

厄尔尼诺事件对中国夏季水汽输送和 降水分布影响的新研究^{*}

吴 萍^{1,2,3} 丁一汇³ 柳艳菊³
WU Ping^{1,2,3} DING Yihui³ LIU Yanju³

1. 中国气象科学研究院, 北京, 100081

2. 南京信息工程大学大气科学学院, 南京, 210044

3. 国家气候中心, 北京, 100081

1. *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*

2. *College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*

3. *National Climate Center, Beijing, 100081, China*

2016-10-25 收稿, 2017-03-06 改回.

吴萍, 丁一汇, 柳艳菊. 2017. 厄尔尼诺事件对中国夏季水汽输送和降水分布影响的新研究. 气象学报, 75(3):371-383

Wu Ping, Ding Yihui, Liu Yanju. 2017. A new study of El Niño impacts on summertime water vapor transport and rainfall in China. *Acta Meteorologica Sinica*, 75(3):371-383

Abstract Based on observed precipitation data and multiple reanalysis datasets from 1961 to 2016, different impacts of eastern Pacific (EP) El Niño and central Pacific (CP) El Niño events on summertime moisture transport and rainfall in China have been investigated. Results suggest that; (1) the impacts of El Niño events on summertime rainfall in China are significantly different in the El Niño developing summer and decaying summer. The main impacts occur in the El Niño-decaying summer when obvious rainfall signals are found in most areas; (2) in the summer of EP El Niño developing, the western North Pacific (WNP) subtropical high (SH) tends to retreat eastward and becomes weak. The weak moisture transport conditions are not conducive to the occurrence of rainfall in most areas. In the summer of CP El Niño developing, evaporation over the western Pacific Ocean and low latitudes of the Indian Ocean becomes stronger. Abundant moisture originating from the Arabian Sea, the Bay of Bengal and the western Pacific Ocean is transported to South China and the net moisture income increase, tending to induce positive rainfall anomalies in South China; (3) in the El Niño decaying summer, extra tropical Pacific evaporation increases significantly. The westward expansion of the WNPSH and the establishment of East Asia/ Pacific (EAP) teleconnection are favorable for the southwesterly winds along the western side of the WNPSH to carry abundant water vapor from the Pacific to central-eastern China. Meanwhile, the double-blocking set up in Eurasia high-mid latitudes and the northerly flow between the low trough and upstream blocking high tend to carry more water vapor from the Arctic Ocean to Northwest China and northern part of North China. The positive net moisture income anomalies are found in most areas in China, providing favorable moisture conditions for rainfall. Two rain belts form in southern and northern China, respectively. In the CP El Niño decaying summer, the WNPSH tends to extend westward and northward, which is favorable for the transport of water vapor originating from the strong Pacific evaporation to Jianghuai region, leading to increases in net moisture income in Jianghuai region. Hence, El Niño events not only influence rainfall anomalies in Yangtze River valley and Huai River valley, but also influence rainfall anomalies in North China, Northeast China and Northwest China.

^{*} 资助课题: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB430202)、国家自然科学基金资助项目(41401056 和 41275095)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406001 和 20140618)、江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYLX15_0858)。

作者简介: 吴萍, 主要从事气候变化研究。E-mail: nj_wp@126.com

通讯作者: 柳艳菊, 主要从事气候变化与季风研究。E-mail: liuyanji@cma.gov.cn

Key words Eastern Pacific (EP) El Niño, Central Pacific (CP) El Niño, Water vapor transport, Rainfall, Teleconnection

摘 要 基于 1961—2016 年中国地面台站降水观测资料和多种再分析资料,分析了东部型和中部型两类厄尔尼诺事件对中国夏季水汽输送和降水的不同影响。结果表明:(1)厄尔尼诺事件对中国夏季降水的影响在发生当年和次年有明显的不同,主要影响是在其发生的次年,中国大部分地区的夏季降水明显偏多。(2)东部型厄尔尼诺事件当年夏季,西北太平洋副热带高压(副高)偏东偏弱,水汽输送条件较弱,不利于中国大范围降水的发生;中部型事件当年夏季,低纬度印度洋和西太平洋蒸发异常偏强,来自阿拉伯海、孟加拉湾和西北太平洋向华南地区的水汽输送和净水汽收支增加,有利于华南地区降水的异常增多。(3)东部型厄尔尼诺事件次年夏季,副热带太平洋蒸发异常偏强,副高西伸,由于东亚-太平洋(EAP)遥相关型的建立,副高西侧的强西南气流将来自太平洋蒸发的大量水汽持续输送至中国中东部地区。此外,在东亚-太平洋遥相关型影响下中高纬度地区建立了亚洲双阻型环流,其间的低槽冷涡与上游阻高之间的强偏北气流有利于北冰洋的水汽持续输送到西北和华北北部地区,中国大部分地区净水汽收支均增加,中国北方和南方地区的降水均产生了明显的同步性增多响应,形成了南北两条异常雨带。中部型厄尔尼诺事件次年夏季,副高较常年偏西且偏北,来自太平洋蒸发的大量水汽输送到江淮地区,使其净水汽收支增加和降水偏多。因此,厄尔尼诺事件的发生不仅对长江流域和淮河流域等南方地区的降水有重要影响,对华北、东北和西北地区的降水异常也有相当的作用。

关键词 东部型厄尔尼诺,中部型厄尔尼诺,水汽输送,降水,遥相关型

中图法分类号 P461, P47, P426.6

1 引 言

厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)是热带海-气系统年际变化中的最强信号,不仅直接影响热带太平洋地区的天气气候,还通过大气环流以“遥相关”形式间接影响东亚地区的天气气候(刘永强等,1995;李维京,1999;Zhang, et al, 1999, 2002; Wang, et al, 2000, 2002; Huang, et al, 2015; 李海燕等, 2016; 翟盘茂等, 2016)。研究表明,厄尔尼诺当年夏季,江淮流域降水偏多,华北和长江流域降水偏少,次年夏季长江流域降水偏多,而江淮流域降水则偏少(Zhang, et al, 1999; 赵亮等, 2006; Liu, et al, 2009)。赵振国(1996)发现厄尔尼诺事件导致初夏西北太平洋副热带高压(副高)偏南,夏季风推迟,长江中下游入梅偏晚。从厄尔尼诺成熟期冬季一直持续到衰减年夏季的西北太平洋反气旋异常被认为是联系厄尔尼诺与东亚气候异常的桥梁,其关键作用是影响西太平洋向中国大陆的水汽输送(Wang, et al, 2000; 智海等, 2012)。在厄尔尼诺成熟期冬季和衰减年春季,异常反气旋的西侧有西南风异常,有利于中国东南部的的水汽输送及降水(Zhang, et al, 2002);在衰减年夏季,异常反气旋使得副高西伸(Chang, et al, 2000),大量水汽输送到长江流域,有利于长江流域降水,长江中下游地区暴雨频次也会增多(Wang, et al, 2011)。

20 世纪 90 年代以来,一种新型的厄尔尼诺事

件发生概率明显增加。这种新型厄尔尼诺型态有别于传统型态,最大海温异常变暖区不在传统定义的赤道东太平洋地区,而是在赤道中太平洋地区,此即中部型厄尔尼诺事件(Yeh, et al, 2009; Capotondi, et al, 2015)。研究表明,在全球气候变暖的背景下中部型厄尔尼诺事件可能会更多地发生,并且由于中部型厄尔尼诺事件和传统厄尔尼诺(即东部型厄尔尼诺)事件的不同海温异常分布型所产生的大气响应不同,进而对东亚气候的影响也有很大差异(Feng, et al, 2011a, 2011b; Yuan, et al, 2012; 袁媛等, 2012; Li, et al, 2014; Zhang, et al, 2013)。Feng 等(2011b)和 Li 等(2014)认为,两类分布型厄尔尼诺事件对中国降水影响的差异主要归因于西北太平洋异常反气旋环流位置的变化。在东部型厄尔尼诺事件成熟和衰减阶段,菲律宾海的异常反气旋很强且从北印度洋移至菲律宾海东部,而中部型厄尔尼诺事件成熟和衰减阶段,异常反气旋在中国南海附近,强度较弱,这将导致东亚大气环流和水汽输送具有很大的差异,影响东南亚南部降水的异常分布(Yuan, et al, 2012)。东部型厄尔尼诺年冬季和春季,副高偏强偏南,华南地区西侧为异常西南风,水汽供应充足,降水偏多,而中部型厄尔尼诺年副高位置偏北,华南地区对流减弱,水汽不足,降水偏少(Feng, et al, 2011a; 袁良等, 2013)。袁媛等(2012)研究发现,东部型、中部型和混合型厄尔尼诺分别对应次年夏季中国可能出现典型的南方型、中间型和

