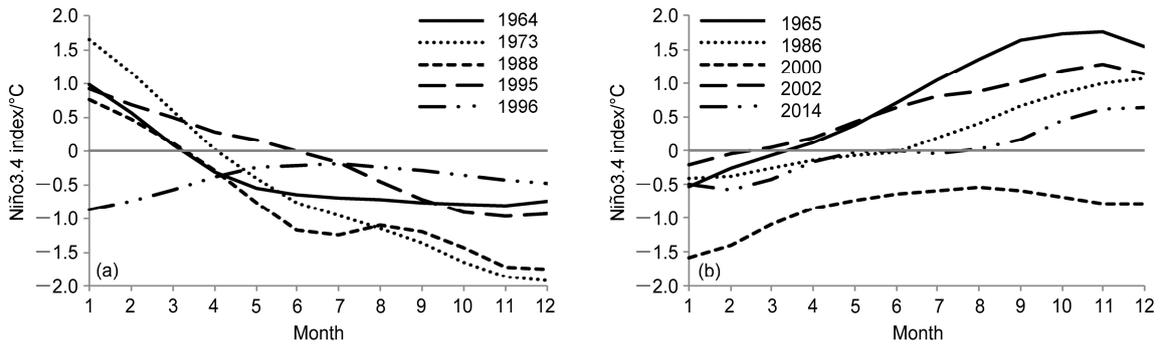


图3 华北雨季降水异常 (a) 偏多年和 (b) 偏少年 Niño3.4 指数的月际变化  
Fig. 3 Monthly changes in Niño3.4 index in the years with abnormally (a) high and (b) low rainy-season precipitation in North China

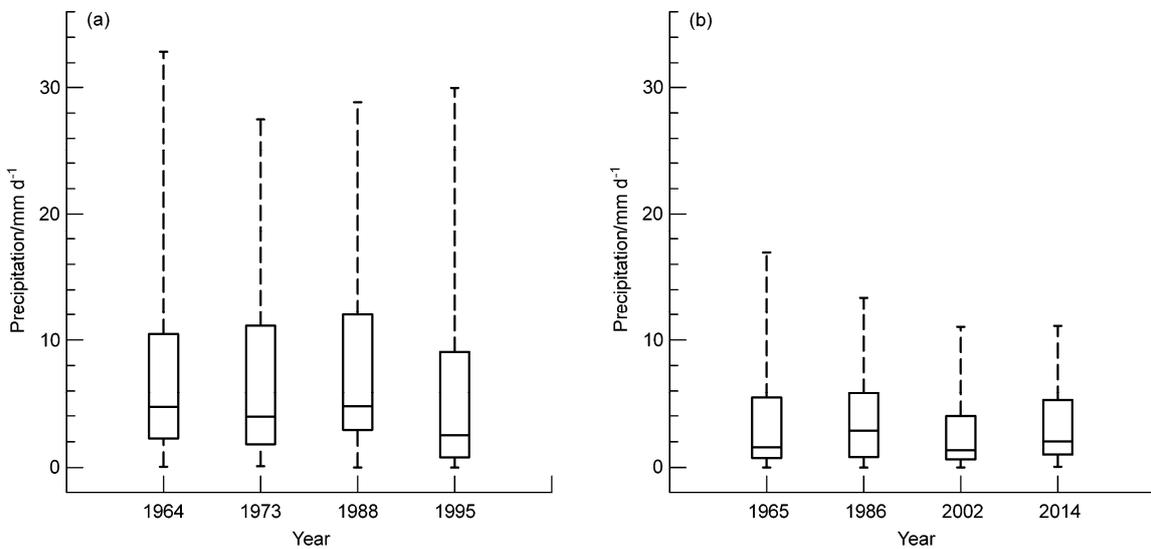


图4 华北雨季降水 (a) 4 个异常偏多年和 (b) 4 个异常偏少年 7~8 月区域平均日降水量的统计分布。虚线的上下边界分别为最大和最小值, 矩形的上下边界分别为上下四分位点, 矩形中间的横线为中位数位置  
Fig. 4 Statistical features of daily rainfall in July–August in four years with abnormally (a) high and (b) low rainy-season precipitation over North China. The upper and lower boundaries of the dashed lines represent the maximum and minimum, the upper and lower boundaries of the rectangles represent the upper and lower quartiles, and the lines in rectangles represent the medians

