

伍红雨, 吴遥. 2018. 不同类型和强度的厄尔尼诺事件对次年华南前汛期降水的可能影响 [J]. 大气科学, 42 (5): 1081–1095. Wu Hongyu, Wu Yao. 2018. Possible impacts of El Niño events of different types and intensity on precipitation in the subsequent first rainy season in South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (5): 1081–1095, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1711.17178.

不同类型和强度的厄尔尼诺事件对次年华南 前汛期降水的可能影响

伍红雨^{1,2} 吴遥³

1 广东省气候中心, 广州 510641

2 中国气象局广东省区域数值天气预报重点实验室, 广州 510641

3 重庆市气候中心, 重庆 401147

摘 要 根据气象行业标准 (QT/T370-2017) 对厄尔尼诺事件不同类型的划分结果以及国家气候中心最新颁布的华南前汛期业务监测标准, 利用 1961~2016 年 NCEP/NCAR 日、月尺度再分析大气环流资料、海表温度资料 (ERSST V4) 以及华南 261 个国家气象观测站逐日降水资料, 采用相关、合成等方法分析了不同类型、强度的厄尔尼诺事件特征以及与次年华南前汛期的关系, 并探讨其海温和大气环流异常特征。结果表明, 厄尔尼诺事件的类型、强度对次年华南前汛期降水的影响存在明显差异。中等及以上强度东部型厄尔尼诺事件次年, 华南前汛期开汛早、结束晚, 前汛期持续时间长、降水多; 弱等级的东部型以及中部型厄尔尼诺事件次年则相反。在厄尔尼诺事件次年华南前汛期, 中等及以上强度东部型厄尔尼诺相对弱东部型或中部型厄尔尼诺的大气环流存在明显差异。高层西风急流明显加强, 中层北半球极涡加强, 东亚大槽强, 低层菲律宾以东存在反气旋异常环流, 华南存在南北风的交汇和水汽辐合加强, 有利于华南前汛期降水偏多。

关键词 厄尔尼诺事件 类型 强度 前汛期降水 华南

文章编号 1006-9895(2018)05-1081-15

中图分类号 P426

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1711.17178

Possible Impacts of El Niño Events of Different Types and Intensity on Precipitation in the Subsequent First Rainy Season in South China

WU Hongyu^{1,2} and WU Yao³

1 Climate Center of Guangdong Province, Guangzhou 510641

2 Guangdong Provincial Key Laboratory of Regional Numerical Weather Prediction, China Meteorological Administration, Guangzhou 510641

3 Chongqing Climate Center, Chongqing 401147

Abstract Based on the meteorological industry standard (QT/T370-2017) for El Niño events of different types and the latest monitoring standard of the first rainy season in South China issued by National Climate Center, using the NCEP/NCAR daily and monthly reanalysis data, NOAA SST data (ERSST V4), and the data collected at 261 meteorological observational stations in South China from 1961 to 2016, the relationship between El Niño events of different types and

收稿日期 2017-06-12; 网络预出版日期 2017-12-05

作者简介 伍红雨, 女, 1969 年出生, 正研级高工, 主要从事气候和气候变化研究。E-mail: wuhy@grmc.gov.cn

资助项目 国家重大科学研究计划项目 2014CB953900, 国家自然科学基金项目 41661144019, 广东省科技计划项目 2017B030314140, 广东省气象局科技项目 2015B12

Funded by National Major Research Program of China (Grant 2014CB953900), National Natural Science Foundation of China (Grant 41661144019), Science and Technology Planning Project of Guangdong Province of China (Grant 2017B030314140), Research Program Foundation of Guangdong Meteorological Bureau (Grant 2015B12)

intensity and precipitation in the subsequent first rainy season in South China and the characteristics of the atmospheric circulation and SST are analyzed by correlation and composite analysis methods. The results show that the impacts of El Niño events of different types and intensity on the subsequent first rainy season in South China are obviously different. Under the influence of the East Pacific El Niño events with medium and higher intensity, the onset date of the first rainy season in South China is earlier than normal while the ending date is later than normal and the duration is longer with higher than normal precipitation. The opposite is true when South China is under the influence of East Pacific El Niño events with weak intensity or under the influence of central Pacific El Niño events. The atmospheric circulation in the first rainy season in South China under the influence of East Pacific El Niño events with medium and higher intensity is obvious different from that under the influence of weak East Pacific El Niño events or central Pacific El Niño events. In the former condition, the westerly jet in upper levels intensify, the polar vortex in the Northern Hemisphere and the East Asia major deep trough both become stronger than normal, an anomalous anticyclone develops to the east of the Philippines in the middle levels, and moisture convergence occurs in South China where southerly and northerly winds converge.

Keywords El Niño events, Types, Intensity, Precipitation in the first rainy season, South China

1 引言

关于 ENSO 事件分布型的研究是近几年非常热门的话题, 主要原因可能是 2000 年以来发生的厄尔尼诺事件基本都不同于传统的厄尔尼诺事件, 最大海温正距平分布的区域不在传统定义 ENSO 事件的 Niño3 区, 而是向西移动到日界线附近, 由此带来的气候影响也与传统 ENSO 事件的影响有着明显的差异 (任福民等, 2012; 袁媛等, 2012a), 因此, 这一现象引起了气象学家广泛的关注。2005 年以来, 科学家们研究发现 ENSO 事件发展过程中, 赤道中东太平洋海表温度异常的空间分布形态不仅对热带对流加热场分布特征的影响存在显著差异, 其发生机理及气候影响也不同 (Larkin and Harrison, 2005; Ashok et al., 2007; Weng et al., 2007; Kug et al., 2009; Kao and Yu, 2009; 袁媛等, 2012a, 2014; 徐霁强等, 2016)。Yeh et al. (2009) 提出中部型 El Niño 事件在 1990 年代后发生的频率显著增加可能与全球气候变暖, 尤其是赤道太平洋海温的年代际增暖有关。中部型厄尔尼诺与东部型厄尔尼诺对南美、北美西海岸以及日本等气候的可能影响几乎相反 (Larkin and Harrison, 2005; Ashok et al., 2007)。中部型厄尔尼诺会导致美国西部冬季常出现北干南湿, 而东部型厄尔尼诺发生时美国西部冬季以偏湿的气候特征为主 (Weng et al., 2007)。袁媛等 (2012a) 参考 Kug et al. (2009) 对厄尔尼诺事件的研究, 根据厄尔尼诺事件发展达到盛期时海温距平分布特点, 将 1950 年以来的厄尔尼诺事件分为东部型、中部型和混合型, 分析指出不同分布型厄尔尼诺事件次年夏季中国主要雨带的分布可能会完全不同, 东部型、中部型及混合型

厄尔尼诺可能分别导致次年夏季中国降水雨带呈现南方型 (III 类)、中间型 (II 类) 和北方型 (I 类) 雨型的分布特点。袁媛等 (2014) 指出, 拉尼娜对东亚大气环流的影响在 1980 年以后发生变化的重要原因与 1980 年以后拉尼娜成熟区海温异常分布型的变化以及北半球大气环流的年代际变化有关。伍红雨等 (2014) 指出在拉尼娜事件发生的当年冬季华南气温以偏低为主, 但中部型拉尼娜事件发生时华南冬季气温出现过显著偏高的情况。李丽平等 (2015) 根据 El Niño 事件期间 SST 最大正异常所在区域, 将 El Niño 事件分为 Niño3、Niño4 和 Niño3.4 型, 分析指出不同类型事件次年夏季, 中国东部降水异常分布不同, 相应的南亚高压和西太平洋副热带高压 (副高) 特征也存在差异。

2014 年 10 月开始的超强厄尔尼诺事件, 在 2015 年 12 月达到峰值, 赤道东太平洋海温偏高 2.8°C , 于 2016 年 4 月结束, 持续时间长达 19 个月, 成为有观测记录以来历时最长、强度最强的超强厄尔尼诺事件, 受其影响, 热带太平洋至东亚副热带地区的大气环流表现出了显著的响应特征 (袁媛等, 2016; 司东等, 2016)。此次超强厄尔尼诺事件导致 2015、2016 年全球包括我国极端天气气候事件频发 (邵懿等, 2016; 孙劭等, 2017)。2015 年南非、埃塞俄比亚、印度、巴西以及中南半岛等地先后出现严重干旱, 巴基斯坦连遭强降水袭击, 南美洲中部遭遇了暴雨和洪水等。2015 年秋、冬季, 我国长江以南大部降水偏多, 尤其冬季华南地区平均降水量达历史第一, 较常年同期偏多 1.6 倍以上 (袁媛等, 2016)。

气象学者对于 ENSO 与华南气候的关系做过相

关的研究, 并取得很有意义的成果(梁暖培和梁必琪, 1995; 梁建茵和吴尚森, 2001; 李宏毅等, 2013), 这些研究着重于分析 El Niño 和 La Niña 事件的出现对气温或降水的影响, 主要分析事件的发生, 不考虑事件的分型。华南地处低纬, 南临南海, 具有典型的季风气候特征, 全年有 8 成左右的降水出现在汛期(4~9 月), 其中有 4~5 成的降水出现在前汛期(4~6 月), 强降水易造成洪涝灾害(郑彬等, 2006, 2007), 所以华南前汛期降水一直是气象学者研究的热点。观测表明, 厄尔尼诺事件次年, 华南前汛期降水以正常到偏多为主, 但也出现降水偏少的情况, 如 1969 年、2003 年、1995 年, 而这三年是中部型厄尔尼诺事件次年。所以厄尔尼诺次年华南前汛期降水不能只考虑厄尔尼诺事件的发生, 还要研究其不同类型对华南前汛期降水的可能影响差异。华南前汛期降水异常与大气环流和海温密切相关(梁建茵和林元弼, 1992; 邓立平和王谦谦, 2002; 李春晖等, 2004; 陈艺敏和钱永甫, 2005; 谷德军等, 2005; 马慧等, 2009a, 2009b; 袁媛等, 2012b; 林爱兰等, 2013; 强学民和杨修群, 2013; 李宏毅等, 2013; 王朋岭等, 2015; 伍红雨等, 2015; 张端禹等, 2015), 不同类型厄尔尼诺事件对不同区域气候的影响均有较大差异(Ashok et al., 2007; Feng and Li, 2011; Feng et al., 2011; Yuan and Yang, 2012; Chen et al., 2014)。

