

杨亚力, 杜岩, 陈海山, 等. 2011. ENSO 事件对云南及临近地区春末初夏降水的影响 [J]. 大气科学, 35 (4): 729–738. Yang Yali, Du Yan, Chen Haishan, et al. 2011. Influence of ENSO event on rainfall anomaly over Yunnan Province and its neighboring regions during late spring – early summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (4): 729–738.

ENSO 事件对云南及临近地区春末初夏降水的影响

杨亚力^{1,2} 杜岩¹ 陈海山³ 张永生⁴

1 中国科学院南海海洋研究所, 热带海洋环境国家重点实验室, 广州 510301

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 南京信息工程大学, 气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044

4 National Oceanographic Data Center, National Oceanic and Atmospheric Administration, Silver Spring, MD 20910, USA

摘 要 本文采用合成及相关分析的方法, 应用 55 年中国降水资料、美国 NOAA 海表温度资料以及 NCEP/NCAR 再分析资料, 研究了 ENSO 事件对我国云南及其邻近地区春末初夏降水的影响及物理机理。研究结果表明: (1) 在 El Niño (La Niña) 年, 云南大部分地区 4~5 月降水偏少 (多), 东部地区相关信号尤其明显; (2) 大气环流分析显示在 El Niño (La Niña) 年, 对流层低层阿拉伯海及孟加拉湾为东 (西) 风异常, 孟加拉湾出现明显的反气旋 (气旋) 式环流异常, 同时西北太平洋副热带高压增强 (减弱); (3) 水汽输送分析表明, El Niño (La Niña) 年, 孟加拉湾对云南水汽输送减弱 (增强) 且该地区有显著的水汽辐散 (辐合); (4) 200 hPa 高度场与云南降水指数相关分析说明云南春末初夏降水异常与印度洋—亚洲 (IA) 型遥相关的冬、春转变有关, El Niño (La Niña) 年春末初夏大气环流不 (有) 利降水生成。以上事实表明, ENSO 事件对云南春末初夏降水异常的影响与其对华南和江淮流域降水影响有明显的不同, 其中孟加拉湾气旋环流异常增强所导致的向云南地区的水汽输送的显著增加, 起着决定性的作用。

关键词 ENSO 云南降水 大气环流 遥相关

文章编号 1006-9895 (2011) 04-0729-10

中图分类号 P461

文献标识码 A

Influence of ENSO Event on Rainfall Anomaly over Yunnan Province and Its Neighboring Regions during Late Spring – Early Summer

YANG Yali^{1,2}, DU Yan¹, CHEN Haishan³, and ZHANG Yongsheng⁴

1 State Key Laboratory of Oceanography in Tropics, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

4 National Oceanographic Data Center, National Oceanic and Atmospheric Administration, Silver Spring, MD 20910, USA

Abstract Using the monthly gridded precipitation data in China, the NOAA extended reconstruction sea surface

收稿日期 2010-08-16, 2011-01-10 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2010CB950302, 中国科学院百人计划项目 KZCX2-YW-BR-04, 中国科学院知识创新工程项目 KZCX2-YW-Q11-02, 国家自然科学基金资助项目 40876007

作者简介 杨亚力, 男, 1986 年出生, 硕士研究生, 研究方向: 物理海洋学——海气相互作用。E-mail: yaliyang@scsio.ac.cn

通讯作者 杜岩, E-mail: duyan@scsio.ac.cn

temperature (SST) data, and the NCEP/NCAR reanalysis data, the authors investigate the impact of the ENSO on the interannual variability of late spring - early summer rainfall in Yunnan Province and the relevant physical mechanism. The analysis of composite and correlation study reveal a strong negative correlation between the rainfall anomaly in Yunnan Province and the Niño index. An El Niño (La Niña) event is concurrent with less (more) precipitation during late spring - early summer (April - May) in Yunnan Province. Further analysis of atmospheric circulation demonstrates that an El Niño (La Niña) event is coincident with an anomalous easterly (westerly) over the Arabian Sea and the Bay of Bengal in the lower troposphere, a stronger anomalous anticyclone (cyclone) over the Bay of Bengal, as well as a stronger (weaker) subtropical anticyclone in the northwestern Pacific Ocean. The correlation between height at 200 hPa and rainfall anomaly during late spring-early summer (April - May) in Yunnan Province reveals a relevant Indian Ocean - Asia teleconnection (IA) pattern. The water vapor transport indicates that during an El Niño (La Niña) event there is a stronger water vapor divergence (convergence) over the region. All above evidences demonstrate that, in comparison with the physical processes in controlling the interannual variation of the summer rainfall in southeastern China and the Yangtze River - Huaihe River valley, the conversion of Indian Ocean - Asia teleconnection pattern from winter to spring is dominant in determination of the rainfall anomaly in Yunnan Province during late spring - early summer, and particularly the increased water vapor transport associated with the intensification of the anomalous cyclone over the Bay of Bengal plays an important role.