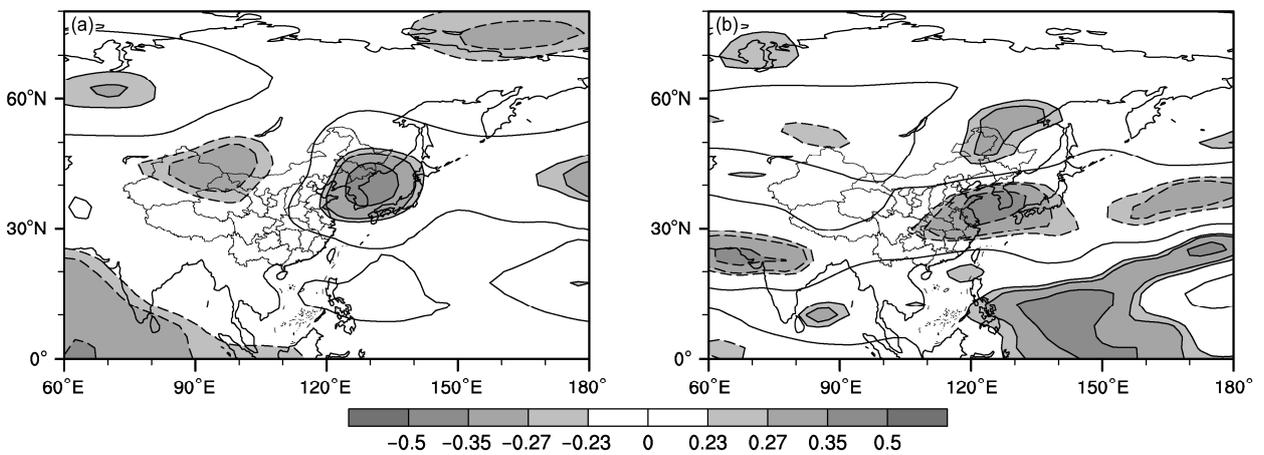


图5 华北雨季降水与盛夏 (7~8 月) 期间平均的 (a) 500 hPa 位势高度和 (b) 200 hPa 纬向风的相关系数, 填色的区域表示结果通过了 90% 的信度水平检验  
Fig. 5 Correlation coefficients between the rainy-season precipitation in North China with (a) 500-hPa geopotential height and (b) 200-hPa zonal winds averaged during July–August. Shaded areas indicate the correlation passed the test at 90% confidence level

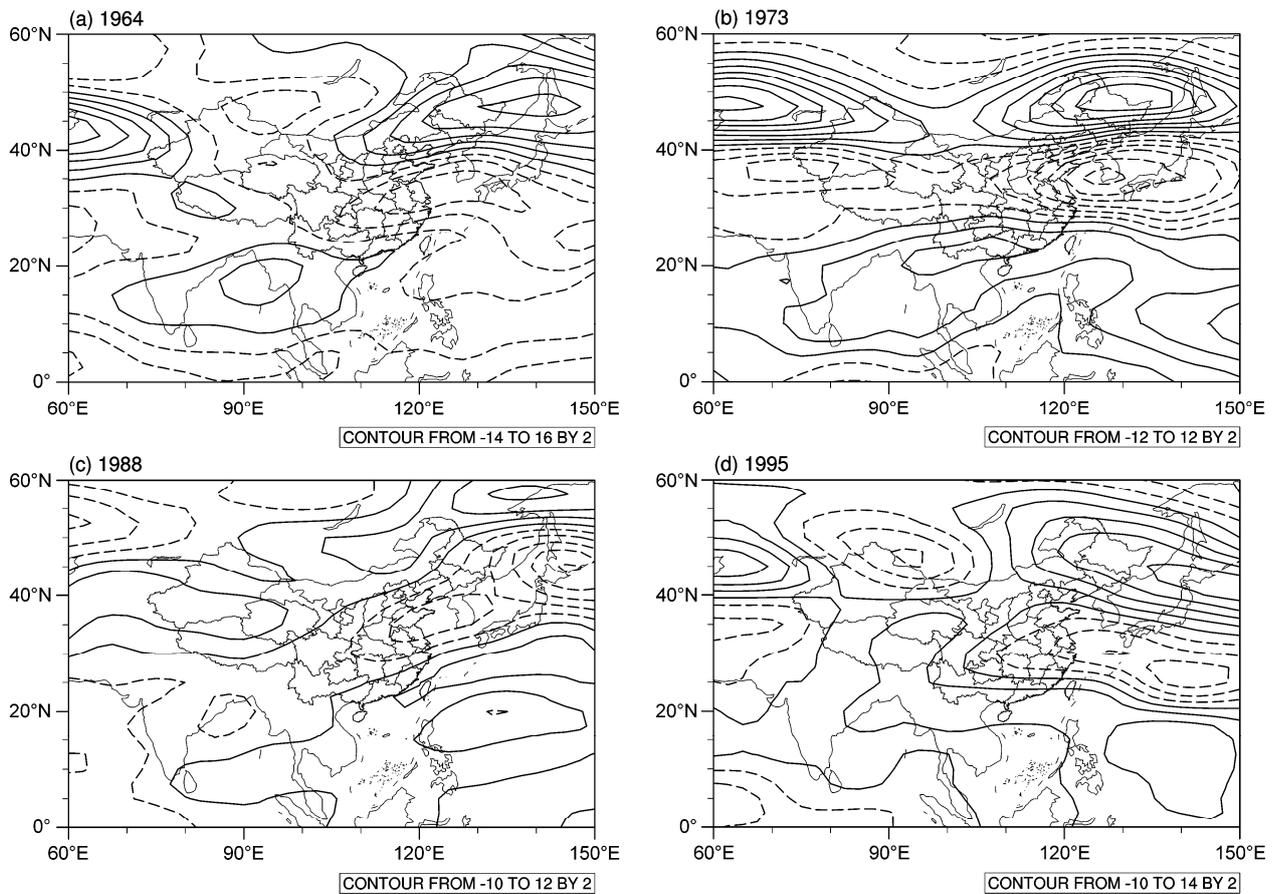


图6 (a) 1964年、(b) 1973年、(c) 1988年和(d) 1995年的7~8月平均200 hPa 纬向风距平(单位:  $\text{m s}^{-1}$ )。实(虚)线表示正(负)值  
Fig. 6 200-hPa zonal wind anomalies (units:  $\text{m s}^{-1}$ ) averaged during July–August in (a) 1964, (b) 1973, (c) 1988, and (d) 1995. Solid (dashed) lines indicate positive (negative) values

