史霖，陈丽娟，李维京，等，2017. 2015 年汛期我国南方季节内东西反相旱涝型及环流特征[J]. 气象，43(6)：705-715.

2015 年汛期我国南方季节内东西反相旱涝型及环流特征*

史 霖[1] 陈丽娟[2,3] 李维京[2,3] 范广洲[1,3]

1 成都信息工程大学大气科学学院 高原大气与环境四川省重点实验室气候与环境变化联合实验室，成都 610225

2 国家气候中心，中国气象局气候研究开放实验室，北京 100081

3 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心，南京 210044

提 要：本文利用站点数据、再分析数据，采用经验正交函数分解(EOF)、合成分析等统计方法，探讨了 2015 年汛期(4—9 月)内我国南方逐候降水的空间模态及其对应的环流特征。结果表明：2015 年汛期，南方地区汛期总体表现为东西反向降水型，体现了强 El Niño 发展年的一般特征，但进一步分析发现汛期内候尺度东西反向降水型具有多样性特征。对候尺度降水资料 EOF 展开后的第一模态(EOF1)和第三模态(EOF3)为两类东西反相型降水，在对流层高、中、低层都有明显的差异。EOF1 东多西少(A1)型是由低层菲律宾反气旋主导的降水型，副热带高压偏强西伸显著，南亚高压偏强偏东，我国南方东部的大部分地区降水偏多。而 EOF3 的东多西少(A2)型是由热带气旋活动主导的降水型，南海北部为气旋式环流；副热带高压偏强，相对于 A1 型偏东；南亚高压较常年同期偏强、偏东，东南沿海降水偏多。EOF1 的东少西多(B1)型明显受到南下冷空气活动的影响，副热带高压偏强，位置相对偏东，印缅槽增强，有利于南方西部降水偏多。而 EOF3 的东少西多(B2)型是菲律宾反气旋位置异常主导的结果，副热带高压明显偏强偏西，引导水汽到南方西部地区。2015 年汛期内东西反相旱涝型与菲律宾反气旋活动及位置、热带气旋活动及位置、冷空气活动路径有密切的关系，受到多种环流配置的影响。

关键词：汛期，南方，东西反相型，时空变化

中图分类号：P466 **文献标志码**：A **DOI**：10.7519/j.issn.1000-0526.2017.06.007

The West-East Reverse Pattern of Intraseasonal Rainfall and Corresponding Circulations in the 2015 Flood Season

SHI Lin[1] CHEN Lijuan[2,3] LI Weijing[2,3] FAN Guangzhou[1,3]

1 School of Atmospheric Sciences/Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province/Joint Laboratory of Climate and Environment Change, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

2 Laboratory for Climate Studies, National Climate Centre, CMA, Beijing 100081

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

Abstract: Based on the observation and reanalysis data, the spatial mode and corresponding circulation characteristics of precipitation anomaly under pentad scale in Southern China during the 2015 flood season (from April to September) are analyzed by using the methods of empirical orthogonal function (EOF), composite analysis and significance test. The results show that the west-east reverse pattern of precipitation anomaly is the major mode in the developing phases of strong El Niño years and the pentad pattern in 2015 shows similar features. But the pentad scale of precipitation anomaly patterns can be divided into two

* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB430203 和 2015CB453203)、国家自然科学基金项目(41275073)、成都信息工程大学中青年学术带头人科研基金(J201516 和 J201518)共同资助

2016 年 10 月 08 日收稿； 2017 年 4 月 11 日收修定稿

第一作者：史霖，主要从事气候异常诊断分析. Email：447161475@qq.com

通信作者：陈丽娟，主要从事气候异常诊断和短期气候预测方法研究. Email：chenlj@cma.gov.cn

types of west-east reverse patterns by using the first and third EOF mode, and they have obvious differences in upper, middle, lower levels of the troposphere. The precipitation anomaly pattern of more in east and less in west (A1) with the first EOF mode is dominated by the anticyclone activities around Philippines at the low level, but the pattern of more in east and less in west (A2) with the third EOF mode is dominated by tropical cyclone activities. The pattern of less in east and more in west (B1) with the first EOF mode is obviously affected by the moving southward of the cold air activities, but the pattern of less in east and more in west (B2) with the third EOF mode is dominated by abnormal position of the anticyclone activities around Philippines at the low level. The precipitation anomaly features of west-east reverse pattern in Southern China during the 2015 flood season are closely related to the positions of anticyclones around Philippines, tropical cyclone activities and the moving path of the cold air activities.

Key words: flood season, southern China, west-east reverse pattern, spatio-temporal variation

引 言

受亚洲夏季风影响,我国汛期降水的年际变率大,极易发生旱涝灾害,尤其是我国南方地区经济发达,发生旱涝灾害后造成的损失巨大。因此深入认识我国南方汛期旱涝的发生特征、机理,既有科学意义又有防灾减灾的应用价值。

在我国降水空间型分类研究中,东部地区夏季降水一般可分为三类、四类或者更多(廖荃荪和陈桂英,1981;廖荃荪和赵振国,1992;赵振国,1996;1999;孙林海等,2005;许力等,2005;Chen et al,2009)。除了基于月或季节尺度的异常降水的空间型分析之外,还有季节内大尺度低频雨型的研究(任宏利等,2004;左金清等,2009;张玉洁,2014)。其中张玉洁(2014)采用经验正交函数(EOF)与聚类分析相结合的方法,将我国南方地区10 d以上的低频尺度降水划分为5个异常雨型:长江型、江南型、华南型、东南型和少雨型,并做了进一步诊断分析,指出不同于以往的季节平均雨型,低频雨型可在季节内交替出现,能够反映大尺度异常降水的低频演变特征,并且具有不同于季风雨带的异常变化行为。低频尺度的雨型分析和环流特征有助于在更短时间尺度上理解汛期降水的变率和相应的环流特征。

我国南方降水还存在多时间尺度变化特征。有20～40年左右的年代际振荡(赵平和周秀骥,2006;赵振国等,2008),在20世纪80年代之前,多雨带位于华北地区,其后逐渐南移到江淮地区,形成"南涝北旱"现象(宇如聪等,2008)。南方降水还有很清晰的年际变率和季节变化特征(陈丽娟等,2013a;李维京等,2016),这些变化特征和海温、积雪、极冰等外强迫信号有密切的联系(陈丽娟等,2013b;贾小龙等,2013;Ren et al,2016;李维京等,2016)。我国南方降水还表现出明显的季节内振荡特征,从华南的季风爆发前降水至梅雨期降水,到雨带北移至东北,再到9月以后台风活动导致的降水,都有较为明显的20和40 d振荡(Lau et al,1988)。而长江中下游地区降水的季节内振荡最为显著(黄菲等,2008)。Yang and Wang(2010)通过功率谱分析证明长江中下游地区夏季在15 d和20～30 d尺度上有两个峰值,且这两个尺度的低频降水分量占总降水的比例超过50%。对南方降水进行多时间尺度的分析也有利于深入理解天气气候异常的深层原因。

