

不同 PDO 位相下 El Niño 发展年和 La Niña 年东亚夏季风的季节内变化

张雯^{1,3} 董啸^{*2} 薛峰²

1 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室, 宁夏 银川 750002

2 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029

3 宁夏回族自治区气候中心, 宁夏 银川 750002

摘要 基于 1957~2017 年观测和再分析资料, 合成分析了北太平洋年代际振荡 (Pacific decadal oscillation, PDO) 不同位相下 El Niño 发展年和 La Niña 年东亚夏季风的环流、降水特征及季节内变化。结果表明, PDO 正、负位相作为背景场, 分别对 El Niño 发展年、La Niña 年东亚夏季风及夏季降水具有加强作用。PDO 正位相一方面可增强 El Niño 发展年夏季热带中东太平洋暖海温异常信号, 另一方面通过冷海温状态加强中高纬东亚大陆与西北太平洋的环流异常, 从而在一定程度上增强了东亚夏季风环流的异常程度; 反之, PDO 负位相则增强了 La Niña 年热带海气相互作用以及中高纬环流 (如东北亚反气旋) 的异常。在季节内变化方面, El Niño 发展年 6 月贝湖以东反气旋性环流为东亚地区带来稳定的北风异常, 东北亚位势高度减弱; 7 月开始, 环流形势发生调整, 日本以东洋面出现气旋性异常, 东亚大陆偏北风及位势高度负异常均得到加强; 8 月, 随着东亚夏季风季节进程和 El Niño 发展, 西太平洋出现气旋性环流异常, 东亚副热带位势高度进一步降低, 副高明显东退。La Niña 年 6 月异常较弱, 主要环流差异自 7 月西北太平洋为大范围气旋性异常控制开始, 东亚-太平洋遥相关型显著, 副高于季节内始终偏弱偏东。上述两种情况下, 均造成东亚地区夏季降水总体上偏少, 尤其是中国北方降水显著偏少。

关键词: 北太平洋年代际振荡 El Niño 发展年 La Niña 年 东亚夏季风 季节内变化

文章编号

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1910.18269

收稿日期 : 网络预出版日期

作者简介 张雯, 女, 1990 年生, 硕士, 主要从事东亚季风及短期气候预测方面的研究。E-mail: acaimeme@sina.cn

通讯作者 董啸, E-mail: dongxiao@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项 41706028、41630530

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41706028 and 41630530)

Intraseasonal Variations of the East Asian Summer Monsoon in El Niño Developing Years and La Niña Years under Different Phases of the Pacific Decadal Oscillation

ZHANG Wen^{1,3}, DONG Xiao², and XUE Feng²

1 *Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions, NingXia Yinchuan 750002*

2 *International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

3 *Ningxia Hui Autonomous Region Climate Center, NingXia Yinchuan 750002*

Abstract Based on observational and reanalysis datasets during 1957-2017, this study compares the impact of different phases of the Pacific Decadal Oscillation (PDO) on seasonal and intraseasonal variation of the East Asian summer monsoon (EASM) in El Niño developing years and La Niña years. Results show that PDO positive (negative) phase reinforces El Niño developing (La Niña) behaviors mainly via modifying the background EASM circulation, precipitation and intraseasonal variation. When El Niño is in phase with PDO (El Niño/ high PDO), PDO amplifies the warm sea surface temperature (SST) anomaly signal of the central and eastern Pacific during the summer, besides it strengthens the mid-high latitudes circulation anomaly of the East Asia continent and the Northwest Pacific through the cold SST state. In La Niña years, the negative PDO phase promotes the tropical air-sea interaction and also causes the circulation anomalies in mid-high latitudes, such as an anti-cyclonic anomaly in northeast Asia. With respect to intraseasonal variations, during the June of El Niño developing years, there exist stable northerly anomalies from anti-cyclonic circulation east of Lake Baikal, which induces negative geopotential height anomalies over East Asia. Since July, the circulation has been adjusted, cyclonic anomaly has appeared in the eastern ocean of Japan, besides the northerlies and negative geopotential height anomalies have been strengthened. In August, with the seasonal march of EASM seasonal and the development of El Niño, cyclonic anomaly occurs in the Western Pacific Ocean, the subtropical geopotential height further reduces and the western Pacific subtropical high (WPSH) retreats eastward clearly. In La Niña years, the circulation anomalies are weak in June. The main differences begin with July, characterized by the large-scale cyclonic anomaly control in the Northwest Pacific Ocean and the significant East Asia-Pacific teleconnection pattern, which eventually weakened the WPSH and retreated it eastward. As a result, there was less summer

precipitation in both cases over East Asia especially in northern China.

Keywords Pacific decadal oscillation, El Niño developing year, La Niña year, East Asian summer monsoon, intraseasonal variation



1 引言

东亚夏季风具有显著的年际变化，并受到厄尔尼诺-南方涛动（El Niño-Southern Oscillation, ENSO）的显著影响（符淙斌和滕星林，1988；陈文，2002；赵俊杰等，2016；Xue and Zhao, 2017；薛峰等，2018）。ENSO 是热带海气耦合系统最强的年际变化信号，包括 El Niño 和 La Niña 两种不同状态，前者的发生伴随着中东赤道太平洋海表温度（Sea surface temperature, SST）的升高，而后者则相反（Wang, 1995；刘长征和薛峰，2010a, b）。ENSO 对东亚夏季风的影响与其位相有关，其中尤以 El Niño 衰减年夏季东亚夏季风异常最为显著，表现为西太平洋副热带高压（副高）偏强偏南，长江流域多雨而南北两侧少雨。此外，在 El Niño 发展年夏季，西太平洋副高偏弱偏东，华南降水偏多，北方降水偏少。La Niña 年夏季的副高异常与 El Niño 发展年类似，但季节内变化有明显差异，同时其物理机制也完全不同（赵俊杰等，2016；Xue et al., 2018；薛峰等，2018）。

除年际变化外，全球气候系统包括东亚夏季风还存在显著的年代际变化。特别是全球气候系统在 1970 年代末发生了明显的年代际变化，东亚夏季风随之减弱，中国夏季降水呈现出“南涝北旱”分布格局（Wang, 2001；Zhou et al., 2009）。与此同时，ENSO 与东亚夏季风的关系也出现了明显变化（Wang, 2002），ENSO 对西太平洋副热带高压的影响加强（Wang et al., 2008），但与中国东部夏季降水的关系则明显减弱（Gao et al., 2006）。Ye and Lu (2011) 指出在上述年代际转折之后，中国东部降水异常在初夏和盛夏两个时段内表现出相反的分布，从而解释了 ENSO 与东亚夏季风关系减弱的问题。

北太平洋年代际振荡（Pacific decadal oscillation, PDO）作为年代际变化的

重要信号，在 1970 年代末发生了由负向正的位相转变，并对全球气候产生了显著影响（Mantua et al., 1997; D'Arrigo and Wilson, 2006; Dong et al., 2014; 董啸等, 2014; Newman et al., 2016; Dong and Xue, 2016），PDO 位相转变也是导致东亚夏季风减弱及其与 ENSO 关系变化的主要因子（Chan and Zhou, 2005; Wang et al., 2008; Song and Zhou, 2015; Dong and Xue, 2016）。Yoon and Yeh (2010) 将东北亚夏季降水异常与 ENSO 不同位相的关系归结为 PDO 对高纬度大气遥相关的影响，在 PDO 与 ENSO 处于同（反）位相时（同位相是指 PDO 正位相/ El Niño 事件或 PDO 负位相/ La Niña 事件），东北亚地区降水增强（减弱）。Feng et al. (2014) 指出在 PDO 正位相背景下，El Niño 衰减年夏季东亚地区受异常西北太平洋反气旋和日本附近的气旋环流共同控制，中国夏季平均降水异常呈现三极型的分布特征，即中部地区降水偏多，北部和南部降水偏少；相反，在 PDO 负位相背景下，衰减年夏季东亚地区主要受异常西北太平洋反气旋环流影响，降水异常呈偶极型分布，同时还存在显著的季节内变化。此外，Dong (2016) 为区分 PDO 和 ENSO 对东亚夏季风的影响，分析了 PDO 不同位相下非 ENSO 年东亚夏季风的异常特征，结果表明，在除去 ENSO 的影响之后，东亚夏季风在不同 PDO 位相的异常特征与不除去 ENSO 年相似。

需要注意的是，尽管东亚夏季风环流异常在 El Niño 衰减年夏季更为显著，对中国夏季气候异常影响也更强，但 El Niño 发展年和 La Niña 年热带 SST 异常变化信号仍对东亚夏季风有一定影响，同样值得关注。此外，前人研究多关注夏季平均结果，而对于东亚夏季风的季节内差异研究较少。Dong et al. (2017) 比较了副热带高压的两个模态在初夏和盛夏的差异及其与 ENSO 的关系。薛峰等 (2018) 比较了 El Niño 发展年和 La Niña 年东亚夏季风季节内变化特征，并分

析了相关的物理机制。但在不同的 PDO 位相背景下, El Niño 发展年和 La Niña 年东亚夏季风异常及其季节内变化仍不清楚。针对这个问题, 我们基于 1957~2017 年共 61 年的再分析资料, 比较了 PDO 不同位相下 El Niño 发展年和 La Niña 年东亚夏季风的季节内变化, 探讨 PDO 不同位相背景下 ENSO 循环影响东亚夏季风季节内变化的可能机理, 从而进一步加深对东亚夏季风异常变化的认识。

2 资料和方法

本文所用资料包括由美国国家环境预测中心和美国国家大气研究中心提供的第一版本大气环流再分析资料, 分辨率为 2.5° (经度) $\times 2.5^{\circ}$ (纬度) (Kalnay et al., 1996), 包括位势高度场、风场及海平面气压场; 英国气象局 Hadley 气候中心提供的 SST 再分析资料, 分辨率为 1° (经度) $\times 1^{\circ}$ (纬度) (Rayner et al., 2003); 东安格利亚大学气候研究组提供的全球陆面降水数据, 分辨率为 0.5° (经度) $\times 0.5^{\circ}$ (纬度) (Harris et al., 2014)。上述资料时段除降水取 1957~2016 年外, 其他资料统一取为 1957~2017 年, 共 61 年。在计算分析前去除所有数据的线性趋势。

文中年平均 PDO 指数取自冬半年(11 月~次年 3 月)太平洋 20° N 以北 SST 异常的经验正交函数 (EOF) 分解第一模态时间系数, 正 (负) 指数指示 PDO 正 (负) 位相年 (Alexander et al., 2006; Bond et al., 2003)。另外, 本文基于 Niño3.4 指数来选定 El Niño 和 La Niña 事件, Niño3.4 指数定义为 (5° S~ 5° N, 170° W~ 120° W) 区域平均的 SST 异常, 当北半球冬季标准化的 Niño3.4 指数大于 0.5 时, 就认为发生了一次 El Niño 事件, 反之则认为发生一次 La Niña 事件 (Yoon and Yeh, 2010; Feng et al., 2014)。

如图 1 所示, 1957~2017 年间发生过多 El Niño 和 La Niña 事件, 由于 La Niña 可看做是 El Niño 自然衰减的结果, 而前者结束后会再次发展出 El Niño 事件。按照本文选取不同 ENSO 事件的标准, 会出现上年冬季 La Niña 衰减后紧接着于当年夏季开始发展一起新的 El Niño 事件, 考虑到两者在衔接的当年夏季可能具备的相似性或可能产生的相互影响, 故本文将冬季 La Niña 衰减后紧接于夏季开始发展起来的 El Niño 年去除, 即仅考虑由正常海温状态开始(结束)的 El Niño (La Niña), 这也是与 Feng et al. (2014) 所挑选出 El Niño 发展年差异之处。例如 1965 年、1968 年、1972 年、1976 年、1986 年、2006 年和 2009 年, 所列年份当年冬季标准化的 Niño3.4 数值均达到 El Niño 事件标准, 但其上年冬季均为 La Niña 冷异常峰值, 考虑到当年夏季气候异常可能同时受到 La Niña 衰减和 El Niño 发展的共同影响, 故将这些年份排除。