北方型三类雨型。

由以上研究可知,不同类型厄尔尼诺事件由于对大气的影响不同,对中国降水的影响亦存在显著差异,且厄尔尼诺不同阶段产生的影响也不同。总体来看,以往研究主要侧重于厄尔尼诺事件对中国长江流域和华南地区降水的影响,而较少涉及其对中国北方地区的影响。然而通过对历次厄尔尼诺事件详细分析发现,多次厄尔尼诺事件的次年,除南方地区降水有明显异常外,中国北方和西部地区往往也出现降水异常,非常值得关注。例如,1997/1998年超强厄尔尼诺事件的次年(1998年)除了长江流域发生全流域性大洪水外,东北的嫩江、松花江也发生了超历史记录的特大洪水;2009/2010年厄尔尼诺事件的次年(2010年)汛期,北方部分地区出现了严重的暴雨洪涝;徐洁等(2016)研究发现,中部型及混合型厄尔尼诺事件次年新疆汛期降水显著偏多。这些事实和研究是否说明厄尔尼诺事件使得中国北方地区(包括东北和西北)与南方地区的降水产生了同步的响应?不同型厄尔尼诺事件对中国南方或北方地区的降水影响是否有差异,为何有差异?这均为尚需研究的重点。此外,来自西太平洋地区的水汽输送是厄尔尼诺事件影响中国降水的重要纽带,水汽输送与海洋蒸发的变化有着密切的关系,过去这方面的研究较少。因此,本研究将从水汽输送及区域差异的角度,全面分析不同型厄尔尼诺事件当年和次年夏季水汽输送状况及其对全中国降水分布的影响。

2 资料和方法

2.1 资料

所使用的资料有:(1)中国气象局国家气象信息中心提供的全中国2400多个地面台站1961—2016年夏季(6—8月)逐日降水资料,原始数据经过严格的质量控制;(2)美国国家环境预报中心/美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)提供的逐日风场、高度场、地表气压和比湿等资料,水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,垂直17层;(3)美国 Woods Hole 海洋研究所提供的客观分析全球海-气热通量的 OAflux(Objectively Analyzed Air-Sea Fluxes for the Global Ocean)资料(Yu, et al, 2008),文中使用的是其月平均洋面蒸发资料,水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$;(4)美国国家海洋大气管理局(NOAA)气候预测中心提供月

平均 Nino3 和 Nino4 海温距平指数。文中研究时段为1961—2016年夏季,气候平均时段取1981—2010年。

2.2 方法

参考 Ren 等(2011)的定义来识别东部型和中部型厄尔尼诺事件

$$\begin{cases} I_{\text{EPI}} = N_{31} - \alpha N_{41} \\ I_{\text{CPI}} = N_{41} - \alpha N_{31} \end{cases}$$
$$\alpha = \begin{cases} 2/5 & N_{31}N_{41} > 0 \\ 0 & N_{31}N_{41} \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, I_{EPI} 为东部型指数, I_{CPI} 为中部型指数, N_{31} 和 N_{41} 分别为月平均 Nino3 区(5°S — 5°N , 150° — 90°W)和 Nino4 区(5°S — 5°N , 160°E — 150°W)海温距平指数。根据此方法,识别出1961年至今共发生了15次厄尔尼诺事件(表1),与 Chen 等(2010)的研究结果基本一致。

表1 1961—2016年的厄尔尼诺事件
Table 1 El Niño events during 1961–2016

类型	序号	起止年月
东部型 (EP)	1	1963年7月—1963年12月
	2	1965年5月—1966年4月
	3	1972年5月—1973年2月
	4	1976年7月—1977年2月
	5	1982年4月—1983年9月
	6	1986年9月—1988年2月
	7	1990年8月—1992年7月
	8	1997年3月—1998年5月
	9	2006年9月—2007年3月
	10	2014年8月—2016年5月
中部型 (CP)	11	1968年12月—1970年1月
	12	1994年6月—1995年4月
	13	2002年1月—2003年4月
	14	2004年6月—2005年4月
	15	2009年6月—2010年4月

在讨论厄尔尼诺年东亚-太平洋(EAP)遥相关型的影响时用到的 EAP 指数,是参照 Huang (2004)对 EAP 指数的定义

$$I_{\text{EAP}} = 0.25Z'_s(60^{\circ}\text{N}, 125^{\circ}\text{E}) - 0.5Z'_s(40^{\circ}\text{N}, 125^{\circ}\text{E}) + 0.25Z'_s(20^{\circ}\text{N}, 125^{\circ}\text{E}) \quad (2)$$

式中, $Z' = Z - \bar{Z}$ 为某格点夏季500 hPa 位势高度场距平, $Z'_s = Z' \sin 45^{\circ} / \sin \varphi$ 为某格点标准化后的500 hPa 位势高度距平值, φ 为该格点纬度。东亚-太平洋遥相关中心分别位于副热带西太平洋地区中心(20°N , 125°E)、东亚中纬度地区中心(40°N ,

125°E)和雅库茨克及鄂霍次克海地区中心(60°N, 125°E),当EAP指数为正(负)时,500 hPa高度场上从南至北依次表现为“+ - +”(“- + -”)的异常环流结构。

3 不同分布型厄尔尼诺事件中国夏季水汽输送和降水分布特征

3.1 中国夏季降水异常分布特征

厄尔尼诺事件是影响中国夏季降水的主要信号之一,从两类厄尔尼诺事件当年和次年合成的中国夏季降水异常分布(图1)可以看出,东部型事件当年夏季(图1a),除东南沿海部分地区降水略偏多外,其他大部分地区降水均异常偏少(赵亮等,2006; Liu, et al, 2009)。中部型厄尔尼诺事件当年夏季(图1c),主要在华南地区及河套地区降水显著偏多,而长江流域、华北大部分地区、西北及东北地区

降水均偏少。因此,厄尔尼诺事件当年夏季中国大部分地区的降水是异常偏少,但中部型厄尔尼诺较之东部型厄尔尼诺对中国华南降水偏多的影响更为显著(Yuan, et al, 2012)。

两类厄尔尼诺事件次年夏季,中国大部分地区降水均异常偏多,但降水高值区的位置有所不同。东部型事件次年夏季(图1b),除典型的长江流域降水异常偏多外(李维京, 1999),注意到中国西北、华北和东北等北方地区的降水也较常年明显偏多(徐洁等, 2016),中国存在南北两条异常雨带,而北方这条雨带在以往的研究中甚少有关关注。降水异常偏少的地区仅出现在华南及高原地区。中部型厄尔尼诺事件次年夏季(图1d),江淮地区、华北东部、东北南部、新疆北部以及青藏高原等地区降水显著偏多,华南、西北东部及东北北部地区降水均偏少,这与Feng等(2011b)的结论基本一致。可以看出,厄尔