我国南方地区降水的空间型一般可归为2～3类,其中春、夏季降水异常第一、第二模态分别为全区一致型和南北反向型,东西反向型异常模态均为第三模态(李维京等,2015)。1965年以来的El Niño发展年南方汛期降水距平百分率进行合成,发现空间分布的优势模态为东西反向型。而2014年9月至2016年4月,热带中东太平洋发生一次超强El Niño事件,该次事件经历了发展—维持—再次发展—盛期—衰亡的过程,持续时间、峰值强度和累计海温距平强度等指标均超过了1982/1983年以及1997/1998年两次超强El Niño事件(邵勰和周兵,2016)。本次超强El Niño事件对全球和中国气候造成了显著影响(陈丽娟等,2016;邵勰等,2016;袁媛等,2016;翟盘茂等,2016)。处于El Niño事件发展时期的2015年汛期,我国北方阶段性干旱突出,南方暴雨频发,总体表现为北旱南涝的特征(司东等,2016)。但是更细致的分析发现,南方汛期(4—9月)降水异常总体呈东多西少的特征,这种特征在前汛期(4—6月)更明显,说明2015年在El Niño发展

年背景下,汛期以东西反向型异常降水为主模态。而实际上,南方降水的东多西少与东少西多空间型存在季节内变化,其对应的环流特征也分成两类。此外南方汛期在季节内除经历东西旱涝反相外,还有南北旱涝反相等空间型的阶段性变化。为了进一步认识在超强 El Niño 事件发生时,我国南方季节内旱涝空间型的主要变化特征及其影响系统,本文以 2015 年汛期为研究对象,重点分析南方季节内旱涝空间型的变化及对应的环流特征,探讨旱涝空间型变化的形成机理。

1　资料和方法

本文使用了 1951—2015 年的中国逐日降水观测资料,数据来源于国家气象信息中心整编的中国地区观测气候数据集,定义 30°N 以南的区域为我国南方地区,提取出无缺测的共 52 个测站资料。本文还使用了 1951—2015 年美国气象环境预报中心(NCEP)和美国国家大气研究中心(NCAR)提供的 2.5°×2.5°水平分辨率的位势高度场、水平风场、水汽场、OLR 场等的逐日再分析资料(Kalnay et al,1996)和美国国家海洋大气署(NOAA)提供的 1°×1°水平分辨率的 1981—2015 年逐日海温资料(Reynolds et al,2007)。利用国家气候中心定义的环流指数,分析了西太平洋副热带高压指数(简称副高指数,刘芸芸等,2012)与 2015 年南方降水的关系。

利用经验正交函数(EOF)对南方区域降水距平进行分解,对分解出的模态依据 North et al(1982)准则进行独立性检验。为了体现降水实际空间变化的量值,采用吴洪宝和吴蕾(2010)的方法对各特征向量进行了变换,并将特征向量每个站点变换后的值都除以该站点降水的气候平均值以化为距平百分率的形式。此外还利用合成分析方法,并对统计结果进行 t 检验(魏凤英,2007)。

文中的气候平均值为 1981—2010 年的平均值。本文分析的南方汛期为 4—9 月。

2　2015 年汛期我国南方季节和月尺度降水空间分布特征

大量研究表明,ENSO 事件的不同阶段对我国夏季降水有不同影响。El Niño 发展期的夏季,西太平洋副高偏弱、偏南,影响我国的西南气流偏弱,东亚夏季风偏弱,我国夏季主要季风雨带偏南(符淙斌和腾星林,1988;Huang and Wu,1989;顾薇,2016),而在 El Niño 事件影响次年夏季降水的过程中,印度洋海温起到重要的作用(Yuan et al,2008;袁媛等,2017)。La Niña 发展阶段的夏季对应着强的东亚夏季风,我国夏季华北和江南往往多雨(倪东鸿等,2000;陈文,2002)。而 2014—2015 年的 El Niño 事件发展演变具有特殊性(邵勰和周兵,2016)。2015 年夏季继续维持 El Niño 状态,同时,印度洋海温也从 2015 年 3 月迅速增暖。El Niño 状态的维持和热带印度洋海温偏暖共同导致 2015 年夏季副高偏强偏西偏南,菲律宾反气旋显著,东亚夏季风偏弱,我国东部夏季降水呈“北少南多”型(陈丽娟等,2016)。但是聚焦到南方地区,可以看到南方汛期(4—9 月)降水与常年同期相比(图 1a),总体为东多西少型,即呈现出江南、华南北部偏多而西南偏

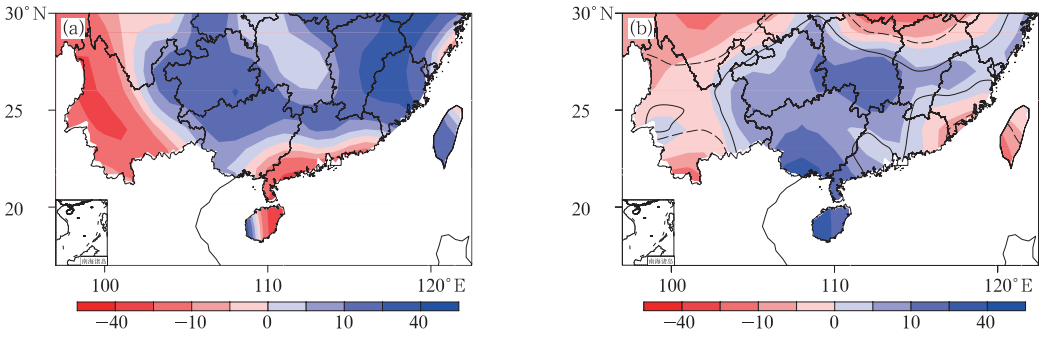

图 1　2015 年(a)、强 El Niño 发展年(b)我国南方汛期(4—9 月)降水距平百分率合成图(单位:%)
(等值线包围区域表示通过 0.10 的显著性水平检验)

Fig. 1　Distribution of precipitation anomaly percentage (unit: %) in Southern China during flood season (from April to September) of 2015 (a), developing phases of strong El Nino (b)
(Areas encircled by lines indicate that the anomalies are above the 0.10 significance test level)

少的异常分布，降水正异常中心位于江南地区。该分布与强 El Niño 发展年(1982、1987 和 1997 年)的降水分布(图 1b)比较一致。在强 El Niño 发展年，总体呈现出江南、华南西部偏多，而西南地区偏少的异常分布，降水正异常中心位于江南西部到华南西部。可见 2015 年汛期降水总体分布特征符合强 El Niño 发展年的特点，空间分布以东西反向为主。

比较 2015 年汛期各月降水特征，发现逐月降水的空间型变化很大(图略)。其中南方 4 月为东少西多型，5、7 和 9 月为东多西少型。6 月降水正异常中心北移至长江中下游地区，8 月表现为东、西降水与中部相反的鞍型场空间分布。而逐候的降水异常空间型差异更大，对应的环流形势也不同。因此下面将以候尺度为基础，重点对东西反相型空间分布及其对应的环流特征进行分析。