此外, 对于生命超过 2 年的强 El Niño 事件(连续两年冬季标准化的 Niño3.4 数值均达到 El Niño 事件标准), 本文仅选取发展特征最显著的第一个夏季年, 将第二个夏季年排除, 如 2014~2015 年事件仅选取 2014 年。在挑选 La Niña 年时, 同样会遇到 1998~2000 年、2010~2011 年这样持续超过 2 年的 La Niña 事件, 参照薛峰等(2018)的方法, 选取除冷海温发展当年以外的其余年份为 La Niña 年, 如 1999 年、2000 年、2001 年、2011 年、2012 年。

至此, El Niño 发展年和 La Niña 年可根据 PDO 正、负位相被分为如表 1 所列的四类, 不区分 PDO 位相时共有 8 个 El Niño 发展年、13 个 La Niña 年两类。将上述四类结果分别合成, 同时对比不考虑 PDO 位相背景的两类(即对所选 El Niño 发展年和 La Niña 年分别进行合成), 进一步比较分析 PDO 不同位相下 El Niño 发展及 La Niña 两种 ENSO 循环状态对东亚夏季风的影响, 并利用 t 检验方

法来检验结果的显著性。

表 1 基于 PDO 不同位相的 El Niño 发展年及 La Niña 年

Table 1. El Niño and La Niña events classified based on the different PDO phases

	PDO+	PDO-
El Niño 发展年	1957 1982 1991 1997 2002	1963 1994
	2014	
La Niña 年	1984 1985 1996	1971 1974 1975 1989 1999
		2000 2001 2008 2011 2012

3 夏季平均东亚夏季风异常

ENSO 事件作为预测年际气候异常最重要的前兆信号之一，在长期的实践和研究中发现其与东亚夏季降水的关系常受到 PDO 不同位相背景的影响而发生调整，具有一定不确定性 (Wang, 2002; 朱益民和杨修群, 2003; Feng et al., 2014)。尽管目前已开展相关研究工作，但多着眼于对气候异常影响最为显著的 ENSO 阶段——El Niño 衰减状态，对 El Niño 发展及 La Niña 衰减这两个异常影响相对较弱的阶段研究成果则较少。本节由此讨论 PDO 正、负位相下，El Niño 发展年、La Niña 年内四类夏季东亚环流异常，同时给出不考虑 PDO 位相影响时的两类合成结果以做比较。

3.1 El Niño 发展年夏季东亚夏季风异常

图 2 (a、b) 给出的是 PDO 不同位相下 El Niño 发展年夏季平均 SST 及海平面气压 (Sea level pressure, SLP) 的异常。在 PDO 正位相背景下 (图 2a)，中东赤道太平洋 SST 为显著正异常，El Niño 信号较强，西太平洋暖池为弱的负 SST

异常，北印度洋为弱的正 SST 异常；北半球中高纬 SLP 呈“西高东低”的异常分布型，即东亚大陆 SLP 偏强、北太平洋偏弱。在 PDO 负位相背景下（图 2b），发展年的 SST 和 SLP 异常特征均与正位相背景合成年存在明显不同，赤道太平洋仅出现小范围 SST 正异常且位置偏向中太平洋，而西太平洋及印度洋则无显著的 SST 异常。同时，北半球中高纬 SLP 异常分布与 PDO 正位相年基本相反，即整个东亚大陆 SLP 为负异常，北太平洋为 SLP 正异常。当不考虑 PDO 位相影响时（图 2c），SST 及 SLP 异常分布特征均与正位相年（图 2a）相似但程度偏弱，中东赤道太平洋 SST 异常程度不高，同时东亚大陆 SLP 异常明显减弱，与北太平洋的经向梯度减小。这表明 PDO 正位相这种“北冷南暖”的 SST 分布型在一定程度上增强了热带 El Niño 异常信号，同时放大了中高纬大气环流对北太平洋冷海温异常的响应。

图 3（a、b）是 PDO 不同位相下 El Niño 发展年夏季平均的 850hPa 风场异常及西太平洋副热带高压，同样地给出不考虑 PDO 影响时的结果（图 3c）以做比较。处于 PDO 正位相背景时（图 3a），850hPa 风场异常表现为东亚中纬地区偏北风异常，西北太平洋日本以东为气旋性异常，赤道地区为显著西风异常。西太平洋副热带高压与气候平均接近，与薛峰等（2018）指出的副高偏东结论不一致，主要原因是所取的气候平均时段不同所致。处于 PDO 负位相背景时（图 3b），东亚大陆转为南风异常，西北太平洋为两个反气旋异常控制，中心分别位于日本及 45° N 日界线附近，副热带西太平洋为气旋性异常，其南侧为西风异常，与 PDO 正位相时期不同的是上述异常特征均未通过显著性检验，副热带高压较气候态明显减弱偏东。不考虑 PDO 影响时（图 3c），风场异常特征与正位相年（图 3a）较为相似，热带西风异常仍十分显著，但副热带地区的风场如日

本以东的气旋性异常、东亚地区偏北风特征均有所减弱，这可能与缺少北太平洋 SST 冷异常有关，表明 PDO 正位相能在一定程度上增强 El Niño 发展年西北太平洋风场的异常程度，尤其是对中纬度异常气旋性环流的加强，从而促使了东亚地区偏北风异常，与图 2 中的结论相似。

图 4 (a、b) 为发展年夏季 500hPa 位势高度异常场的合成结果。PDO 处于正位相时 (图 4a)，东亚大陆中高纬以正异常为主，北太平洋中纬度为负异常，与图 2a 中 SLP 分布特征高度相似，异常场同为“西高东低”，热带地区位势高度异常偏高。PDO 处于负位相时 (图 4b)，高度场异常分布与正位相时大体相反，即中高纬的东亚大陆为负异常、东北亚至北太平洋为正异常且异常程度明显增强，但仅个别区域能通过显著性检验。不考虑 PDO 影响时 (图 4c)，其异常分布与 PDO 正位相年 (图 4a) 类似，但异常程度同样明显弱于后者，特别是中高纬大陆与海洋之间的东西向梯度明显减弱，因此 PDO 正位相有利于增强 El Niño 发展年夏季北半球中高纬度位势高度场异常特征。

由上述分析可见，处于 PDO 正位相背景的 El Niño 发展年，夏季贝加尔湖至巴尔喀什湖一带 500hPa 高度场偏高，日本及中高纬西北太平洋地区异常偏低，造成东北亚大陆东、西向的异常梯度明显增强。相应地，在贝湖反气旋性异常和东侧西北太平洋上空两个气旋性异常的共同作用下，850hPa 风场上整个东亚东岸为较强的偏北风异常控制，此时副高处于异常北风的东侧。此外，由西北太平洋中高纬向南延伸至副热带地区的高度场略偏低，同样不利于副高加强西伸。SLP 具有与高度场异常一致的分布特征。西太平洋环流形势整体不利于副高的加强与西伸，因而副高表现为接近常年略偏南。PDO 负位相背景下，北太平洋“北暖南冷”的 SST 分布一方面使得东北亚至中高纬北太平洋地区 500hPa 位势高度

场为正异常、欧亚大陆负异常，另一方面阻碍了中东赤道太平洋 SST 暖异常的发展，赤道太平洋东、西两侧 SST 异常梯度减弱，副热带西北太平洋出现高度场负异常，其中南海至副热带西太平洋显著偏低，SLP 异常存在类似特征，菲律宾以东对应出现气旋性异常，其西侧偏北气流不利于副高加强西伸，副高减弱偏东。PDO 不同位相与 El Niño 发展状态的叠加均能看到夏季副高减弱，正位相下北太平洋海温异常通过加强中高纬气压梯度来实现对副热带环流的影响；而负位相则似乎是通过削弱热带暖 SST 信号来改变低纬环流异常。

对应于上述环流，图 5 (a、b) 进一步给出发展年夏季东亚地区平均降水异常的空间分布。处于 PDO 正位相背景时 (图 5a)，中国东部夏季降水呈典型的“北少南多”的偶极型分布，即华北河套一带降水偏少，长江以南大范围降水偏多，与不考虑 PDO 影响的降水分布形势 (图 5c) 相似，并且降水异常偏少的程度得到明显增强。华北河套降水的显著偏少主要是受中高纬源源不断的北风异常影响所致，加之副高偏弱，水汽条件并不理想。PDO 负位相时，西北太平洋由日本上空反气旋异常控制，加之副高减弱东退，所展现出的降水异常分布形势为由南向北的“负正负”三极型 (图 5b)，即除长江流域至日本降水偏少外，华南和华北降水均偏多，但大部分地区未能通过显著性检验。降水的异常分布特征则进一步表明 PDO 正位相对中高纬环流及对热带 ENSO 信号的影响，能在一定程度加强 El Niño 发展阶段夏季风异常变化，从而加强东亚地区降水异常的“北少南多”。

3.2 La Niña 年夏季东亚夏季风异常

图 2 (d、e) 为 PDO 不同位相背景内 La Niña 年夏季平均 SST 及 SLP 异常，PDO 正位相背景下 (图 2d)，中东赤道太平洋为负 SST 异常，最强负异常位于

太平洋东岸，西印度洋及西北太平洋 SST 同样为显著负异常，但异常程度较弱。东亚大陆及中高纬北太平洋 SLP 以正异常为主，西北太平洋为负异常。PDO 负位相背景下（图 2e），SST 和 SLP 异常特征与 PDO 正位相背景之间的差异较大，低纬 La Niña 冷海温信号更为显著，需要注意的是赤道东太平洋的负 SST 并未通过显著性检验，致使 SST 显著负异常以“V”型嵌于赤道中东太平洋并分别向南、北延伸，另外印度洋及南海的 SST 为负异常。另外，北太平洋 40° N 日界线以东存在 SST 正异常中心。SLP 异常与 PDO 正位相年有一定相似性，东北亚为正异常而西北太平洋为负异常，但异常很弱。不考虑 PDO 影响时（图 2f），SST 及 SLP 异常特征与 PDO 负位相年（图 2e）更接近，表明北太平洋“北暖南冷”的 SST 异常更多地是加强了副热带太平洋东岸及赤道中太平洋的 SST 异常，而非赤道东岸。换言之，PDO 负位相增强了 La Niña 年太平洋地区的 SST 异常，但对气压场影响较弱。

图 3（d、e）为 PDO 不同位相下 La Niña 年夏季平均 850hPa 风场异常及西太平洋副热带高压。PDO 正位相时（图 3d），风场异常整体较弱，东亚地区为北风异常，日本及菲律宾以东为反气旋性异常，副热带西太平洋则为气旋性异常控制。PDO 为负位相时（图 3e），风场异常与正位相年存在一定相似之处，菲律宾以东仍为反气旋性异常，位于副热带西太平洋日本以南的气旋性异常减弱、东亚中纬度地区存在较弱的东北风异常，差别来自于中高纬东北亚出现反气旋性异常、赤道地区东风异常得到明显增强，而东风异常则与负位相背景下得到加强的 La Niña 信号有关（图 2e）。上述两种情况下，受西太平洋气旋性异常影响，副高均明显减弱偏东。不考虑 PDO 影响时（图 3f），异常特征接近 PDO 负位相时的状况（图 3e）。