厄尔尼诺事件类型的划分一直以来由于划分标准不同, 研究的区域、时段不同, 研究结果也相应存在差异。在全球气候变暖的背景下, 厄尔尼诺事件的类型在最近几十年已发生明显变化。2017 年关于 ENSO 的划分气象行业标准(QT/T370-2017)颁布并在业务中使用, 得到厄尔尼诺事件不同类型新的划分结果。根据国家气候中心最新颁布的华南汛期监测的各项指标, 研究表明华南前汛期降水的多少与前汛期开始早晚、持续时间以及大气环流和海温密切相关(伍红雨等, 2015; 李多等, 2017)。本文根据此气象行业标准以及国家气候中心最新颁布的华南汛期监测指标, 统计不同类型、强度的厄尔尼诺事件与次年华南前汛期降水各项指标, 包括前汛期开始日期、结束日期、持续时间和前汛期雨量强度、等级等的可能关系。在此基础上, 采用 NCEP/NCAR 的日尺度和月尺度大气环流和海温资料, 分析不同强度、类型的厄尔尼诺事件次年大气环流和海温特征, 从而探讨不同强度、类型的厄尔

尼诺事件对次年华南前汛期降水的可能影响及机理, 这对与厄尔尼诺有关的气象服务和气候预测具有重要意义。

2 资料和方法

(1) 本文所用的数据为 1961~2016 年美国国家环境预测中心/美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)的日尺度、月尺度全球高度场、风场、海平面气压场的大气环流再分析资料、NOAA 月尺度海表温度资料(ERSST V4)。华南包括广东、广西、福建和海南 4 省(区)。

(2) 厄尔尼诺事件的划分。厄尔尼诺事件是指赤道中、东太平洋海面出现大范围持续异常偏暖的现象, 是热带海气相互作用的产物, 其判别标准在国际上还可能存在一定差别, 国内尚缺乏统一的判别标准, 为了规范厄尔尼诺/拉尼娜事件的判别标准, 2017 年 2 月中国气象局颁布气象行业标准《厄尔尼诺/拉尼娜事件判别方法》(QT/T370-2017), 定义赤道中、东太平洋海面温度距平(SSTA)中心位于赤道东太平洋, 称为东部型(或东太平洋型)厄尔尼诺事件; SSTA 中心位于赤道中太平洋, 称为中部型(或中太平洋型、暖池型、日界线型)厄尔尼诺事件。图 1 为厄尔尼诺事件的主要监测关键区, 包括 Niño1+2 区(90°W~80°W, 10°S~0°)、Niño3 区(150°W~90°W, 5°S~5°N)、Niño4 区(160°E~150°W, 5°S~5°N)、Niño3.4 区(170°W~150°W, 5°S~5°N)。其中, Niño3 指数($I_{Niño3}$)、Niño4 指数($I_{Niño4}$)、Niño3.4 指数($I_{Niño3.4}$)分别表示 Niño3 区、Niño4 区、Niño3.4 区的 SSTA 的平均值(单位: °C)。使用 $I_{Niño3.4}$ 定义厄尔尼诺事件的起止、持续时间和强度(包括弱、中等、强、超强四个等级)。当 $I_{Niño3.4}$ 的 3 个月滑动平均值达到或超过 0.5°C、且至少持续 5 个月, 判定为一次厄尔尼诺事件。 I_{EP} 、 I_{CP} 分别代表东部型、中部型厄尔尼诺指数(单位: °C):

$$I_{EP}=I_{Niño3}-\alpha I_{Niño4}, \quad (1)$$

$$I_{CP}=I_{Niño4}-\alpha I_{Niño3}, \quad (2)$$

根据历史经验, 当 $I_{Niño3} \times I_{Niño4} > 0$ 时, $\alpha=0.4$; 当 $I_{Niño3} \times I_{Niño4} \leq 0$ 时, $\alpha=0$ 。

事件过程中当 I_{EP} 或 I_{CP} 达到或超过 0.5°C 且持续至少 3 个月, 判定为一次东部型或中部型厄尔尼诺事件; 若一次事件同时出现上述两种情况, 则将事件峰值所在的类型定义为事件主体类型, 整个事

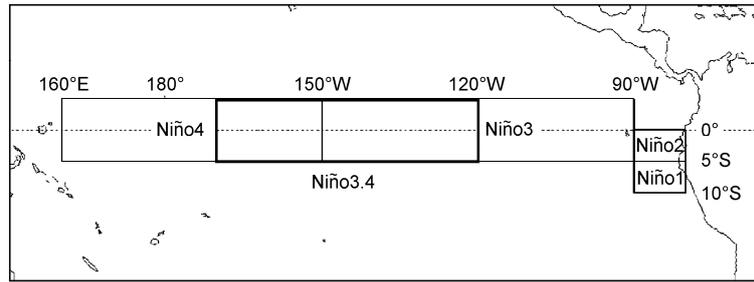


图1 热带太平洋海温距平监测关键区分布

Fig. 1 Distribution of the key monitoring area for the tropical Pacific SSTA (sea surface temperature anomaly)

件的类型以事件主体类型为准。依照上述判别标准得到1961年以来的厄尔尼诺事件基本信息表1。本文厄尔尼诺事件发生当年为厄尔尼诺当年，事件发生第二年为厄尔尼诺次年。

表1 1961年以来发生的厄尔尼诺事件
Table 1 El Niño events since 1961

事件类型	序号	起止年月	长度/ months	峰值 时间	强度/ °C	强度 等级
东部型	1	1963.07~1964.01	7	1963.11	1.1	弱
	2	1965.05~1966.05	14	1965.11	1.7	中等
	3	1972.05~1973.03	11	1972.11	2.1	强
	4	1976.09~1977.02	6	1976.01	0.9	弱
	5	1979.09~1980.01	5	1980.01	0.6	弱
	6	1982.04~1983.06	15	1983.01	2.7	超强
	7	1986.08~1988.02	19	1987.08	1.9	中等
	8	1991.05~1992.06	14	1992.01	1.9	中等
	9	1997.04~1998.04	13	1997.11	2.7	超强
	10	2006.08~2007.01	6	2006.11	1.1	弱
	11	2014.10~2016.04	19	2015.12	2.8	超强
中部型	1	1968.10~1970.02	17	1969.02	1.1	弱
	2	1977.09~1978.02	6	1978.01	0.9	弱
	3	1994.09~1995.03	7	1994.12	1.3	中等
	4	2002.05~2003.03	11	2002.11	1.6	中等
	5	2004.07~2005.01	7	2004.09	0.8	弱
	6	2009.06~2010.04	11	2009.12	1.7	中等

(3) 华南前汛期监测指标。根据中国气象局《华南汛期监测业务规定(试行)》(气预函〔2014〕2号),把华南261个国家气象观测站作为华南雨季监测站点,包括广东86站,广西90站,福建66站,海南19站,采用其1961~2016年日降水资料。根据指标得到华南1961~2016年逐年前汛期的起讫日期、持续时间、降水量、降水强度和等级系列,以及1961年以来东部型、中部型厄尔尼诺事件次年华南前汛期各项监测指标,包括得到华南前汛期雨量强度指标,由此把华南前汛期雨量强度指数(I)

划分为5个等级:弱($I \leq -1.5$)、偏弱($-1.5 < I \leq -0.5$)、正常($-0.5 \leq I < 0.5$)、偏强($0.5 \leq I < 1.5$)、强($I \geq 1.5$)。

(4) 不同类型、强度的厄尔尼诺事件次年华南前汛期降水与海温和大气环流的关系分析采用相关分析、合成分析的方法。气候标准值为1981~2010年平均。

3 结果分析

3.1 不同类型、强度的厄尔尼诺事件与华南前汛期各监测指标统计

从表1统计得出,1961~2016年,赤道太平洋共发生17次厄尔尼诺事件,其中东部型11次,中部型6次,在2000年以来发生了5次厄尔尼诺事件,其中3次是中部型,说明2000年以来中部型厄尔尼诺出现的概率较之前明显增加。1961年以来发生的3次超强厄尔尼诺事件均为东部型。持续时间最长的厄尔尼诺事件发生在2014年10月至2016年4月和1986年8月至1988年2月,均为19个月,但在事件发展过程中都存在东部型和中部型的转变。根据任宏利等(2016)的分析,2014年10月至2016年4月这次事件是历时最长,强度最强的超强厄尔尼诺事件,期间存在由中部型向东部型的转变,可细分为2014年10月至2015年3月的弱等级中部型过程和2015年4月至2016年4月的超强东部型过程。1986年8月至1988年2月这次事件可细分为1986年8月至1987年9月的东部型过程和1987年10月至1988年2月的中部型过程,均为中等强度。据此,以下分析把这四次过程分别归到东部型、中部型来进行分析。

统计厄尔尼诺事件的类型、强度与华南前汛期各项监测指标的关系(表2)得出,1961年以来发

表 2 1961 年以来不同类型、强度的厄尔尼诺事件次年华南前汛期降水监测指标平均

Table 2 Averages of the monitoring indexes of precipitation in the subsequent first rainy season in South China corresponding to El Niño events of different types and intensity since 1961

厄尔尼诺事件 类型	厄尔尼诺事件 强度	开始日期	开始日期 距平/d	结束日期	结束日期 距平/d	持续时间/d	持续时间 距平/d	雨量强度 指数
东部型	超强、强	3 月 24 日	-13	7 月 8 日	3	106	15	1
	中等	3 月 25 日	-12	7 月 15 日	10	91	0	1
	弱	4 月 17 日	11	7 月 2 日	-3	76	-15	-1
中部型	中等、弱	4 月 14 日	8	6 月 30 日	-5	77	-14	-0.5