Key words ENSO, Yunnan late spring-early summer rainfall, atmospheric circulation, Indian Ocean - Asia teleconnection

1 引言

ENSO 事件近年来倍受关注, 因为赤道太平洋海面水温的变化与全球大气环流尤其是热带大气环流紧密相关。ENSO 事件可以认为是热带地区特别是赤道地区海—气相互作用最集中的反映。它一旦发生, 将会在全球引起严重的气候异常。已有很多的专家与学者对 ENSO 事件进行了研究。

大量的资料统计结果及动力学研究表明, ENSO 是影响我国夏季降水的主要因子之一 (黄荣辉, 1990; 刘永强和丁一汇, 1995; 陶诗言和张庆云, 1998; Chang et al., 1999a, 1999b; Wang et al., 2000; 陈文, 2002)。Huang and Wu (1989) 的工作指出, 在 ENSO 暖事件发展阶段的夏季, 热带西太平洋海温偏低, 对流活动弱, 副热带高压南移, 中国东南沿海往往发生干旱, 江淮流域上空副热带高压减弱, 往往发生洪涝; 在 ENSO 事件消亡阶段, 菲律宾群岛附近洋面对流活动加强, 使得副热带高压北移, 造成江淮流域干旱。Chang et al. (1999a, 1999b) 及刘永强和丁一汇 (1995) 的工作指出, ENSO 次年长江中下游地区 5~6 月有显著的降水异常。前者还指出我国夏季降水异常与 ENSO 的关系有年代际的变化。Huang and Wu (1989)、Chang et al. (1999a, 1999b) 及 Wang et al. (2000) 的工作把 ENSO 事件对东亚气候的影响

用一种遥相关模式进行了研究, 指出 ENSO 通过热带太平洋的 Walker 环流影响西北太平洋副高, 从而影响我国华南及长江中下游地区夏季降水的异常。陶诗言和张庆云 (1998) 的工作指出, 类似于太平洋—北美 (Pacific - North America, 简称 PNA) 型遥相关, 在 ENSO 冬季印度洋—亚洲出现的印度洋—亚洲 (Indian Ocean - Asia, 简称 IA) 遥相关型, 是引起亚洲夏季风异常的主要物理因子。

我国西南地区处于海拔 2000 m 左右的低纬高原地区, 其西北临青藏高原, 南面是孟加拉湾和南海两个热带海洋, 同时受到印度洋西南季风和东亚季风的影响, 形成一种独特的低纬高原气候 (秦剑等, 1997)。我们选取云南 ($23^{\circ}\text{N}\sim 28^{\circ}\text{N}$, $97.5^{\circ}\text{E}\sim 105^{\circ}\text{E}$)、江淮流域 ($27^{\circ}\text{N}\sim 34^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 125^{\circ}\text{E}$)、华南地区 ($20^{\circ}\text{N}\sim 27^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 125^{\circ}\text{E}$) 三地逐日降水多年气候平均进行比较 (图 1), 发现云南雨季建立及其持续的时间与华南、江淮流域有显著的不同, 全年表现为明显的干湿两季, 雨季建立于 5 月中下旬, 于 10 月底结束。已有的研究 (秦剑等, 1997; 琚建华和陈琳玲, 2003) 表明, ENSO 是影响云南夏季尤其是初夏降水的一个重要的因子。秦剑等 (1997) 的研究指出南方涛动指数与次年昆明 5 月份的雨量有显著的相关。琚建华和陈琳玲 (2003) 研究了 ENSO 事件对云南降水年代际变化

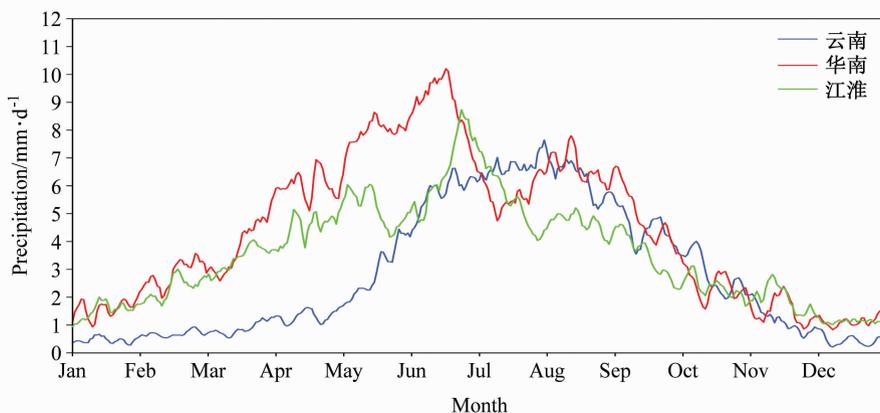


图1 云南(23°N~28°N, 97.5°E~105°E)、江淮流域(27°N~34°N, 110°E~125°E)、华南地区(20°N~27°N, 110°E~125°E)降水区域气候平均逐日变化

Fig. 1 Daily variations of climatological precipitation averaged over Yunnan region (23°N - 28°N, 97.5°E - 105°E), the Yangtze River - Huaihe River valley (27°N - 34°N, 110°E - 125°E), and South China (20°N - 27°N, 110°E - 125°E)

的影响,指出 ENSO 对云南降水的影响主要表现为云南雨季起讫的早晚。迄今为止, ENSO 与云南及西南其它地区夏季降水的异常的关系仍然存在很多疑问,例如,目前人们还不十分清楚 ENSO 影响云南夏季降水到何种程度,也不清楚是否涉及其它相关的物理机制。最近, Yang et al. (2007)、Xie et al. (2009)、Du et al. (2009) 的研究提出 ENSO 事件通过印度洋能够影响次年的印度季风和东亚季风。这意味着来自印度洋的影响会起重要的作用。

本工作基于国家气候中心收集的我国气象观测站逐日降水和 NOAA 逐月海温资料,分析 ENSO 影响我国西南地区降水的基本事实,然后提取显著的信号,结合大气环流场分析与降水异常相联系的大气环流变化及其相关的物理机理,探讨 ENSO 在影响我国西南地区气候变化的作用。本文的第二部分将描述所采用的资料和方法,第三部分给出 ENSO 影响云南及西南临近地区降水异常的事实,第四部分讨论相关的大气环流变化,最后给出结论和讨论。