3 2015 年汛期我国南方降水候尺度东西反相型及环流特征

利用 2015 年汛期 4—9 月南方地区的 52 站(30°N 以南)的逐日降水资料处理成候尺度降水距平百分率，进行经验正交函数分解，前三个模态通过了 North 的独立性检验(North et al，1982)，方差贡献分别为：15%、13.5%和 10%。进一步对这三个模态的时间系数进行标准化处理，并根据不同时间系数标准化值定义各模态正、负异常候。由于第一、第三异常模态反映的是东西反相型异常分布，因此重点探讨第一和第三异常模态的环流特征及成因。

3.1 南方降水第一模态降水特征及其成因分析

2015 年汛期南方候尺度降水异常第一模态(EOF1)的解释方差为 15.2%。由空间分布(图 2)可见，特征值大值区主要在湖南和广西东部以东的地区。EOF1 的时间系数为正(负)异常时，我国南方贵州、广西以东大部地区降水偏多(少)，而四川、云南等地区降水偏少(多)，分界点位于 106°E 附近，该型和月尺度降水中 4 和 9 月表现的特征接近，定义该模态为东西反相型降水 1 型。

根据该模态标准化的时间系数序列(图 2b)，选取 PC1＞1.0 为模态正异常代表候，PC1＜－1.0 为模态负异常代表候，得到正异常代表候有 4 候(5 月 4 候、7 月 5 候、9 月 4 候和 5 候)，负异常代表候有 4 候(4 月 3 候、4 月 5 候、8 月 5 候和 9 月 3 候)。

3.1.1 大气环流和水汽输送特征

为进一步分析东西反相降水对应的环流特征，分别选取正、负异常代表候对应的对流层高、中、低层环流异常进行合成(图 3)。为方便起见，将南方降水异常第一模态正异常候的合成场命名为东多西少 A1 型，负异常候的合成场命名为东少西多 B1 型。

从 200 hPa 高度场看，对应 A1 型(图 3a)，南亚高压较常年同期明显偏强、偏东，有利于东部降水偏多；对应 B1 型(图 3b)，南亚高压较常年同期偏弱、偏南。500 hPa高度场上，对应A1型(图3c)，欧洲

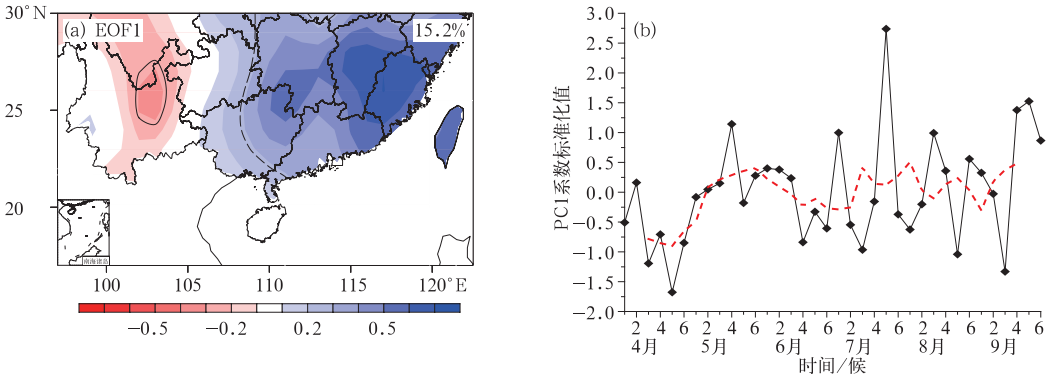

图 2 2015 年汛期我国南方候尺度降水异常 EOF1 的空间分布(a，等值线包围区域线条为通过 0.05 的显著性检验)及标准化时间系数序列(b，虚线为 5 候滑动平均)

Fig. 2 The first EOF mode of pentad scale precipitation anomaly in Southern China during the 2015 flood season (a, Areas encircled by lines indicate that the anomalies are above the 0.05 significance test level) and its normalized time series (b) with 5-pentad running mean (dashed line)

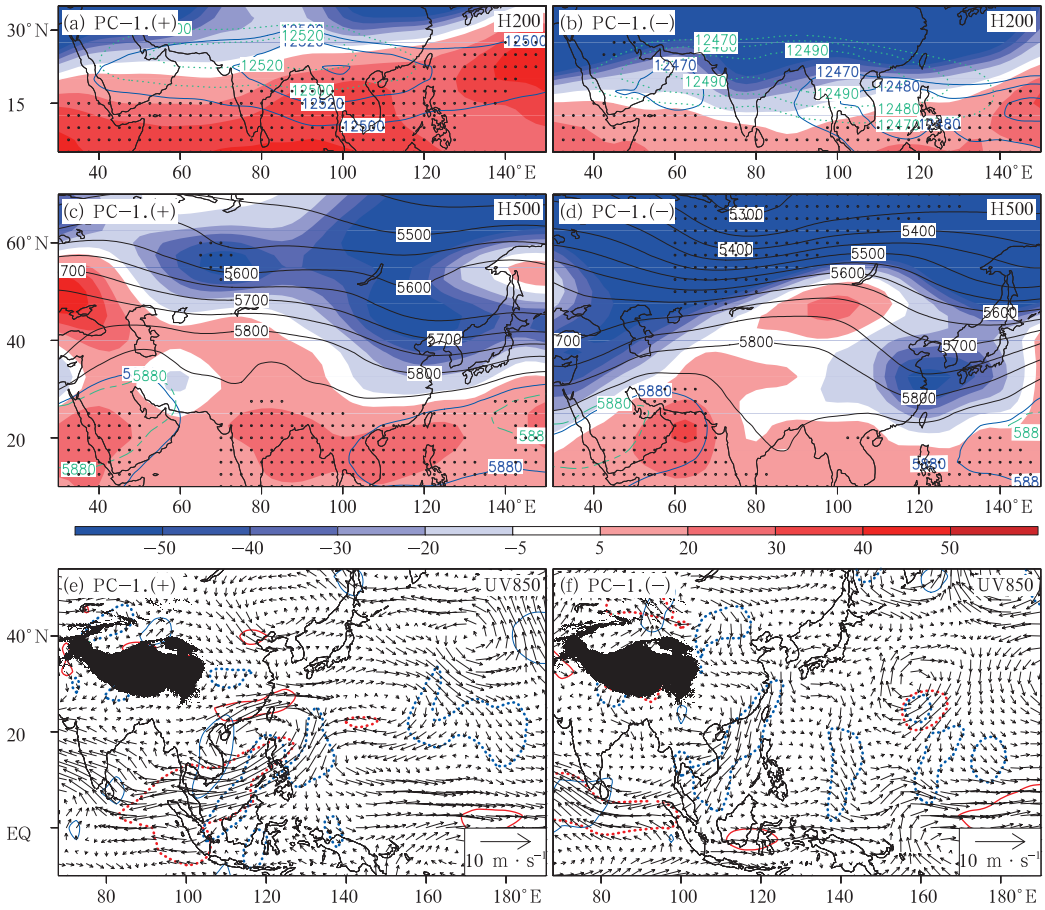

图 3　2015 年汛期我国南方降水候尺度异常 EOF1 A1 型(a，c，e)和 B1 型(b，d，f)合成的(a，b)200 hPa 位势高度场及距平(等值线，蓝实线为 2015 年 200 hPa 南亚高压位置、绿虚线为气候态位置；阴影为距平，单位：gpm)，(c，d)500 hPa 位势高度场及距平(等值线，黑实线为 2015 年 500 hPa 等高线、蓝线和绿虚线分别为 2015 年和气候态下 5880 gpm 等高线；阴影为距平，单位：gpm)，(e，f)850 hPa 风场距平(200 和 500 hPa 合成图上，打点区域表示距平场显著区域；850 hPa 合成图上，红线表示纬向风显著区域，蓝线表示经向风显著区域，均通过 0.10 的显著性水平检验)