的波列结构。卫捷等(2003)和 Wang and He (2015)把这种波列称为 EU 遥相关型,且均指出夏季 500 hPa 位势高度场距平出现图 5a 所示波列的反位相时,会导致华北地区夏季干旱。在该波列中尤其以渤海湾到日本列岛上空的正相关最为显著,体现了西北太平洋副热带高压(副高)的偏西偏北,有利于引导南海和热带太平洋的水汽向华北地区输送。下面进一步分析副高的逐日变化特征。

在华北雨季降水异常偏多的4年中,7~8月副高脊线的总体位置偏北,或者有明显的阶段性异常偏北现象(图7)。并且这4年中,副高在6月底7月初均有一次明显的北跳过程,从前期低于气候平均纬度北抬到高于气候平均纬度。这种突然北跳的过程在1973年尤其明显。而6月底到7月初的副高北跳也是导致1964年、1973年、1988年和1995年华北雨季开始时间偏早的原因,其中前三年华北雨季均开始于7月上旬。同时盛夏期间副高位置偏

北有利于引导水汽向华北地区输送,这与图5a所示的有利于华北雨季降水的500 hPa环流场特征是一致的。

### 3.3 ENSO 位相转换对华北雨季降水和环流影响的机理分析

引言中提到,许多研究发现 El Niño 衰减阶段的夏季,华北雨季降水容易偏多。因此,这里通过对比 El Niño 衰减年和 El Niño 转为 La Niña 年的环流特征来探讨华北雨季降水异常偏多年易出现在 El Niño 转为 La Niña 年的原因及机理。根据 CPC 三个月滑动平均的 Niño3.4 指数,1961~2015年间所有的 El Niño 衰减年份有16年:1964年、1966年、1970年、1973年、1977年、1978年、1980年、1983年、1988年、1992年、1995年、1998年、2003年、2005年、2007年和2010年。其中 El Niño 结束后当年转为 La Niña 的年份有8年:1964年、1970年、1973年、1988年、1995年、1998年、2007年

和 2010 年。

从所有 El Niño 衰减年 7~8 月 500 hPa 位势高度场距平的合成看, 热带太平洋位势高度为负距平, 而太平洋南北纬约 20°~30°为正距平, 体现了两半球副热带高压整体向极地方向偏移的趋势(图 8a)。从日本南部到南海北部的东亚地区位势高度场合成为正距平, 但是没有通过显著性检验。相比之下, El Niño 转为 La Niña 年, 两半球太平洋上副热带高压整体向两极偏移的趋势更加明显, 东亚地区位势高度距平同样没有通过显著性检验, 但是从日本南部到渤海的正位势高度距平比 El Niño 衰减年有明显加强(图 8c), 而这种特征更符合华北雨季降水偏多年东亚地区典型的东高西低的环流形势(图 5a)。从 850 hPa 风场距平的合成看, 相比所有 El Niño 衰减年, El Niño 转为 La Niña 年, 日本南部到渤海的正位势高度距平加强更有利于对流层低层来自南海和热带太平洋的水汽向华北地区输送。

在所有 El Niño 衰减年, 7~8 月热带中西太平洋、海洋性大陆以及孟加拉湾地区高空西风增强(图 8b), 对应着低空东风增强, 反映了热带沃克环流的加强(图 9a), 另外, 200 hPa 纬向西风在华北和东北上空增强, 在黄淮以南地区减弱(图 8b), 体现了东亚高空西风急流的北移。事实上, 热带与中高纬的环流系统通过经向三圈环流彼此有紧密的联系, 热带太平洋沃克环流增强可以通过西太平洋暖池地区的上升运动将东亚副热带系统向北极方向推动, 造成东亚副热带西风急流偏北, 在 200 hPa 纬向风场上东亚上空为经向遥相关波列(图 5b), 有利于华北盛夏对流活跃。同样的原因, 西太平洋暖池对流偏强有利于夏季副高北跳偏早和东亚夏季风偏强(黄荣辉等, 2005)。相比 El Niño 衰减年, 在 El Niño 转为 La Niña 年, 盛夏期间热带中西太平洋、海洋性大陆以及孟加拉湾地区高空西风的加强程度更加明显, 而且通过显著性检验的格点数更多(图 8d)。从热带沃克环流的合成图(图 9b)可以看到, 热带沃克环流的增强程度更加显著、西太平洋暖池区的上升运动更加旺盛, 从而引起东亚副热带西风急流北移也更加显著, 更符合图 5b 所示的有利于华北雨季降水的高空风场条件。

综上所述, 虽然研究表明 El Niño 衰减年有利于华北盛夏期间降水偏多, 但是从 500 hPa 位势高度场上看, 并没有显著的环流特征; 从高空纬向风

场上看, El Niño 衰减年热带太平洋上沃克环流加强使得东亚副热带西风急流北移, 有利于华北上空形成辐散形势。相比 El Niño 衰减年, El Niño 转为 La Niña 年, 从日本海到渤海的正位势高度距平加强, 更有利于热带太平洋和南海的水汽向华北输送, 而热带太平洋上沃克环流加强、西太平洋暖池对流活跃使得东亚副热带高空急流北移更加显著, 更有利于东亚遥相关型的形成和华北地区垂直运动的发展, 从而造成 El Niño 转为 La Niña 年华北雨季降水显著偏多。