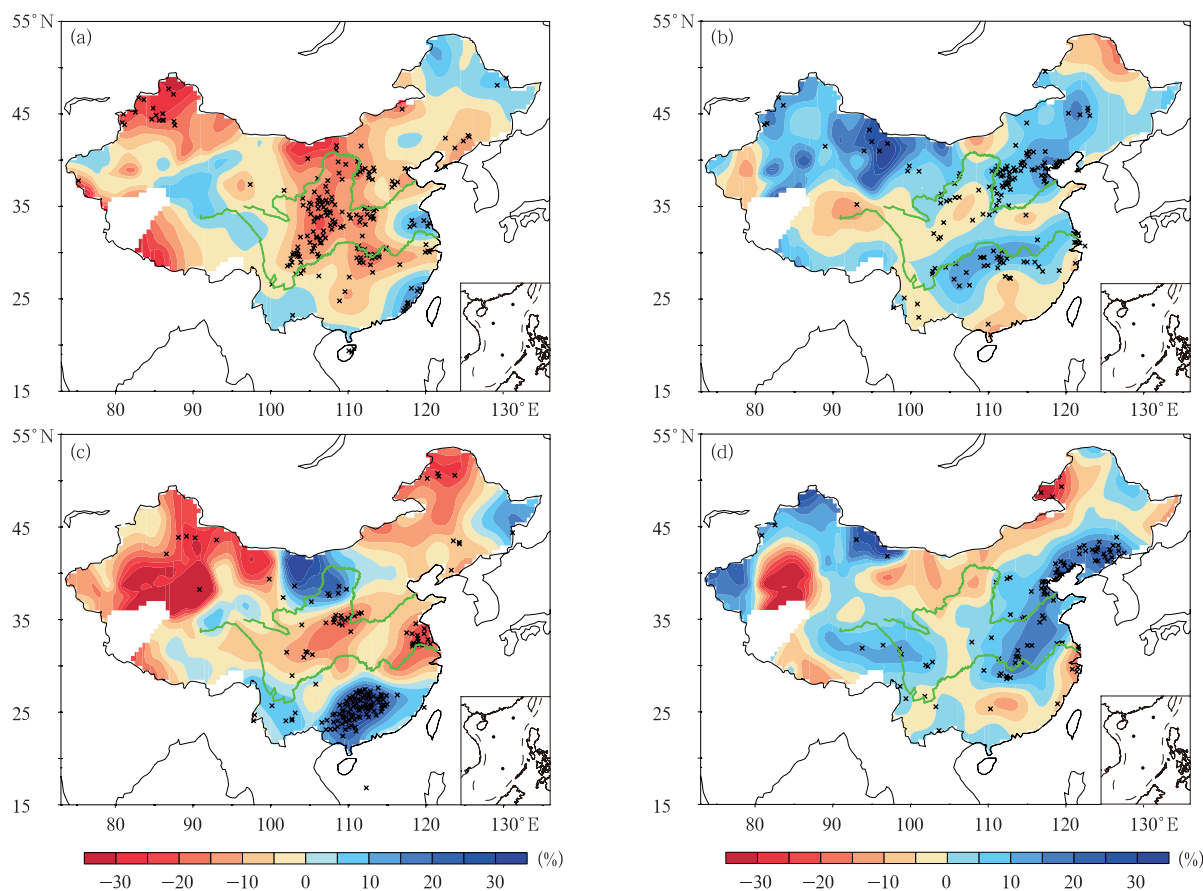


图1 东部型(a,b)和中部型(c,d)厄尔尼诺事件当年(a,c)及次年(b,d)中国夏季降水距平百分率分布 (“×”为超过95%置信度的站点)

Fig.1 Composite distributions of rainfall anomaly percentage in EP El Niño (a, b) and CP El Niño (c, d) developing (a, c) and decaying (b, d) summer (“×” indicates the value passing the 95% confidence level)

厄尔尼诺事件(尤其是东部型事件)发生次年中国北方和南方地区的年际降水发生了同步性增多变化,且东部型事件对中国降水的影响较之中部型偏强,范围偏广。

上述降水异常分布的特点在超强厄尔尼诺事件中均有很好的体现,以近 56 年发生的 3 次超强厄尔

尼诺事件(1982/1983、1997/1998、2014/2016 年)为例,在事件当年夏季,除东南沿海和新疆西部降水异常偏多外,中国大部分地区降水异常偏少(图 2a),而在次年夏季,总体来看,中国明显存在南北两条雨带,长江流域、西北及东北等地区降水明显偏多(图 2b)。

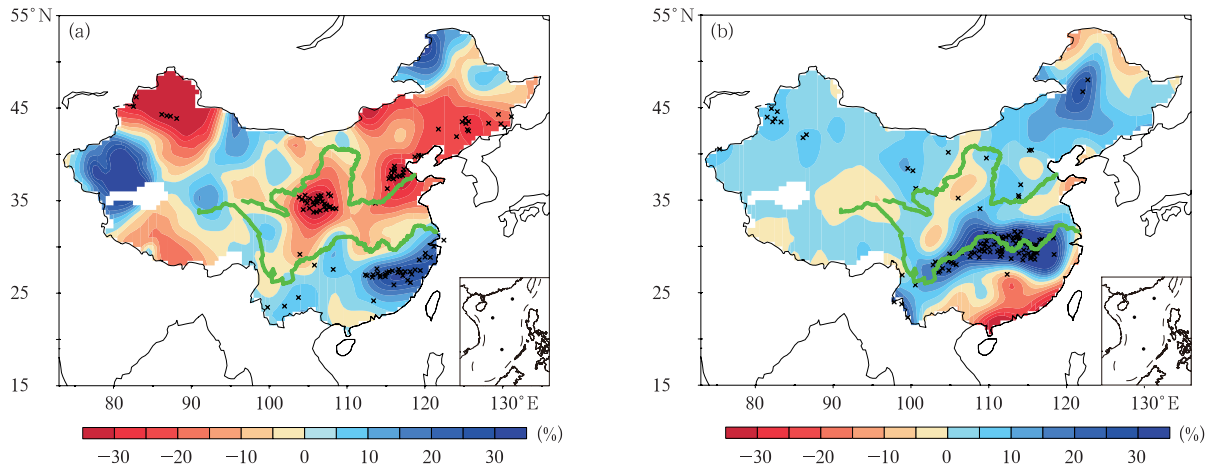


图 2 超强厄尔尼诺事件当年(a)及次年(b)中国夏季降水距平百分率分布

(“×”为超过 95%置信度检验的站点)

Fig. 2 Composite distributions of rainfall anomaly percentage in super strong El Niño developing (a) and decaying (b) summer (“×” indicates the value passing 95% confidence level)

3.2 夏季水汽输送的异常分布特征

持续的水汽输送及其散度直接与降水有关,图 3 给出了东部型和中部型厄尔尼诺事件夏季整层水汽输送及散度的合成分析结果。可以看出,东部型厄尔尼诺事件当年夏季(图 3a),低纬度地区为异常的偏西风水汽输送,但向中国大陆的水汽输送强度较弱,不利于全国大范围降水的发生。在水汽通量散度场上东南沿海部分地区为弱的水汽辐合区,为该地区的降水提供了一定的水汽条件。中部型厄尔尼诺事件当年夏季(图 3c),西北太平洋上空以北为反气旋性、以南为气旋性的异常偶极子环流水汽输送,长江以南地区为异常的东北风水汽输送,表明西南风水汽输送带较常年偏南。此外,华南地区上空水汽辐合显著,为该地区的降水提供了很好的水汽条件。

东部型厄尔尼诺事件次年夏季,菲律宾以东洋面为异常强的反气旋环流,其北边缘在 30°N 附近(图 3b),西侧异常强的西南风可携带西太平洋的大量水汽向中国长江流域及以北地区输送并在长江流

域形成异常辐合区,导致长江流域降水异常偏多。此外,欧亚中高纬度地区气旋-反气旋的异常环流结构有利于将北冰洋的水汽向中国西北内陆输送,这是导致中国西北地区降水异常偏多的一条重要的水汽输送通道。来自北冰洋的水汽与来自西太平洋的水汽在中国西北东部和华北地区汇合并一起输送至东北地区,从而造成中国华北和东北地区降水也异常偏多。中部型厄尔尼诺事件次年夏季(图 3d),西北太平洋上空异常强的反气旋环流水汽输送较东部型偏北,北边缘可达 40°N 附近,反气旋环流西侧异常偏强的西南风将来自低纬度的大量偏东风水汽输送至中国江淮流域,然后转向东输送至日本,同时江淮地区表现为异常的水汽辐合区,非常有利于该地区的降水。

3.3 夏季水汽收支的异常特征

为了进一步反映中国各区域水汽输送和净水汽收支状况,图 4 给出了两类厄尔尼诺事件夏季水汽收支异常示意。可以看出,东部型厄尔尼诺事件当年(图 4a)主要有偏南风、偏北风、偏西风等异常