图 4 (d、e) 为 PDO 不同位相下夏季 500hPa 位势高度异常场的合成结果。PDO 正位相时 (图 4d), 除日本至中高纬北太平洋地区为正异常外, 包括西太平洋在内的大部分区域均为负异常, 但均未能通过显著性检验。PDO 负位相时 (图 4e), 热带和副热带地区位势高度显著偏低, 东北亚及太平洋东北侧为显著正异常, 其异常特征与不考虑 PDO 影响时的结果 (图 4f) 相似, 但高度场异常程度得到加强, 表明 PDO 负位相加强了 La Niña 年夏季位势高度异常, 与图 2、3 的结论基本一致。

由上述分析可见, PDO 正位相背景下的 La Niña 年, 受西北太平洋冷 SST 异常影响, 日本以南至中纬度西北太平洋位势高度异常偏低, SLP 异常同时对应相同特征, 不利于副高加强西伸。东亚大陆中高纬高度场异常不显著, 但 SLP 异常偏强, 850hPa 风场上可看到贝湖附近为反气旋性异常, 东亚地区为北风异常。西北太平洋为大范围气旋性异常控制, 因此副高表现出明显偏东。PDO 负位相背景下, 东北亚地区正位势高度异常偏强, 热带至副热带地区均为显著负异常, 有利于副高减弱偏东, SLP 异常存在类似特征。风场上, 东亚中高纬贝湖以东为反气旋异常控制, 大陆东岸受偏北风异常影响, 此外热带东风异常显著, 其北侧为反气旋性异常, 中国台湾及日本以南上空存在弱的气旋性异常, 副高因此偏弱偏东。PDO 不同位相与 La Niña 状态的叠加均使得夏季副高减弱东退, 正位相 (西北太平洋延伸至北太平洋的冷 SST 异常) 在加强低层中高纬东亚大陆和北太平洋的气压异常时十分明显, 副高在东亚大陆北风异常及西北太平洋气旋性异常的共同作用下东退; 而负位相则主要通过加强 La Niña 冷信号, 改变了热带风场异常。

图 5d 和 5e 分别是 PDO 正、负位相下 La Niña 年东亚夏季平均降水异常分

布，两者差异较大。正位相背景下（图 5d），长江以北降水偏多，但仅东北个别区域能通过显著性检验，另外，受西北太平洋较强气旋性异常和日本反气旋性异常偏东北风的影响，副高明显偏弱偏东，日本及华南地区降水偏少。负位相背景下（图 5e），除华东地区降水偏多外，中国东部大部区域降水偏少，东北及华北地区的显著偏少与东北亚受强大高压及低层反气旋性异常控制有关。不考虑 PDO 影响时（图 5f），La Niña 年中国东部夏季降水异常信号不显著，与 PDO 负位相影响下的情况对比，前者对降水最显著的作用是增强了中高纬贝湖以东的高压异常，从而使得中国东北大部显著偏少。

上述内容讨论了 PDO 不同背景与 ENSO 不同状态叠加的东亚夏季降水，其中 El Niño 发展年（PDO 正位相）与 La Niña 年（PDO 负位相）所展现出的结果与已有研究成果基本吻合（薛峰等，2018），即 El Niño 发展年中国东部以长江为界，以南地区降水偏多，以北地区降水偏少；La Niña 年，由于副高明显的偏东，中国东部大部分地区降水以偏少为主。表明除 ENSO 外，PDO 作为背景场确实通过加强中高纬环流异常、ENSO 信号直接或间接地影响着东亚夏季风，并对降水异常分布产生一定作用。

PDO 处于不同位相时期，中高纬大气对海温异常响应表现出明显不同的特征，最为显著是当其处于正（负）位相时，500hPa 位势高度及 SLP 异常在东亚大陆中高纬与北太平洋展现出的“西高东低”（“西低东高”）的经向差异（Dong and Xue, 2016）；杨修群等（2005）也指出正位相年中国北方大部会出现北风异常，不利于水汽向内陆地深入输送。近期的研究进一步强调乃至阐述了年代际信号对 ENSO 及东亚夏季风所起的调制作用（Fan et al., 2018），Lin et al. (2018) 量化地指出当 PDO 处于正位相时，El Niño 爆发频率是 La Niña 的 3 倍，反之

当其处于负位相时, El Niño 的爆发频率仅为 La Niña 的 58%; Fan and Fan (2017) 指出 PDO 处于暖位相时, 热带太平洋海温变率增强、ENSO 事件增多, 从而对沃克环流及西北太平洋反气旋异常的位置和强度产生影响, 导致南海夏季风与赤道太平洋海温的相互作用增强, 反之亦然。上述研究与本文结论相似, 即无论 ENSO 处于 El Niño 发展还是 La Niña 阶段, PDO 作为背景场所起到作用不可小觑 (图 2-4)。究其缘由, 一方面 PDO 不同位相加强或削弱热带 ENSO 信号, 从而改变了热带海气相互作用的效果, 另一方面其所展现的 SST 异常特征可通过影响中高纬特别是东北亚与西北太平洋地区的环流异常, 间接地影响东亚夏季风特征及降水分布。

4 东亚夏季风的季节内变化

上节分析了 El Niño 发展年和 La Niña 年在 PDO 不同位相下东亚地区夏季平均的环流和降水异常特征, 特别是 PDO 正、负位相分别对 El Niño 发展年和 La Niña 年东亚夏季风的增强作用。由于东亚夏季风具有显著的季节内变化, 本节将继续讨论不同 PDO 位相背景内 El Niño 发展年和 La Niña 年夏季逐月东亚夏季风环流及降水的变化特征。

4.1 El Niño 发展年东亚夏季风季节内变化

PDO 正位相背景下, El Niño 发展年夏季逐月环流及降水发展如图 6-9 所示。由图 6 (a-c) 可见, 中东赤道太平洋 SST 正异常信号持续增强, 一方面是由于 El Niño 在夏季逐渐发展, 另一方面 PDO 正位相对赤道太平洋 SST 正异常具有增强作用。6 月位于北太平洋的 SST 正异常和赤道西太平洋的负异常均在 7 月发生明显变化, 前者转为负异常而后者有所增强 (图 6a、b), 8 月继续发展。对应于 SST 异常变化, 太平洋 SLP 异常低中心在 7 月更偏向中纬度西太平洋。整

体上看，北太平洋地区 SLP 正异常在 6~8 月间逐渐趋于增强并向南扩展，位于东亚大陆中高纬的 SLP 正异常则趋于减弱（图 6a-c）。

图 7 (a-c) 是发展年 6-8 月 850 hPa 风场异常演变，与夏季平均结果类似，6-8 月间赤道西太平洋西风异常显著，东亚大陆始终为偏北风异常。6 月贝湖以东异常反气旋环流带下较强偏北风，副热带西太平洋无明显环流异常（图 7a），7 月中纬度日本以东的气旋性异常明显得到加强，东亚地区盛行的偏北风异常受到来自于贝湖附近反气旋性异常和东北亚气旋性异常的共同影响，此时日本以南为反气旋性异常（图 7b），随着中东赤道太平洋暖 SST 持续升高，8 月赤道西风异常进一步加强，日本南侧、东侧的环流性异常北移并有所减弱，同时西太平洋 10° -25° N 出现气旋性异常（图 7c），即副热带西太平洋为大范围气旋性异常控制。随着西太平洋反气旋性异常向气旋性异常转变，副高由 6 月略偏西逐渐转弱，8 月偏东，这种变化对应着 El Niño 逐渐发展的热带风场特征（薛峰等，2018）。

500 hPa 位势高度场上（图 8），6 月东亚地区中高纬位势高度正异常明显偏强，西北太平洋为负异常（图 8a），此后正异常有所减弱，负异常范围由日本地区向南、向西扩张，8 月副热带西太平洋转以负异常为主（图 8c），高低纬度之间异常梯度增大，呈显著的遥相关型，与大气环流模式模拟结果较为一致，表明环流变化与 El Niño 的强迫有一定关系（Lau and Nath, 2000）。与风场异常的变化时间较为一致，7~8 月间是环流调整最为明显的时段，北太平洋中高纬度负异常逐渐向西、向南增强，因此西北太平洋转为大范围负异常控制。

El Niño 发展年环流形势的季节内变化表现为 6 月贝湖附近为高压异常，使得东亚大陆东岸为较强的偏北风异常控制，东北亚地区 500hPa 位势高度略偏低，

可能与偏北风引起的冷平流异常有关 (Xue and Fan, 2016), 副热带西太平洋无明显风场异常, 赤道为显著的西风异常, 此时副高较气候态略偏西; 7月随着东北亚地区的负位势高度异常得到发展, 西北太平洋中高纬风场异常显著, 大陆东岸北风异常加强, 西太平洋 25° N 附近为小范围反气旋性环流, 热带西风异常持续加强中, 此时副高略有东退、接近常年; 8月中高纬风场异常维持, 大陆东岸仍以偏北风为主, 日本至西太平洋大范围位势高度偏低, 随着 El Niño 的进一步发展, 中太平洋地区的对流得到加强, 此时副热带西太平洋由7月的反气旋性异常转为气旋性异常 (薛峰等, 2018), 从而致使副高东退。因此在 El Niño 发展年夏季, 季节内副高的异常变化是平缓而逐渐的, 但从7、8月的环流特征来看, 其成因似乎并不完全相同, 特别是副热带西太平洋风场异常的转变表明6月的异常更多是由中高纬大气变化引起, 而8月以后更多的是受到 El Niño 强迫影响。

对应于上述环流和副高的变化, 东亚地区降水也呈现出显著的季节内变化 (图 9a-c), 6月中国东部地区降水分布差异较大, 东北、长江下游及华南地区以偏少为主, 仅华南西部降水偏多。7月随着副高的减弱东退, 降水分布发生明显转变, 长江流域及华南地区降水偏多, 华北、东北降水偏少, 表现为典型的“北少南多”分布型。8月上述情况进一步持续, 中国北方大部地区降水显著偏少。

4.2 La Niña 年东亚夏季风季节内变化

对于 PDO 负位相背景下的 La Niña 年, 同样地, 图 10 (a-c) 首先给出逐月 SST 和 SLP 异常, 中东赤道太平洋通过显著性检验的负 SST 异常呈现 V 字形分布特征, 北太平洋中纬度为正 SST 异常, 上述 SST 异常在 6~8 月间逐渐减弱。SLP 异常较弱, 但月际间变化较大, 西太平洋的 SLP 由正常状态逐渐转负异常

并有所增强。此外，6月位于北太平洋暖SST上空的正SLP异常随着SST异常减弱，于7月减弱南移，8月转为负异常。

对应于La Niña年SST异常，由图11可见，赤道850 hPa风场始终为东风异常，其中7、8月最为显著，可向西伸展至130° E附近，而6月约在150° E。此外，6月受华南及南海一带的对流增强影响，表现为较弱的气旋性环流，副热带西太平洋为反气旋性异常，东亚大陆东岸无偏北风异常，此时副高接近常年；7月之后随着西太平洋暖池特别是菲律宾海附近的对流增强，东亚副热带地区转为气旋性异常，大陆东岸为偏北风异常，不利于副高增强，副高出现东退；8月，受热带东风异常影响，西北太平洋气旋性异常进一步增强，同时东北亚地区出现异常反气旋性环流，东亚地区为偏强的北风异常控制，副高明显减弱东退。

因热带太平洋冷海温事件，热带和副热带500 hPa位势高度大范围偏低（图12a-c），其中6月南海附近高度场异常偏低，对应于低层气旋性异常（图11a），7月与8月形势较为相似，东亚沿岸至西太平洋副热带地区的高度场异常明显偏低。与中低纬度相比，高纬地区位势高度异常的月际变化更为显著，6月贝加尔湖以东为正异常覆盖，7月位于鄂霍次克海地区的正异常显著，8月该正异常扩大南压位于我国东北及日本以东一带，高低纬之间呈典型的东亚-太平洋遥相关型（图12b、c），对应于图11b、c中异常气旋性环流以及副高的异常偏东状态。