Fig. 3　Composite (a, b) 200 hPa geopotential height (The blue solid and green dashed contours respectively denote the position of the 200 hPa South Asia high in 2015 and climatological means) and its anomaly (shaded area, unit: gpm), (c, d) 500 hPa geopotential height (black solid contour) and its anomaly (shaded area, unit: gpm) (The blue solid and green dashed contours respectively denote the 5880 contour in 2015 and climatological means), and (e, f) 850 hPa wind anomaly (arrow) in anomalous (a, c, e) positive and (b, d, f) negative pentads of EOF1 mode of pentad scale precipitation anomaly in Southern China during the 2015 flood season (Dotted areas in Figs. 3a−3d indicate that the anomalies are above the 0.10 significance test level. Areas encircled by red and blue lines in 850 hPa wind field in Figs. 3e, 3f indicate confident zonal and meridional wind anomalies, respectively)

南部以东地区到我国西部地区为正高度距平，乌拉尔山以东地区到鄂霍茨克海以西地区为偏强的低压槽，这种环流型有利于冷空气沿中路南下影响我国东部地区。副高较常年同期偏强、面积偏大，西脊点明显偏西，南方的东部地区受副高西北侧和西南暖湿气流共同作用，有很强的正涡度，有利于东部降水偏多。对应 B1 型(图 3d)，欧亚中纬度地区为“两槽一脊”型的分布，欧洲以东地区到贝加尔湖以西地区为负距平，贝加尔湖南部地区为正高度距平，东北亚地区为负距平，这种环流以纬向为主，冷空气主要沿东路南下影响我国。副高较常年同期偏强，面积偏大，但是相对于 A1 型，有所减弱，且西伸也减弱，相对偏东，从而造成印缅槽有所增强。从 850 hPa 风场来看，对应 A1 型(图 3e)，菲律宾反气旋的主体在

南海北部，南方地区东部受其西北侧的西南气流作用，低层相比西部有充足的水汽输送，同时与沿中路南下的冷空气汇合，有较强的水汽辐合，有利于东部降水偏多；对应 B1 型（图 3f），南方地区东部处于弱的反气旋东侧的偏北风场中，这也是东路冷空气沿近海南下影响的特征，不利于产生降水，而西部受到较强印缅槽的影响，有利于降水偏多。

从水汽条件场可以进一步印证上面的环流分析，A1 型（图 4a）的整层水汽通量散度显示我国南方地区为东负西正，表明水汽输送的配置东部明显强于西部；而 B1 型（图 4b），南方地区整层水汽通量散度异常为西负东正，表明水汽输送的配置西部强于东部，与环流场异常特征相匹配。

从 OLR 场上看，A1 型（图 4c）的南方地区 OLR 场异常分布为东负西正，表明东部地区对流活跃；B1 型（图 4d）的南方地区 OLR 场异常分布东部为正，西部为弱负值，表明东部的对流很弱。

3.1.2 副高的特征

2015—2016 年的超强 El Niño 事件是造成副高持续偏强、偏西的主要原因（陈丽娟等，2016）。即使在这样的背景下，副高仍然存在季节内变率，同时也对应着不同的降水型。

我们分别计算了针对 A1 型和 B1 型的副高特征指数（刘芸芸等，2012）（表 1）。可以看到，即使 2015 年整个汛期的副高都呈现偏强偏西的特征，但是针对 A1 型和 B1 型还是有明显差异。A1 型中菲律宾反气旋更加清晰，表明赤道西太平洋地区的异常下沉运动更强，因此A1型的副高值均强于B1型，

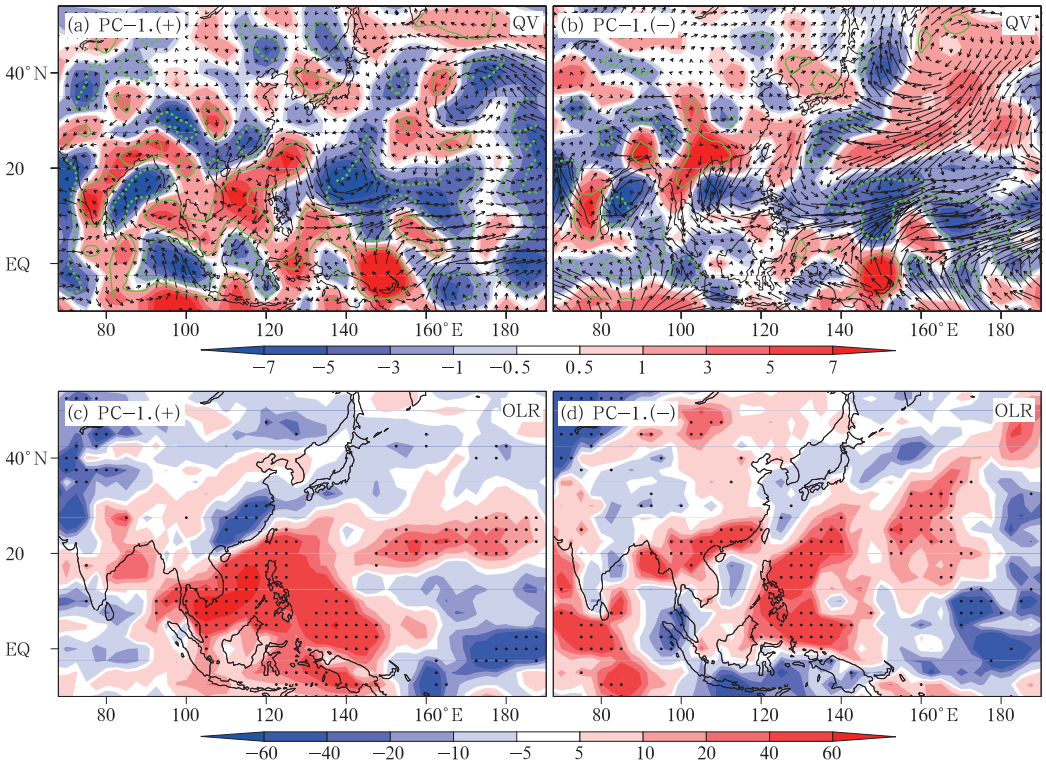

图 4 2015 年汛期我国南方降水候尺度异常 EOF1 A1 型（a，c）和 B1 型（b，d）合成的整层水汽通量（箭头，单位：kg·s^{-1}·m^{-1}）及其散度距平（阴影，单位：10^{-5} kg·s^{-1}·m^{-2}）（a，b），OLR 距平场（阴影，单位：W·m^{-2}）（c，d）