生的中等、强、超强以上强度东部型厄尔尼诺次年有 7 年 (1966、1973、1983、1987、1992、1998、2016 年), 这 7 年对应的华南前汛期平均开汛日期 3 月 24 日, 较常年 (4 月 6 日) 偏早 13 天, 平均结束日期超强、强等级是 7 月 8 日, 中等强度是 7 月 15 日, 较常年 (7 月 5 日) 分别偏晚 3 天或 10 天。超强、强等级厄尔尼诺次年前汛期平均持续 106 天, 较常年 (91 天) 偏长 15 天, 这 7 年中等及以上强度东部型厄尔尼诺次年华南前汛期雨量较常年偏多 7%~60.2%, 平均偏多 28.6%, 对应的前汛期雨量强度指数平均为 1.0, 雨量等级除 2016 年为正常外, 其余 6 年均均为偏强 (4 年)、强 (2 年)。1961 年以来发生的弱强度等级的东部型厄尔尼诺次年有 4 年 (1964、1977、1980、2007 年), 这 4 年对应的华南前汛期平均开汛日期 4 月 17 日, 较常年偏晚 11 天, 平均结束日期 7 月 2 日, 较常年偏早 3 天, 前汛期持续 76 天, 较常年偏短 15 天, 这 4 年华南前汛期雨量较常年偏少 9%~29.2%, 平均偏少 15.1%, 对应的前汛期雨量强度指数平均为 -1.0, 雨量等级两年偏弱、两年正常。

1961 年以来发生的中部型厄尔尼诺次年有 8 年 (1969、1978、1988、1995、2003、2005、2010、2015 年), 强度均为中等或弱等级, 这 8 年对应的华南前汛期平均开汛日期 4 月 14 日, 较常年偏晚 8 天, 平均结束日期 6 月 30 日, 较常年偏早 5 天, 前汛期持续 77 天, 较常年偏短 14 天, 这 8 年华南前汛期平均雨量较常年偏少 11.6%, 对应的前汛期雨量强度指数平均为 -0.5, 雨量等级 5 年偏弱、3 年正常。统计厄尔尼诺事件峰值月份与华南前汛期各监测指标得出无明显的对应关系。

从 1961~2016 年华南前汛期雨量强度指数的变化 (图 2) 可得出, 近 55 年来华南前汛期降水强度变化趋势不明显, 但存在显著的年际变化特征。强度指数最高出现在 1973 年 (2.74), 为强等级东

部型厄尔尼诺次年。华南前汛期降水强度指数名列前 8 位的年份, 除 2001 年不是厄尔尼诺年外, 其余 7 年均均为厄尔尼诺年, 其中 2 年是厄尔尼诺当年, 5 年是厄尔尼诺次年, 说明华南前汛期降水强度与厄尔尼诺的发生密切相关, 特别是 1961 年以来发生的强、超强东部型厄尔尼诺次年有 4 年 (1973、1983、1998、2016 年), 对应的华南前汛期降水除 2016 年为正常 (强度指数为 0.34) 外, 其余 3 年均均为 1.21~2.74, 显著偏多的可能性大。计算厄尔尼诺次年华南前汛期雨量强度指数平均得到, 中等及以上强度东部型最高 (1.0), 其次是中部型 (-0.5), 弱等级东部型最低 (-1.0)。弱等级东部型厄尔尼诺事件和中部型厄尔尼诺事件次年, 华南前汛期降水以偏少到正常为主。

可见厄尔尼诺事件的不同类型与不同强度对次年华南前汛期降水的影响存在明显差异。中等及以上强度东部型厄尔尼诺事件次年, 华南前汛期开汛早、结束晚, 降水多, 雨量强度以偏强、强为主; 而弱等级的东部型厄尔尼诺事件次年 and 所有中部型厄尔尼诺事件次年华南前汛期开汛晚、结束早, 降水少, 雨量强度偏弱到正常。

3.2 华南前汛期降水强度指数与海温的相关

为了分析华南前汛期总体降水与海温的关系, 计算 1961~2016 年华南前汛期雨量强度指数与不同时段的海温相关系数分布 (图 3)。可见, 华南前汛期雨量强度与上半年赤道太平洋、我国近海和低纬西太平洋暖池海温一直存在稳定显著相关区, 特别与 2~4 月海温通过 0.05、0.01 显著性水平的相关系数最高、区域最广, 说明华南前汛期降水与 2~4 月海温相关最显著。华南前汛期雨量强度指数与 150°W 以东的赤道东太平洋、我国近海, 包括黄海、东海、渤海等以及南海中北部地区海温显著正相关, 与低纬度西太平洋暖池 (0°~20°N, 150°E~180°)、中纬度北太平洋 (30°N~40°N) 日界线附

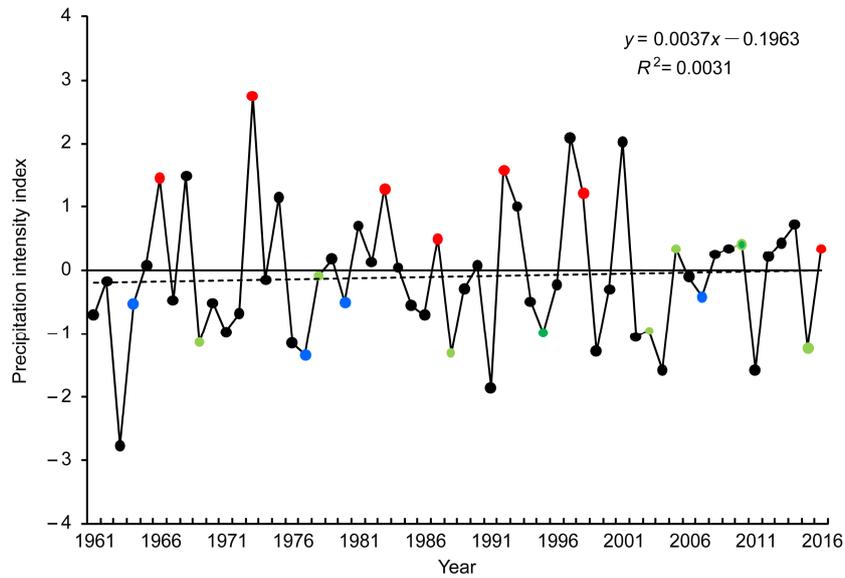


图2 1961~2016年厄尔尼诺事件次年华南前汛期雨量强度指数的变化。红点：中等及以上强度东部型；蓝点：弱强度东部型；绿点：中部型；黑色：非厄尔尼诺次年。虚线代表线性变化趋势

Fig. 2 The change of precipitation intensity index in the subsequent first rainy season (PIISFRS) in South China of El Niño events during 1961–2016. Red dots represent the eastern El Niño with medium and higher intensity, blue dots represent the eastern El Niño with weak intensity, green dots represent all the central Pacific El Niño, black dots represent non-El Niño in next years. The dashed line shows the linear trend

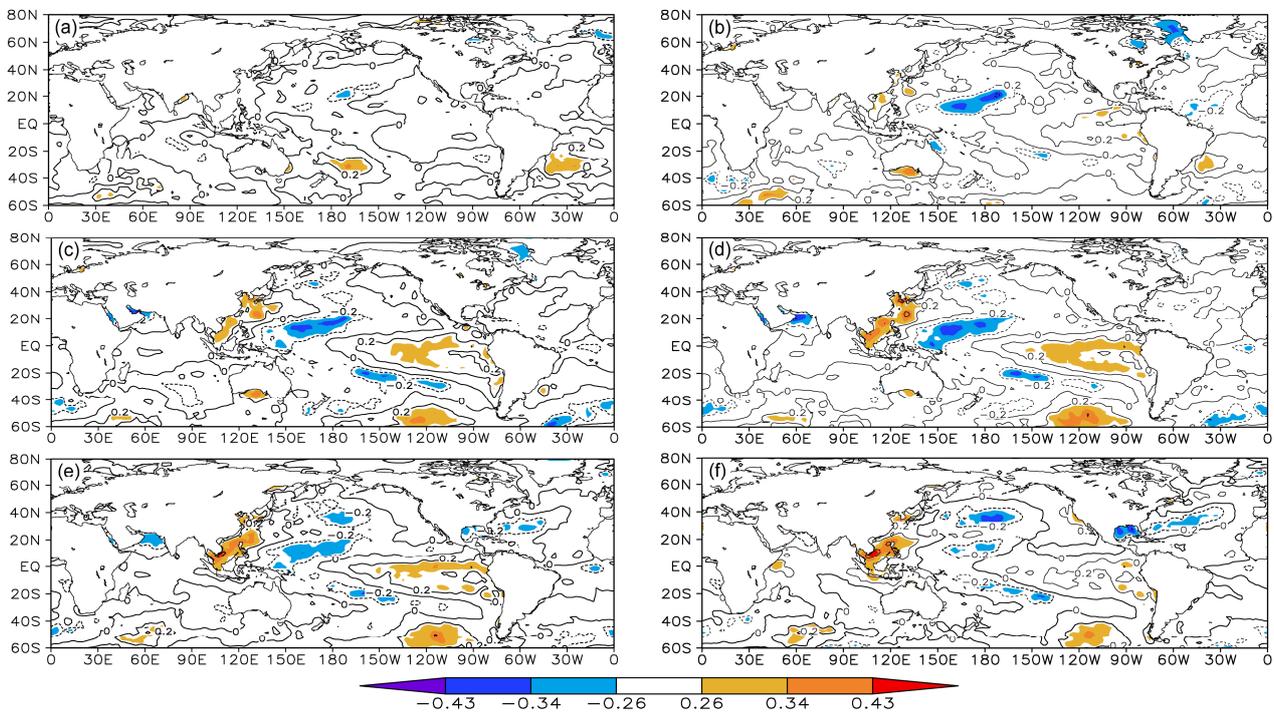


图3 1961~2016年华南前汛期雨量强度指数与不同时段的海温相关系数分布：(a) 11~1月；(b) 12~2月；(c) 1~3月；(d) 2~4月；(e) 3~5月；(f) 4~6月。阴影区由浅到深表示通过0.05、0.01和0.001显著性水平的显著性检验

Fig. 3 Correlation coefficients between PIISFRS in South China and SST in different periods during 1961–2016: (a) Nov–Jan, (b) Dec–Feb, (c) Jan–Mar, (d) Feb–Apr, (e) Mar–May, (f) Apr–Jun. Areas shaded from light to dark indicate the correlation coefficients at the 0.05, 0.01, 0.001 significance levels, respectively