2 资料与方法

本文采用的降水资料为国家气候中心收集的站点逐日降水资料,通过插值获得精细格点资料,时间由 1951 年 1 月 1 日~2005 年 12 月 31 日,水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。所使用的高度气压场、风场、水汽资料是 17 层的月平均 NCEP/NCAR 再分

析资料 (Kalnay et al., 1996), 水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。海温资料为美国 NOAA 拓展海表温度 (Smith and Reynolds, 2003), 其水平分辨率为 $2.0^\circ \times 2.0^\circ$, NCEP 再分析 OLR 逐月平均资料,水平分辨率 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。

本文从 1951~2005 共 55 年中挑选出 El Niño 年和 La Niña 年,挑选方法基于美国 NOAA 气候预测中心在业务上使用的对 ENSO 事件的定义,定义冬季前后连续 6 个月赤道中东太平洋 SSTA (海表温度异常) $\geq 0.5^\circ\text{C}$ ($\leq -0.5^\circ\text{C}$) 的年份为 El Niño (La Niña) 年。我们将 ENSO 事件由发展直至形成的年份定义为 ENSO 冷(暖)事件(0)年,将 ENSO 冷(暖)事件次年定义为 ENSO (1)年,而本文研究的重点为 ENSO 事件(1)年对云南地区降水的影响,遂挑选出 10 个 El Niño 年份: 1958、1964、1966、1973、1977、1983、1987、1992、1998、2003, 11 个 La Niña 年份: 1965、1968、1971、1974、1976、1984、1985、1989、1996、1999、2000。通过合成 El Niño 和 La Niña 多年月平均降水、风场、水汽、OLR、高度场资料与云南降水差异较大的区域进行相关研究。

3 ENSO 事件和云南降水的关系

云南雨季始于 5 月 (秦剑等, 1997)。为了研究 ENSO 事件对云南地区降水可能存在的影 响,我们选取区域 ($23^\circ\text{N} \sim 28^\circ\text{N}$, $97.5^\circ\text{E} \sim 105^\circ\text{E}$) 代表云南进行冷暖事件(0)~(1)年期间 1~12 月的降水

气候平均分析。图 2 是逐月降水距平结果（距平指的是相对于 1957~2003 年的长期平均而言）。

分析图 2 可得，El Niño 和 La Niña 年月平均降水差异主要表现在事件（1）年，整体上表现为，在 El Niño（1）年，云南地区逐月降水量偏少；在 La Niña 年即 ENSO 冷事件（1）年，云南地区降水量偏多；在春末初夏即 4~5 月份表现得尤其明显。由逐月降水距平百分率（逐月降水距平值与其多年气候平均的比值）可以进一步发现（图 3），ENSO 冷暖事件（1）年 4、5 月降水异常较其他月份更加明显。云南雨季开始时间平均为 5 月，4 月相对其他雨季月份来说，降雨量相对较少，但云南地处低纬高原，受南亚季风和东亚季风的共同影响，雨季开始期年际差异很大，正常年份开始于 5 月第 5 候左右，异常年份雨季开始期最早可在 4 月下旬，最晚可在 6 月下旬，早晚相差近两个月（陶云等，2006；刘瑜等，2007a），且每年 4~5 月，正是冬季风向夏季风转换的关键时期（晏红明等，2001），由

此表明，4、5 月降水异常对于云南雨季开始期的重要性。综上，ENSO 冷暖事件背景下，云南降水异常主要表现在事件发生后第二年，并集中于春末初夏的 4、5 月。

为了说明降水异常的出现与 ENSO 冷、暖事件的关系，我们做了 Niño3.4 指数（Trenberth, 1997）与事件（0）~（1）年云南各月降水的相关分析。在事件（1）年的 5 月两者呈现了很好的相关（图 4）。在云南中东部呈很强的负相关，其它区域虽然相关系数相对较弱，但整体上云南与 Niño 指数呈现负相关，说明在 El Niño（1）年 5 月，云南降水偏少，这与图 2 中的降水异常形势一致，很好地说明了云南降水异常与 ENSO 冷暖事件在统计上关系密切。

另外，在图 5 中我们将云南与江淮流域、华南地区在 4~5 月的降水情况进行对比，El Niño 年 4、5 月江淮流域降水偏多，华南地区降水偏少；La Niña 年江淮流域降水偏少，华南地区降水偏多。

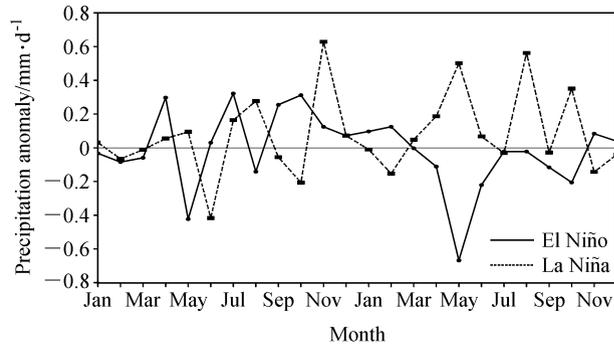


图 2 El Niño、La Niña 年云南逐月降水距平合成（单位：mm/d）
Fig. 2 The composites of monthly precipitation anomalies in Yunnan for El Niño and La Niña years