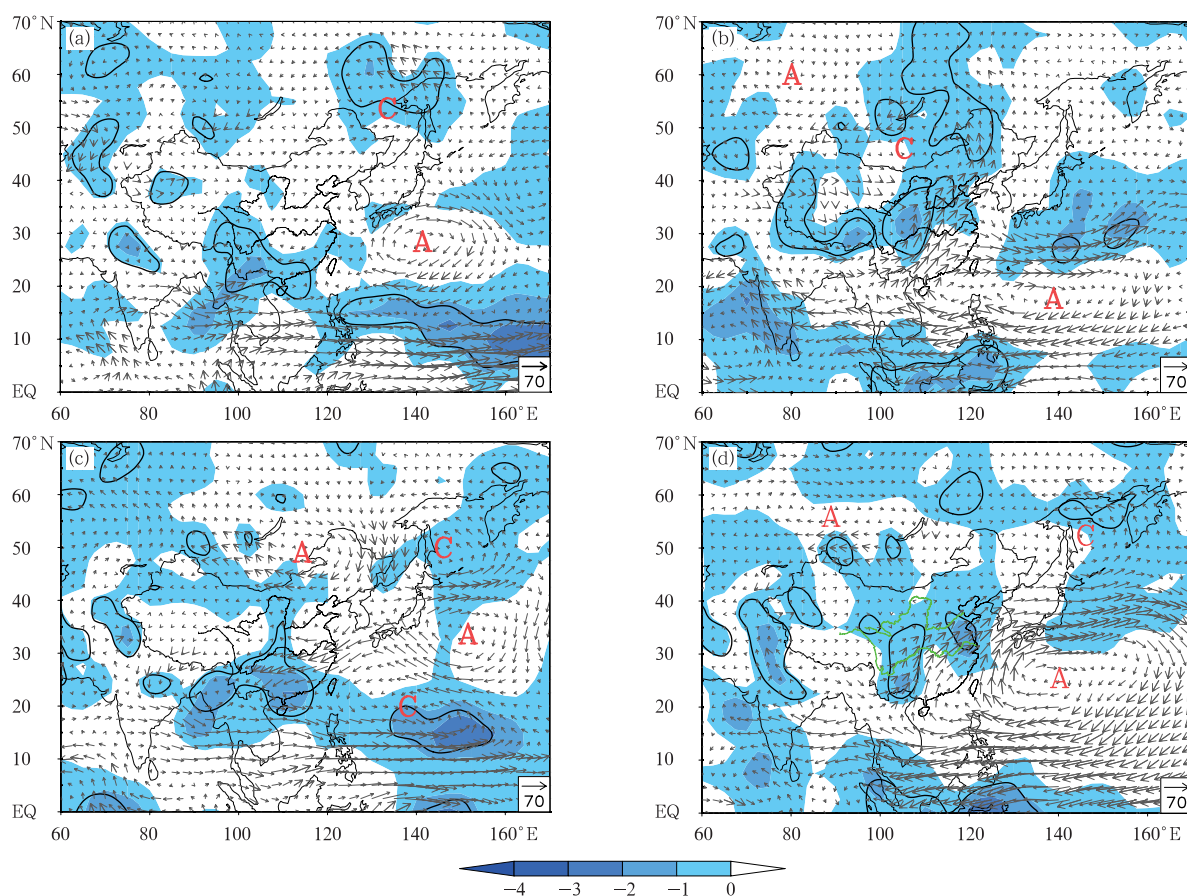


图3 东部型(a,b)和中部型(c,d)厄尔尼诺事件当年(a,c)及次年(b,d)整层水汽输送通量异常

(矢线,单位: $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$,大箭头区域表示水汽输送通量异常通过95%的置信度检验,

C和A分别代表气旋和反气旋环流异常)和水汽通量散度异常(阴影表示水汽辐合,

单位: $10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,等值线区域表示辐合异常通过95%的置信度检验)分布

Fig. 3 Composite anomalous distributions of vertically integrated water vapor flux

(vectors; the big arrowhead indicates the 95% confidence level; unit: $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$;

C and A indicate cyclone and anticyclone anomalies, respectively)

and divergence (shaded areas indicate the convergence; contours indicate the 95%

confidence level; unit: $10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) in EP El Niño (a, b)

and CP El Niño (c, d) developing (a, c) and decaying (b, d) summer

水汽输送到中国各区域,其中来自阿拉伯海经孟加拉湾的水汽输送在中国南海折向北抵达中国华南地区,并一直向北输送至长江流域、华北和东北地区,而西北地区则是主要来自于偏北风的水汽输送。由各区域净水汽收支可以看出,长江流域、华北、西北和青藏高原净水汽收支均异常偏少,而华南净水汽收支较常年偏多,东北地区净水汽收支与常年相当,这不利于中国大多数地区的降水,仅为华南部分地区的降水提供了一定的水汽条件。中部型厄尔尼诺事件当年(图4c),主要是来自西北太平洋北区的异

常偏东风水汽输送到中国华南、长江流域、华北、西北和青藏高原地区,少部分偏西风水汽输送到中国西北和青藏高原地区,东北地区的水汽主要是来自偏北风水汽输送。其中输送到长江流域的水汽还不断的向北输送到华北地区和向南输送到华南地区,造成长江流域净水汽收支异常偏少,而华南和华北地区明显偏多。

厄尔尼诺事件次年夏季(图4b,d),进入中国东部(不包括东北地区)的水汽异常主要是由于偏西风和偏南风的异常水汽输送。其中,来自西北太平洋

南区经南海折向北的偏南风水汽一直输送至华北,且大于偏西风 and 偏北风的水汽输送。此外,向中国东部地区输送的一部分异常偏西风水汽和向东北地区输送的偏南风水汽究其源头也是来自西北太平洋南区。东部型厄尔尼诺事件次年夏季(图 4b)中国西部的水汽异常主要来自于偏北风、偏南风 and 偏西风异常水汽输送,而中部型厄尔尼诺事件次年夏季(图 4d)中国西部的水汽异常主要来自偏北风 and 偏南风异常水汽输送,且偏北风 and 偏南风异常水汽输送量均小于东部型。比较两类型事件次年夏季中国

各区域的水汽输送状况,可以发现,东部型厄尔尼诺事件次年夏季来自西北太平洋南区向中国各区域输送的偏南风水汽均较中部型偏强,且中国各区域的净水汽收支均较常年偏多,为中国大范围降水的发生提供了有利的水汽条件。中部型厄尔尼诺事件次年夏季华南、长江流域及西北地区净水汽收支较常年偏多,华北与常年相当,东北地区偏少,这可能也是东部型厄尔尼诺事件次年夏季降水范围较中部型偏广的原因之一。

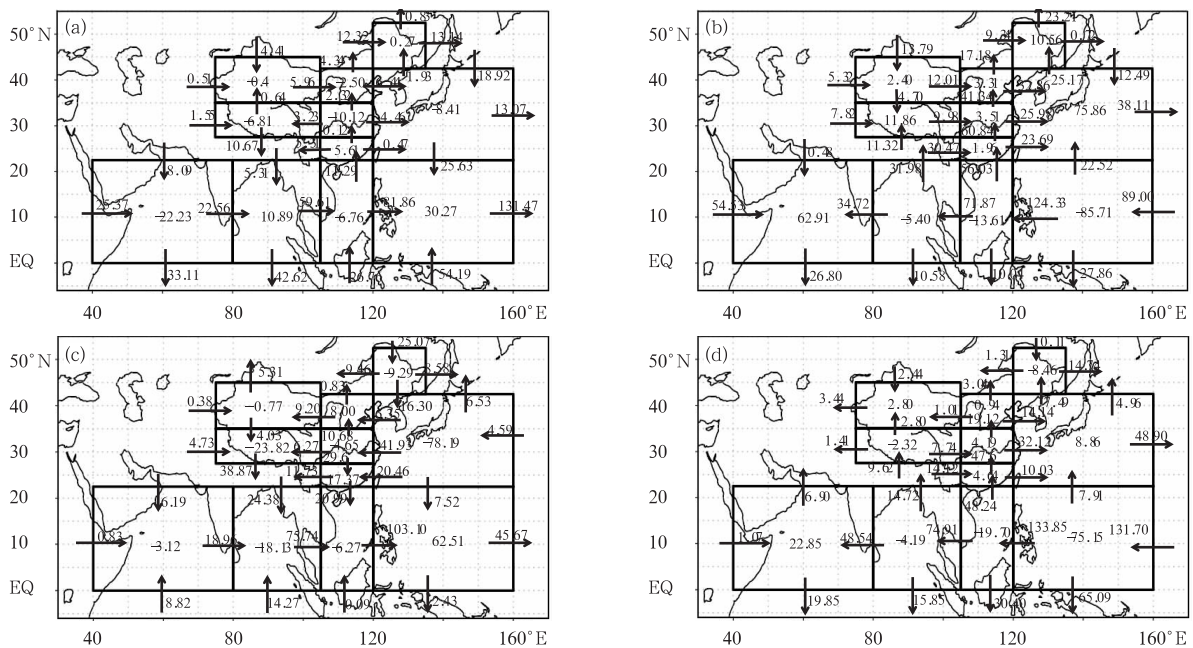


图 4 东部型(a,b)和中部型(c,d)厄尔尼诺事件当年(a,c)及次年(b,d)水汽收支异常示意
(箭头方向表示水汽输送方向,正值表示区域净水汽收支增加,负值表示区域净水汽收支减少;单位: 10^6 kg/s)
Fig. 4 Composite anomalous distributions of moisture income in EP El Niño (a, b) and CP El Niño (c, d) developing (a, c) and decaying (b, d) summer (the direction of arrow indicates the direction of moisture transport; positive values indicate increases in net moisture income and negative values indicate decreases in net moisture income; unit: 10^6 kg/s)