### 3.4 对盛夏降水预测的启示

从前面的讨论可知, ENSO 位相转换可以通过影响大气环流, 进而影响华北雨季降水。ENSO 位相发生明显转换体现了赤道中东太平洋海温上升或者下降的速度较快, 对环流的影响也比较显著, 如 1961~2015 年间所有的 El Niño 转 La Niña 年 Niño3.4 指数 1~8 月平均下降速度为  $0.30^{\circ}\text{C month}^{-1}$ , 快于所有 El Niño 衰减年的平均 ( $0.22^{\circ}\text{C month}^{-1}$ )。这给华北盛夏和雨季降水的预测以启示: 即前期 ENSO 指数的变化速度可能对华北盛夏和雨季降水多少有较好的指示意义。图 10a 给出 1~8 月 Niño3.4 指数的线性趋势与当年盛夏东亚地区降水的相关系数, 可以看出, 1~8 月 Niño3.4 指数下降速度越快, 越有利于华北、东北南部、西北地区东部和新疆北部、西南地区北部等地盛夏降水偏多。图 10b 为前冬平均的 Niño3.4 指数与次年盛夏东亚降水的相关系数, 可以看出, 前冬 Niño3.4 指数越大, 越有利于西北地区东部、新疆北部等地次年盛夏期间降水偏多, 但是与华北盛夏降水的相关关系并不显著, 即利用前冬的海温指数预测次年盛夏华北降水信号并不显著。而从图 10c 可以看出, 当年夏季平均的 Niño3.4 指数与华北西部、西北地区东部等局部地区的盛夏降水呈反相关关系, 表明同期的海温指数对华北盛夏降水有部分信号, 但是没有图 10a 提供的信息显著。因为华北雨季降水与华北盛夏降水有非常好的对应关系(图 2), 所以在预测华北雨季降水时, 也需要将前期赤道中东太平洋海温变化的速度作为一种考虑因素, 尤其在 El Niño 或者 La Niña 事件的发展和衰减年份更要谨慎。

目前的研究多侧重于从 ENSO 事件的发展年和衰减年角度分析中国东部地区夏季雨型的分布(如赵振国, 1999; 陈文, 2002; 黄平和黄荣辉, 2010),

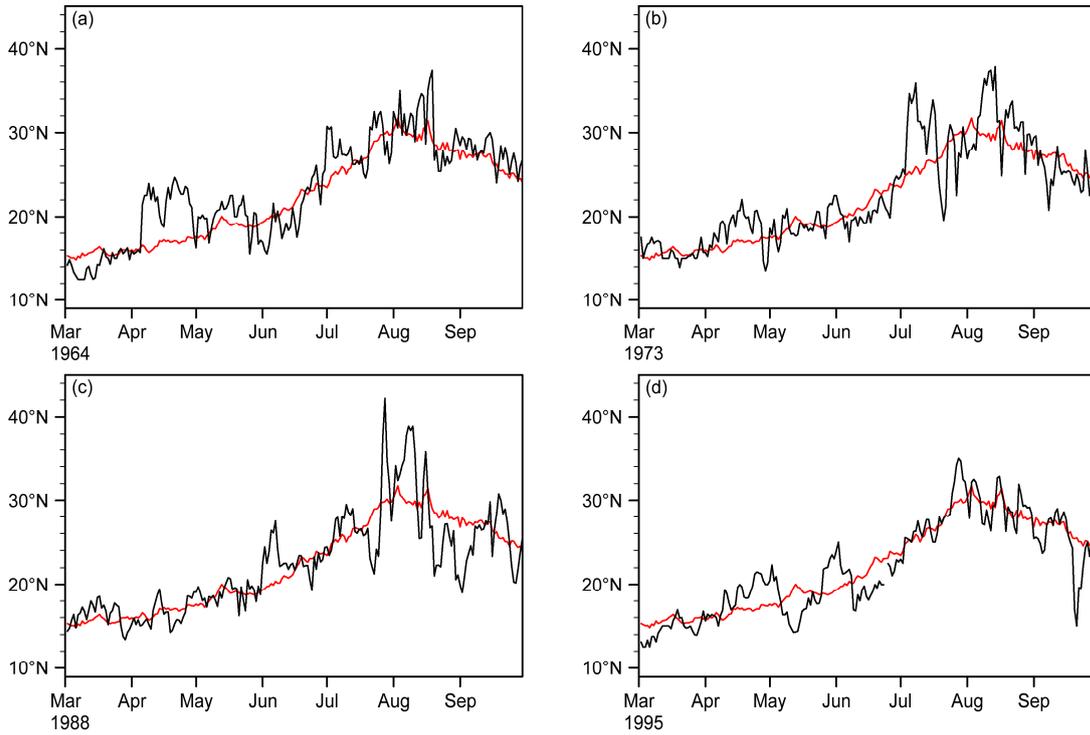


图7 (a) 1964年、(b) 1973年、(c) 1988年、(d) 1995年的3~9月西北太平洋副热带高压脊线的逐日变化(黑色线), 红色线为1981~2010年气候态的西北太平洋副热带高压脊线的平均位置

Fig. 7 Daily changes (black lines) in latitude of the ridge line of the northwestern Pacific subtropical high (NWPSH) from March to September in (a) 1964, (b) 1973, (c) 1988, and (d) 1995. The red lines show the climatological (1981–2010) location of the ridge of the NWPSH