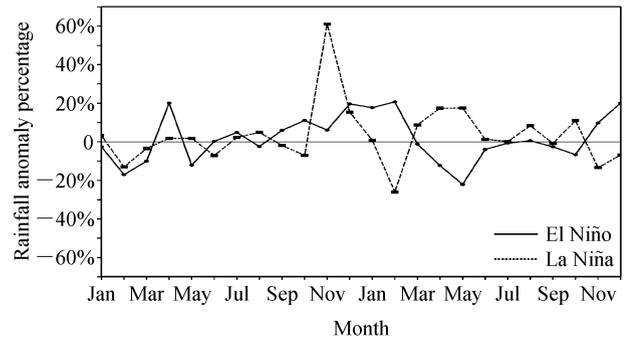


图 3 El Niño、La Niña 年云南逐月降水距平百分率合成
Fig. 3 The composites of monthly rainfall anomaly percentages in Yunnan for El Niño and La Niña years

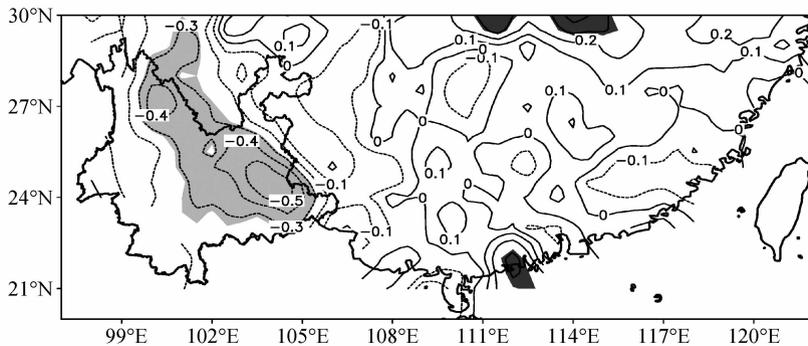


图 4 Niño3.4 指数与 5 月云南降水相关分析。深、浅阴影区为相关系数超过 0.05 显著性水平
Fig. 4 Correlation between the Niño3.4 index and Yunnan rainfall anomaly in May. The dark (light) shading represents positive (negative) correlation at 0.05 significance level

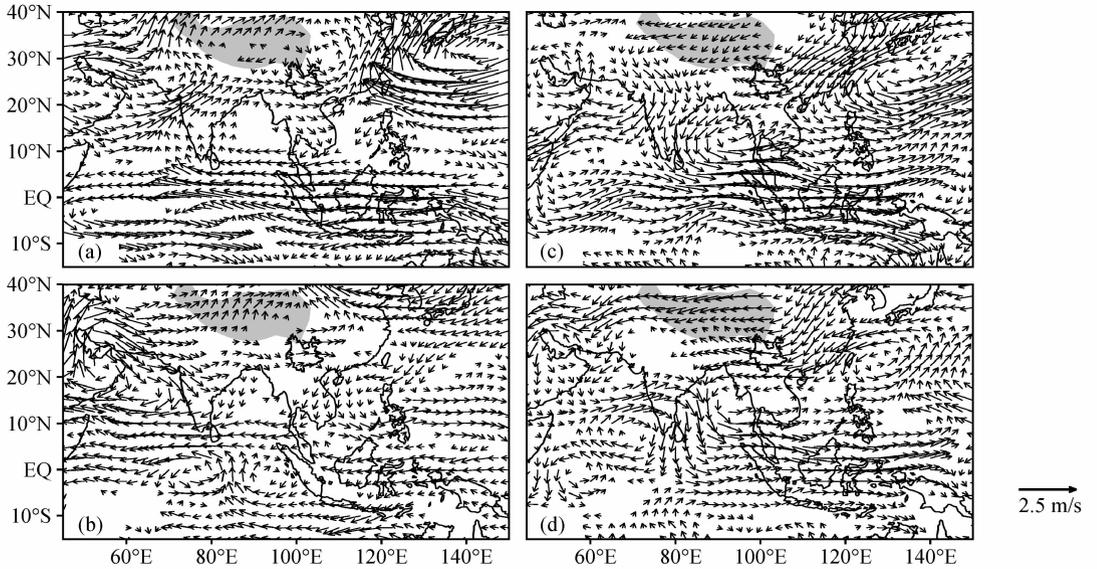


图 6 (a, b) El Niño (1) 年和 (c, d) La Niña (1) 年 700 hPa 风场距平合成 (单位: m/s): (a, c) 4 月; (b, d) 5 月
Fig. 6 The composites of the 700-hPa wind anomalies in (a, b) El Niño and (c, d) La Niña years; (a, c) Apr; (b, d) May