4 厄尔尼诺事件影响水汽输送和降水的可能物理机制

4.1 海洋蒸发和低层风场特征

海洋是大气主要的热源和水汽源地,通过表层环流和表面加热、蒸发、降水等海-气相互作用过程与大气进行动量、热量和水汽交换,从而影响气候变化。海洋蒸发是水分循环和状态变化过程中的关键环节,蒸发的水汽借助大气环流向陆地输送,从而影

响陆地降水。东部型厄尔尼诺事件当年,中、西太平洋地区的蒸发基本均较常年偏低(图 5a),由海洋蒸发上升的水汽则偏少,而热带东太平洋地区尽管蒸发偏强,相应的海洋上空水汽偏多,但异常的偏西风不利于将热带东太平洋上空的水汽输送至中国大陆。副热带东印度洋蒸发较常年稍偏强,其蒸发的水汽通过孟加拉湾和南海仅输送至中国东部沿海部分地区,使其降水略偏多;中部型厄尔尼诺事件当年,低纬度太平洋和印度洋地区的蒸发几乎均较常

年偏强, 尤其中东太平洋地区海温异常偏高(图略), 蒸发显著偏强(图 5c), 但异常的偏西风也不利于其蒸发的水汽向中国大陆输送。热带印度洋地区 and 菲律宾地区的海面蒸发也较常年偏高, 其蒸发上升的大量水汽在较常年偏弱的偏南风作用下输送至中国华南地区, 为华南地区降水的发生提供有利的水汽条件。

东部型厄尔尼诺事件次年(图 5b), 副热带太平洋蒸发较常年偏强, 海洋蒸发的大量水汽可通过异常的偏东风向西太平洋输送, 并在异常的非律宾反气旋环流作用下向中国长江流域及华北、东北地区输送, 为中国东部地区的降水提供了充分的水汽条件。在中部型厄尔尼诺事件次年(图 5d), 热带中西太平洋和副热带太平洋地区蒸发均异常偏强, 太平

洋蒸发的大量水汽通过异常偏东风输送至西太平洋地区, 并通过异常强的西北太平洋反气旋环流向中国江淮地区输送。比较东部型和中部型厄尔尼诺事件次年夏季海洋蒸发可以看出, 中部型厄尔尼诺事件太平洋地区蒸发较东部型偏强, 通过两类型厄尔尼诺事件海温和风场差值(图略)发现, 中部型厄尔尼诺事件太平洋地区蒸发偏强可能是由于其次年夏季中东太平洋地区异常偏西风分量较东部型偏强, 海温衰减较东部型偏慢造成的。虽然中部型太平洋地区蒸发较强, 但是在异常偏西风分量的作用下, 一部分蒸发上升的水汽未能向西输送至中国大陆, 此外, 由于两类型厄尔尼诺事件西北反气旋位置的不同, 因此, 对中国东部水汽输送影响有所不同(图 3b 和 3d)。

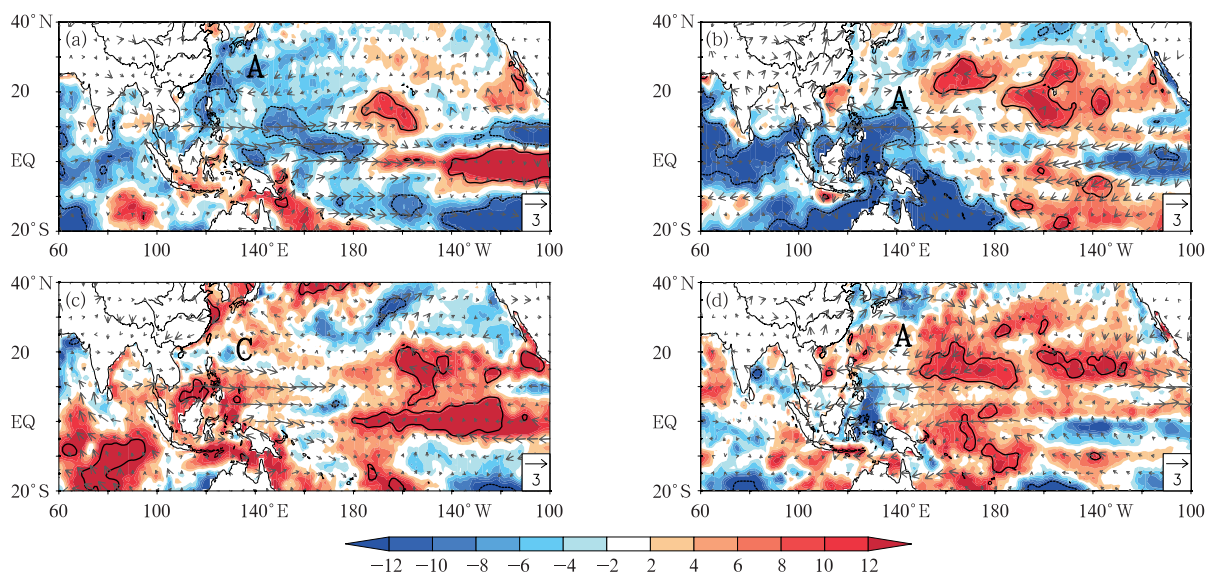


图 5 东部型(a,b)和中部型(c,d)厄尔尼诺事件当年(a,c)及次年(b,d)海面蒸发距平(色阶,单位:mm,等值线区域表示蒸发距平通过 95%的置信度检验)和 850 hPa 风场距平(矢线,单位:m/s,大箭头区域表示风场距平通过 95%的置信度检验;C 和 A 分别代表气旋和反气旋环流异常)分布

Fig. 5 Composite anomalous distribution of evaporation (shaded areas indicate evaporation; contours indicate the 95% confidence level; unit: mm) and 850 hPa wind (vectors; unit: m/s; the big arrowhead indicates the 95% confidence level; C and A indicate cyclone and anticyclone anomalies, respectively; unit: m/s) in EP El Niño (a, b) and CP El Niño (c, d) developing (a, c) and decaying (b, d) summer

4.2 500 hPa 高度场特征

副高是影响中国陆地水汽输送路径的重要系统, 不同类型厄尔尼诺事件通过海-气耦合作用对副高的位置和强度产生不同的影响。从两类厄尔尼诺事件合成的 5880 gpm 和 5860 gpm 等值线(图 6)可

以看出, 两类厄尔尼诺事件当年副高较常年均明显偏东偏弱(图 6a), 不易建立降水发生的大尺度环流。其中, 东部型厄尔尼诺事件当年沿副高西侧外围的水汽输送仅可影响到东南沿海部分地区, 而中部型厄尔尼诺事件当年副高西侧外围的水汽输送对

中国南方的影响范围较东部型略偏广,有利于华南地区降水。而在两类厄尔尼诺事件次年,副高位置较常年均加强西伸(图 6b)。其中,东部型厄尔尼诺事件次年,副高脊线位置略偏南,有利于副高西侧水汽向中国长江中下游地区的输送,使得长江中下游地区降水异常偏多。而中部型厄尔尼诺事件次年副高位置较常年和东部型均偏北,西北太平洋反气旋环流位置也偏北(图 3d),副高西侧水汽可大量输送至淮河流域,为该地区降水提供有利的水汽条件。研究表

明,厄尔尼诺事件次年夏季副高的加强西伸以及西北太平洋反气旋环流的维持与印度洋异常偏暖有关。此时,赤道中东太平洋异常暖海温减弱,而印度洋海温从次年春季升高,并持续至夏季,此时的副高西伸以及西北太平洋反气旋的维持主要是印度洋暖海温滞后响应的作用,而太平洋海温的影响则相对减弱(Yuan, et al, 2012; Xie, et al, 2016)。由于副高偏强偏西及西北太平洋反气旋的维持,来自太平洋的水汽持续输送至中国长江或江淮流域导致其降水偏多。