（图 2a，2b 绿线表示整层水汽通量散度显著区域，图 2c，2d 打点区域表示 OLR 距平场显著区域，均通过 0.10 的显著性水平检验）

Fig. 4 Composite (a, b) anomalies of integrated moisture flux (arrow, unit: kg·s^{-1}·m^{-1}) and its divergence (shaded area, unit: 10^{-5} kg·s^{-1}·m^{-2}), (c, d) OLR anomaly (shaded area, unit: W·m^{-2}) in anomalous (a, c) positive and (b, d) negative pentads of EOF1 mode of pentad scale precipitation anomaly in Southern China during the 2015 Flood Season

(Areas encircled by green lines in Figs. 2a, 2b indicate confident integrated moisture flux divergence anomalies. Dotted areas in Figs. 2c, 2d indicate that the anomalies are above the 0.1 significance levels)

表 1　2015 年汛期我国南方降水候尺度异常 EOF1 A1 型和 B1 型对应的副高特征指数

Table 1　Composition of the subtropical high index in anomalous positive (A1) and negative (B1) pentads of EOF1 mode of pentad scale precipitation anomaly in Southern China during the 2015 flood season

副高指数	面积距平	强度距平	脊线距平	西脊点距平
PC1(+)A1	85.5	243.7	−3.8	−39.4
PC1(−)B1	50.5	134.6	−3.3	−15.0

西伸更加显著,但是脊线南北位置的差异并不大。A1 型的副高特征更有利于引导暖湿气流影响南方,造成东部降水偏多。

3.2　南方降水第三模态特征及其成因分析

2015 年汛期南方降水异常第三模态(EOF3)的解释方差为 10.1%。由空间分布图(图 5a)可见,正异常大值区在浙江、福建及广东东部,负异常大值区在广西、湖南、贵州及重庆等地区。即 EOF3 的时间系数为正(负)时,浙江、福建及广东东部降水偏多(少)、广西、湖南及贵州等地区降水偏少(多),分界点位于 115°E 左右,本文将该模态称为东西反相型降水 2 型。

根据该模态的标准化时间系数序列(图 5b)确定异常候,当 PC3＞1.0 为模态正异常代表候,PC3＜−1.0 为模态负异常代表候,则正异常代表候有 3 候(7 月 2 候、4 候和 9 月 6 候),负异常代表候有 3 候(6 月 6 候、8 月 1 候和 9 月 2 候)。

3.2.1　大气环流和水汽输送特征

为了解南方东西反相型降水 2 型的环流特征,对应正、负异常代表候,分析其对流层高、中、低层环流异常合成(图 6)。为方便起见,类似对第一模态的分析,将南方降水异常第三模态东西反相型降水东多西少分布定义为 A2 型,东少西多分布定义为 B2 型。

从 200 hPa 高度场看,A2 型南亚高压较常年偏强、偏东,是有利于东多西少降水异常分布的环流配置(图 6a);B2 型南亚高压较常年偏强、偏北(图 6b),更有利于西部降水。500 hPa 高度场上,A2 型中,欧亚中高纬地区呈现为“西低东高”型分布,欧洲以东地区到贝加尔湖以西地区为负距平,贝加尔湖以东地区到鄂霍茨克海以西地区为正高度距平,这种环流型对应冷空气活动一般较弱。副高较常年偏强、西脊点接近常年(图 6c);B2 型中,欧亚中高纬地区为“西高东低”型分布,欧洲以东地区到贝加尔湖以西地区为正高度距平,贝加尔湖以东地区为偏强的低压槽控制,这种环流型有利于冷空气沿东路南下影响我国。副高较常年同期相比明显偏强,西伸脊点偏西,面积偏大,我国南方的东部地区受副高控制,降水偏少(图 6d)。从 850 hPa 风场看,A2 型中(图 6e),南海北部地区为气旋式环流距平,南方的东部地区低层受到热带气旋活动的影响,有利于东部降水;B2 型中,菲律宾反气旋中心位于海南岛附近,南方的东部地区受菲律宾反气旋控制,不利于产生降水,西部处于菲律宾反气旋西北侧的西南风场中,同时有沿东路南下扩散的冷空气,容易产生降水(图 6f)。

水汽条件上,A2 型(图 7a)在南方地区整层水汽通量散度异常为东负西正,表明水汽输送的配置东部明显强于西部,有利东部降水偏多。B2 型(图 7b),南方地区整层水汽通量散度异常为西负东正,表明水汽输送的配置西部强于东部,与其环流场异常相匹配,有利西部降水偏多。