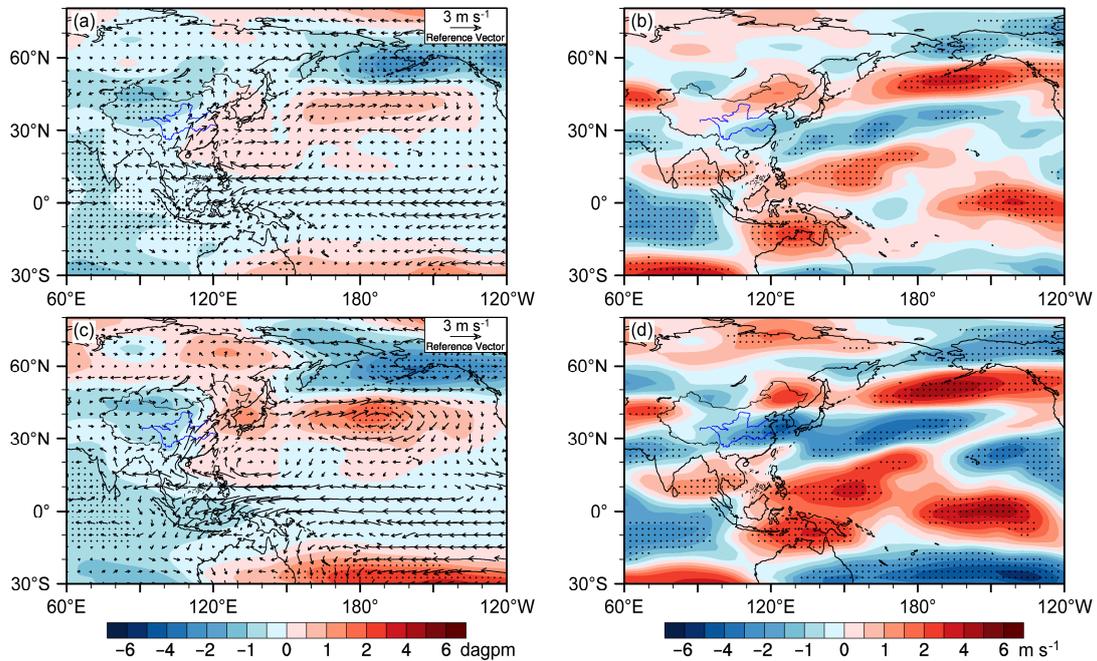


图8 1961~2015年所有El Niño衰减年合成的7~8月(a) 500 hPa位势高度距平(填色, 单位: dagpm)和850 hPa风场距平(箭头, 单位:  $m s^{-1}$ ), (b) 200 hPa纬向风距平(填色, 单位:  $m s^{-1}$ )。1961~2015年所有El Niño转La Niña年合成的7~8月(c) 500 hPa位势高度距平(填色, 单位: dagpm)和850 hPa风场距平(箭头, 单位:  $m s^{-1}$ ), (d) 200 hPa纬向风距平(填色, 单位:  $m s^{-1}$ )。黑点标出的地区表明填色区域所示结果通过了90%的信度水平检验

Fig. 8 Composites of the July–August anomalies for all El Niño decaying years during 1961–2015: (a) 500-hPa geopotential height anomalies (shaded, units: dagpm) and 850-hPa wind field (arrows, units:  $m s^{-1}$ ), (b) 200-hPa zonal wind anomalies (shaded, units:  $m s^{-1}$ ). Composites of the July–August anomalies for all the years El Niño switched to La Niña during 1961–2015: (c) 500-hPa geopotential height (shaded, units: dagpm) and 850-hPa wind field (arrows, units:  $m s^{-1}$ ), (d) 200-hPa zonal wind (shaded, units:  $m s^{-1}$ ). Black dots indicate that results in the shaded areas pass the test at 90% confidence level

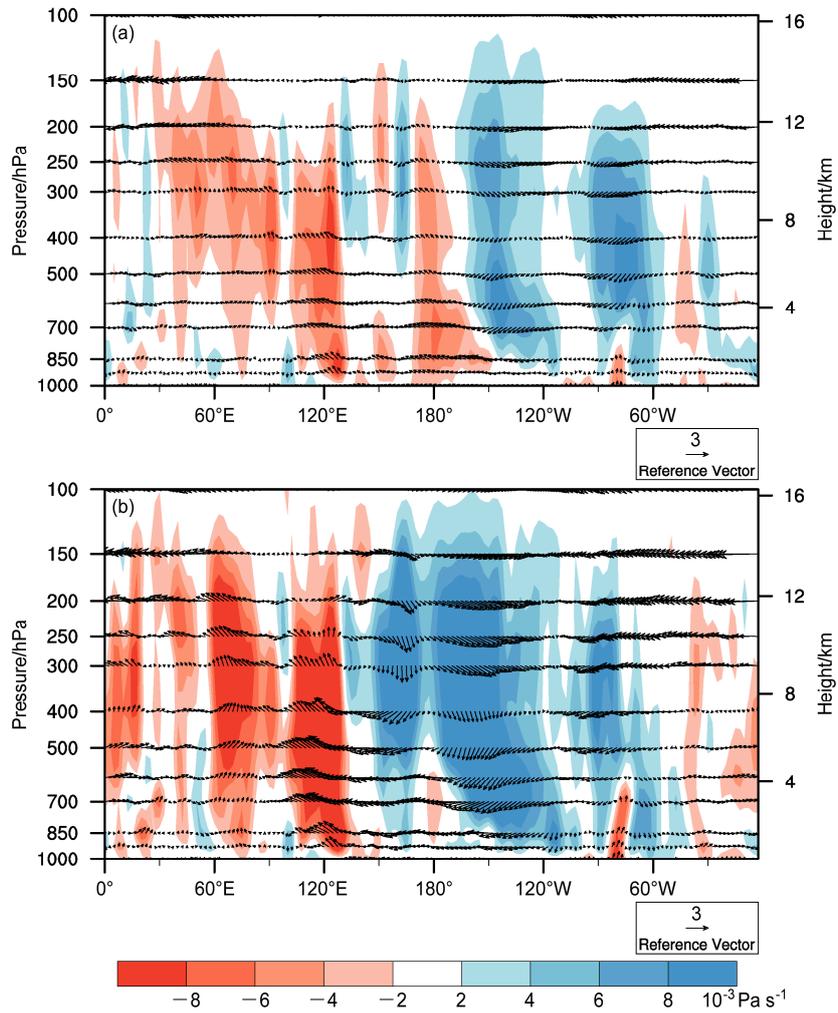


图 9 1961~2015 年所有 (a) El Niño 衰减年和 (b) El Niño 转为 La Niña 年合成的 7~8 月 5°S~5°N 平均垂直速度距平 (填色, 单位:  $10^{-3} \text{ Pa s}^{-1}$ ) 和纬向-垂直剖面上风场距平示意图 (箭头)