与PDO正位相El Nino发展年相似的是负位相背景下的La Niña年东亚夏季风的季节内变化同样以7月为转折点。6月东亚地区的环流异常较弱，大陆东岸无明显偏北风，仅在华南、南海附近出现较弱的气旋性异常，其上空500hPa位势高度略偏低，西太平洋副热带地区位势高度同样偏低但未能通过显著性检验，日本南侧为反气旋性异常，此时副高接近常年略偏东；7月受热带对流异常的强

迫作用，西太平洋 25°N 附近出现显著的气旋性异常，日本东北侧转为反气旋异常，西太平洋副热带高低纬之间呈东亚-太平洋遥相关型，即日本以南的副热带及热带位势高度显著降低，而中高纬东北亚一带显著升高，东亚地区受北风异常影响，使得副高出现较明显的东退；在 7 月环流状况维持发展基础上，8 月东亚中高纬出现反气旋性环流，日本以东的反气旋异常扩大加强，西太平洋副热带的气旋性异常增强北进，东亚-太平洋遥相关型的特征较 7 月更加明显，副高进一步东退。需要说明的是，与 7、8 月受对流强迫有关的副高偏东不同，6 月副高偏东时中高纬无明显风场异常，表明其与中高纬大气变化的关系较弱，可能与 La Niña 年前期春季暖池 SST 偏高有关（薛峰等，2018）。

图 13 显示的是 La Niña 年东亚地区降水异常的月际变化，6 月受南海附近气旋性环流影响华南西部降水偏多，华东至日本一带位于西太平洋异常反气旋西北侧，同样降水偏多。7 月开始，随着副高进一步减弱东退，东亚地区盛夏期提早来临，长江流域转以降水偏少为主。8 月仅长江流域至日本一带降水明显偏多，中国北方特别是华北、东北地区的降水异常偏少，中高纬的降水异常偏少与 8 月东北亚受异常反气旋控制以及副高异常偏东有关（图 11c），即上述环流异常形势不利于水汽向中国北方大部地区输送，因而降水显著偏少。

5 小结和讨论

薛峰等（2018）对比研究了 El Niño 发展年和 La Niña 年东亚夏季风的季节内变化。本文基于 1957~2017 年观测、再分析资料，进一步考察了 PDO 不同位相下 El Niño 发展年和 La Niña 年东亚夏季风环流和降水的季节内变化影响。

对于 El Niño 发展年，薛峰等（2018）指出初夏和盛夏的副高均偏东，初夏主要是大气内部变化引起的，而盛夏是 El Niño 强迫所造成的。在考虑了 PDO

位相后，结果表明 PDO 正位相作为背景场增强了夏季中东赤道太平洋海温异常的程度，促进了 El Niño 的发展，同时通过中高纬的 SST 异常加强了东亚大陆与西北太平洋高度场及 SLP 异常，西北太平洋日本以东出现的气旋性异常在一定程度上也促进了东亚沿岸的北风异常，最终使得夏季华北及河套地区降水显著偏少。与正位相相比，PDO 负位相则削弱了热带暖 SST 信号，因此 El Niño 发展年东亚夏季风的异常不显著。季节内变化表现为 6 月贝湖以东为高压异常，反气旋性环流给东亚地区带来偏北风异常，东北亚地区的位势高度有所减弱，副高与常年接近略偏西。7 月开始，环流形势逐渐发生调整，西北太平洋日本以东出现气旋性环流异常，与贝湖反气旋性异常共同促进了东亚地区的北风异常，此时东亚副热带地区的负位势高度异常得到加强，副高逐渐减弱。8 月，中高纬风场异常维持，大陆东岸仍以偏北风为主，随着东亚夏季风季节内进程的推进及 El Niño 的发展，西太平洋暖池对流的效应更为明显，此时气旋性环流异常出现，副热带西太平洋位势高度进一步降低，副高出现明显的东退。El Niño 发展年夏季副高季节内变化是单调减弱的，由偏西逐渐接近常年而后减弱偏东，受到了东亚夏季风季节进程和 El Niño 强迫的共同影响（薛峰等，2018）。

对于 La Niña 年，薛峰等（2018）发现副高最大异常主要在 7 月，副高提前东退，造成东亚地区盛夏期提早来临。本文分析结果表明，PDO 负位相对 La Niña 年东亚夏季风的影响更显著。PDO 负位相加强了中赤道太平洋冷 SST 异常，从而加强了热带风场对 ENSO 信号的异常响应，西太平洋高度场异常偏低，副高明显偏东，加之东北亚地区异常反气旋的出现，同样造成中国北方特别是东北地区降水异常偏少。PDO 正位相削弱了 La Niña 冷信号，通过西北太平洋冷 SST 异常直接加强气旋性异常，促使副高减弱东退，但对降水异常的作用并不显著。

季节内 La Niña 年东亚夏季风更为复杂，6 月环流异常整体较弱。自 7 月开始，考虑到 La Niña 年前期春季西太平洋海温偏高，夏季暖池对流持续偏强（薛峰等，2018），西太平洋转为显著的气旋性异常。8 月，东亚-太平洋遥相关型更为明显，随之东亚北部反气旋的增强也进一步促使了西太气旋性异常的发展，副热带位势高度场明显降低，副高大幅度减弱东退。La Niña 年副高季节内始终偏弱偏东，月际间最明显差异自 7 月开始，受热带环流影响西北太平洋由大范围气旋性异常控制。

自上世纪 70 年代末我国出现“南涝北旱”现象以及与此同时 PDO 由负位相转为正位相后，许多研究表明 PDO 与我国夏季降水有密切的关系（朱益民和杨修群，2003）。除 1970 年代这次变化之外，Yu et al. (2015) 通过分析近百年的观测资料发现“南涝北旱”现象并不是仅仅出现在 1970 年代，而是受到 PDO 调节的一种年代际变率。当 PDO 处于正位相期间，我国华北地区降水较常年偏少而长江中下游一带则偏多。此外，Feng et al. (2014) 更为细致地考虑了 PDO 不同位相下 El Niño 衰减年夏季东亚夏季风和我国东部夏季降水的异常特征。在 PDO 正位相，El Niño 衰减年我国东部夏季降水呈现三极型分布，而 PDO 负位相的 El Niño 衰减年我国东部夏季降水呈现两极型分布，这同低层西北太平洋异常反气旋影响范围的变化有关。本文进一步分析了 El Niño 发展年和 La Niña 年东亚夏季风和我国东部夏季降水在不同 PDO 位相下的异常特征，结果表明 PDO 正位相背景使 El Niño 发展年中国北方降水偏少的可能性增大，同时 La Niña 年梅雨偏少在 PDO 处于负位相时可能性也趋向升高。因此，在预测东亚夏季风异常变化时，除 ENSO 信号外，还必须注意到 PDO 的位相。本文的结论深化了 PDO 对 ENSO 信号（特别是 El Niño 发展和 La Niña 阶段）的调制作用以及 ENSO 影

响东亚夏季风的认识，对提高短期气候预测水平也有一定参考意义，而 PDO 对 ENSO 乃至东亚夏季风的具体影响机制则需要后续研究中通过数值模拟实验做进一步探讨。

刊

涉

涉

科

风

涉

涉

科

风

刊

涉

涉

参考文献

- Alexander M, Yin J, Branstator G, et al. 2006. Extratropical atmosphere ocean variability in CCSM3 [J]. *J. Climate*, 19 (11): 2496-2525.
- Bond N A, Overland J E, Spillane M, et al. 2003. Recent shifts in the state of the North Pacific [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30 (23): 2183, doi:10.1029/2003GL018597.
- Chan J C L and Zhou W. 2005. PDO, ENSO and the early summer monsoon rainfall over south China [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32 (8): L08810, doi:10.1029/2004GL022015.
- 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.
- Dong X. 2016. Influences of the Pacific decadal oscillation on the East Asian summer monsoon in non-ENSO years [J]. *Atmos. Sci. Lett.*, 17 (1): 115-120, doi:10.1002/asl.634.
- Dong X, Lin R, Fan F. 2017. Comparison of the two modes of the western Pacific subtropical high between early and late summer [J]. *Atmos. Sci. Lett.*, 18: 153-160, doi:10.1002/asl.737.
- Dong X, Su T H, Wang J, et al. 2014. Decadal variation of the Aleutian low- Icelandic low seesaw simulated by a climate system model (CAS-ESM-C) [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 7 (2): 110–114, doi:10.3878/j.issn.1674-2834.13.0061.
- Dong X, Xue F. 2016. Phase transition of the Pacific decadal oscillation and decadal variation of the East Asian summer monsoon in the 20th century [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 33 (3): 330–338, doi:10.1007/s00376-015-5130-7.
- 董啸, 薛峰, 曾庆存. 2014. 北半球冬季阿留申低压—冰岛低压相关关系的年代际变化及其模拟 [J]. *气候与环境研究*, 19 (5): 523-535. Dong X, Xue F, Zeng Q. 2014. Observational analysis and numerical simulation of the decadal variation in the relationship between the Aleutian low and the Icelandic low during boreal winter [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 19 (5): 523–535, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13021.

- D'Arrigo R, Wilson R. 2006. On the Asian expression of the PDO [J]. *Int. J. Climatol.*, 26 (12): 1607-1617, doi:10.1002/joc.1326.
- Fan Y, Fan K. 2017. Pacific decadal oscillation and the decadal change in the intensity of the interannual variability of the South China Sea summer monsoon [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 10 (2): 162-167, doi:10.1080/16742834.2016.1256189.
- Fan Y, Fan K, Xu Z, et al. 2018. ENSO-South China Sea summer monsoon interaction modulated by the Atlantic Multidecadal Oscillation [J]. *J. Climate*, 31: 3061-3076.
- Feng J, Wang L, Chen W. 2014. How does the East Asian summer monsoon behave in the decaying phase of El Niño during different PDO phases? [J]. *J. Climate*, 27 (7): 2682-2698.
- 符淙斌, 滕星林. 1988. 我国夏季的气候异常与埃尔尼诺/南方涛动现象的关系 [J]. *大气科学*, 12 (S1): 133-141. Fu Congbin, Teng Xinglin. 1988. Climate anomalies in China associated with El Niño/southern Oscillation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 12 (S1): 133-141, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1988.tl.11.
- Gao H, Wang Y G, He J H. 2006. Weakening significance of ENSO as a predictor of summer precipitation in China [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33 (9): L09807, doi:10.1029/2005GL025511.
- Harris I, Jones P D, Osborn T J, et al. 2014. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations-the CRU TS3.10 Dataset [J]. *Int. J. Climatol.*, 34: 623-642, doi:10.1002/joc.3711.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77 (3): 437-471.
- Lau N C, Nath M J. 2000. Impact of ENSO on the variability of the Asian-Australian monsoons as simulated in GCM experiments [J]. *J. Climate*, 13: 4287-4309, doi:10.1175/1520-0442(2000)013<4287:IOEOTV>2.0.CO;2.
- Lin R, Zheng F, Dong X. 2018. ENSO frequency asymmetry and the Pacific decadal oscillation in observation and 19 CMIP5 models [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 35 (5): 495-506, doi:10.1007/s00376-017-7133-z.
- 刘长征, 薛峰. 2010a. 不同强度 El Niño 的衰减过程. I, 强 El Niño 的衰减过程 [J].