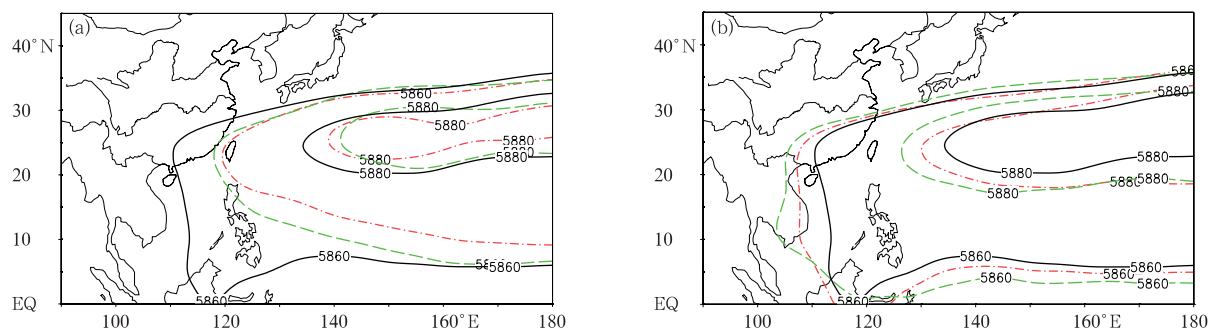


图 6 厄尔尼诺事件当年(a)及次年(b)合成的 5880 和 5860 gpm 等值线
(黑线为气候平均状态,红线为东部型厄尔尼诺事件,绿线为中部型厄尔尼诺事件)

Fig. 6 The western Pacific sub-tropical high with 5880 and 5860 gpm contours in El Niño developing (a) and decaying summer (b) (the black, red and green lines indicate the climatological mean, and that in EP El Niño and CP El Niño events, respectively)

进一步分析 500 hPa 高度距平场可以看出,东部型厄尔尼诺事件当年低纬及中高纬度地区均为负距平控制,不利于中国大部分地区的降水(图 7a),而中部型厄尔尼诺事件当年西北太平洋呈北高南低的高度距平分布,长江以南地区的降水易偏多;中高纬度地区自西向东呈“-、+、-”的高度距平分布,不利于偏北风水汽向中国北方地区的输送,从而不利于其降水的发生(图 7c)。东部型事件次年(图 7b),西太平洋—东亚中纬度地区—鄂霍次克海地区上空呈现“+ - +”的东亚-太平洋遥相关型波列(李维京, 1999),有利于来自太平洋地区的水汽输送至长江流域,易造成长江流域地区降水偏多。而欧亚中高纬度地区自西向东呈“+ - +”的高度距平分布,有利于来自北冰洋和欧亚高纬度的水汽向中国西北地区输送,形成北方水汽输送通道,来自北冰洋的水汽和来自太平洋的西南水汽在西北东部和华北汇合并一直输送至东北地区,从而有利于西北、华北以及东北等中国北方地区降水的发生(图 3b)。再看中部型厄尔尼诺事件次年,中国以东洋面上空

从南向北呈“- +”的距平分布,副高西北侧的西南暖湿水汽和南下的湿冷水汽在淮河流域汇合,易造成淮河流域地区降水偏多。中高纬度地区自西向东呈“+ -”的高度距平分布(图 7d),这不利于北冰洋的水汽向中国西北地区输送,从而不利于西北地区的降水发生。由此可以看出,在两类事件次年由于热带海洋强迫,大量来自西太平洋地区水汽可以输送至长江或江淮流域,造成其降水明显偏多,但是东部型厄尔尼诺事件次年,由于中国北方地区受欧亚中高纬度地区双阻型大气环流的影响,其与南方地区的降水产生了同步性增多响应。

东亚-太平洋遥相关是影响东亚气候的一个重要遥相关型,尤其对中国长江流域降水有重要的指示作用(Huang, 2004)。由以上分析可以看出东部型厄尔尼诺事件次年东亚-太平洋遥相关型的建立加强了中国长江流域的水汽输送和降水。通过东部型厄尔尼诺事件次年与非厄尔尼诺年夏季 500 hPa 高度差值场(图 8)可以看出,东亚—太平洋地区也表现为明显的“+ - +”东亚-太平洋波列,表明无论

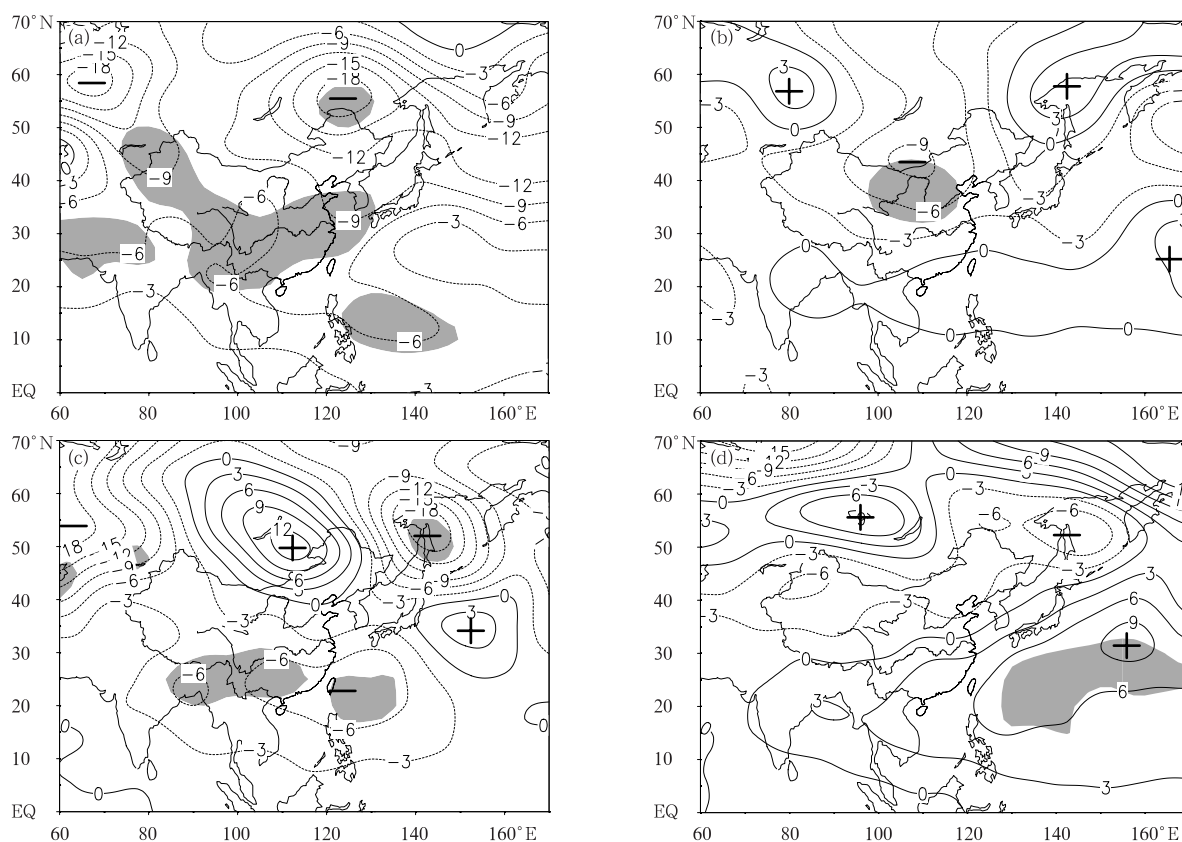


图7 东部型(a,b)和中部型(c,d)厄尔尼诺事件当年(a,c)及次年(b,d)500 hPa 高度场距平分布
(+表示正高度距平,-表示负高度距平,单位:gpm;阴影表示距平通过95%置信度检验的区域)

Fig. 7 Composite anomalous distribution of 500 hPa geopotential height in EP El Niño (a, b) and CP El Niño (c, d) developing (a, c) and decaying (b, d) summer
(characters + and - indicate the positive and negative anomalies, respectively;
unit: gpm; shaded areas are for values passing the 95% confidence level)

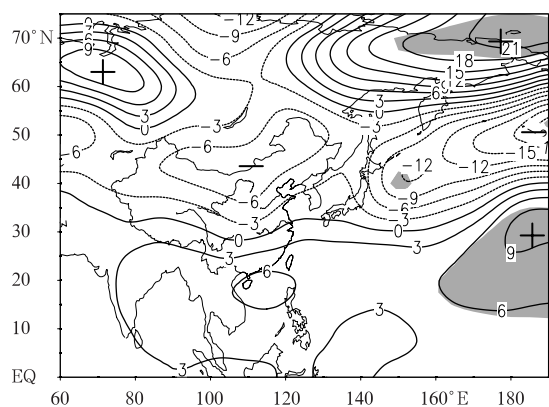


图8 东部型厄尔尼诺事件次年与非厄尔尼诺年夏季500 hPa 高度差值场(+表示正高度距平,-表示负高度距平,单位:gpm;阴影距平表示通过95%置信度检验的区域)

Fig. 8 Composite anomalous distribution of 500 hPa geopotential height in the El Niño decaying summer (EP El Niño years minus non-El Niño years; characters + and - indicate positive and negative anomalies, respectively; unit: gpm; shaded areas indicate values passing the 95% confidence level)