Fig. 9 Composites of 5°S~5°N averaged vertical velocity anomalies (shaded, units:  $10^{-3} \text{ Pa s}^{-1}$ ) and the schematic diagram of wind fields anomalies on the zonal-vertical cross section (arrows) in July-August (a) all El Niño decaying years and (b) the years El Niño switched to La Niña during 1961-2015

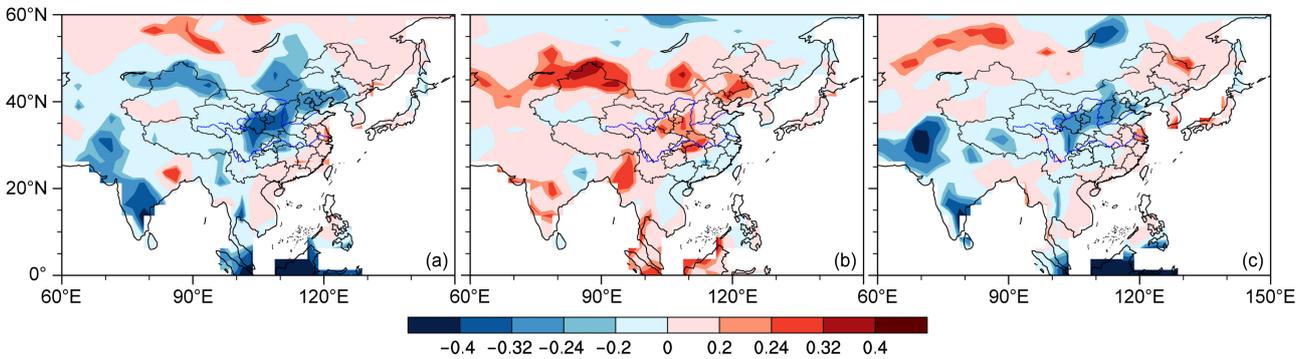


图 10 1951~2015 年东亚 7~8 月降水 (已经去掉了长期线性趋势) 与 (a) 1~8 月 Niño3.4 指数的线性趋势、(b) 前冬 Niño3.4 指数、(c) 夏季 Niño3.4 指数的相关系数。相关系数绝对值超过 0.24 表示通过了 90% 的信度水平检验

Fig. 10 Correlation coefficients (CC) between July-August precipitation over East Asia (the long-term linear trend has been removed) and (a) the linear tendency of January-August Niño3.4 index, (b) pre-winter Niño3.4 index, (c) summer Niño3.4 index. The CC with the absolute values more than 0.24 passed the test at 90% confidence level

许多结论在我国东部夏季降水预测业务中得到了较好的应用。但是就华北区域而言, 仅从 ENSO 事件的发展年和衰减年角度预测盛夏和雨季降水的多少, 信息量不足。从华北雨季降水与 ENSO 位相转换的对应关系, 以及 1~8 月 Niño3.4 指数的变化速度与华北盛夏降水的相关关系来看, 在预测华北盛夏和雨季降水多少时还应该考虑 ENSO 事件变化的细节, 如 El Niño 或者 La Niña 事件前期的发展或衰减速度, 以及其自身未来的发展趋势。

## 4 总结与讨论

通过分析华北雨季降水异常偏多(少)年 Niño3.4 指数的变化特征发现, 华北雨季降水异常偏多年一般发生在 El Niño 结束且当年转为 La Niña 的年份, 而华北雨季降水异常偏少年一般发生在赤道中东太平洋冷水位相结束且当年发展成 El Niño 的年份。通过诊断分析发现, 7 月初副高北跳偏早, 且盛夏间副高有明显阶段性偏北现象, 以及东亚副热带高空急流北移是 El Niño 转 La Niña 年份华北雨季降水异常偏多的环流原因。进一步研究发现, 相比所有 El Niño 衰减年, El Niño 转为 La Niña 的 7~8 月, 500 hPa 高度场上, 日本列岛到渤海的位势高度正距平加强, 更符合华北雨季降水偏多年“东高西低”的典型环流特征, 且随着热带沃克环流的加强, 东亚副热带高空急流北移也比 El Niño 衰减年更为显著, 更有利于华北盛夏对流活动的发生。这启示我们在做华北盛夏和雨季降水预测时, 需要关注前期和未来赤道中东太平洋海温变化速度这一影响因素, 尤其是在 ENSO 事件的发展和衰减年份更要谨慎考虑。

需要指出的是, 不论是 El Niño 衰减年还是 El Niño 转为 La Niña 年, 在做 500 hPa 位势高度距平的合成分析时, 东亚地区均没有通过显著性检验(图 8)。这意味着东亚地区盛夏期间的环流场不仅受低纬度系统的影响, 还可能受其他因素, 如中高纬度环流和外强迫等因素的影响(宋华和孙照渤, 2003; Wang and Fan, 2005)。这些因素也会对华北雨季降水的预测造成很大的不确定性, 需要进一步研究。