- 地球物理学报, 53 (1): 39-48. Liu Changzheng, Xue Feng. 2010a. The decay of El Niño with different intensity. Part I, the decay of the strong El Niño [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 53 (1): 39-48, doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.01.005.
- 刘长征, 薛峰. 2010b. 不同强度 El Niño 的衰减过程. II, 中等和较弱 El Niño 的衰减过程 [J]. 地球物理学报, 53 (11): 2564-2573. Liu Changzheng, Xue Feng. 2010b. The decay of El Niño with different intensity. Part II, the decay of the moderate and relatively-weak El Niño [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 53 (11): 2564-2573, doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.11.004.
- Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, et al. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 78(6): 1069-1079.
- Newman M, Alexander M A, Ault T R, et al. 2016. The Pacific decadal oscillation, revisited [J]. J. Climate, 29 (12): 4399-4427, doi:10.1175/JCLI-D-15-0508.1.
- Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century [J]. J. Geophys. Res., 108, 4407, doi:10.1029/2002JD002670.
- Song F, Zhou T. 2015. The crucial role of internal variability in modulating the decadal variation of the East Asian summer monsoon-ENSO relationship during the 20th century [J]. J. Climate, 28 (18): 7093-7107.
- Wang B. 1995. Interdecadal changes in El Niño onset in the last four decades [J]. J. Climate, 8 (2): 267-285.
- Wang B, Yang J, Zhou T J, et al. 2008. Interdecadal changes in the major modes of Asian Australian monsoon variability: strengthening relationship with ENSO since the late 1970s [J]. J. Climate, 21 (8): 1771-1789.
- Wang H J. 2001. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 18 (3): 376-386.
- Wang H J. 2002. The instability of the East Asian summer monsoon-ENSO relations [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 19 (1): 1-11.
- Wang L, Chen W, Huang R H. 2008. Interdecadal modulation of PDO on the impact of ENSO on the East Asian winter monsoon [J]. Geophys. Res. Lett., 35: L20702,

doi:10.1029/2008GL035287.

- Xue F, Dong X, Fan F. 2018. Anomalous western Pacific subtropical high in El Niño developing summer and its comparison with the decaying summer [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 35 (3): 360-367, doi:10.1007/s00376-016-5281-1.
- Xue F, Fan F X. 2016. Anomalous western Pacific subtropical high during late summer in weak La Niña years: Contrast between 1981 and 2013 [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 33 (12):1351-1360, doi:10.1007/s00376-016-5281-1.
- Xue F, Zhao J J. 2017. Intraseasonal variation of the East Asian summer monsoon in La Niña years [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 10 (2): 156-167.
- 薛峰, 段欣好, 苏同华. 2018. El Niño 发展年和 La Niña 年东亚夏季风季节内变化的比较 [J]. *气候与环境研究*, 23 (3): 321-331. Xue Feng, Duan Xinyu, Su Tonghua. 2018. Comparison of Intraseasonal variation of the East Asian summer monsoon between El Niño developing years and La Niña years [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 23 (3): 321-331, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17044.
- Ye H, Lu R. 2011. Subseasonal variation in ENSO-related East Asian rainfall anomalies during summer and its role in weakening the relationship between the ENSO and summer rainfall in eastern China since the late 1970s [J]. *J. Climate*, 24 (9): 2271-2284.
- Yoon J, Yeh S W. 2010. Influence of the Pacific decadal oscillation on the relationship between El Niño and the northeast Asian summer monsoon [J]. *J. Climate*, 23: 4525-4537.
- Yu L, Furevik T, Otterå O H, et al. 2015. Modulation of the Pacific decadal oscillation on the summer precipitation over East China: A comparison of observations to 600-years control run of Bergen climate model [J]. *Clim. Dyn*, 44 (1): 475-494.
- 杨修群, 谢倩, 朱益民等. 2005. 华北降水年代际变化特征及相关的海气异常型 [J]. *地球物理学报*, 48(4): 789-797. Yang X Q, Qian X, Zhu Y M, et al. 2005. Decadal-to-interdecadal variability of precipitation in North China and associated atmospheric and oceanic anomaly patterns [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 48 (4): 789-797.

- 赵俊杰, 薛峰, 林万涛, 等. 2016. El Niño 对东亚夏季风和夏季降水季节内变化的影响 [J]. 气候与环境研究, 21 (6): 678-686. Zhao Junjie, Xue Feng, Lin Wantao, et al. 2016. The El Niño influence on intra-seasonal variations of East Asian summer monsoon and summer rainfall [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (6): 678-686, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15244.
- Zhou T, Gong D, Li J, et al. 2009. Detecting and understanding the multi-decadal variability of the East Asian summer monsoon-recent progress and state of affairs [J]. Meteor. Z., 18 (4): 455-467.
- 朱益民, 杨修群. 2003. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系 [J]. 气象学报, 61 (6): 641-654, doi: 10.11676/qxxb2003.065. Zhu Yimin, Yang Xiuqun. 2003. Relationships between Pacific decadal oscillation (PDO) and climate variabilities in China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61 (6): 641-654, doi:10.11676/qxxb2003.065.

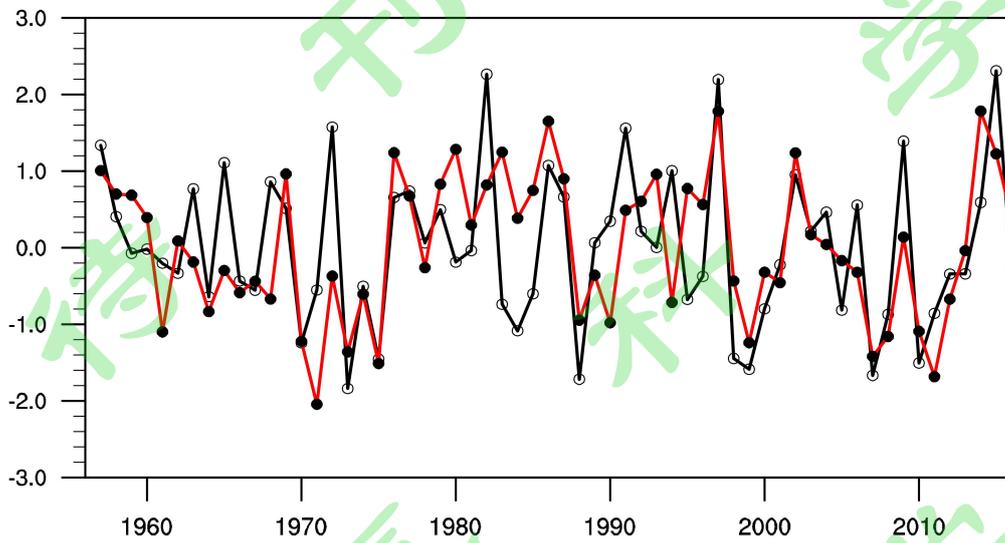


图 1 1957~2017 年标准化的冬季 Niño3.4（黑线）及 PDO（红线）指数

Fig1 The normalized time series of Niño3.4 index (black line) and PDO index (red line) during 1957-2017

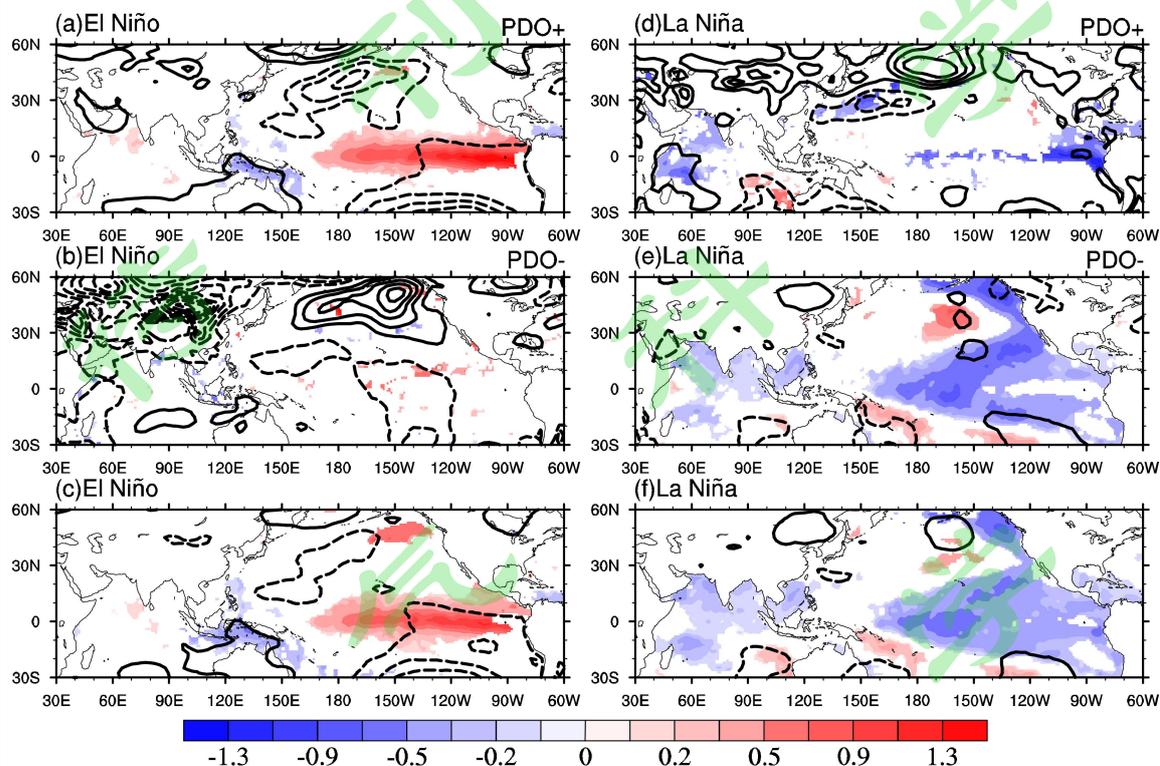


图 2 PDO 正 (+) / 负 (-) 位相下 El Niño 发展年 (a、b)，La Niña 年 (d、e) 以及不考虑 PDO 影响的 El Niño 发展年 (c)、La Niña 年 (f) 夏季平均海表面温度 (单位: $^{\circ}\text{C}$, 填色部分为超过 90% 显著性检验) 及海平面气压异常 (单位: hPa, 等值线间隔 0.3hPa)

Fig 2 Composite anomalies of summer SST (shading; $^{\circ}\text{C}$) and SLP (contour; hPa) for the (a-c) El Niño developing years and (d-f) La Niña years during the high PDO phases (top), low PDO phases (middle) and without PDO (bottom). The red and blue shading indicates the 90% confidence levels based on two-tailed Student's t test. Contour interval is 0.3 hPa, zero lines are omitted