是相对平均状态或非厄尔尼诺年,东亚-太平洋正位相环流是东部型厄尔尼诺次年夏季的优势模态。此外,由夏季EAP指数与前冬的东部型厄尔尼诺指数(图9a)及与中部型厄尔尼诺指数(图9b)的相关系数可以看出,东亚-太平洋指数与前冬东部型厄尔尼诺指数表现为显著的正相关关系,相关系数为0.27,通过95%的置信度检验,而EAP指数与前冬中部型厄尔尼诺指数的相关性则不显著。这也表明,前冬东太平洋地区海温正异常,有利于次年夏季东亚-太平洋地区由南至北“+ - +”东亚-太平洋波列的形成,如1983和1998年这两次强厄尔尼诺事件次年夏季,东亚-太平洋正位相环流显著(李维京,1999),2016年梅雨期也表现为强的东亚-太平洋正位相环流(图略)。

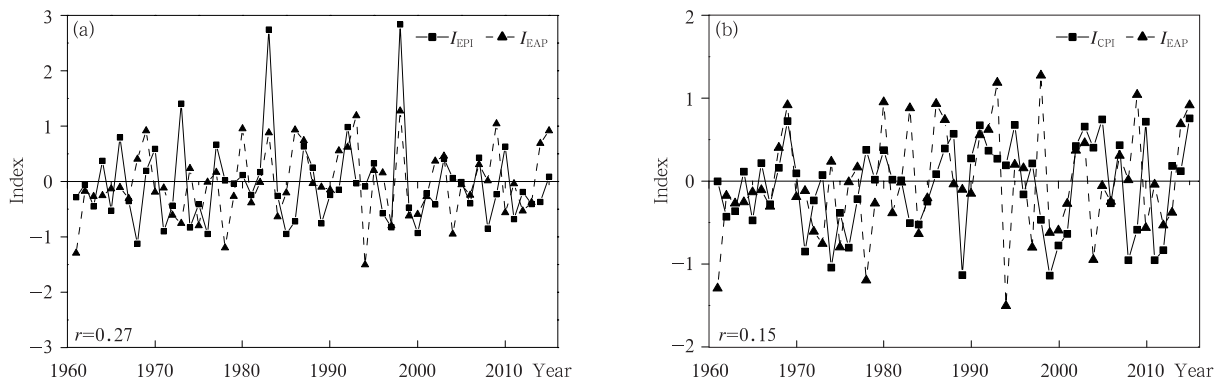


图9 夏季EAP指数(I_{EAP})与前冬东部型厄尔尼诺指数 I_{EPI} (a)及与中部型厄尔尼诺指数 I_{CPI} (b)长期序列
(r 为 I_{EAP} 与 I_{EPI} (或 I_{CPI})的相关系数)

Fig. 9 Time series of summer I_{EAP} and winter I_{EPI} (a) and I_{CPI} (b)
(the variable r is the correlation coefficient between I_{EAP} and I_{EPI} or I_{CPI})

5 结 论

利用台站降水资料和再分析资料分析了东部型和中部型厄尔尼诺事件当年及次年对中国夏季水汽输送和降水分布的影响,主要结论如下:

(1)厄尔尼诺事件当年夏季,除华南地区在中部型事件当年降水异常偏多外,中国大部分地区降水均异常偏少。而厄尔尼诺事件次年夏季,东部型厄尔尼诺事件对中国降水的影响较中部型偏强,范围更广。东部型厄尔尼诺事件次年夏季长江流域、西北、华北与东北等中国大部分地区降水均异常偏多,存在南、北两条异常雨带,而中部型厄尔尼诺事件次年夏季主要在江淮地区,华北东部和东北南部地区降水异常偏多。

(2)东部型厄尔尼诺事件当年夏季,热带东太平洋蒸发异常偏强,但低纬度异常的偏东风不利于其蒸发的水汽向中国大陆输送,主要由副热带印度洋蒸发的一部分水汽通过阿拉伯海和孟加拉湾向中国东部沿海部分地区输送,中国大陆水汽输送条件整体较弱,中国大部分地区净水汽收支均偏少,不利于大范围降水的发生(图10a);中部型厄尔尼诺事件当年夏季,低纬度的异常偏西风及西太平洋自南向北“ $- + -$ ”异常环流均不利于将热带中东太平洋地区异常蒸发的水汽向中国大陆输送,而低纬度印度洋和菲律宾群岛附近海域的蒸发偏强,来自阿拉伯海、孟加拉湾和西北太平洋的水汽可输送至华南地区,造成华南地区降水显著偏多,但中国其他地区的水汽条件偏弱,降水不易发生(图10c)。

(3)东部型厄尔尼诺事件次年夏季,副热带太平

洋蒸发异常偏强,副高西伸,由于东亚—西太平洋地区自南向北“ $+ - +$ ”东亚-太平洋遥相关型的建立和西北太平洋反气旋环流的作用,副高西侧的强西南气流将来自西太平洋的水汽持续输送至中国中东部地区。另外,欧亚中高纬度地区建立了自西向东“ $+ - +$ ”双阻型环流异常,其间的低槽冷涡与上游阻高之间的强偏北气流有利于欧亚高纬度地区和北冰洋的水汽持续输送到中国西北和华北北部,并与来自西北太平洋的水汽汇合并输送至东北地区,中国大部分地区净水汽收支增加,中国长江流域、华北、西北和东北等地区降水均异常偏多(图10b)。中部型厄尔尼诺事件次年夏季,中西太平洋蒸发异常增强,副高异常偏西且偏北,西北太平洋反气旋环流也偏北,将来自太平洋蒸发的大量水汽输送到江淮地区,使其净水汽收支增加,降水偏多;而欧亚中高纬度地区自西向东“ $+ -$ ”环流异常结构不利于形成北方水汽通道,从而不利于北方地区降水的发生(图10d)。

上述结果清楚地表明,在厄尔尼诺事件次年,由于西北太平洋反气旋环流的作用,大量来自西北太平洋的水汽输送到长江或江淮流域,导致其降水异常偏多。但值得注意的是东部型厄尔尼诺事件次年不仅对长江流域的降水产生了重要的影响,而且通过欧亚中高纬度地区建立的异常双阻型环流对中国西北地区的降水也有相当的增强作用。因而,东部型厄尔尼诺事件发生后中国南方和北方(包括西北、华北和东北)地区的降水均产生了明显的同步性增多响应和变化,形成了南北两条异常雨带。

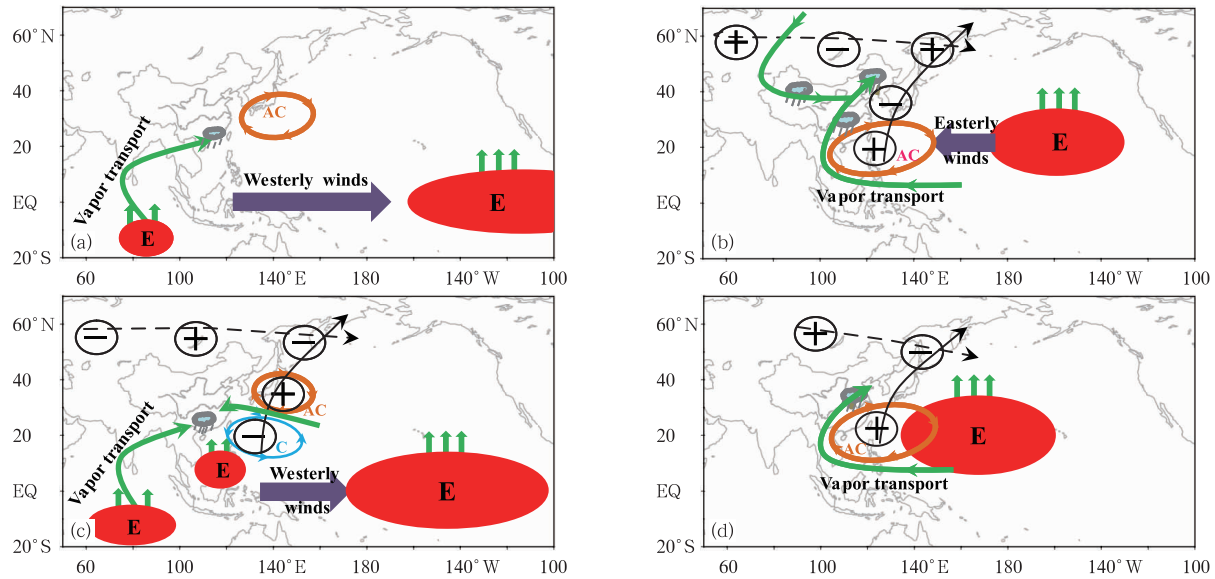


图 10 东部型(a,b)和中部型(c,d)厄尔尼诺事件当年(a,c)及次年(b,d)异常环流概念

(“+”和“-”分别代表 500 hPa 高度正和负异常,虚线箭头代表遥相关波列传播方向,绿色实线箭头代表水汽输送路径,E 代表蒸发,C 和 AC 分别代表气旋和反气旋环流异常)