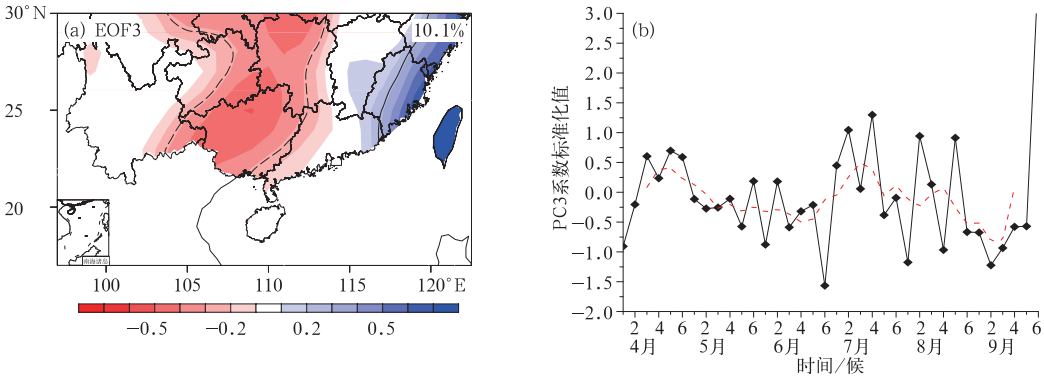

图 5　同图 2,但为 EOF3

Fig. 5　Same as Fig. 2, but for EOF3

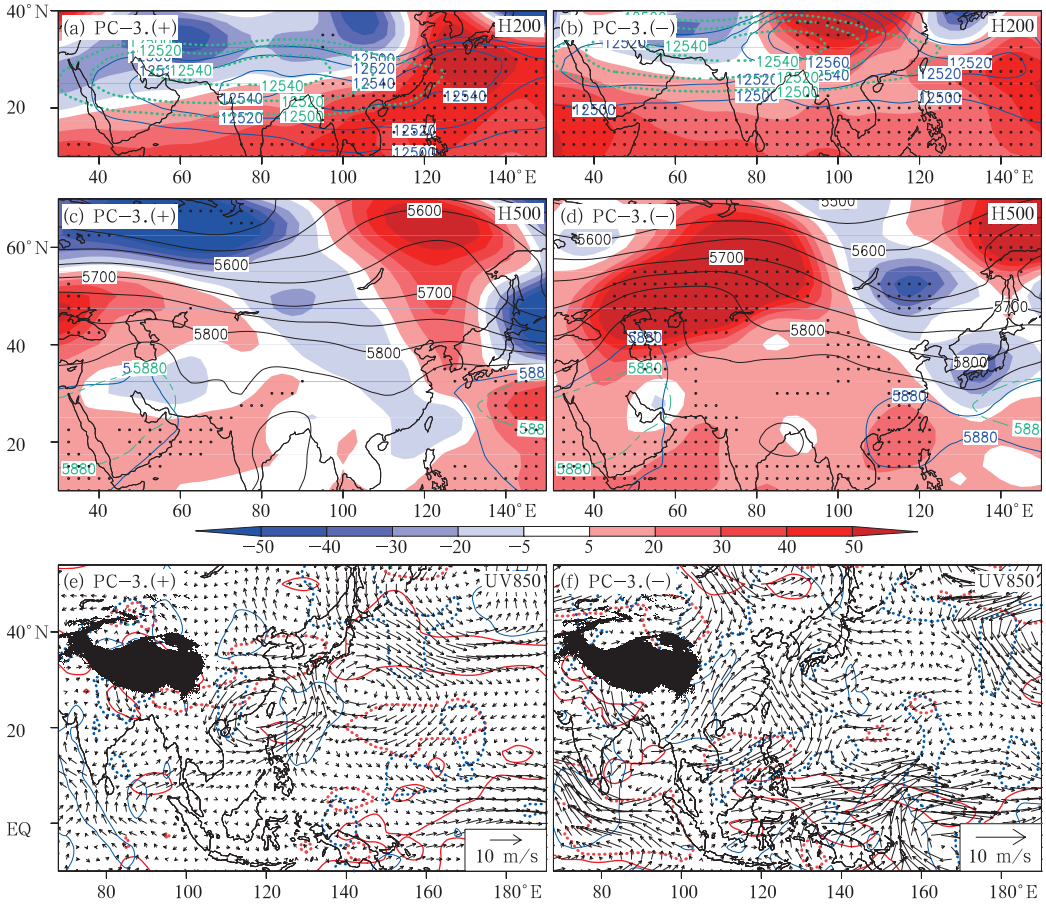

图 6 同图 3，但为 EOF3 A2 和 B2 型

Fig. 6 Same as Fig. 3, but for the A2 and B2 patterns of EOF3

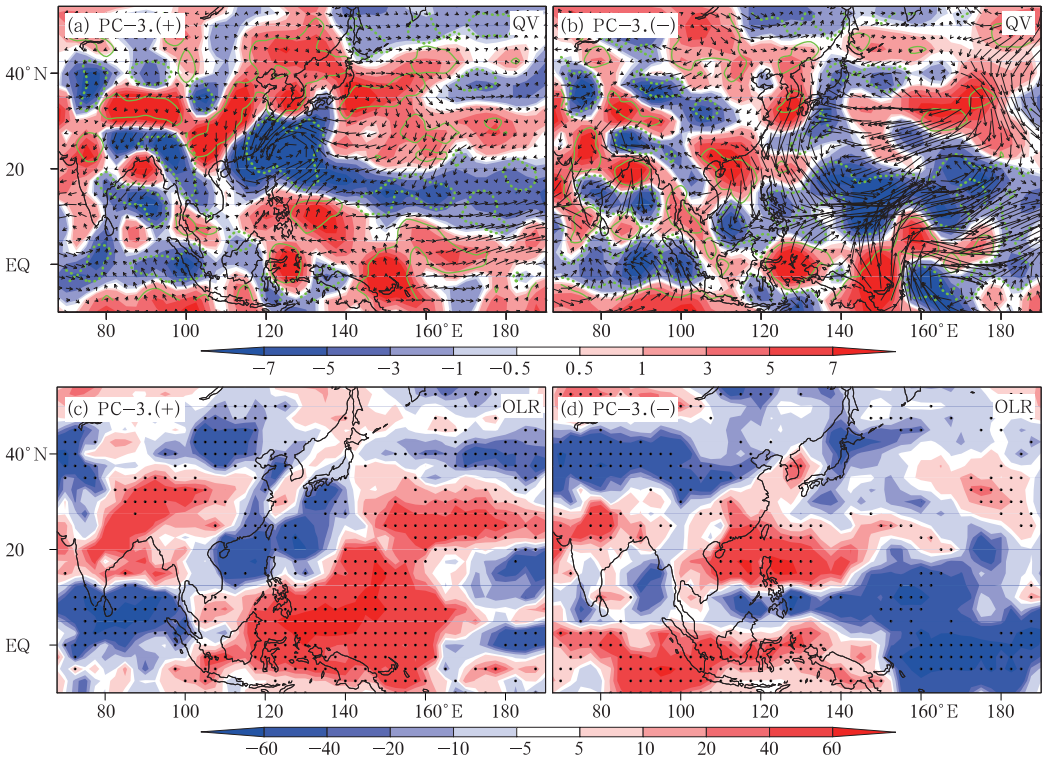

图 7 同图 4，但为 EOF3 A2 和 B2 型

Fig. 7 Same as Fig. 4, but for the A2 and B2 patterns of EOF3

从 OLR 场上看,A2 型(图 7c),南方地区 OLR 场异常分布为东负西正,表明东部对流活跃,有利于降水;而 B2 型(图 7d),异常分布为西负东正,东部对流活动很弱,不利于降水。

3.2.2　副高的特征

同 EOF1 模态的分析一样,计算了对应 A2 型和 B2 型的副高指数(表 2)。对比可见两组结果都表现副高较常年偏强偏南偏西,但是针对 A2 型和 B2 型还是有明显差异,B2 型中菲律宾反气旋更加清晰,表明赤道西太平洋地区的异常下沉运动更强,更有利于加强副高,因此 B2 型的副高西伸更加显著,更有利于引导暖湿气流影响南方西部,造成西部降水偏多;A2 型副高比 B2 型更强,脊线位置差异不大,但是主体位置偏东,这是受到热带气旋活动影响的结果,造成东部降水偏多。

表 2　同表 1,但为 EOF3 A2 和 B2 型

Table 2　Same as Table 1, but for the A2 and B2 patterns of EOF3

副高指数	面积距平	强度距平	脊线距平	西脊点距平
PC3(+)A2	120.0	606.1	−2.1	−12.5
PC3(−)B2	91.7	388.3	−2.9	−34.2

3.3　南方地区两类东西反相型降水及环流特征对比

由上述分析,2015 年汛期候尺度降水特征的主要模态有东西反相型降水,两个模态的环流、水汽条件等特征有较大的差异,梳理结果见表 3 和表 4。

此外,比较 A1 型和 A2 型降水的高中低层环流差异(图 8),可以看到,A1 型,在低层 850 hPa 菲律宾北部为明显的反气旋中心,中层 500 hPa 副高偏强偏南,西伸更加显著,南方的东部大部分地区受副高引导的西南水汽条件的影响造成降水偏多;而 A2 型,在低层南海北部为气旋式环流,中层副高偏强,相对于 A1 型偏东,南方的东部沿海地区受热带气旋活动影响造成降水偏多;A1 型和 A2 型的高层相似,200 hPa 南亚高压均较常年同期偏强、偏东,但 A1 型相对 A2 型略偏南一些(图 8b)。A1、A2 两类降水型的环流差异主要在中低层(图 8a)。