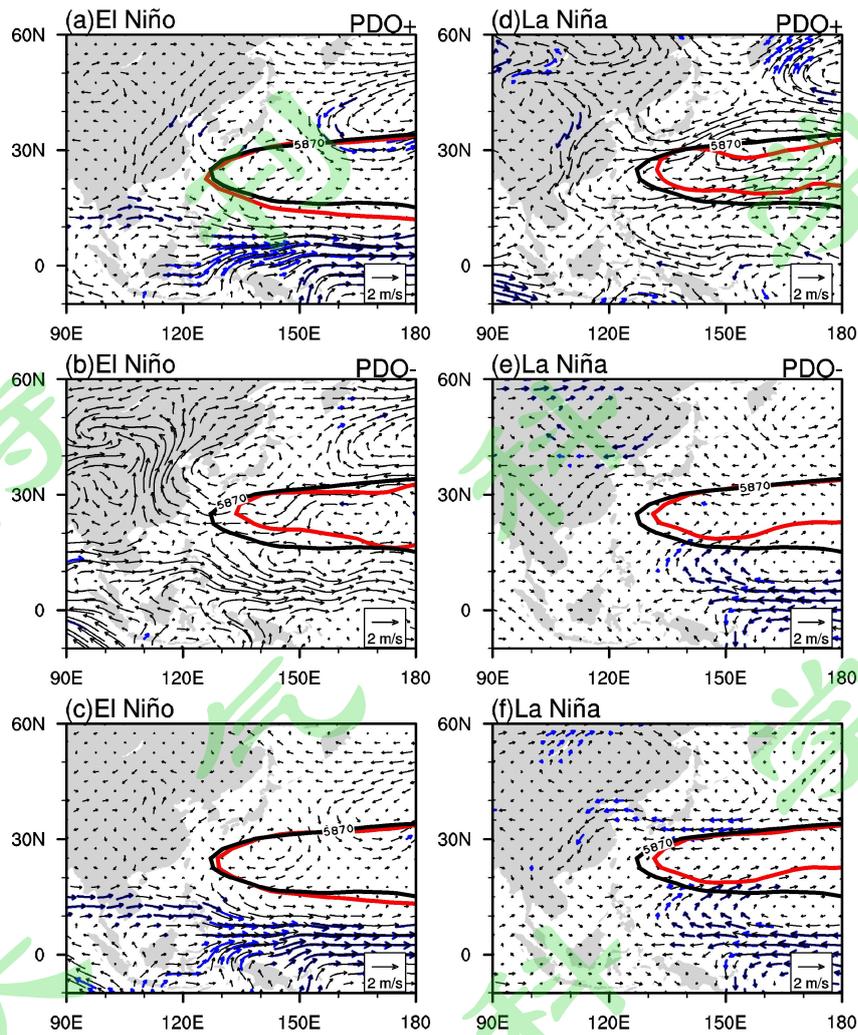


图 3 PDO 正 (+) / 负 (-) 位相下 El Niño 发展年 (a、b)，La Niña 年 (d、e) 以及不考虑 PDO 影响的 El Niño 发展年 (c)、La Niña 年 (f) 夏季平均 850hPa 风场异常 (单位: m/s, 填色部分为超过 90%显著性检验) 及 500hPa 西太平洋副热带高压 (单位: gpm, 黑色和红色等值线分别为气候平均和合成年副高)

Fig 3 Composite anomalies of the summer mean wind (vector; ms^{-1}) at 850 hPa and the location of western Pacific subtropical (red lines indicate by 5870 gpm) for the (a-c) El Niño developing years and (d-f) La Niña years during the high PDO phases (top), low PDO phases (middle) and without PDO (bottom). The blue vector indicates the 90% confidence levels based on two-tailed Student's t test. The black lines for climatology (averaged for the period 1957-2017)

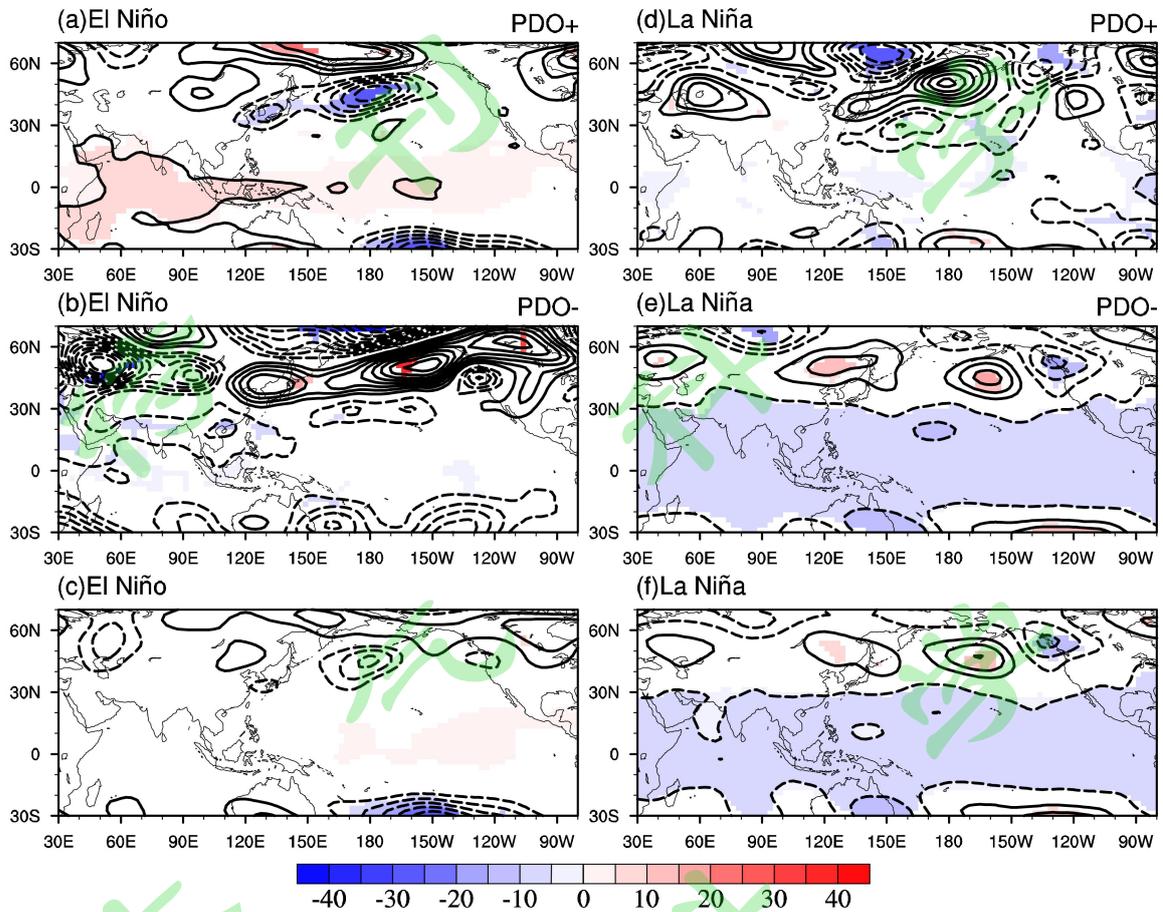


图 4 PDO 正 (+) / 负 (-) 位相下 El Niño 发展年 (a、b)，La Niña 年 (d、e) 以及不考虑 PDO 影响的 El Niño 发展年 (c)、La Niña 年 (f) 夏季平均 500hPa 位势高度异常 (单位: gpm, 等值线间隔 5gpm, 填色部分为超过 90% 显著性检验)

Fig 4 Composite anomalies of the summer 500-hPa geopotential height (gpm) for the (a-c) El Niño developing years and (d-f) La Niña years during the high PDO phases (top), low PDO phases (middle) and without PDO (bottom). The red and blue shading indicates the 90% confidence levels based on two-tailed Student's t test. Contour interval is 5 gpm, zero lines are omitted

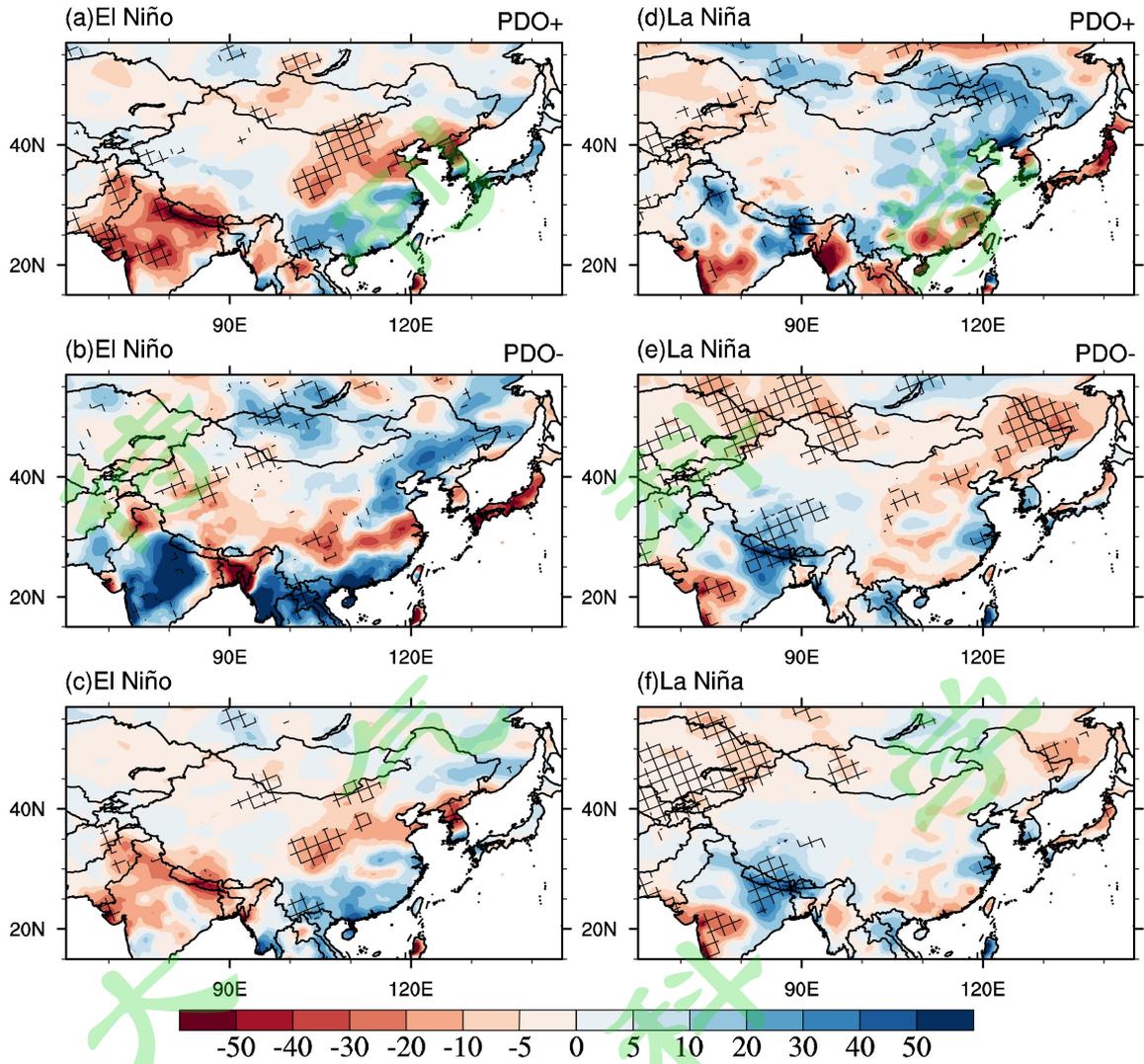


图 5 PDO 正 (+) / 负 (-) 位相下 El Niño 发展年 (a、b)，La Niña 年 (d、e) 以及不考虑 PDO 影响的 El Niño 发展年 (c)、La Niña 年 (f) 夏季平均东亚降水异常 (单位: mm/month)

Fig 5 Composite anomalies of the summer precipitation (shading, mm/month) in East Asian for the (a-c) El Niño developing years and (d-f) La Niña years during the high PDO phases (top), low PDO phases (middle) and without PDO (bottom). Cross denotes indicate the 90% confidence levels based on two-tailed Student's *t* test