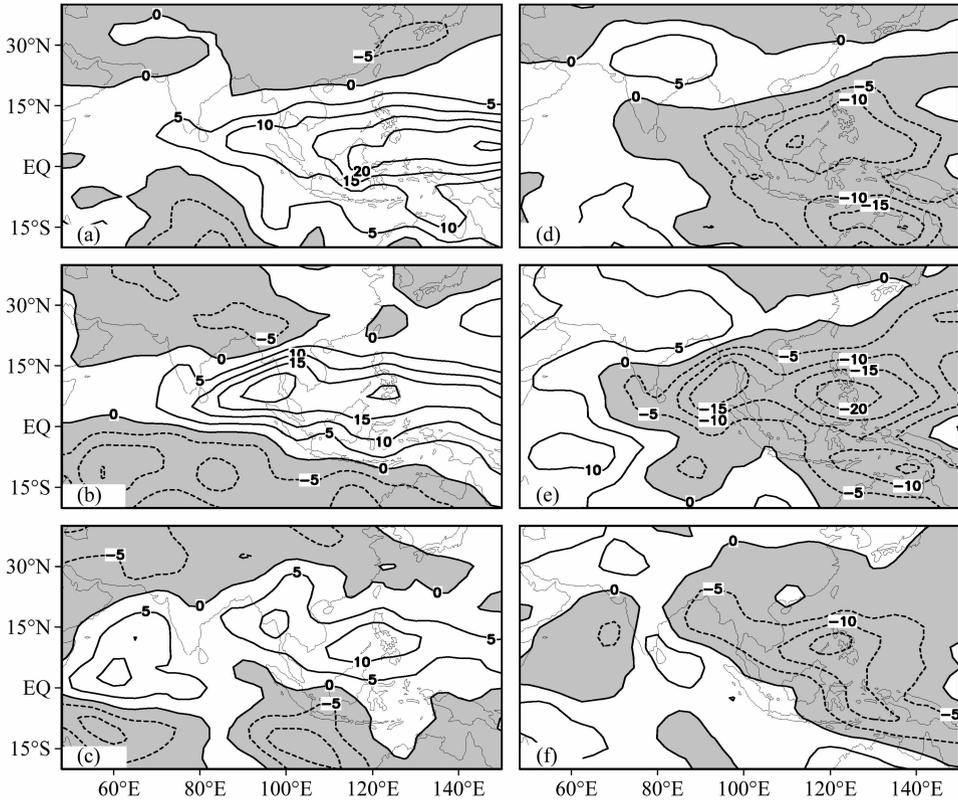


图 7 (a-c) El Niño (1) 年和 (d-f) La Niña (1) 年 3~5 月 OLR 距平合成场 (单位: W/m^2): (a, d) 3 月; (b, e) 4 月; (c, f) 5 月。阴影: 负距平区

Fig. 7 The composites of the OLR anomalies (W/m^2) in (a-c) El Niño and (d-f) La Niña years: (a, d) Mar; (b, e) Apr; (c, f) May. The shaded areas are negative anomalies

刘瑜等, 2007a, 007b), 因此, 分析 ENSO 冷暖事件背景下 OLR 特征, 能够了解孟加拉湾低压系统发展情况及其向云南输送水汽的能力。图 7 给出 El Niño (1)、La Niña (1) 年 OLR 距平合成场, 由图中可以看到, El Niño (1) 年 3、4、5 月苏门答腊岛附近的孟加拉湾南部及爪哇岛一带为正距平控制, 而这一区域正是印度洋夏季风气流活动的关键区, 正距平表明这一带对流活动较弱, 孟加拉湾低压系统生成可能性较低。另外, 中国南海也为正距平区, 表明南海的对流强度也较弱。从图中还能看到, 由 3 月至 5 月, 云南上空对流情况发生了改变, 由强对流变为弱对流, 5 月时不利于云南上空降水的生成。La Niña (1) 年 3~5 月的 OLR 距平场中, 呈现了与 El Niño (1) 年几乎相反的情况。孟加拉湾南部及爪哇岛一带为负距平区, 表明这些区域对流活动强烈, 孟加拉湾低压系统生成可能性较高, 图 6c、d 中孟加拉湾气旋式环流的存在即是有利的证明。中国南海强对流也有利于向云南的水汽输送, 孟加拉湾和南海此时将给云南带来丰沛的水汽。另外, La Niña (1) 年 5 月, 云南为强对流区, 有利当地降水生成。

由上述对对流分析可得, El Niño (La Niña) 年,

中南半岛附近海域对流的发展不(有)利于孟加拉湾低压系统生成, 不(极)易给云南带来充足的水汽, 使得 El Niño (La Niña) 年云南降水偏少(多)。另外, 云南当地的对流情况也是影响降水的因素。

4.3 水汽输送

由图 6、7 我们已大致了解 El Niño、La Niña 年孟加拉湾向云南的水汽输送情况, 由图 8 的 850 hPa 水汽通量形势可以进一步明晰此时云南水汽辐合辐散的情况。图 8 中可以明显看出在 El Niño 年 4、5 月, 850 hPa 高度上水汽通量在云南表现为辐散, 在江淮流域表现为辐合; La Niña 年 4、5 月, 水汽通量形势正好相反。云南为辐合, 江淮流域为辐散异常。另外从图 7 中已知道, La Niña 年 5 月时, 云南上空对流运动强烈, 表明只要有充分的水汽供应, 此时在云南出现大雨天气过程的可能性很大。水汽通量情况还显示, 在 El Niño 年, 只要有充分的水汽供应, 在江淮流域容易产生降水, 云南则降水偏少; 而在 La Niña 年, 则是云南多雨, 江淮流域少雨。