## 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 W. 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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.05.02.
- 陈文, 康丽华, 王玓. 2006. 我国夏季降水与全球海温的耦合关系分析 [J]. 气候与环境研究, 11 (3): 259–269. Chen Wen, Kang Lihua, Wang Ding. 2006. The coupling relationship between summer rainfall in China and global sea surface temperature [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (3): 259–269, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2006.03.02.
- Chen M Y, Xie P P, Janowiak J E, et al. 2002. Global land precipitation: A 50-yr monthly analysis based on gauge observations [J]. J. Hydrometeorol., 3 (3): 249–266, doi:10.1175/1525-7541(2002)003<0249:GLPAYM>2.0.CO;2.
- 丁一汇. 2015. 论河南“75.8”特大暴雨的研究: 回顾与评述 [J]. 气象学报, 73 (3): 411–424. Ding Yihui. 2015. On the study of the unprecedented heavy rainfall in Henan Province during 4–8 August 1975: Review and assessment [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 73 (3): 411–424, doi:10.11676/qxxb2015.067.
- 丁一汇, 刘芸芸. 2008. 亚洲—太平洋季风区的遥相关研究 [J]. 气象学报, 66 (5): 670–682. Ding Yihui, Liu Yunyun. 2008. A study of the teleconnection in the Asian–Pacific monsoon region [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 66 (5): 670–682, doi:10.11676/qxxb2008.062.
- 杜银, 张耀存, 谢志清. 2009. 东亚副热带西风急流位置变化及其对中国东部夏季降水异常分布的影响 [J]. 大气科学, 33 (3): 581–592. Du Yin, Zhang Yaocun, Xie Zhiqing. 2009. Location variation of the East Asia subtropical westerly jet and its effect on the summer precipitation anomaly over eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (3): 581–592, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.03.15.
- 范可, 王会军. 2006. 有关南半球大气环流与东亚气候的关系研究的若干新进展 [J]. 大气科学, 30 (3): 402–412. Fan Ke, Wang Huijun. 2006. Studies of the relationship between Southern Hemispheric atmospheric circulation and climate over East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (3): 402–412, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.03.04.
- 范可, 林美静, 高煜中. 2008. 用年际增量方法预测华北汛期降水 [J]. 中国科学 (D 辑): 地球科学, 38 (11): 1452–1459. Fan Ke, Lin Meijing, Gao Yuzhong. 2008. Forecasting the summer rainfall in North China using the year-to-year increment approach [J]. Science in China (Series D): Earth Sciences, 52 (4): 532–539, doi:10.1007/s11430-009-0040-0.
- 郭其蕴, 王继琴. 1988. 中国与印度夏季风降水的比较研究 [J]. 热带气象, 4 (1): 53–60. Guo Qiyun, Wang Jiqin. 1988. A comparative study on summer monsoon in China and India [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 4 (1): 53–60.
- 郭恒, 张庆云. 2016. 北方雨季中国东部降水异常模态的环流特征及成因分析 [J]. 大气科学, 40 (5): 946–964. Guo Heng, Zhang Qingyun. 2016. The dominant modes of precipitation anomalies over eastern China during the northern China rainy season and the possible causes [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (5): 946–964, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1510.15218.
- 郝立生, 丁一汇, 闵锦忠, 等. 2011. 华北降水季节演变主要模态及影