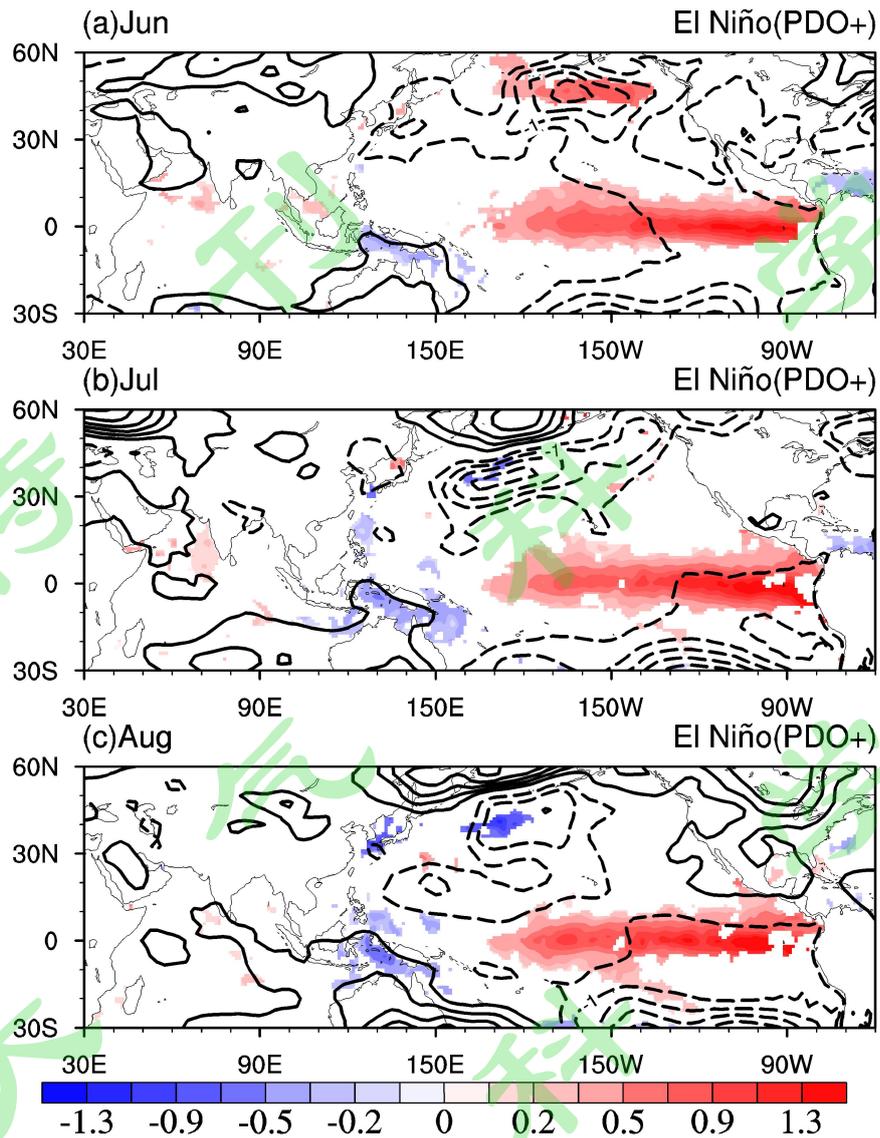


图 6 PDO 正 (+) 位相 El Niño 发展年 6 月 (a)、7 月 (b)、8 月 (c) 平均海表面温度 (单位: $^{\circ}\text{C}$, 填色部分为超过 90% 显著性检验) 及海平面气压异常 (单位: hPa, 等值线间隔 0.3hPa)

Fig 6 Composite anomalies of the SST (shading; $^{\circ}\text{C}$) and SLP (contour; hPa) of June (a), July (b) and August (c), respectively, for the El Niño developing years during the high PDO phases. The red and blue shading indicates the 90% confidence levels based on two-tailed Student's t test. Contour interval is 0.3 hPa, zero lines are omitted

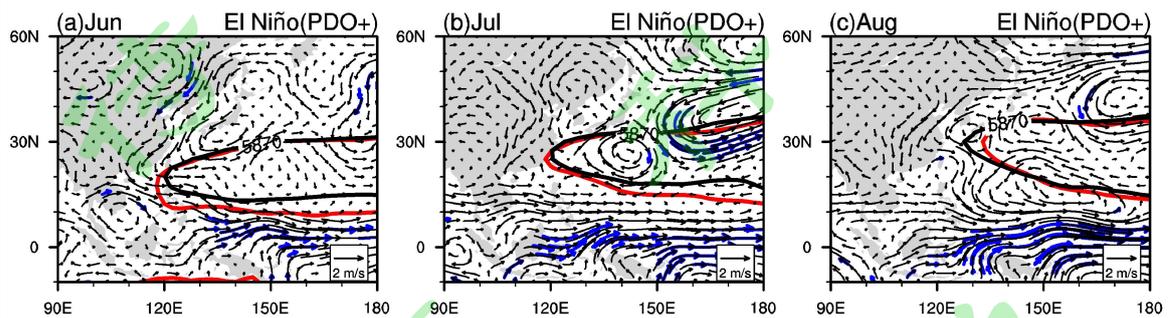


图 7 PDO 正 (+) 位相 El Niño 发展年 6 月 (a)、7 月 (b)、8 月 (c) 平均 850hPa 风场异常 (单位: m/s, 填色部分为超过 90%显著性检验) 及 500hPa 西太平洋副热带高压 (单位: gpm, 黑色和红色等值线分别为气候平均和合成年副高)

Fig 7 Composite anomalies of the mean wind (vector; ms^{-1}) at 850 hPa and the location of western Pacific subtropical (red lines indicate by 5870 gpm) of June (a), July (b) and August (c), respectively, for the El Niño developing years during the high PDO. The blue vector indicates the 90% confidence levels based on two-tailed Student's t test. The black lines for climatology (averaged for the period 1957-2017)

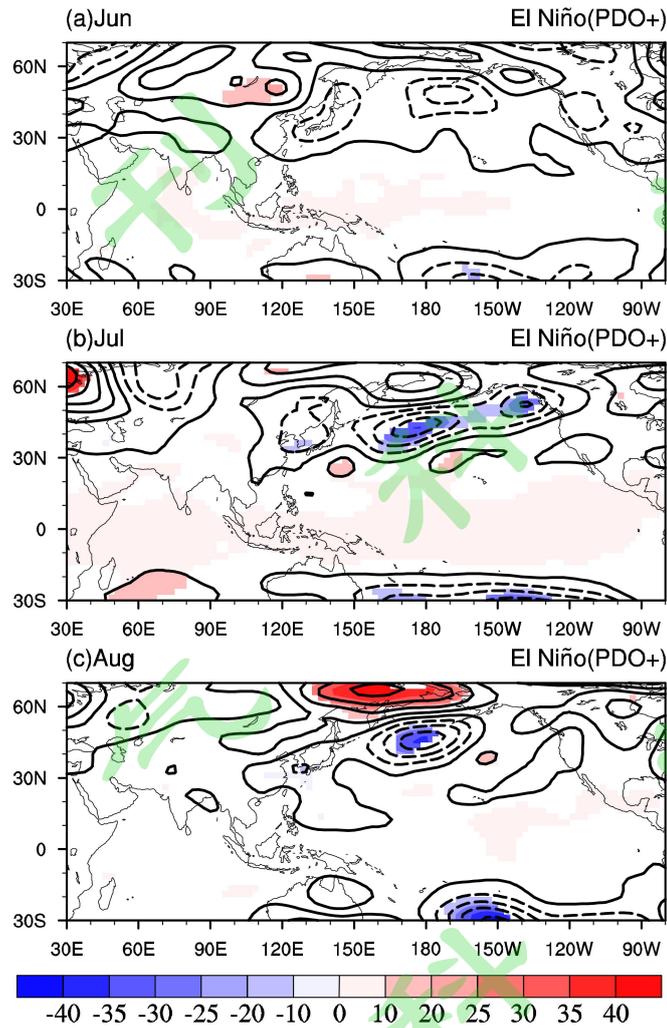


图 8 PDO 正 (+) 位相 El Niño 发展年 6 月 (a)、7 月 (b)、8 月 (c) 平均 500hPa 位势高度异常 (单位: gpm, 等值线间隔 5gpm, 填色部分为超过 90%显著性检验) Fig 8 Composite anomalies of the 500-hPa geopotential height (gpm) of June (a), July (b) and August (c), respectively, for the El Niño developing years during the high PDO phases. The red and blue shading indicates the 90% confidence levels based on two-tailed Student's t test. Contour interval is 5 gpm, zero lines are omitted

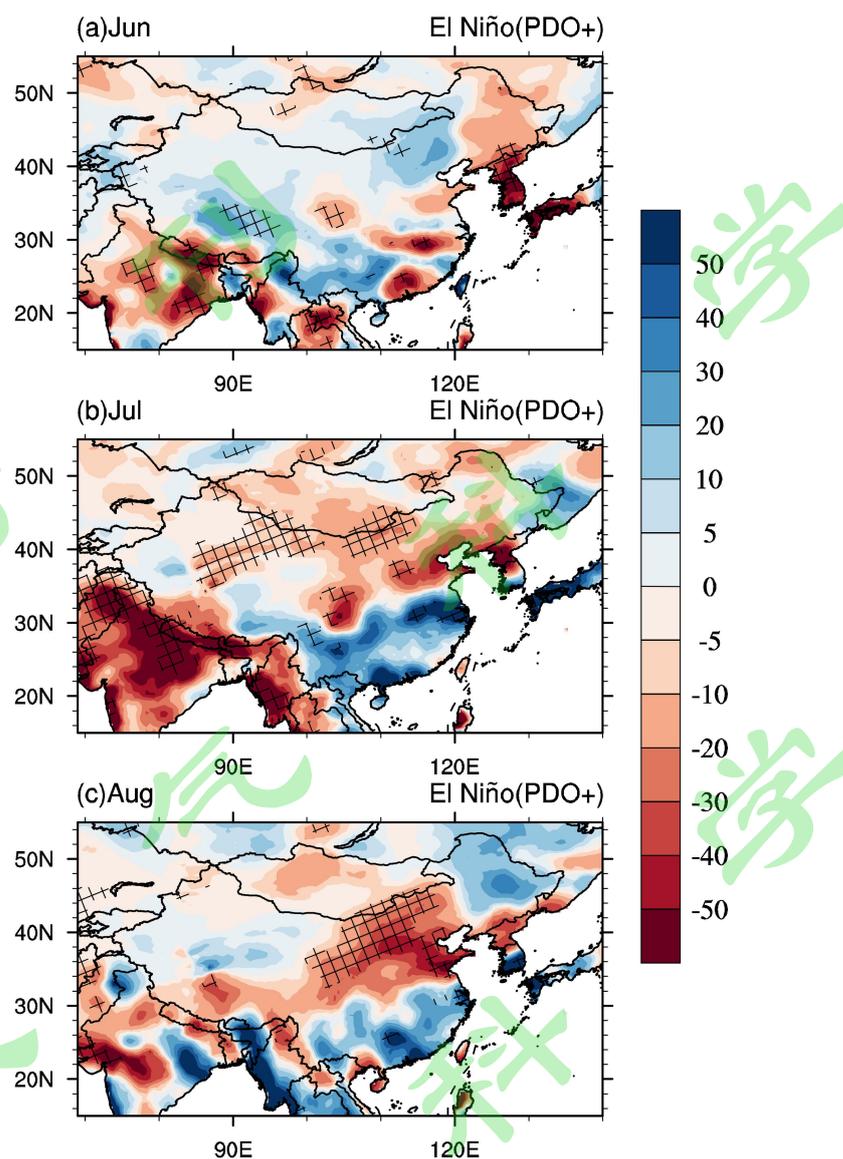


图 9 PDO 正 (+) 位相 El Niño 发展年 6 月 (a)、7 月 (b)、8 月 (c) 东亚降水异常 (单位: mm/month) 合成场

Fig 9 Composite anomalies of the precipitation (shading, mm/month) of June (a), July (b) and August (c), respectively, in East Asian for the El Niño developing years during the high PDO phases. Cross denotes indicate the 90% confidence levels based on two-tailed Student's t test