4.4 高度场

我们将图 2 中所选区域 (23°N~28°N, 97.5°E~105°E) 49 年 (1957~2005 年) 的 4、5 月降水区域

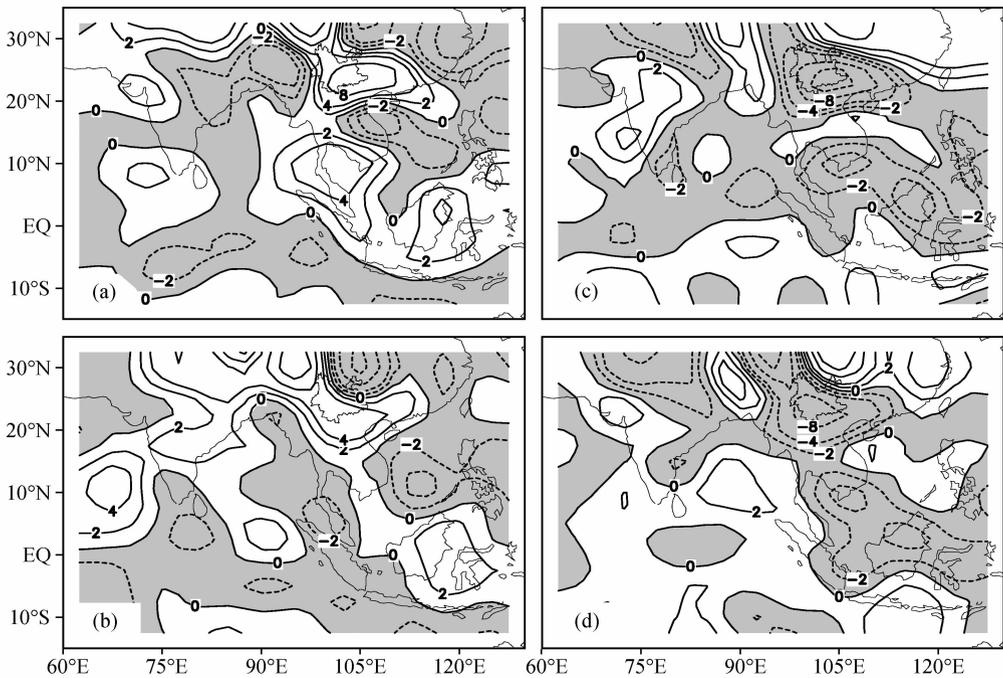


图 8 (a、b) El Niño 年和 (c、d) La Niña 年 850 hPa 水汽通量辐合 (单位: $10^{-5} \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$); (a、c) 4 月; (b、d) 5 月。阴影: 负值区
Fig. 8 The composites of the 850-hPa water vapor flux divergence (units: $10^{-5} \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) in (a, b) El Niño and (c, d) La Niña years; (a, c) Apr; (b, d) May. The shaded areas are negative values

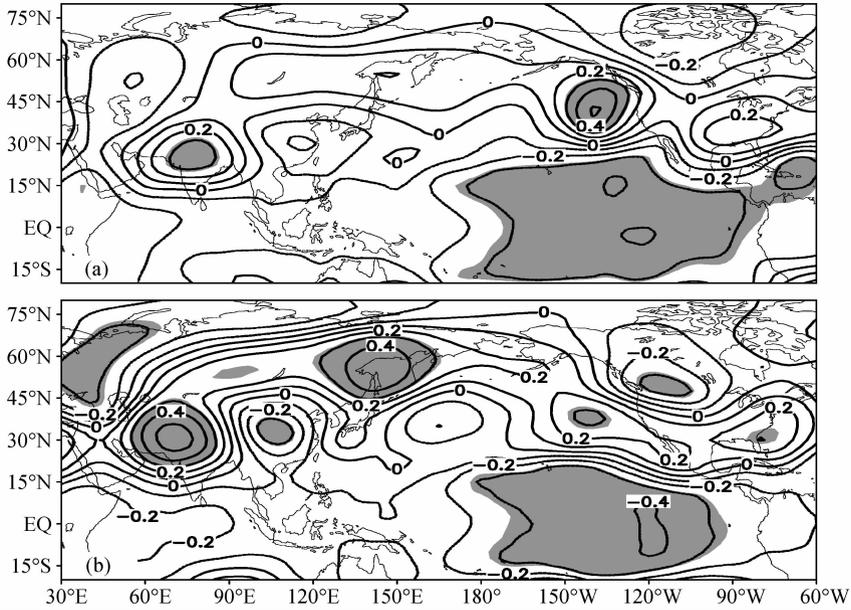


图9 云南降水指数与4、5月200 hPa月平均位势高度相关:(a)4月;(b)5月。阴影:相关系数超过0.05显著性水平

Fig. 9 Correlation distributions of Yunnan rainfall index and the 200-hPa height fields in (a) Apr and (b) May. The shaded regions denote correlation coefficients over 0.05 significance level

平均之和定义为云南降水指数,与同期4、5月200 hPa位势高度场进行相关分析(图9)。结果显示,在亚洲,中亚南部正相关,东亚、中国大部地区为负相关,低纬印度洋为负相关区,中纬度贝加尔湖至鄂霍次克海为正相关区,由北向南有明显的西南—东北向的正负波列分布特征。在太平洋和北美地区,北太平洋、加拿大西北部、美国东南部和低纬副热带地区呈现“正—负—正—负”的相关波列形势,是东太平洋SST异常引发的PNA型遥相关的体现。

印度洋在El Niño期间,也存在海面异常增暖的情况,相对于太平洋,印度洋的增暖一般存在3~6个月的滞后期(Schott et al., 2009)。那么,亚洲200 hPa上的正负波列分布也是一种遥相关?陶诗言和张庆云(1998)在分析El Niño次年亚洲冬季环流状况时,提出了位于对流层中上层的印度洋—亚洲(IA)遥相关型。具体表现为1998年2月赤道印度洋60°E上有强烈的上升运动,200 hPa流函数距平在(30°N, 60°E)以南及东亚中高纬度有反气旋环流,90°E~120°E副热带有气旋环流。将这些环流特征与图9进行对比,可以发现,两者在亚洲副热带地区一致。另外,从ENSO事件(1)年200 hPa位势高度距平合成场(图略)中可以发现,

图9所反映的4、5月相关特征与El Niño(1)年1、2月,亚洲副热带地区200 hPa位势高度距平特征同样一致,但图9体现的是La Niña年的情况,说明El Niño(1)年,前冬、春季亚洲副热带200 hPa环流形势发生了转变。