B1 型和 B2 型相比,从低层到高层都有明显的不同。B1 型在低层 850 hPa,南方地区东部处于东路冷空气沿近海南下的偏北风影响;副高较常年同期相比偏强,面积偏大,但是位置相对B2明显偏东,印缅槽相对有所增强;南亚高压较常年同期偏弱、偏南,中心位置偏东。而 B2 型中菲律宾反气旋中心位于海南岛附近,南方的东部地区受反气旋环流控制;副高较常年同期相比明显偏强,面积偏大,西脊点偏西(图 8a);南亚高压较 B1 型明显偏北(图 8c)。

通过以上对比可以看到,对于东多西少型,一种是菲律宾反气旋造成的南方东部的大部分地区降水偏多(表 3,A1 型),另一种是热带气旋活动造成东部沿海地区降水偏多(表 4,A2 型)。而对于东少西多型,一种是南方东部受到南下冷空气造成的偏北风影响(表3,B1型),一种是菲律宾反气旋中心在海

表 3　EOF1 的 A1 型和 B1 型对应影响因子特征对比

Table 3　Major circulation features of the A1 and B1 patterns of EOF1

候尺度异常各系统对比	东多西少(A1 型)	东少西多(B1 型)
高层南亚高压	偏强、偏东	偏弱、偏南
中层欧亚中高纬系统	“西高东低”型	“两槽一脊”型
中层副热带系统	副高偏强、偏西	相对 A1 型,副高偏弱、偏东,印缅槽增强
低层环流配置	菲律宾反气旋主体在南海北部,南方东部水汽充足	南方西部受印缅槽影响,水汽充足
冷空气活动	中路冷空气南下影响南方东部,有利于降水	东路冷空气沿近海南下影响南方东部,不利降水
水汽输送配置	南方东部明显强于西部	南方西部明显强于东部
OLR 场	南方东部对流明显强于西部	南方西部对流强于东部

表 4　EOF3 的 A2 型和 B2 型对应的影响因子特征对比

Table 4　Major circulation features of the A2 and B2 patterns of EOF3

影响因子	东多西少(A2 型)	东少西多(B2 型)
高层南亚高压	偏强、偏东	偏强、偏北
中层欧亚中高纬系统	“西低东高”型	“西高东低”型
中层副热带系统	副高偏强,西伸正常	明显偏强、偏西
低层环流配置	南海北部为气旋式环流,有利于南方东部降水	菲律宾反气旋中心在海南岛附近,不利于南方东部降水
冷空气活动	较弱	沿东路南下影响我国
水汽输送配置	东部明显强于西部	西部强于东部
OLR 场	东部对流强于西部	西部对流强于东部

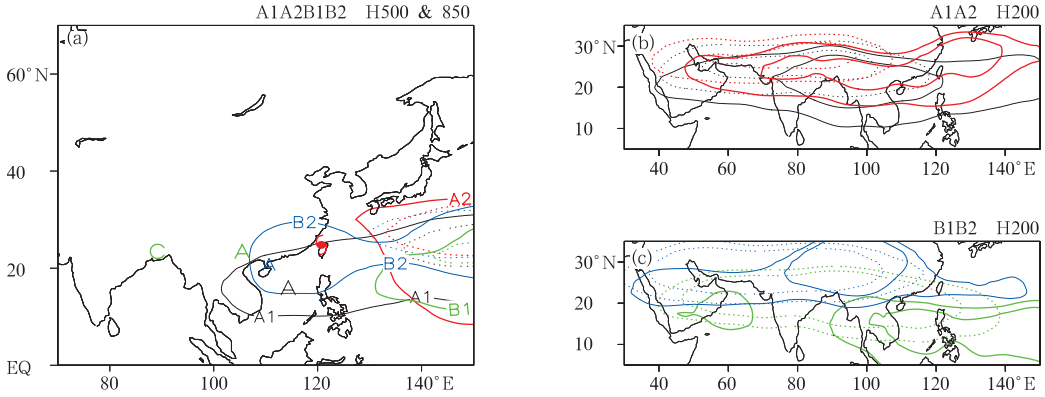

图 8 2015 年汛期我国南方降水 A1 型(黑色)、A2 型(红色)、B1 型(绿色)、B2 型(蓝色)合成的 500 hPa 副高(a)、200 hPa 南亚高压(b,c)位置(实线)及其气候态(虚线)

(字母 A、C 分别表示 850 hPa 风场距平中对应各型反气旋、气旋的中心位置,9表示热带气旋影响中心位置)

Fig. 8 Composite (solid contour) of 500 hPa subtropical high (a) and 200 hPa South Asia high (b, c) and its climatological means (dashed contour) of pentad scale precipitation anomaly in Southern China during the 2015 flood season

(Letters A and C respectively indicate corresponding center positions of various patterns of anticyclones and cyclones at 850 hPa wind anomaly; the 9 indicates the center position of tropical cyclone)

南岛附近造成的影响(表 4,B2 型)。值得关注的是,同样是有菲律宾反气旋环流,但是环流的中心及主体位置不同,使得南方东西反相型降水特征发生明显变化,这一点在监测和预测中都值得关注。

4 结论与讨论

本文利用站点数据和再分析数据对 2015 年强 El Niño 发展背景下,我国南方汛期(4—9 月)内逐候降水的空间模态进行了分析,发现 2015 年南方降水东西反向型是一般强 El Niño 发展年的优势降水模态,但是候尺度降水的优势模态具有多样化特征,进一步深入分析了东西反相型降水及其环流型,主要结论有:

(1) 2015 年 4—9 月的候尺度降水特征中,前三个模态均通过 North 检验,第一模态(EOF1)和第三模态(EOF3)为两类东西反相降水型,反相型的分界线和中心有明显不同。EOF1 中,我国南方贵州、广西以东大部地区降水偏多(少)与四川、云南等地区降水偏少(多)反相,分界点位于 106°E 附近。EOF3 中,浙江、福建及广东东部降水偏多(少)与广西、湖南及贵州等地区降水偏少(多)反相,分界点位于 115°E 左右。

(2) 对南方汛期候尺度两类东西反相型降水,在对流层高、中、低层都有明显的差异。EOF1 的东多西少(A1)型是由低层菲律宾反气旋主导的降水型;同时副高偏强偏南,西伸显著;南亚高压偏强偏东;我国南方东部的大部分地区降水偏多,西部偏少。而 EOF3 的东多西少(A2)型是由热带气旋活动主导的降水型;在低层南海北部为气旋式环流;副高偏强,相对于 A1 型偏东;南亚高压较常年同期偏强、偏东,相对 A1 型略偏北;东南沿海降水偏多,西部大部分地区降水偏少。EOF1 的东少西多(B1)型在低层 850 hPa 明显受到南下冷空气活动的影响;副高较常年偏强,位置相对 B2 型明显偏东;印缅槽相对增强;南亚高压较常年同期偏弱、偏南,中心位置偏东;从而造成南方降水东少西多。而 EOF3 的东少西多(B2)型是菲律宾反气旋位置异常主导的结果,中心位于海南岛附近,南方的东部地区受反气旋环流控制;副高较常年明显偏强,面积偏大,西脊点偏西;南亚高压较 B1 型明显偏北;造成南方东少西多。