- 响因子 [J]. 大气科学, 35 (2): 217–234. Hao Lisheng, Ding Yihui, Min Jinzhong, et al. 2011. Analysis on seasonally evolutive main modes of North China precipitation and their influence factors [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (2): 217–234, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.02.03.
- 郝立生, 丁一汇. 2012. 华北降水变化研究进展 [J]. 地理科学进展, 31 (5): 593–601. Hao Lisheng, Ding Yihui. 2012. Progress of precipitation research in North China [J]. Progress in Geography (in Chinese), 31 (5): 593–601, doi:10.11820/dlkxjz.2012.05.007.
- 黄平, 黄荣辉. 2010. El Niño 事件对其衰减阶段夏季中国降水季节内演变的影响及其机理 [J]. 大气科学学报, 33 (5): 513–519. Huang Ping, Huang Ronghui. 2010. Effects of El Niño events on intraseasonal variations of following summer rainfall in China and its mechanism [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 33 (5): 513–519, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2010.05.001.
- 黄勇, 李崇银, 王颖, 等. 2008. 近百年西北太平洋热带气旋频数变化特征与 ENSO 的关系 [J]. 海洋预报, 25 (1): 80–87. Huang Yong, Li Chongyin, Wang Ying, et al. 2008. Study on the variation characteristics of annual frequency for tropical cyclones in western North Pacific during the last hundred years and relationship with ENSO [J]. Marine Forecasts (in Chinese), 25 (1): 80–87, doi:10.3969/j.issn.1003-0239.2008.01.012.
- 黄荣辉, 顾雷, 徐予红, 等. 2005. 东亚夏季风爆发和北进的年际变化特征及其与热带西太平洋热状态的关系 [J]. 大气科学, 29 (1): 20–36. Huang Ronghui, Gu Lei, Xu Yuhong, et al. 2005. Characteristics of the interannual variations of onset and advance of the East Asian summer monsoon and their associations with thermal states of the tropical western Pacific [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (1): 20–36, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.01.04.
- Huang B Y, Banzon V F, Freeman E, et al. 2015. Extended reconstructed sea surface temperature version 4 (ERSST.v4). Part I: Upgrades and intercomparisons [J]. J. Climate, 28 (3): 911–930, doi:10.1175/JCLI-D-14-00006.1.
- 江志红, 何金海, 李建平, 等. 2006. 东亚夏季风推进过程的气候特征及其年代际变化 [J]. 地理学报, 61 (7): 675–686. Jiang Zhihong, He Jinhai, Li Jianping, et al. 2006. Northerly advancement characteristics of the East Asian summer monsoon with its interdecadal variations [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 61 (7): 675–686, doi:10.3321/j.issn:0375-5444.2006.07.001.
- 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, doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
- 廖清海, 高守亭, 王会军, 等. 2004. 北半球夏季副热带西风急流变异及其对东亚夏季风气候异常的影响 [J]. 地球物理学报, 47 (1): 10–18. Liao Qinghai, Gao Shouting, Wang Huijun, et al. 2004. Anomalies of the extratropical westerly jet in the North Hemisphere and their impacts on East Asian summer monsoon climate anomalies [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 47 (1): 10–18, doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2004.01.003.
- 刘娜, 李双林. 2015. 基于时间尺度分离的中国东部夏季降水预测 [J]. 应用气象学报, 26 (3): 328–337. Liu Na, Li Shuanglin. 2015. Short-term climate prediction for summer rainfall based on time-scale decomposition [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 26 (3): 328–337, doi:10.11898/1001-7313.20150308.
- 陆日宇. 2002. 华北汛期降水量变化中年代际和年际尺度的分离 [J]. 大气科学, 26 (5): 611–624. Lu Riyu. 2002. Separation of interannual and interdecadal variations of rainfall in North China [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 26 (5): 611–624, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.05.03.
- 陆日宇, 林中达, 张耀存. 2013. 夏季东亚高空急流的变化及其对东亚季风的影响 [J]. 大气科学, 37 (2): 331–340. Lu Riyu, Lin Zhongda, Zhang Yaocun. 2013. Variability of the East Asian upper-tropospheric jet in summer and its impacts on the East Asian monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 331–340, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12310.
- 阮成卿, 李建平. 2016. 华北汛期降水分离时间尺度降尺度预测模型的改进 [J]. 大气科学, 40 (1): 215–226. Ruan Chengqing, Li Jianping. 2016. An improvement in a time-scale decomposition statistical downscaling prediction model for summer rainfall over North China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (1): 215–226, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1503.14317.
- 宋华, 孙照渤. 2003. 华北地区夏季旱涝的时空分布特征及其与北极海冰的关系 [J]. 南京气象学院学报, 26 (3): 289–295. Song Hua, Sun Zhaobo. Flood and drought in North China and their relationship to the North Arctic sea-ice [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 2003, 26 (3): 289–295, doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.2003.03.001.
- 孙建华, 齐琳琳, 赵思雄. 2006. “9608”号台风登陆北上引发北方特大暴雨的中尺度对流系统研究 [J]. 气象学报, 64 (1): 57–71. Sun Jianhua, Qi Linlin, Zhao Sixiong. 2006. A study on mesoscale convective systems of the severe heavy rainfall in North China by “9608” typhoon [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 64 (1): 57–71, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2006.01.006.
- 陶诗言, 张庆云. 1998. 亚洲冬季季风对 ENSO 事件的响应 [J]. 大气科学, 22 (4): 399–407. Tao Shiyun, Zhang Qingyun. 1998. Response of the Asian winter and summer monsoon to ENSO events [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 22 (4): 399–407, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1998.04.02.
- 王丽华, 陈乾金. 2000. 华北雨季不同时段严重旱涝特征的诊断研究 [J]. 自然灾害学报, 9 (4): 86–93. Wang Lihua, Chen Qianjin. 2000. Diagnostic analysis of serious flood and drought features for every month in rainy season in the North China [J]. Journal of Natural Disaster (in Chinese), 9 (4): 86–93, doi:10.13577/j.jnd.2000.0415.
- Wang H J, Fan K. 2005. Central–North China precipitation as reconstructed from the Qing Dynasty: Signal of the Antarctic atmospheric oscillation [J]. Geophys. Res. Lett., 32 (24): L24705, doi:10.1029/2005GL024562.
- Wang H J, He S P. 2015. The North China/northeastern Asia severe summer drought in 2014 [J]. J. Climate, 28 (17): 6667–6681, doi:10.1175/JCLI-D-15-0202.1.
- 卫捷, 张庆云, 陶诗言. 2003. 近 20 年华北地区干旱期大气环流异常特征 [J]. 应用气象学报, 14 (2): 140–151. Wei Jie, Zhang Qingyun, Tao Shiyun. 2003. Characteristics of atmospheric circulation anomalies

- during persistent droughts in North China for last two decades [J]. *J. Appl. Meteor. Sci.* (in Chinese), 14 (2): 140–151, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2003.02.002.
- 赵汉光. 1994. 华北的雨季 [J]. *气象*, 20 (6): 3–8. Zhao Hanguang. 1994. Rainy season in North China [J]. *Meteor. Mon.* (in Chinese), 20 (6): 3–8, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.1994.06.001.
- 赵振国. 1999. 中国夏季旱涝及环境场 [M]. 北京: 气象出版社, 297pp. Zhao Zhenguo. 1999. Summer Flood/Drought in China and Their Environment Field (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 297pp.
- 竺可桢. 1934. 东南季风与中国之雨量 [J]. *地理学报*, 1 (1): 1–27.
- Chu C. 1934. The enigma of southeast monsoon in China [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 1 (1): 1–27, doi:10.11821/xb193401001.