近的海温以及阿拉伯海北部沿海海温显著负相关, 北半球低纬到赤道太平洋海温自西向东呈“+ - +”的相关分布, 与太平洋海温从南到北呈现“+ - +”的相关分布。即赤道东太平洋以及我国近海、南海中北部海温偏高(低), 而中低纬度西太平洋和阿拉伯海北部的海温偏低(高)有利于华南前汛期雨量偏强(弱)。

3.3 不同类型、强度的厄尔尼诺事件次年海温的变化

从前面华南前汛期降水与不同时段全球海温相关系数分析得到, 华南前汛期降水与 2~4 月的海温相关最显著。因此选取 1961~2016 年东部型厄尔尼诺事件次年共 11 年, 其中, 中等、强、超强以上强度东部型厄尔尼诺次年有 7 年: 1966、1973、1983、1987、1992、1998、2016 年(简称事件 1), 弱等级有 4 年: 1964、1977、1980、2007 年(简称事件 2); 中部型厄尔尼诺事件次年有 8 年: 1969、1978、1988、1995、2003、2005、2010、2015

年(简称事件 3)。对事件 1、事件 2、事件 3 对应要素场的合成场分别命名为 P1、P2、P3, 对 2~4 月海温距平进行合成, 分析不同类型、强度的厄尔尼诺事件次年海温的特征。

从 P1 的 2~4 月海温距平合成分布(图 4a)可见, 海温异常介于 $-0.6\sim 1.2^{\circ}\text{C}$ 之间, 明显异常的区域位于太平洋, 从南到北呈现“+ - +”的异常分布。在 $80^{\circ}\text{W}\sim 180^{\circ}$ 赤道中东太平洋存在 $0.2\sim 1.2^{\circ}\text{C}$ 的海温正距平区域, 中心位于赤道东太平洋 $120^{\circ}\text{W}\sim 170^{\circ}\text{W}$, 海温距平达 1.2°C , 这是典型东部型厄尔尼诺海温异常分布特征。我国近海、日本岛及以东附近海温为正距平, 低纬度西太平洋暖池($0^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\text{E}\sim 170^{\circ}\text{E}$)和西北太平洋大部为负海温距平控制, 东太平洋为海温正距平。印度洋的阿拉伯海大部和孟加拉湾大部为 $0\sim 0.2^{\circ}\text{C}$ 的海温弱正距平, 但阿拉伯海北部海温为负距平, 大西洋海温为 $-0.2\sim 0^{\circ}\text{C}$ 的海温负距平。北半球低纬到

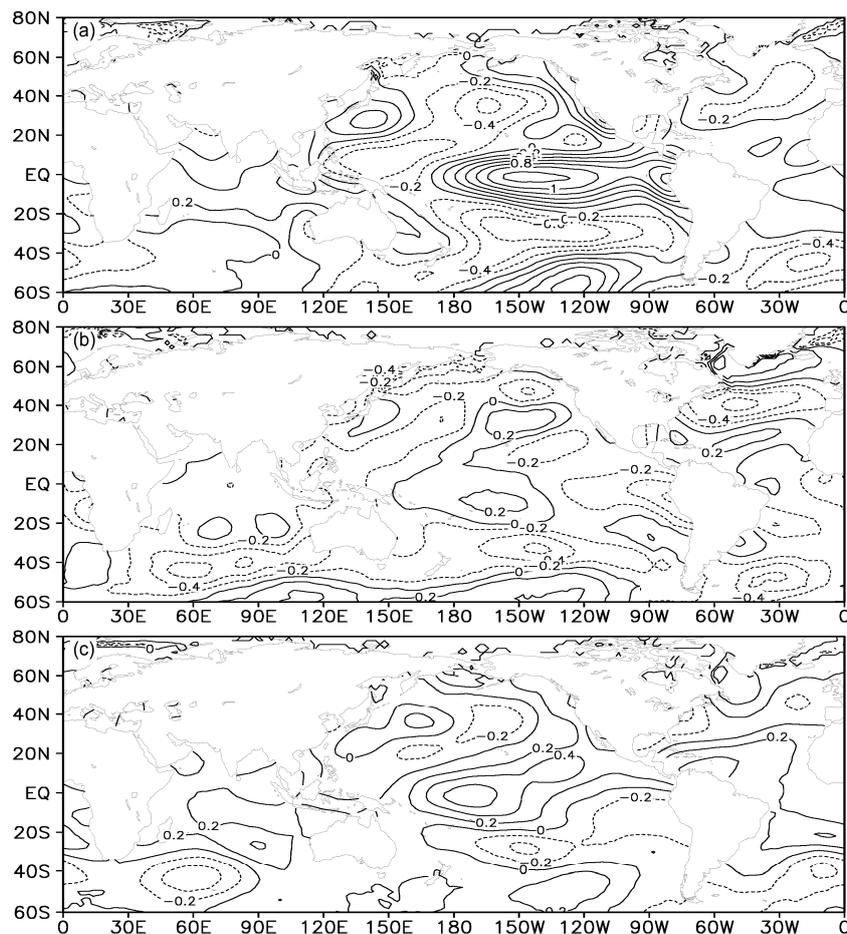


图 4 1961~2016 年厄尔尼诺事件次年 2~4 月海温距平(单位: $^{\circ}\text{C}$)合成: (a) 中等及以上强度东部型; (b) 弱强度东部型; (c) 所有中部型

Fig. 4 Composites of SSTA (units: $^{\circ}\text{C}$) during Feb–Apr in the subsequent years of El Niño events from 1961 to 2016: (a) East Pacific El Niño events with medium and higher intensity; (b) East Pacific El Niño events with weak intensity; (c) all the central Pacific El Niño events

赤道太平洋海温自西向东呈“+ - +”的距平分布，这和前面华南前汛期雨量强度指数与 2~4 月海温的相关得到的结果一致，即 P1 发生时，这种海温分布有利于华南前汛期雨量偏强。

从 P2 的 2~4 月海温距平合成分布(图 4b)可见，全球海温的异常介于-0.6°C~0.6°C，较 P1 的海温异常明显减弱，除 150°E~130°W 的中低纬太平洋存在 0~0.2°C 的海温正距平外，其余以海温负距平为主，包括印度洋中北部，西太平洋、中低纬东太平洋以及大西洋北部存在-0.4~0°C 的海温负距平，低纬到赤道太平洋海温自西向东呈“- + -”的距平分布，与 P1 的分布相反，即不利于华南前汛期雨量偏多，有利于前汛期雨量偏弱或正常。

从 P3 的 2~4 月海温距平分布(图 4c)可见，除(20°N~40°N, 160°E~140°W)的中纬度太平洋为海温负距平控制外，北太平洋的其余地区、印度洋中北部、北大西洋大部地区为海温正距平，0.6°C 的距平中心位于日界线附近。可见 P3 反映了中部型厄尔尼诺事件的特征，赤道太平洋海温自西向东主要是正距平分布，且海温异常程度没有 P1 明显，这种海温异常分布与 P1 和前面相关分析的多雨分布有很大差异，不利于华南前汛期降水偏

多。

合成分析得到和前面统计和相关分析相一致的结果，即 P1 发生时，海温分布有利于华南前汛期雨量偏强，而 P2 和 P3 发生时，华南前汛期雨量偏少或正常。

3.4 不同类型、强度厄尔尼诺事件次年大气环流场特征

3.4.1 华南前汛期降水强度指数与 4~6 月大气环流的相关

统计得出华南前汛期平均的开汛日期为 4 月 6 日，结束时间为 7 月 4 日，平均持续时间 89 天，可见前汛期主要集中在 4~6 月，因此计算 1961~2016 年华南前汛期雨量强度指数与 4~6 月对流层各层大气环流场的相关系数分布(图 5)，由此分析华南前汛期雨量与大气环流的关系。

华南前汛期雨量强度指数与 4~6 月高层 200 hPa 风场的相关系数分布(图 5a)可见，在(15°N~30°N, 60°E~180°)的东亚中低纬的纬向风与华南前汛期雨量强度存在显著正相关，表明 4~6 月高层西风急流加强(减弱)有利于华南前汛期雨量偏强(偏弱)。中层 500 hPa 位势高度场(图 5b)上，在(20°N~40°N, 120°E~160°W)的西北太平洋

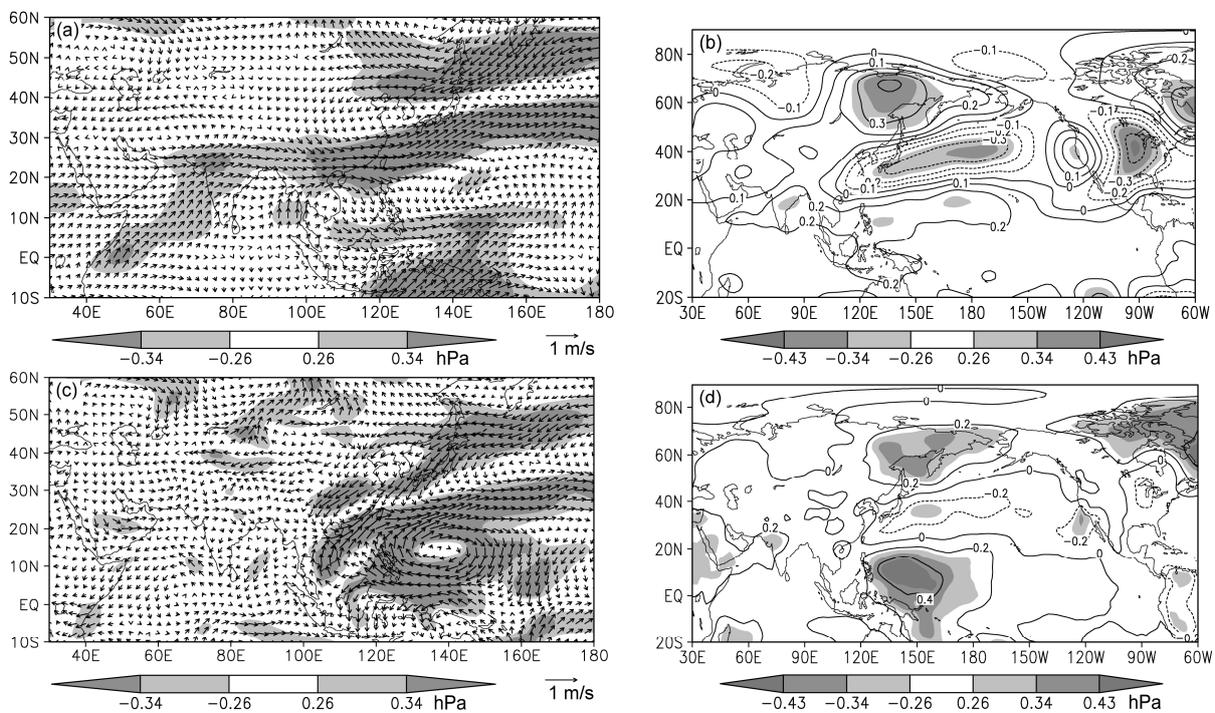


图 5 1961~2016 年华南前汛期雨量强度指数与 4~6 月大气环流的相关: (a) 200 hPa 风场; (b) 500 hPa 高度场; (c) 850 hPa 风场; (d) 海平面气压场。阴影区由浅到深表示通过 0.05、0.01 和 0.001 显著性水平的显著性检验

