王娜,顾伟宗,孟祥新,2019. 山东夏季降水年际优势模态及对应大气环流特征[J]. 气象,45(1):99-112. Wang N,Gu W Z,Meng X X,2019. Dominant interannual modes of summer precipitation over Shandong Province and its atmospheric circulation characteristics[J]. Meteor Mon,45(1):99-112(in Chinese).

山东夏季降水年际优势模态及对应大气环流特征*

王 娜 顾伟宗 孟祥新

山东省气候中心,济南 250031

提 要: 本文基于1962—2016年山东省降水资料和JRA-55再分析资料,利用EOF、相关分析和合成分析等方法,研究了山东夏季降水年际分布型态及对应的大气环流形势。结果表明:山东夏季降水的年际型态主要分为全区一致型、西北—东南型和东北—西南型模态。在全区一致偏多(少)年,蒙古高原和日本海呈"东高西低"("西高东低")的环流结构,东亚地区有"－＋－"("＋－＋")分布的类似EAP遥相关型经向波列,阿拉伯海、孟加拉湾和菲律宾低层为异常反气旋式环流。在西北多(少)—东南少(多)年,乌拉尔山阻塞高压和鄂霍次克海阻塞高压活动加强(减弱),沿高空急流轴自西向东有类似"丝绸之路"遥相关型的波列。在东北多(少)—西南少(多)年,在欧亚大陆中西部有"－＋－"("＋－＋")东北—西南向异常波列,热带地区为东(西)风异常。另外,西太平洋副热带高压的南北位置主要影响第一模态、西伸东退主要影响第二模态;三个模态的东亚急流在山东及其附近区域都有位于急流轴南北两侧的偶极子异常结构,但异常中心的位置有所差异。这些结论有助于进一步认识山东夏季降水异常及其环流特征,从而为预测提供参考依据。

关键词: 夏季降水,年际型态,大气环流异常

中图分类号: P461 **文献标志码:** A **DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.01.009

Dominant Interannual Modes of Summer Precipitation over Shandong Province and Its Atmospheric Circulation Characteristics

WANG Na GU Weizong MENG Xiangxin

Shandong Climate Centre, Jinan 250031

Abstract: Based on meteorological data and JRA-55 reanalysis data, the dominant interannual patterns of summer precipitation over Shandong Province and their circulation characteristics were investigated by using the EOF, correlation analysis and composite analysis methods. The results indicate that the spatial distributions of interannual summer precipitation over Shandong Province can be classified into 'consistent distribution', 'northwest-southeast seesaw distribution' and 'northeast-southwest seesaw distribution' modes. In the consistent more (less) precipitation year, there is a dipole anomaly pattern with high (low) pressure over the Sea of Japan and low (high) pressure over Mongolia Plateau; a meridional wave-train resembles EAP teleconnection pattern is distributed as '－＋－' ('＋－＋') over East Asia; the Arabian Sea, the Bay of Bengal and the Philippine regions are characterized by anomalous low level anticyclones. In the years of more precipitation over northwest (southeast) and less precipitation over southeast (northwest) of Shandong, the activities of Ural blocking high and Okhotsk blocking high are enhanced (suppressed) and a wave-train which is analogous to 'Silk Road' teleconnection pattern propagating eastward along the upper westerly jet stream. In the years of more precipitation over northeast (southwest) and less

* 国家自然科学基金项目(41275073)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306033)和山东省气象局气象科学技术研究项目重点课题(2016sdqxz02)共同资助

2017年4月18日收稿; 2018年8月28日收修定稿

第一作者:王娜,主要从事短期气候预测研究. Email:wn5412@163.com

通信作者:顾伟宗,主要从事气候异常诊断和预测方法研究及应用. Email:longmarch529@163.com

precipitation over southwest (northeast) of Shandong, a northeast-southwest wave-train is distributed as '－＋－' ('＋－＋') over western and central Eurasia and the tropical zone is characterized by anomalous east (west) wind. In addition, the 'consistent distribution' mode is mainly influenced by the latitude position of West Pacific subtropical high (WPSH) ridge while the 'northwest-southeast seesaw distribution' mode is largely affected by the westward extending and eastward retreating of WPSH. As for the upper westerly jet stream, a dipole anomaly pattern is located in the south and north sides of jet axis over Shandong and its vicinal region in all of the three modes with position differences of the anomalous centers. These results would be helpful in further understanding anomalous summer precipitation and its atmospheric circulation to improve the predictability of summer precipitation over Shandong Province.