陶诗言和张庆云(1998)指出El Niño年冬季,IA遥相关型作用为:南亚上空西风带偏南,扰动活跃,高原和华南地区冬季降水偏多,土壤水分正距平,促使南亚大陆在春夏增暖推迟,与海洋热力对比小,引发弱的南亚夏季风。我们由相关分析结果得到,El Niño(1)年春末对流层中上层环流形势对降水有抑制作用。青藏高原东南部至中国大部位势偏高表明南亚高压较多年平均强度增强,面积较大,位置偏东。气候平均显示,5月南亚高压是一个低空辐合、高空辐散的环流系统,此环流系统建立的时间、强度及位置是影响5月云南降水的因素之一(严华生等,1995)。彭丽霞等(2009)的研究指出,印度洋海温与南亚高压面积的显著相关在前冬季开始出现,并在当年春季达到最强,由此造成南亚高压在El Niño(La Niña)年春、夏季,强度增强(减弱),面积扩大(缩小),东西向扩展(收缩)。因此,El Niño(1)年春末初夏200 hPa环流场特征可以认为是南亚高压强度、位置在ENSO冷

暖事件年春末初夏转换的表现。

由上述分析可得, 南方南亚夏季风和孟加拉湾低压系统, 西边南亚高压, 东边副热带高压均是影响云南降水的系统。La Niña (1) 年春末初夏, 环流形势与 El Niño (1) 年相反, 南亚夏季风强盛, 孟加拉湾低压系统活跃。南亚高压位置偏西, 主要位于中亚南部, 其高层为反气旋环流, 有强烈的气流辐散; 对应低层在孟加拉湾将存在气流辐合, 有气旋式环流 (吴国雄和张永生, 1998, 1999; Wu and Zhang, 1998)。高低空环流配置激发低层偏南气流向北输送, 加之云南此时为水汽辐合区, 且对流运动强烈。有利于北方冷空气与南方暖湿空气在云南交汇, 造成云南降水偏多。ENSO 事件背景下, 云南春末初夏降水异常是印度洋海温异常、亚洲南部地区前冬、春末大气环流场共同作用的结果。前冬由于印度洋异常海温激发特定大气环流结构, 引发初夏南亚夏季风强弱变化, 同时决定了雨期初期孟加拉湾向云南的水汽输送强度, 后期通过大气环流结构的调整, 促进或抑制降水的产生。但总的来说, 对云南降水异常起决定作用的是孟加拉湾的水汽输送。

5 小结和讨论

ENSO 事件次年云南的降水出现显著异常, 主要表现为 El Niño 年春末初夏 (4、5 月) 降水偏少, La Niña 年降水偏多。由于 5 月之后降水异常相对并不明显, 该降水异常也可以看作是 ENSO 事件对云南雨期开始时间的影响, 暖事件的发生使得云南雨期开始时间推后, 冷事件则是使雨期提前。

伴随着降水异常的则是动力场方面的异常, 包括风场、高度场和水汽输送。Klein et al. (1999) 曾指出, 通过遥相关机制, ENSO 事件会造成在太平洋、印度洋和大西洋上经向 Hadley 环流出现异常。El Niño 年呈现出的环流和辐散/辐合异常不利于降水, 而 La Niña 年的异常则促进了降水。本文重点分析的环流异常可以看作是赤道中东太平洋海气耦合过程通过“大气桥”(Alexander et al., 2002) 效应在我国西南地区的体现。其机制包括 ENSO—西太平洋副高遥相关机制, 也包括印度—亚洲遥相关机制; 另外, 由于云南水汽主要来源于孟加拉湾, 与印度洋相联系的印度—亚洲型遥相关提供的大气环流背景对于云南异常降水有重要作用。我们

推测这些过程还和云南当地特殊地形条件有关。ENSO 事件的发生在一定程度上造成了云南的降水异常, 这种影响是间接的, 内在问题还需要进一步的研究。例如, 由于云南春末初夏降水的异常最终来源于孟加拉湾的水汽输送, 那么前冬印度洋异常海温激发的 IA 遥相关型是否是决定初夏南亚夏季风的强度的唯一因素? 最近, Yang et al. (2007)、Xie et al. (2009)、Du et al. (2009) 揭示印度洋内部的海气反馈机制可能起到了关键的作用。这些都需要高精度的海气耦合模式进行更深入的研究。

致谢 Qinghua Ding (Meteorology Department, University of Hawaii at Manoa, 私人通信) 提供文章所用降水资料。

参考文献 (References)

- Alexander A M, Bladé I, Newman M, et al. 2002. The atmospheric bridge: The influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans [J]. *J. Climate*, 15: 2205-2231.
- 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.
- Chang C-P, Zhang Yongsheng, Li T. 1999a. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part I: Roles of the subtropical ridge [J]. *J. Climate*, 13: 4310-4325.
- Chang C-P, Zhang Yongsheng, Li T. 1999b. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part II: Meridional structure of the monsoon [J]. *J. Climate*, 13: 4326-4332.
- Du Yan, Xie Shangping, Huang Gang, et al. 2009. Role of air-sea interaction in the long persistence of El Niño-induced North Indian Ocean warming [J]. *J. Climate*, 22 (8): 2023-2038.
- 黄荣辉. 1990. 引起我国夏季旱涝的东亚大气环流异常遥相关及其物理机制的研究 [J]. *大气科学*, 14 (1): 108-116.
- Huang Ronghui. 1990. Studies on the teleconnections of the general circulation anomalies of East Asia causing the summer drought and flood in China and their physical mechanism [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 14 (1): 108-116.
- Huang Ronghui, Wu Yifang. 1989. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 6 (1): 21-32.
- 琚建华, 陈琳玲. 2003. ENSO 对云南地区降水影响的年代际变化 [J]. *热带气象学报*, 19 (2): 191-196.
- Ju Jianhua, Chen Lin-