Fig. 5 Correlation between PIISFRS in South China and the atmospheric variables in Apr-Jun during 1961-2016: (a) 200-hPa wind; (b) 500-hPa geopotential height; (c) 850-hPa wind; (d) sea level pressure. Areas shaded from light to dark indicate the correlation at 0.05, 0.01, 0.001 significance levels, respectively

高度场与华南前汛期雨量强度存在显著负相关, 在 $50^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 的高度场与华南前汛期雨量强度显著正相关, 表明 4~6 月东亚大槽加强, 有利于华南前汛期雨量强度偏强。同时华南前汛期雨量强度与 ($0^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{W}$) 的低纬高度场正相关, 说明华南北侧的高度场降低, 南侧高度场升高, 华南南北高度场的反相变化, 对应的华南前汛期雨量偏强, 反之雨量偏弱。这与吴志伟等 (2006) 指出的华南前汛期降水与其北侧有无低值系统向南发展密切相关相吻合。低层 850 hPa 风场 (图 5c) 在 ($0^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{E}$) 的西太平洋存在一个巨大显著相关异常反气旋环流, 环流中心位于菲律宾以东加罗林群岛附近。同时反气旋环流左侧的转向偏南气流与我国东部的偏北风均与华南前汛期雨量强度显著相关, 表明 4~6 月在菲律宾附近存在反气旋异常环流, 我国东部存在北风距平, 中南半岛和华南南部存在南风距平时, 华南前汛期雨量偏强; 反之偏弱。说明菲律宾附近反气旋环流的存在以及南北气流在华南的交汇与华南前汛期雨量强度密切相关, 这与强学民和杨修群 (2013) 指出的菲律宾附近存在反气旋异常环流有利于华南降水偏多相一致。在海平面气压场上 (图 5d), 华南前汛期雨量强度指数与高纬的鄂霍次克海以及低纬的菲律宾附近的海平面气压显著正相关, 与中纬度北太平洋气压负相关, 反映高、中、低纬度太平洋海平面气压 “+ - +” 的分布结构, 有利于华南前汛期雨量强度加强, 反之减弱。同时, 华南前汛期雨量强度指数与欧亚大陆海平面气压是正相关, 与中纬度北太平洋负相关, 反映了中纬度大陆与海洋海平面气压差增大有利于华南前汛期雨量增强。

3.4.2 不同类型、强度厄尔尼诺事件次年前汛期大气环流合成分析

为进一步了解不同类型、强度的厄尔尼诺事件次年华南前汛期大气环流特征, 采用 NCEP/NCAR 逐日再分析资料, 对不同强度的东部型厄尔尼诺事件 P1—P2, 不同类型厄尔尼诺事件 P1—P3 和 P2—P3 的大气环流差值场进行分析。

图 6a 为不同强度的东部型厄尔尼诺事件次年华南前汛期 200 hPa 风场差值分布。可见 P1—P2 风场差异大且通过 0.05 显著性水平的地区主要出现在 $20^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 的低纬度地区, 低纬 ($0^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $30^{\circ}\text{E}\sim 60^{\circ}\text{W}$) 的西风急流明显加强, 并且在北美上空存在通过 0.05 显著性水平的异常气旋环流。图

6c 为 P1—P3 在华南前汛期 200 hPa 风场差值分布。可见, 在 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 的北半球低纬地区, 西风急流明显加强, 但北美上空的差值异常气旋环流减弱, 没有通过显著性检验。

图 6b、6d 为不同强度的东部型厄尔尼诺事件次年华南前汛期海平面气压场差值分布。可见, P1—P2 (图 6b) 时, 欧亚大陆、中低纬度西太平洋、印度洋、北美洲都是海平面气压正差值, 而东太平洋海平面气压负差值, 中高纬度北太平洋为明显负差值, 说明, 特别是北太平洋高压明显降低, 还可看到海平面气压差值通过 0.05 显著性水平的区域非常大, 包括中高纬度欧亚大陆、北美洲、中低纬度的西太平洋的正差值和中高纬度北太平洋的负差值, 这种中纬度东亚气压场的 “+ - +” 的气压差分布形势, 与前面华南前汛期雨量强度与海平面气压相关分析得到的结果一致, 有利于华南前汛期雨量偏强。图 6d 为 P1—P3 在华南前汛期的海平面气压场差值分布。得到图 6b 相类似的结果, 但差值大小和通过 0.05 显著性水平的范围较图 6b 小, 特别是北太平洋高压差异变小, 而北美洲北部的差值正异常变为差值负异常, 中高纬度大陆与海洋的气压差的差异减小。图 6e 为 P2—P3 在华南前汛期 200 hPa 风场差值分布, 得到和前面 P1—P3 几乎相反的结果。在北半球中低纬地区存在显著的异常东风气流, 说明西风急流明显减弱, 北美上空存在显著的异常反气旋环流。从这三个差值的分布看, P1—P2 的风速差异最显著, 其次是 P1—P2, 而 P2—P3 差异较小。说明在厄尔尼诺事件发生次年的华南前汛期, 在中等及以上强度的东部型厄尔尼诺事件发生时, 高层西风急流偏强最显著, 其次是弱等级东部型厄尔尼诺, 而中部型厄尔尼诺发生时西风急流最弱。图 6f 为 P2—P3 在华南前汛期的海平面气压场差值分布, 得到和图 6b、6d 大部分相反的结果。在欧亚大陆、印度洋、北美洲以及中低纬度太平洋大部为海平面气压负差值分布, 而中高纬度和东太平洋大部为海平面气压正差值分布, 通过 0.05 显著性水平的区域主要位于中高纬度的北太平洋, 北太平洋与大陆之间的东西气压差明显加大, 不利于北方系统和西风系统的南压和东移影响, 不利于华南前汛期降水的发生。从这三个差值的分布看, P1—P3 的海平面气压差异最大, 其次是 P1—P2, 而 P2—P3 的差值分布与前两个几乎相反, P1 相对 P2、P3 的差值在高、中、低纬度大陆和太平洋海平面气

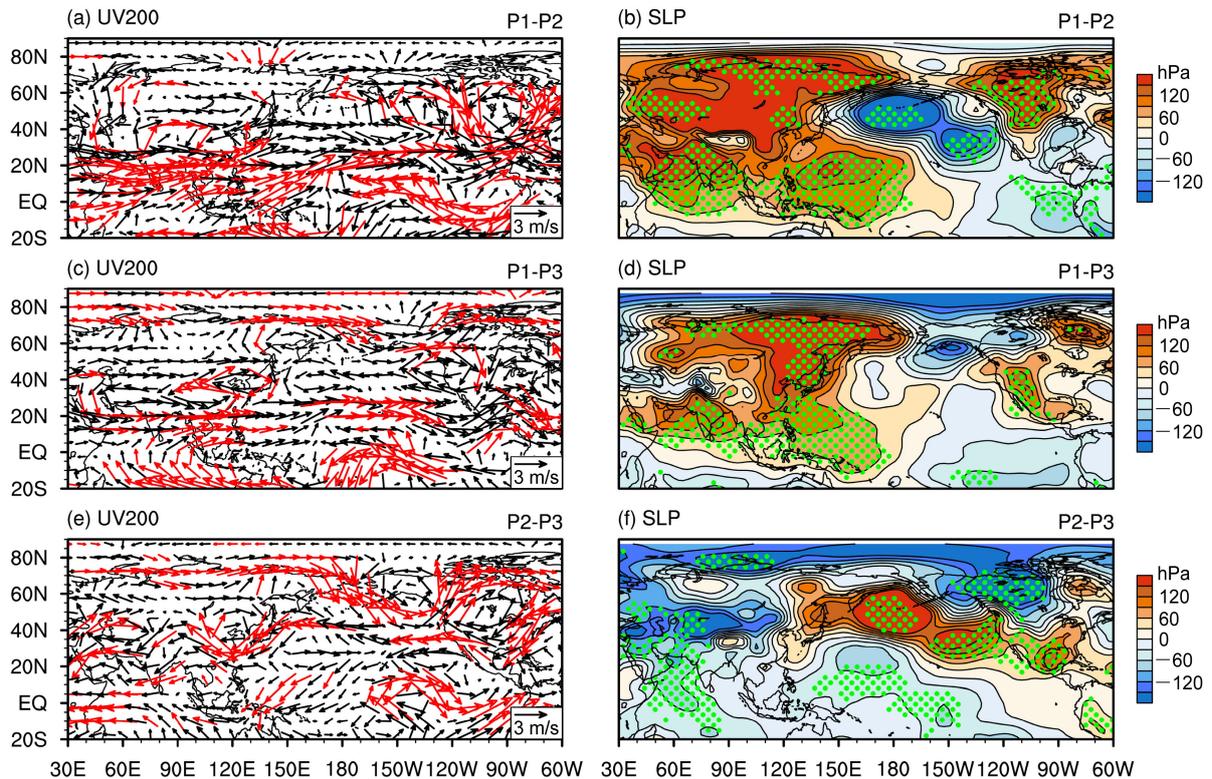


图 6 厄尔尼诺事件次年前汛期 200 hPa 风场 (左, 单位: m s^{-1}) 和 海平面气压 (右, 单位: hPa) 在不同情况下合成场差值: (a, b): P1-P2; (c, d): P1-P3; (e, f): P2-P3. P1: 中等及以上强度东部型; P2: 弱强度东部型; P3: 中部型。红色矢量和绿点分别代表风速差值和海平面气压差值通过 0.05 显著性水平的显著性检验