Key words: summer precipitation, interannual pattern, atmospheric circulation abnormal

引 言

山东省东邻太平洋、西连欧亚大陆,位于南北气候的中间过渡带,是气候变化、短期气候预测研究及业务工作的难点区域之一。全省夏季(6—8月)降水占全年降水量的60%以上,降水年际波动大,空间分布型态多变,各地区降水量偏多和偏少的年份相差悬殊。夏季旱涝交替发生,与华北平原频繁干旱、江淮流域频繁洪涝的特征有很大差别,与造成降水异常的各影响因子之间的关系也相当复杂。

已有研究表明,我国夏季降水的长期趋势在北方地区更易偏旱、南方地区更易偏涝(Zhang et al,2012;李维京等,2015),山东省大部地区年降水量在剧烈波动中呈下降趋势,夏季的减幅最大,20世纪80年代之前夏季年际降水以偏多为主,强度偏强,出现洪涝的概率较大,80年代之后呈相反特征(廉丽姝等,2006;迟竹萍,2009;董旭光等,2014)。中国夏季降水有三种主要雨带类型,山东省西北地区和半岛北部处于Ⅰ型雨带的东南边缘,南部地区处于Ⅱ型雨带的东北边缘,Ⅰ、Ⅱ型雨带发生时山东省降水分别呈"北多南少"和"南多北少"的空间分布,全国雨带的轻微变动都会造成省内降水年际、年代际分布型的巨大差异(赵振国,1999;魏凤英等,2012)。山东省夏季降水的空间分布型可以划分为6类,其中同多型主要出现在20世纪60年代前期、90年代中前期和21世纪初(胡桂芳,2011)。降水多寡受诸多因素协同影响,海温异常是关键的外强迫信号之一(黄荣辉和孙凤英,1994;Wang et al,2000;余贞寿等,2005;陈丽娟等,2016;邵勰和周兵,2016;袁媛等,2016;2017a;孟祥新等,2017;顾薇,2016;岳如画和徐海明,2017),中高纬和低纬地区大气环流异常对旱涝的形成起着重要作用(Zhang et al,2009;Ding et al,2014;崔童等,2015;高辉等,2017;袁媛等,2017b)。20世纪50年代至70年代后期,热带西太平洋海面温度变化为正异常,夏季降水在长江以南地区偏多,之后则相反。在El Niño的发展阶段,当热带西太平洋海温偏冷(暖)时,夏季降水容易出现以长江为界"南少北多"("南多北少")的分布特征。在El Niño衰减年的夏季,西太平洋副热带高压(以下简称副高)偏强偏西,影响我国的西南水汽输送偏强,而东亚夏季风偏弱,易导致长江流域降水偏多。热带西太平洋暖池增暖时,菲律宾周围上空的对流活动增强,副高位置偏北,黄河流域降水偏多。山东省涝(旱)年,东亚夏季风偏强(弱),副高偏北(南),山东上游易维持低压槽区(高压脊区);7月,当低纬地区的南海、菲律宾等地高度场偏低,副高西部在朝鲜半岛、日本岛附近与西风带高压脊叠加,冷暖空气易在山东省交汇形成降水(高安春等,2006;李君等,2009;顾伟宗等,2012)。

现有的研究主要针对山东夏季降水全省平均的情况,本文在前人研究的基础上,试图回答以下两个问题:(1)山东夏季降水的年际分布存在哪些主要类型,每种类型有哪些典型年份?(2)每种降水模态的大气环流特征是什么,怎样理解相应的环流形势?通过上述研究以期解释导致山东夏季旱涝异常的环流因素,并为降水预测提供参考依据。

1 资料和方法

本文用到的资料包括:(1)山东省102站逐月降水量资料;(2)JRA-55再分析资料,水平分辨率为

1.25°×1.25°,包括逐月的多层位势高度场、纬向风场、经向风场、辐散风、相对涡度、速度势、垂直速度和整层大气纬向水汽通量、经向水汽通量(Onogi et al,2007;Kobayashi et al,2015)。研究的时段是1962—2016 年夏季(6—8 月),文中各变量气候标准值均采用 1981—2010 年平均。