- ling. 2003. The influence of ENSO events upon Yunnan precipitation and its interdecadal variations [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 19 (2): 191–196.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 437–471.
- Klein S A, Soden B J, Lau N C. 1999. Remote sea surface temperature variations during ENSO: Evidence for a tropical atmospheric bridge [J]. *J. Climate*, 12 (4): 917–932.
- 刘永强, 丁一汇. 1995. ENSO 事件对我国季节降水和温度的影响 [J]. *大气科学*, 19 (2): 200–208. Liu Yongqiang, Ding Yihui. 1995. Reappraisal of the influence of ENSO events on seasonal precipitation and temperature in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 19 (2): 200–208.
- 刘瑜, 黄玮, 陶云, 等. 2007a. 云南雨季开始期与热带 OLR 的联系 [J]. *高原气象*, 26 (2): 409–413. Liu Yu, Huang Wei, Tao Yun, et al. 2007. Relationship between the rainy season onset Yunnan and tropical OLR [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 26 (2): 409–413.
- 刘瑜, 赵尔旭, 黄玮, 等. 2007b. 初夏孟加拉湾低压与云南雨季开始期 [J]. *高原气象*, 26 (3): 572–578. Liu Yu, Zhao Erxu, Huang Wei, et al. The lows over the Bay of Bengal in early summer and beginning time of rainy season of Yunnan Province [J]. *Plateau Meteorology*, 26 (3): 572–578.
- 彭丽霞, 孙照渤, 倪东鸿, 等. 2009. 夏季南亚高压年际变化及其与 ENSO 的关系 [J]. *大气科学*, 33 (4): 783–795. Peng Lixia, Sun Zhaobo, Ni Donghong, et al. 2009. Interannual variation of summer South Asia high and its association with ENSO [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 33 (4): 783–795.
- 秦剑, 琚建华, 解明恩, 等. 1997. 低纬高原天气气候 [M]. 北京: 气象出版社, 第六章: 23–149. Qin Jian, Ju Jianhua, Xie Ming'en. 1997. *Weather and Climate over Low Latitude Plateau* (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, Chapter 6: 123–149.
- Smith T M, Reynolds R W. 2003. Extended reconstruction of global sea surface temperatures based on COADS data (1854–1997) [J]. *J. Climate*, 16: 1495–1510.
- Schott F A, Xie S P, McCreary J P Jr. 2009. Indian Ocean circulation and climate variability [J]. *Rev. Geophys.*, 47, RG1002, doi: 10.1029/2007RG000245.
- 陶诗言, 张庆云. 1998. 亚洲冬夏季风对 ENSO 事件的响应 [J]. *大气科学*, 22 (4): 399–406. Tao Shiyan, Zhang Qingyun. 1998. Response of the Asian winter and summer monsoon to ENSO events [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 22 (4): 399–406.
- 陶云, 郑建萌, 万云霞, 等. 2006. 云南雨季开始期演变特征分析 [J]. *气候与环境研究*, 11 (2): 229–235. Tao Yun, Zheng Jianmeng, Wan Yunxia, et al. 2006. Evolution feature of the rainy season onset time of Yunnan Province [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 11 (2): 229–235.
- Trenberth K E. 1997. The definition of El Niño [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78 (12): 2771–2777.
- 吴国雄, 张永生. 1998. 青藏高原的热力和机械强迫作用以及亚洲季风的爆发 I: 爆发地点 [J]. *大气科学*, 22 (6): 825–838. Wu Guoxiong, Zhang Yongsheng. 1998. Thermal and mechanical forcing of the Tibetan Plateau and the Asian monsoon onset. Part I: Situating of the onset [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 22 (6): 825–838.
- 吴国雄, 张永生. 1999. 青藏高原的热力和机械强迫作用以及亚洲季风的爆发 II: 爆发时间 [J]. *大气科学*, 23 (1): 51–61. Wu Guoxiong, Zhang Yongsheng. 1999. Thermal and mechanical forcing of the Tibetan Plateau and the Asian monsoon onset. Part II: Timing of the onset [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 23 (1): 51–61.
- Wu Guoxiong, Zhang Yongsheng. 1998. Tibetan Plateau forcing and the timing of the monsoon onset over South Asia and the South China Sea [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 126: 913–927.
- Wang Bin, Wu Renguang, Fu Xiouhua. 2000. Pacific–East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? [J]. *J. Climate*, 13: 1517–1536.
- Xie Shangping, Hu K M, Hafner J, et al. 2009. Indian Ocean capacitor effect on Indo-Western Pacific climate during the summer following El Niño [J]. *J. Climate*, 22: 730–747.
- 严华生, 鲁亚斌, 尤卫红. 1995. 云南省 5 月份雨量的天气气候成因探讨 [J]. *应用气象学报*, 6 (1): 124–128. Yan Huasheng, Lu Yabin, You Weihong. 1995. A study of weather and climate features of precipitation in May in Yunnan [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 6 (1): 124–128.
- 晏红明, 杞明辉, 肖子牛. 2001. 云南 5 月雨量与热带海温异常及亚洲季风变化的关系 [J]. *应用气象学报*, 12 (3): 368–377. Yan Hongming, Qi Minghui, Xiao Ziniu. 2001. Relationship between precipitation in May over Yunnan and the changes of tropical sea surface temperature and Asia monsoon [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 12 (3): 368–377.
- Yang J, Liu Q, Xie S P, et al. 2007. Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L02708, doi: 10.1029/2006GL028571.