Fig. 6 Composite differences of 200-hPa wind fields (left, units: m s^{-1}) and sea level pressures (right, units: hPa) in the first rainy season in South China in the subsequent years of El Niño events under different circumstances: (a, b) P1-P2; (c, d) P1-P3; (e, f): P2-P3. P1: East Pacific El Niño events with medium and higher intensity; P2: East Pacific El Niño events with weak intensity; P3: all the central Pacific El Niño events. Red vectors and green dots indicate the wind speed and sea level pressure differences at 0.05 significance level

压呈“+ - +”的异常分布, 得到和前面相关分析近似的结果, P1 这种分布有利于华南前汛期雨量偏强。

图 7a、7c 为不同强度东部型厄尔尼诺事件次年华南前汛期 500 hPa 高度差值场分布和通过 0.05 显著性水平的区域。可见在 P1-P2 时(图 7a), 500 hPa 高度场的差异主要在 20°N 附近呈北低南高的反位相差值分布, 而华南北侧的高度场降低, 南侧的高度场上升, 说明副高偏强, 但不显著。同时东亚中高纬经向环流加强, 对应东亚大槽和极涡都明显加强。图 7c 为 P1-P3 在华南前汛期 500 hPa 高度差值场。得到图 7a 相类似的结果, 但在高纬度的高度场差值均为通过 0.05 显著性水平, 说明中等以上强度东部型厄尔尼诺事件次年比中部型厄尔尼诺东部型极涡明显加强, 冷空气强。图 7e 为 P2-P3 的 500 hPa 高度差值场, 可见 20°N 附近南北高度场的差异分布与图 7a、7c 的分布几乎相反。20°N 附

近以南的高度差值为负, 高度场差异最大的区域出现在 (20°S~20°N, 120°E~60°W) 的低纬热带太平洋地区以及阿拉伯海北部, 通过了 0.05 显著性水平, 而 20°N~60°N 的中纬度地区大部为正高度差值, 同时在东亚到北太平洋存在高度场正差值中心, 说明在华南前汛期, 弱强度东部型相对中部型厄尔尼诺事件次年, 中低纬到赤道太平洋高度场明显下降, 副高减弱, 也说明中部型厄尔尼诺事件次年华南前汛期副高是明显加强的, 同时东亚大槽减弱, 不利于华南前汛期降水的增加。得到和前面华南前汛期雨量强度指数和高度场相关分析一致的结果。

图 7b、7d 为不同强度东部型厄尔尼诺事件次年华南前汛期 850 hPa 风场差值和通过 0.05 显著性水平的分布。可见 P1-P2 (图 7b) 时, 风场的显著差异主要出现在太平洋和印度洋, 北太平洋存在异常气旋性环流, 西太平洋和南海存在异常反气旋

环流, 中心位于菲律宾以东, 同时在日界线以东赤道太平洋为西风气流, 日界线以西为东风气流; 印度洋存在异常气旋环流。华南处于北风和西风交汇, 有利于气流辐合和降水产生, 得到和前面华南前汛期雨量强度指数和 850 hPa 风场相关分析一致的结果。说明菲律宾附近反气旋异常环流的存在有利于华南前汛期降水偏多。图 7d 为 P1—P3, 风场差异与图 7b 相似, 但风速差值较小, 且通过显著性检验的区域也变小。

图 7f 为 P2—P3 的 850 hPa 风场在华南前汛期差值分布。风场差异显著的地区在北太平洋, 在菲律宾以东存在异常气旋环流, 在 (40°N~60°N, 180°~120°W) 的东北太平洋存在反气旋异常环流, 赤道太平洋的风场分布与图 6b、6d 相反; 但在图 7d、7f 华南的南风气流达到 60°N, 说明中等或以上强度的东部型厄尔尼诺次年的华南前汛期冷空气强, 中部型的冷空气最弱, 而弱等级东部型厄尔尼诺介于两者之间。

图 8 为不同强度、类型的厄尔尼诺事件次年华南前汛期整层水汽输送差异和水汽的辐合辐散差值分布, 可见, 在 P1—P2 时 (图 8a), 华南地区存在北风和西风异常的冷暖气流的交汇, 并有明显水汽辐合配合, 与李宏毅等 (2013) 分析指出这样暖湿气流与北方东部异常冷空气在华南地区形成水汽辐合, 导致华南 3 月降水显著增多相一致。而 P1—P3 (图 8b) 时, 华南南部存在偏西风和偏南风的交汇, 但水汽辐合的区域没有图 8a 大。而 P2—P3 (图 8c) 时, 南风异常增大, 水汽辐合区北抬到长江中下游, 华南和南海北部为水汽辐散区, 不利于华南前汛期降水的发生。

以上分析可见不同强度、类型的厄尔尼诺事件次年由于海温正异常中心的位置和强度的不同, 热带大气对其响应存在明显差异, 导致次年华南前汛期雨量强度不同。当中等及以上强度的东部型厄尔尼诺事件发生的次年上半年, 特别是 2~4 月赤道东太平洋海温异常偏高, 而赤道西太平洋海温异常偏低, 中高纬度的西北太平洋海温异常偏低, 低纬太平洋海温自西向东呈 “+ - +” 的距平分布, 大气对这种海温的响应是通过对流层低层在菲律宾以东洋面激发异常反气旋环流和南风异常来实现 (Wang et al., 2000), 低层孟加拉湾到中南半岛、南海中北部的偏南气流明显加强并与北风异常在华南交汇, 且华南为存在水汽辐合; 中层极涡和东

亚大槽均明显加强, 导致南下的冷空气偏强, 华南北侧为高度负距平, 南侧为高度正距平, 欧亚中高纬经向环流明显加强。对流层高层中低纬存在显著西风急流, 导致华南前汛期雨量偏强。而弱等级东部型厄尔尼诺次年和中部型厄尔尼诺次年, 1~6 月低纬太平洋海温自西向东呈 “- + -” 的距平分布, 西太平洋暖池异常偏暖, 导致 Walker 环流及东亚太平洋中低纬局地 Hadley 环流增强, 该异常通过影响东亚到太平洋遥相关波列, 使前汛期期间副高加强西伸, 华南地区对流活动受到抑制 (强学民和杨修群, 2013)。同时高层西风急流明显减弱, 中层东亚大槽和极涡均明显减弱, 导致冷空气弱, 水汽辐合区北抬, 华南区域没有水汽的辐合, 不利于华南前汛期降水的发生。当然厄尔尼诺事件对降水的影响, 除了与厄尔尼诺的不同类型、强度有关外, 还与年际、年代际变化等有关 (何溪澄等, 2008; 宗海锋等, 2010), 华南前汛期雨量强度是多种因素共同作用的结果, 需要综合考虑。

4 结论

(1) 根据气象行业标准 (QT/T370-2017) 对厄尔尼诺事件不同类型的划分结果统计, 1961~2016 年共发生了 17 次厄尔尼诺事件, 其中东部型 11 次, 中部型 6 次, 2000 年以来中部型厄尔尼诺事件出现的概率较之前明显增多。1961 年以来发生的 3 次超强厄尔尼诺事件均为东部型。

(2) 根据国家气候中心最新颁布的华南前汛期业务监测标准, 统计不同强度、类型的厄尔尼诺事件对次年华南前汛期各监测指标的影响得出, 厄尔尼诺事件的不同类型与不同强度对次年华南前汛期降水的影响存在明显差异。中等及以上强度东部型厄尔尼诺事件次年, 华南前汛期开汛早、结束晚, 降水多, 雨量强度以偏强、强为主; 而弱等级的东部型厄尔尼诺事件次年 and 所有中部型厄尔尼诺事件次年华南前汛期开汛晚、结束早, 降水少, 雨量强度偏弱到正常。

(3) 华南前汛期雨量强度指数与 2~4 月海温的相关最显著。赤道东太平洋以及我国近海、南海中北部海温偏高 (低), 而中低纬度西太平洋和阿拉伯海北部的海温偏低 (高) 有利于华南前汛期雨量偏强 (弱)。