Fig. 10 Schematic diagram of the circulation anomalies in EP El Niño (a, b) and CP El Niño (c, d) developing (a, c) and decaying (b, d) summer

(characters + and - indicate the positive and negative 500 hPa height anomalies, respectively; dash curves indicate the direction of the teleconnection wave train; green solid curves with an arrow indicate the water vapor transport path; characters E, C and AC indicate evaporation, cyclone and anticyclone anomalies, respectively)

参考文献

- 李海燕, 张文君, 何金海. 2016. ENSO 及其组合模态对中国东部各季节降水的影响. 气象学报, 74(3): 322-334. Li H Y, Zhang W J, He J H. 2016. Influences of ENSO and its combination mode on seasonal precipitation over eastern China. Acta Meteor Sinica, 74(3): 322-334 (in Chinese)
- 李维京. 1999. 1998 年大气环流异常及其对中国气候异常的影响. 气象, 25(4): 20-25, 57. Li W J. 1999. General atmospheric circulation anomaly in 1998 and their impact on climate anomaly in China. Meteor Mon, 25(4): 20-25, 57 (in Chinese)
- 刘永强, 丁一汇. 1995. ENSO 事件对我国季节降水和温度的影响. 大气科学, 19(2): 200-208. Liu Y Q, Ding Y H. 1995. Reappraisal of the influence of ENSO events on seasonal precipitation and temperature in China. Sci Atmos Sinica, 19(2): 200-208 (in Chinese)
- 徐洁, 王舒, 肖高翔. 2016. 不同分型厄尔尼诺事件对新疆汛期降水的影响. 沙漠与绿洲气象, 10(3): 53-58. Xu J, Wang S, Xiao G X. 2016. El Niño events of different types and their impact on the flood season precipitation in Xinjiang. Desert Oasis Meteor, 10(3): 53-58 (in Chinese)
- 袁良, 何金海. 2013. 两类 ENSO 对我国华南地区冬季降水的不同影响. 干旱气象, 31(1): 24-31. Yuan L, He J H. 2013. Different impacts of two types of ENSO on winter rainfall over South China. J Arid Meteor, 31(1): 24-31 (in Chinese)
- 袁媛, 杨辉, 李崇银. 2012. 不同分布型厄尔尼诺事件及对中国次年夏季降水的可能影响. 气象学报, 70(3): 467-478. Yuan Y, Yang H, Li C Y. 2012. Study of El Niño events of different types and their potential impact on the following summer precipitation in China. Acta Meteor Sinica, 70(3): 467-478 (in Chinese)
- 翟盘茂, 余荣, 郭艳君等. 2016. 2015/2016 年强厄尔尼诺过程及其对全球和中国气候的主要影响. 气象学报, 74(3): 309-321. Zhai P M, Yu R, Guo Y J, et al. 2016. The strong El Niño in 2015/2016 and its dominant impacts on global and China's climate. Acta Meteor Sinica, 74(3): 309-321 (in Chinese)
- 赵亮, 邹力, 王成林等. 2006. ENSO 年东亚夏季风异常对中国江淮流域夏季降水的影响. 热带气象学报, 22(4): 360-366. Zhao L, Zou L, Wang C L, et al. 2006. Impacts of the East Asian summer monsoon anomaly during the ENSO event period on the summer precipitation in the lower-middle reaches of the Yangtze river and Huaihe river valley. J Trop Meteor, 22(4): 360-366 (in Chinese)
- 赵振国. 1996. 厄尔尼诺现象对北半球大气环流和中国降水的影响. 大气科学, 20(4): 422-428. Zhao Z G. 1996. Impact of El Niño events on atmospheric circulations in the Northern Hemisphere and precipitation in China. Sci Atmos Sinica, 20(4): 422-428 (in Chinese)
- 智海, 俞永强, 严厉等. 2012. 厄尔尼诺衰减年东亚夏季大气环流和降水异常的耦合模式后报试验. 气象学报, 70(4): 779-788.

- Zhi H, Yu Y Q, Yan L, et al. 2012. Retrospective prediction in a coupled model over East Asia during El Niño decaying phase. *Acta Meteor Sinica*, 70(4): 779-788 (in Chinese)
- Capotondi A, Wittenberg A T, Newman M, et al. 2015. Understanding ENSO diversity. *Bull Amer Meteor Soc*, 96(6): 921-938
- Chang C P, Zhang Y S, Li T. 2000. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part I: Roles of the subtropical ridge. *J Climate*, 13(24): 4310-4325
- Chen G H, Tam C Y. 2010. Different impacts of two kinds of Pacific Ocean warming on tropical cyclone frequency over the western North Pacific. *Geophys Res Lett*, 37(1): L01803, doi: 10.1029/2009GL041708
- Feng J, Li J P. 2011a. Influence of El Niño Modoki on spring rainfall over south China. *J Geophys Res*, 116(D13): D13102, doi: 10.1029/2010JD015160
- Feng J, Chen W, Tam C Y, et al. 2011b. Different impacts of El Niño and El Niño Modoki on China rainfall in the decaying phases. *Int J Climatol*, 31(14): 2091-2101
- Huang G. 2004. An index measuring the interannual variation of the East Asian summer monsoon; The EAP index. *Adv Atmos Sci*, 21(1): 41-52
- Huang P, Xie S P. 2015. Mechanisms of change in ENSO-induced tropical Pacific rainfall variability in a warming climate. *Nat Geosci*, 8(12): 922-926
- Li X Z, Zhou W, Chen D L, et al. 2014. Water vapor transport and moisture budget over Eastern China: Remote forcing from the two types of El Niño. *J Climate*, 27(23): 8778-8792
- Liu Y J, Ding Y H, Song Y F, et al. 2009. Climatological characteristics of the moisture budget and their anomalies over the joining area of Asia and the Indian-Pacific Ocean. *Adv Atmos Sci*, 26(4): 642-655
- Ren H L, Jin F F. 2011. Niño indices for two types of ENSO. *Geophys Res Lett*, 38(4): L04704, doi: 10.1029/2010GL046031
- Wang B, Wu R G, Fu X H. 2000. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? *J Climate*, 13(9): 1517-1536
- Wang B, Zhang Q. 2002. Pacific-East Asian teleconnection. Part II: How the Philippine Sea anomalous anticyclone is established during El Niño development. *J Climate*, 15(22): 3252-3265
- Wang Y, Yan Z W. 2011. Changes of frequency of summer precipitation extremes over the Yangtze River in association with large-scale oceanic-atmospheric conditions. *Adv Atmos Sci*, 28(5): 1118-1128
- Xie S P, Kosaka Y, Du Y, et al. 2016. Indo-western Pacific ocean capacitor and coherent climate anomalies in post-ENSO summer: A review. *Adv Atmos Sci*, 33(4): 411-432
- Yeh S W, Kug J S, Dewitte B, et al. 2009. El Niño in a changing climate. *Nature*, 461(7263): 511-514
- Yu L, Jin X Z, Weller R A. 2008. Multidecade global flux datasets from the objectively analyzed air-sea fluxes (OAFlux) project: Latent and sensible heat fluxes, ocean evaporation, and related surface meteorological variables. OAFlux Project Technical Report (OA-2008-01). Woods Hole, Massachusetts: Woods Hole Oceanographic Institution, 64pp
- Yuan Y, Song Y. 2012. Impacts of different types of El Niño on the East Asian climate: Focus on ENSO cycles. *J Climate*, 25(21): 7702-7722
- Zhang R H, Sumi A, Kimoto M. 1999. A diagnostic study of the impact of El Niño on the precipitation in China. *Adv Atmos Sci*, 16(2): 229-241
- Zhang R H, Sumi A. 2002. Moisture circulation over East Asia during El Niño episode in northern winter, spring and autumn. *J Meteor Soc Japan*, 80(2): 213-227
- Zhang W J, Jin F F, Zhao J X, et al. 2013. The possible influence of a nonconventional El Niño on the severe autumn drought of 2009 in Southwest China. *J Climate*, 26(21): 8392-8405