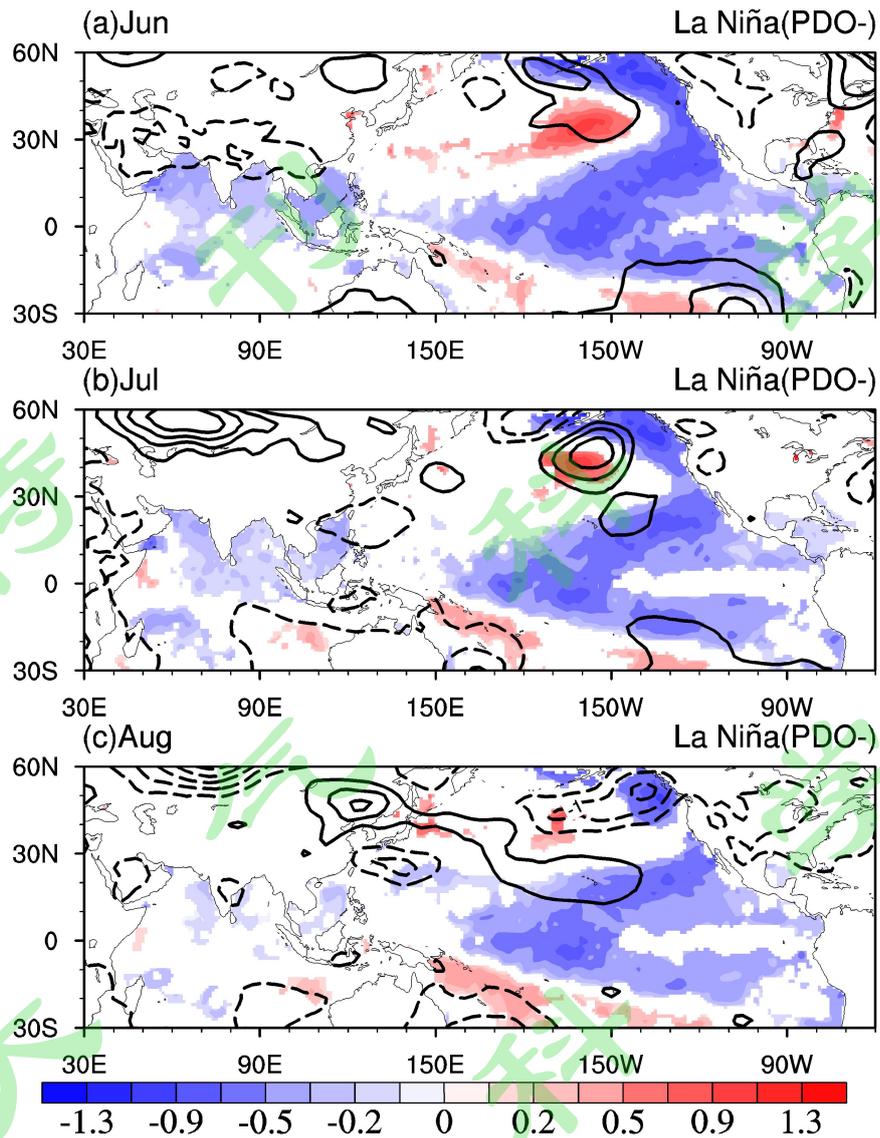


图 10 PDO 负 (-) 位相 La Niña 年 6 月 (a)、7 月 (b)、8 月 (c) 平均海表面温度 (单位: $^{\circ}\text{C}$, 填色部分为超过 90% 显著性检验) 及海平面气压异常 (单位: hPa, 等值线间隔 0.3hPa)

Fig 10 Composite anomalies of the SST (shading; $^{\circ}\text{C}$) and SLP (contour; hPa) of June (a), July (b) and August (c), respectively, for the La Niña years during the low PDO phases. The red and blue shading indicates the 90% confidence levels based on two-tailed Student's t test. Contour interval is 0.3 hPa, zero lines are omitted

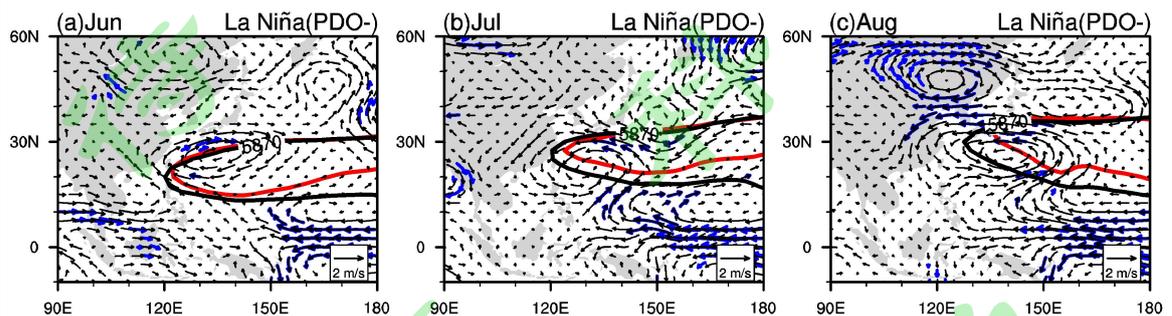


图 11 PDO 负 (-) 位相 La Niña 年 6 月 (a)、7 月 (b)、8 月 (c) 平均 850hPa 风场异常 (单位: m/s, 填色部分为超过 90%显著性检验) 及 500hPa 西太平洋副热带高压 (单位: gpm, 黑色和红色等值线分别为气候平均和合成年副高)

Fig 11 Composite anomalies of the mean wind (vector; ms^{-1}) at 850 hPa and the location of western Pacific subtropical (red lines indicate by 5870 gpm) of June (a), July (b) and August (c), respectively, for the La Niña years during the low PDO. The blue vector indicates the 90% confidence levels based on two-tailed Student's t test. The black lines for climatology (averaged for the period 1957-2017)

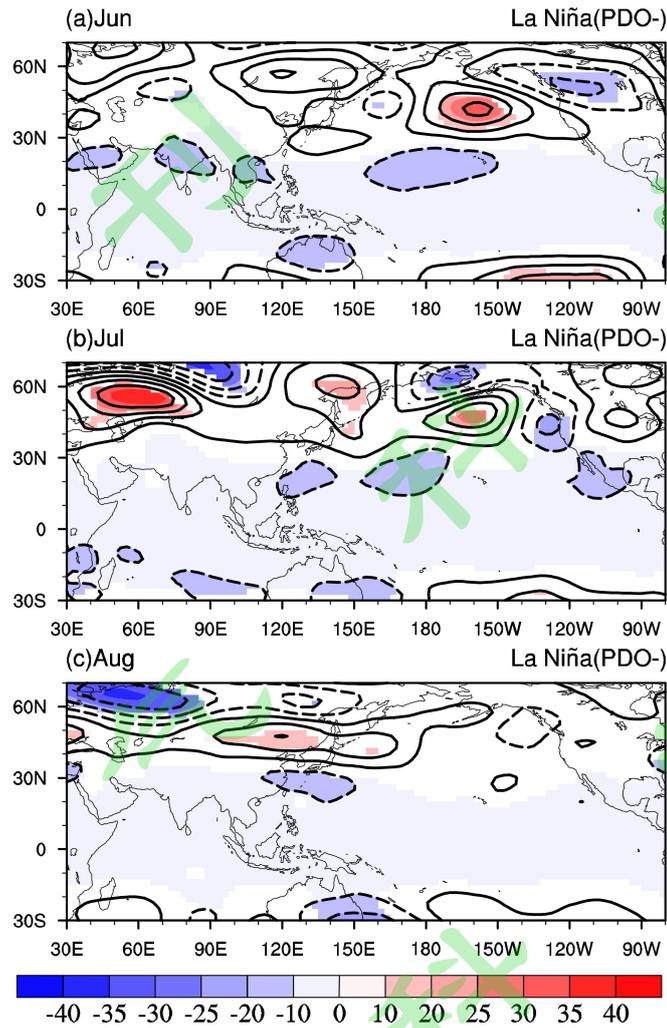


图 12 PDO 负 (-) 位相 La Niña 年 6 月 (a)、7 月 (b)、8 月 (c) 平均 500hPa 位势高度异常 (单位: gpm, 等值线间隔 5gpm, 填色部分为超过 90%显著性检验) Fig 12 Composite anomalies of the 500-hPa geopotential height (gpm) of June (a), July (b) and August (c), respectively, for the La Niña years during the low PDO phases. The red and blue shading indicates the 90% confidence levels based on two-tailed Student's t test. Contour interval is 5 gpm, zero lines are omitted

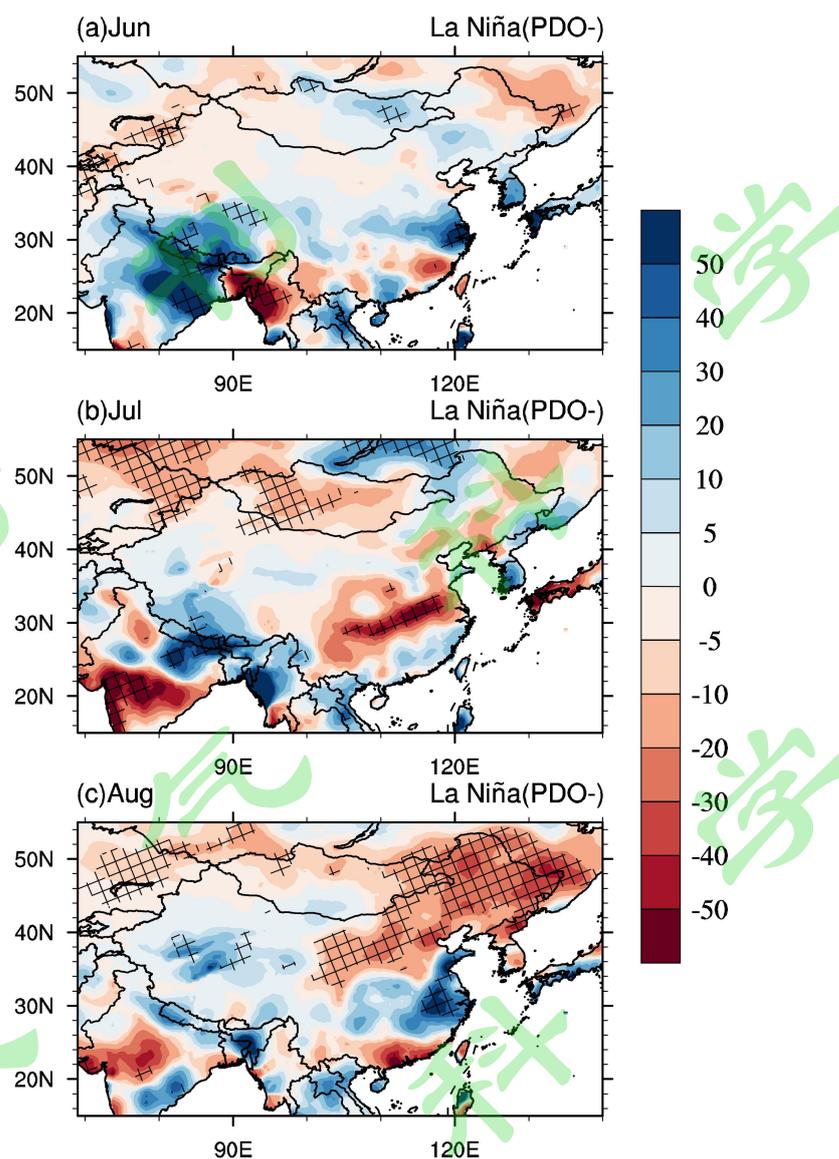


图 13 PDO 负 (-) 位相 La Niña 年 6 月 (a)、7 月 (b)、8 月 (c) 东亚降水异常 (单位: mm/month) 合成场

Fig 13 Composite anomalies of the precipitation (shading, mm/month) of June (a), July (b) and August (c), respectively, in East Asian for the La Niña years during the low PDO phases. Cross denotes indicate the 90% confidence levels based on two-tailed Student's *t* test

	刊	科	游
游		科	
	刊		游
游		科	
	刊		游
游		科	