(4) 华南前汛期雨量强度指数与 4~6 月欧亚高中低纬度的大气环流显著相关, 说明大气环流对

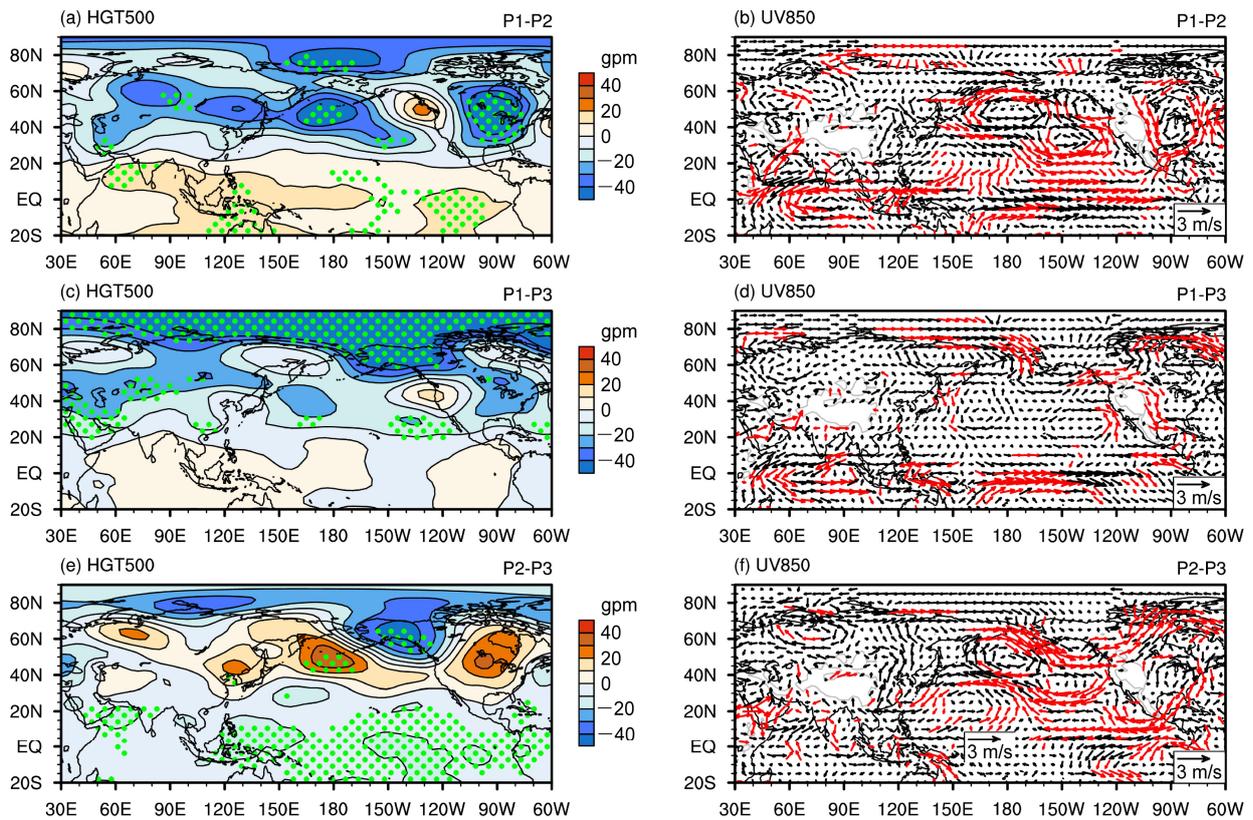


图7 同图6, 但为500 hPa高度场(单位: gpm)和850 hPa风场(单位: m s^{-1})

Fig. 7 As in Fig. 6, but for 500-hPa geopotential height (units: gpm) and 850-hPa wind (units: m s^{-1})

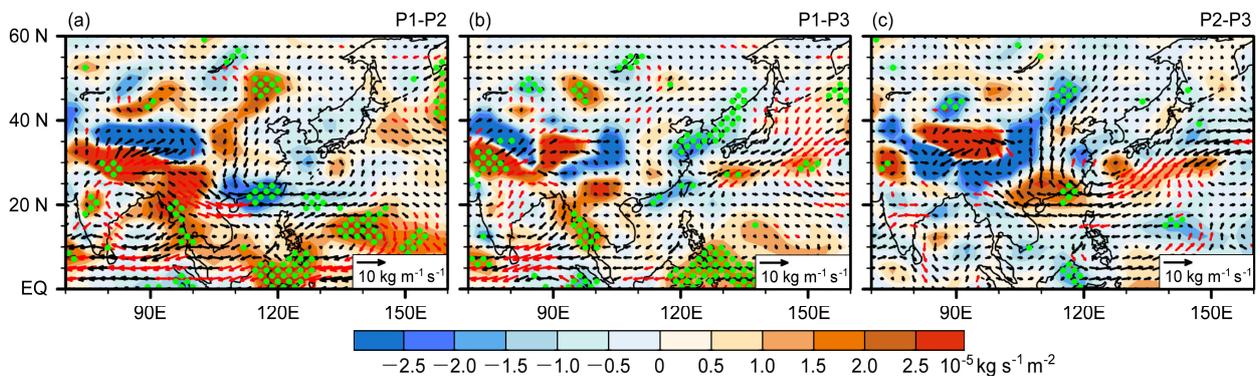


图8 厄尔尼诺事件次年华南前汛期对流层中层(1000~300 hPa)水汽通量(矢量, 单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)及水汽通量散度(阴影区, 单位: $10^{-5} \text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$)在不同情况下合成场差值: (a) P1-P2; (b) P1-P3; (c) P2-P3

Fig. 8 Composite differences of moisture fluxes (vectors, units: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) vertically integrated from 1000 hPa to 300 hPa and moisture fluxes divergence (color shaded, units: $10^{-5} \text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$) in the first rainy season in South China in the subsequent years of El Niño events under different circumstance: (a) P1-P2, (b) P1-P3, (c) P2-P3

华南前汛期雨量强度有显著影响, 包括高层西风急流加强, 中层东亚大槽加强, 华南南北高度场的反相变化; 低层菲律宾附近反气旋环流的存在以及南北气流在华南的交汇等密切相关。

(5) 相关和合成分析表明, 中等及以上强度东部型厄尔尼诺事件次年, 大气对这种海温的响应是

通过对流层低层在菲律宾以东洋面激发异常反气旋环流和南风异常来实现, 低层阿拉伯海—孟加拉湾—中南半岛—华南的偏西气流和南海到华南的偏南气流明显加强并在华南存在水汽的辐合; 东亚大槽和极涡均明显加强; 对流层高层中低纬存在西风急流, 导致华南前汛期雨量偏强。而弱等级东

部型或中部型厄尔尼诺事件次年, 高层西风急流明显减弱; 中层东亚大槽和极涡均明显减弱, 导致冷空气弱, 水汽辐合区北抬, 华南区域没有水汽的辐合, 不利于华南前汛期降水的发生。

致谢 感谢审稿专家对文章提出非常好的修改建议! 感谢国家气候中心王遵娅提供华南汛期监测数据!

参考文献 (References)

- Ashok K, Behera S K, Rao S A, et al. 2007. El Niño Modoki and its possible teleconnection [J]. *J. Geophys. Res.*, 112: C11007, doi:10.1029/2006JC003798.
- 陈艺敏, 钱永甫. 2005. 西太平洋暖池海温对华南前汛期降水影响的数值试验 [J]. *热带气象学报*, 21: 13–23. Chen Yimin, Qian Yongfu. 2005. Numerical study of influence of the SSTA in western Pacific warm pool on precipitation in the first flood period in South China [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 21: 13–23, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2005.01.002.
- Chen Z S, Wen Z P, Wu R G, et al. 2014. Influence of two types of El Niños on the East Asian climate during boreal summer: A numerical study [J]. *Climate Dyn.*, 43: 469–481, doi:10.1007/s00382-013-1943-1.
- 邓立平, 王谦谦. 2002. 华南前汛期(4~6月)降水异常特征及其与我国近海海温的关系 [J]. *热带气象学报*, 18: 44–55. Deng Liping, Wang Qianqian. 2002. On the relationship between precipitation anomalies in the first raining season (April–June) in southern China and SST over offshore waters in China [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 18: 44–55, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2002.01.006.
- 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: 2091–2101, doi:10.1002/joc.2217.
- Feng J, Li J P. 2011. Influence of El Niño Modoki on spring rainfall over South China [J]. *J. Geophys. Res.*, 116: D13102, doi:10.1029/2010JD015160.
- 谷德军, 纪忠萍, 林爱兰, 等. 2005. 广州春季降水的变化及其前兆信号 [J]. *热带气象学报*, 21: 579–587. Gu Dejun, Ji Zhongping, Lin Ailan, et al. 2005. The variation and precursor of Guangzhou spring rainfall [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 21: 579–587, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2005.06.003.
- 何溪澄, 丁一汇, 何金海. 2008. 东亚冬季风对 ENSO 事件的响应特征 [J]. *大气科学*, 32: 335–344. He Xicheng, Ding Yihui, He Jinhai. 2008. Response characteristics of the East Asian winter monsoon to ENSO events [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32: 335–344, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.02.12.
- Kao H Y, Yu J Y. 2009. Contrasting eastern Pacific and central Pacific types of ENSO [J]. *J. Climate*, 22: 615–632, doi:10.1175/2008JCLI2309.1.
- Kug J S, Jin F F, An S I. 2009. Two types of El Niño events: Cold tongue El Niño and warm pool El Niño [J]. *J. Climate*, 22: 1499–1515, doi:10.1175/2008JCLI2624.1.
- Larkin N K, Harrison D E. 2005. On the definition of El Niño and associated seasonal average U.S. weather anomalies [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32: L13705, doi:10.1029/2005GL022738.
- 李春晖, 梁建茵, 吴尚森. 2004. 近百年广州汛期降水变化特征及其影响因素 [J]. *热带气象学报*, 20: 365–374. Li Chunhui, Liang Jianyin, Wu Shangsen. 2004. The characteristics of precipitation in the raining season in Guangzhou and its affecting factors over the past 100 years [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 20: 365–374, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2004.04.004.
- 李多, 柳艳菊, 王遵娅. 2017. 华南前汛期起讫日期的年际变化及与前汛期降水的关系 [J]. *地理科学*, 37: 154–160. Li Duo, Liu Yanju, Wang Zunya. 2017. Inter annual variation of the onset and ending dates of the first rainy season in South China and their relationships with the corresponding precipitation [J]. *Scientia Geographica Sinica (in Chinese)*, 37: 154–160, doi:10.13249/j.cnki.sgs.2017.01.019.
- 李宏毅, 林朝晖, 宋燕, 等. 2013. 我国华南3月份降水异常的可能影响因素分析 [J]. *大气科学*, 37: 719–730. Li Hongyi, Lin Zhaohui, Song Yan, et al. 2013. Analysis of the possible factors that influence March precipitation anomalies over South China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37: 719–730, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11252.
- 李丽平, 宋哲, 吴楠. 2015. 三类厄尔尼诺事件对东亚大气环流及中国东部次年夏季降水的影响 [J]. *大气科学学报*, 38: 753–765. Li Liping, Song Zhe, Wu Nan. 2015. Effects of three types of El Niño events on atmospheric circulation over East Asia and following summer precipitation in eastern China [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 38: 753–765, doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20130723001.
- 梁建茵, 林元弼. 1992. 南海海温异常对七月份中国气候的影响及数值试验 [J]. *热带气象*, 8: 134–141. Liang Jianyin, Lin Yuanbi. 1992. The influence of sea surface temperature anomalies for the South China Sea on July climate in China and their numerical experiments [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 8: 134–141, doi:10.16032/j.issn.1004-4965.1992.02.005.
- 梁建茵, 吴尚森. 2001. 广东省汛期旱涝成因和前期影响因素探讨 [J]. *热带气象学报*, 17: 97–108. Liang Jianyin, Wu Shangsen. 2001. Formation reasons of drought and flood in the rain season of Guangdong and preceding impact factors [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 17: 97–108, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2001.02.001.
- 梁暖培, 梁必骥. 1995. 厄尔尼诺事件与广州降水 [J]. *热带海洋*, 14 (2): 18–23. Liang Nuanpei, Liang Biji. 1995. The El Niño event and rainfall variation in Guangzhou [J]. *Tropic Oceanology (in Chinese)*, 14 (2): 18–23.
- 林爱兰, 李春晖, 郑彬, 等. 2013. 广东前汛期持续性暴雨的变化特征及其环流形势 [J]. *气象学报*, 71: 628–642. Lin Ailan, Li Chunhui, Zheng Bin, et al. 2013. Variation characteristics of sustained torrential rain during the pre-flooding season in Guangdong and the associated circulation pattern [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 71: 628–642, doi:10.11676/qxxb2013.063.
- 马慧, 陈桢华, 毛文书, 等. 2009a. 华南前汛期降水异常及其环流特征分析 [J]. *热带气象学报*, 25: 89–96. Ma Hui, Chen Zhenhua, Mao Wenshu, et al. 2009a. Analysis of precipitation in the annually first rainy period and general circulation in the south of China [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 25: 89–96, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2009.01.011.
- 马慧, 陈桢华, 姜丽萍, 等. 2009b. 华南前汛期降水与我国近海海温的