本文分析显示,强 El Niño 发展年背景下南方地区汛期容易出现东西反向型异常降水,2015 年在强 El Niño 发展背景下,南方地区汛期内东西反相型及其环流特征具有多样性。东西反相旱涝特征与菲律宾反气旋活动及位置、热带气旋活动及位置和冷空气活动路径及影响有密切的关系,需要在监测和预测中关注这些关键系统及其组合的影响。下一步需要深入研究在 ENSO 循环的不同位相和不同

强度下,我国南方旱涝的空间分布特征及其影响系统。

参考文献

陈丽娟,高辉,龚振淞,等,2013a. 2012 年汛期气候预测的先兆信号和应用[J]. 气象,39(9):1103-1110.

陈丽娟,袁媛,杨明珠,等,2013b. 海温异常对东亚夏季风影响机理的研究进展[J]. 应用气象学报,24(5):521-532.

陈丽娟,顾薇,丁婷,等,2016. 2015 年汛期气候预测先兆信号的综合分析[J]. 气象,42(4):496-506.

陈文,2002. El Nino 和 La Nina 事件对东亚冬、夏季风循环的影响[J]. 大气科学,26(5):595-610.

符淙斌,腾星林,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(增刊):133-141.

顾薇,2016. 夏季热带西太平洋海温对厄尔尼诺发展阶段我国东部汛期降水的影响分析[J]. 气象,42(5):548-556.

黄菲,黄少妮,张旭,2008. 中国降水季节内振荡的气候特征分析[J]. 中国海洋大学学报,38(2):1773-1779.

贾小龙,陈丽娟,高辉,等,2013. 我国短期气候预测技术进展[J]. 应用气象学报,24(6):641-655.

李维京,张若楠,孙丞虎,等,2016. 中国南方旱涝年际年代际变化及成因研究进展[J]. 应用气象学报,27(5):577-591.

李维京,左金清,宋艳玲,等,2015. 气候变暖背景下我国南方旱涝灾害时空格局变化[J]. 气象,41(3):261-271.

廖荃荪,陈桂英,1981. 北半球西风带环流和我国夏季降水[M]. 北京:气象出版社,103-114.

廖荃荪,赵振国,1992. 7—8 月西太平洋副热带高压的南北位置异常变化及其对我国天气的影响[M]. 北京:气象出版社,131-139.

刘芸芸,李维京,艾婉秀,等,2012. 月尺度西太平洋副热带高压指数的重建与应用[J]. 应用气象学报,23(4):414-423.

倪东鸿,孙照渤,赵玉春,2000. ENSO 循环在夏季的不同位相对东亚夏季风的影响[J]. 南京象学院学报,23(1):18-28.

任宏利,高丽,张培群,等,2004. 相空间中划分大尺度异常雨型的初步研究[J]. 气象学报,62(4):459-467.

司东,柳艳菊,邵勰,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(4):481-488.

邵勰,柳艳菊,孙丞虎,等,2016. 2016 年春季我国主要气候特征及其成因分析[J]. 气象,42(10):1278-1282.

邵勰,周兵,2016. 2015/2016 年超强厄尔尼诺事件气候监测及诊断分析[J]. 气象,42(5):540-547.

孙林海,赵振国,许力,等,2005. 中国东部季风区夏季雨型的划分及其环流成因分析[J]. 应用气象学报,16(增刊):56-62.

魏凤英,2007. 现代气候统计诊断与预测技术(第二版)[M]. 北京:气象出版社,27pp.

吴洪宝,吴蕾,2010. 气候变率诊断和预测方法(第二版)[M]. 北京:气象出版社,29pp.

许力,赵振国,孙林海,等,2005. 全国大范围多(少)雨型的划分及环境场特点分析[J]. 应用气象学报,16(增刊):77-83.

宇如聪,周天军,李建,等,2008. 中国东部气候年代际变化三维特征的研究进展[J]. 大气科学,32(4):893-905.

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(5):532-539.

袁媛,高辉,柳艳菊,2017. 2016 年夏季我国东部降水异常特征及成因简析[J]. 气象,43(1):115-121.

翟盘茂,余荣,郭艳君,等,2016. 2015/2016 年强厄尔尼诺过程及其对全球和中国气候的主要影响[J]. 气象学报,74(3):309-321.

张玉洁,2014. 我国南方夏季低频降水的时空特征分析[D]. 南京:南京信息工程大学.

赵平,周秀骥,2006. 近 40 年我国东部降水持续时间和雨带移动的年代际变化[J]. 应用气象学报,17(5):548-556.

赵振国,1996. 厄尔尼诺现象对北半球大气环流和中国降水的影响[J]. 大气科学,20(4):422-428.

赵振国,1999. 中国夏季旱涝及环境场[M]. 北京:气象出版社,27pp.

赵振国,朱艳峰,柳艳香,等,2008. 1880—2006 年中国夏季雨带类型的年代际变化特征[J]. 气候变化研究进展,4(2):15-23.

左金清,任宏利,李维京,等,2009. 我国南方夏季低频雨型的季节内水汽输送特征[J]. 地球物理学报,52(09):2210-2221.

Chen L J, Chen D L, Wang H J, et al, 2009. Regionalization of Precipitation Regimes in China[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2(5): 301-307.

Huang R H, Wu Y F, 1989. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism[J]. Adv Atmos Sci, 6(5): 21-32.

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler, et al, 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. Bull Amer Meteor Soc, 77(3): 437-471.

Lau K M, Yang G, Shen S H, et al, 1988. Seasonaland intraseasonal climatology of summer Monsoon rainfall over East Asia[J]. Mon Wea Rev, 116(1): 18-37.

North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al, 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions[J]. Mon Wea Rev, 110(1): 699-706.

Ren H C, Li W, Ren H L, et al, 2016. Distinct linkage between winter Tibetan Plateau snow depth and early summer Philippine Sea anomalies anticyclone[J]. Atmos Sci Lett, DOI: 10. 1002/asl, 646(3): 117-125.

Reynolds R W, Smith T M, Liu C, et al, 2007. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature[J]. J Climate, 20(22): 5473-5496.

Yang Jing, Wang Bin, Wang Bin, et al, 2010. Biweekly and 21－30 day variations of the subtropical monsoon rainfall over the Lower Reach of the River Basin[J]. J Climate, 23(5): 1146-1159.

Yuan Y, Zhou W, Chan J C L, et al, 2008. Impacts of the basin-wide Indian Ocean SSTA on the South China Sea summer monsoon onset[J]. Int J Climatol, 28(7): 1579-1587.