- SVD 分析 [J]. 热带气象学报, 25: 241–245. Ma Hui, Chen Zhenhua, Jiang Liping, et al. 2009b. SVD analysis between the annually first raining period precipitation in the south of China and the SST over offshore waters in China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 25: 241–245, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2009.02.017.
- 强学民, 杨修群. 2013. 华南前汛期降水异常与太平洋海表温度异常的关系 [J]. 地球物理学报, 56: 2583–2593. Qiang Xuemin, Yang Xiuqun. 2013. Relationship between the first rainy season precipitation anomaly in South China and the sea surface temperature anomaly in the Pacific [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 56: 2583–2593, doi:10.6038/cjg20130808.
- 任福民, 袁媛, 孙丞虎, 等. 2012. 近 30 年 ENSO 研究进展回顾 [J]. 气象科技进展, 2 (3): 17–24. Ren Fumin, Yuan Yuan, Sun Chenghu, et al. 2012. Review of progress of ENSO studies in the past three decades [J]. Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2 (3): 17–24, doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2012.03.002.
- 任宏利, 刘颖, 左金清, 等. 2016. 国家气候中心新一代 ENSO 预测系统及其对 2014/2016 年超强厄尔尼诺事件的预测 [J]. 气象, 42 (5): 521–531. Ren Hongli, Liu Yun, et al. 2016. The new generation of ENSO prediction system in Beijing climate centre and its prediction for the 2014/2016 super El Niño event [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 42: 521–531, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.05.001.
- 邵颢, 廖要明, 柳艳菊, 等. 2016. 2015 年全球重大天气气候事件及其成因 [J]. 气象, 42: 489–495. Shao Xie, Liao Yaoming, Liu Yanju, et al. 2016. Global major weather and climate events in 2015 and the possible cause [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 42: 489–495, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.04.013.
- 司东, 柳艳菊, 邵颢, 等. 2016. 2015 年海洋和大气环流异常及对中国气候的影响 [J]. 气象, 42: 481–488. Si Dong, Liu Yanju, Shao Xie, et al. 2016. Anomalies of oceanic and atmospheric circulation in 2015 and their impacts on climate in China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 42: 481–488, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.04.012.
- 孙勃, 李多, 刘绿柳, 等. 2017. 2016 年全球重大天气气候事件及其成因 [J]. 气象, 43 (4): 477–485. Sun Shao, Li Duo, Liu Lüliu, et al. 2017. Global major weather and climate events in 2016 and the possible causes [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 43: 477–485, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2017.04.010.
- Wang B, Wu R G, Fu X H. 2000. Pacific–East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? [J]. J. Climate, 13: 1517–1536, doi:10.1175/1520-0442(2000)013<1517:PEATHD>2.0.CO;2.
- 王朋岭, 周兵, 柳艳菊, 等. 2015. 2014 年海洋和大气环流异常及对中国气候的影响 [J]. 气象, 41 (4): 489–496. Wang Pengling, Zhou Bing, et al. 2015. Anomalies of ocean and atmospheric circulation in 2014 and their impacts on climate over China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 41: 489–496, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2015.04.012.
- Weng H Y, Ashok K, Behera S K, et al. 2007. Impacts of recent El Niño Modoki on dry/wet conditions in the Pacific Rim during boreal summer [J]. Climate Dyn., 29: 113–129, doi:10.1007/s00382-007-0234-0.
- 伍红雨, 潘蔚娟, 王婷. 2014. 华南冬季气温异常与 ENSO 的关系 [J]. 气象, 40: 1230–1239. Wu Hongyu, Pan Weijuan, Wang Ting. 2014. Winter temperature anomalies in South China and its relation to ENSO [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 40: 1230–1239, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.10.007.
- 伍红雨, 杨崧, 蒋兴文. 2015. 华南前汛期开始日期异常与大气环流和海温变化的关系 [J]. 气象学报, 73: 319–330. Wu Hongyu, Yang Song, Jiang Xingwen. 2015. Anomalous onset date of the first rainy season in South China and its relationship with the variation of the atmospheric circulation and SST [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 73: 319–330, doi:10.11676/qxxb2015.046.
- 吴志伟, 江志红, 何金海. 2006. 近 50 年华南前汛期降水、江淮梅雨和华北雨季旱涝特征对比分析 [J]. 大气科学, 30: 391–401. Wu Zhiwei, Jiang Zhihong, He Jinhai. 2006. The comparison analysis of flood and drought features among the first flood period in South China, Meiyu period in the Yangtze River and the Huaihe River valleys and rainy season in North China in the last 50 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30: 391–401, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.03.03.
- 徐需强, 冯娟, 陈文. 2016. ENSO 冷暖位相影响东亚冬季风与东亚夏季风联系的非对称性 [J]. 大气科学, 40: 831–840. Xu Peiqiang, Feng Juan, Chen Wen. 2016. Asymmetric role of ENSO in the link between the East Asian winter monsoon and the following summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40: 831–840, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1509.15192.
- Yeh S W, Kug J S, Dewitte B, et al. 2009. El Niño in a changing climate [J]. Nature, 461: 511–514, doi:10.1038/nature08316.
- 袁媛, 杨辉, 李崇银. 2012a. 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 [J]. 气象学报, 70: 467–478. Yuan Yuan, Yang Hui, Li Chongyin. 2012a. Study of El Niño events of different types and their potential impact on the following summer precipitation in China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 70: 467–478, doi:10.11676/qxxb2012.039.
- 袁媛, 任福民, 王艳姣, 等. 2012b. 2012 年华南前汛期降水特征及环流异常分析 [J]. 气象, 38: 1247–1254. Yuan Yuan, Ren Fumin, Wang Yanjiao, et al. 2012b. Analysis of the precipitation feature and general circulation anomaly during the pre-flood season in South China in 2012 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 38: 1247–1254, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2012.10.011.
- 袁媛, 李崇银, 杨崧. 2014. 与厄尔尼诺和拉尼娜相联系的中国南方冬季降水的年代际异常特征 [J]. 气象学报, 72: 237–255. Yuan Yuan, Li Chongyin, Yang Song. 2014. Decadal anomalies of winter precipitation over southern China in association with El Niño and La Niña [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 72: 237–255, doi:10.11676/qxxb2014.014.
- 袁媛, 高辉, 贾小龙, 等. 2016. 2014–2016 年超强厄尔尼诺事件的气候影响 [J]. 气象, 42: 532–539. Yuan Yuan, Gao Hui, Jia Xiaolong, et al. 2016. Influences of the 2014–2016 super El Niño event on climate [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 42: 532–539, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.05.002.
- Yuan Y, Yang S. 2012. Impacts of different types of El Niño on the East Asian climate: Focus on ENSO cycles [J]. J. Climate, 25: 7702–7722, doi:10.1175/JCLI-D-11-00576.1.
- 宗海锋, 陈烈庭, 张庆云. 2010. ENSO 与中国夏季降水年际变化关系的不稳定性特征 [J]. 大气科学, 34: 184–192. Zong Haifeng, Chen Lieting, Zhang Qingyun. 2010. The instability of the interannual relationship between ENSO and the summer rainfall in China [J]. Chinese

- Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34: 184–192, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.01.17.
- 郑彬, 梁建茵, 林爱兰, 等. 2006. 华南前汛期的锋面降水和夏季风降水. I: 划分日期的确定 [J]. 大气科学, 30: 1207–1216. Zheng Bin, Liang Jianyin, Lin Ailan, et al. 2006. Frontal rain and summer monsoon rain during pre-rainy season in South China. Part I: Determination of the division dates [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30: 1207–1216, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.06.15.
- 郑彬, 谷德军, 李春晖, 等. 2007. 华南前汛期的锋面降水和夏季风降水. II: 空间分布特征 [J]. 大气科学, 31: 495–504. Zheng Bin, Gu Dejun, Li Chunhui, et al. 2007. Frontal rain and summer monsoon rain during pre-rainy season in South China. Part II: Spatial patterns [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31: 495–504, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.03.1.
- 张端禹, 郑彬, 汪小康, 等. 2015. 华南前汛期持续暴雨环流分型初步研究 [J]. 大气科学学报, 38: 310–320. Zhang Duanyu, Zheng Bin, Wang Xiaokang, et al. 2015. Preliminary research on circulation patterns in the persistent heavy rain processes during the first rainy season in South China [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38: 310–320, doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20130520002.