本文采用经验正交函数(Empirical Orthogonal Function,EOF)分解方法对山东夏季降水进行时空分解。EOF 是气候科学研究中分析变量场特征的主要方法之一,基本原理是把原变量场分解为正交函数的线性组合,构成为数较少互不相关的典型模态来描述原始变量场,这几个空间分布模态能基本涵盖原变量场的信息,每个典型模态也都包含了尽量多的原始场信息(魏凤英,2007)。EOF 分解方法要求研究时段内资料完整,在运算时利用 102 个没有数据缺测的台站资料。

由于变量场的空间点数大于样本量,本文利用 North et al(1982)提出的计算特征值误差范围的方法来检验分解出的经验正交函数是有物理意义的信号还是无意义的噪声。特征值 λ_j 的误差范围为:

$$e_j = \lambda_j \sqrt{2/n} \tag{1}$$

式中 n 为样本量。当相邻的特征值 λ_{j+1} 满足:

$$\lambda_j - \lambda_{j+1} \geqslant e_j \tag{2}$$

就认为这两个特征值所对应的经验正交函数有价值。

本文还使用了气象上常用的九点二次平滑法来讨论降水量距平百分率时间序列的年代际变化情况,利用相关分析和合成分析方法来讨论山东夏季降水异常及其大气环流特征,并用 t 检验法来检验显著性(魏凤英,2007)。

2　山东夏季降水的客观分型

利用年际时间演变序列、标准差空间分布和 EOF 分解等统计方法确定山东夏季降水的年际优势模态,并选取各个异常型态的典型年份。

降水量距平百分率的时间演变曲线(图 1a)显示,山东夏季降水的年际变化显著并表现出年代际的阶段性特征,20 世纪 60 年代至 70 年代初降水量经历了先减小后增加的年代际波动,这一阶段有较强的年际跃变,之后到 80 年代中期的年际波动相对平缓且呈振荡减小趋势,80 年代末到 21 世纪初的年际振荡加强,随后年际波动减弱且以偏多为主,近几年降水量存在由偏多转为偏少阶段或进入年际振荡活跃期的可能性。山东夏季降水标准差空间分布(图 1b)呈现由东南到西北递减的整体特征,表明降水在东南部比西北部的变化幅度大。

对降水量距平百分率进行 EOF 分解,经计算,前 4 个特征向量通过了 North 显著性水平检验。前 3 个特征向量(简称为 PC1～PC3)的累计解释方差为 65.3%,基本上体现了山东夏季降水的年际空间分布特征。PC1 方差贡献率为 45.6%,呈现全区一致变化的特征(图 2a),载荷向量的大值区位于山东北部和中部地区,可以根据这一模态的正负位相将年际降水划分为一致偏多型和一致偏少型。PC2 方差贡献率为 12.9%,呈现西北—东南反位相变化的特征(图 2b),可以根据它的正负位相将年际降水划分为西北多—东南少型和西北少—东南多型。PC3

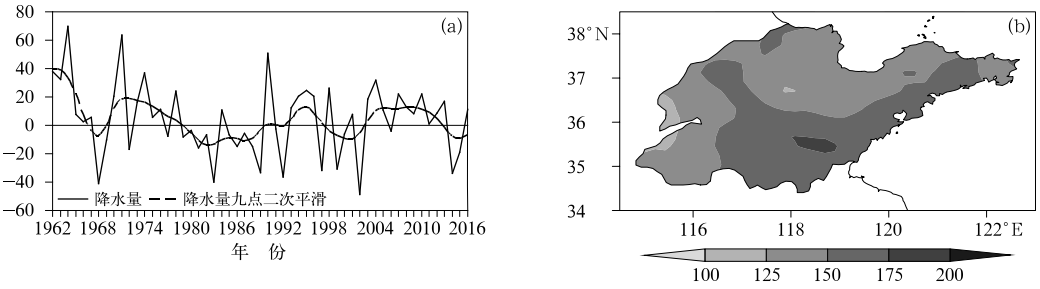


图 1　山东夏季降水量的距平百分率年际时间演变曲线(a,单位:%)和标准差空间分布(b,单位:mm)

Fig. 1　Anomaly percentage time series (a, unit: %) and standard deviation spatial distribution (b, unit: mm) for the summer precipitation over Shandong Province

方差贡献率为6.8%，呈现东北—西南反位相变化的特征(图2c)，可以根据它的正负位相将年际降水划分为东北多—西南少型和东北少—西南多型。前3个模态的解释方差都超过5%，且具有统计检验的物理意义，同时也是业务工作中需要诊断和预测的重点模态，因此本文给出详细的研究结果。

以前研究通常以EOF各个模态标准化时间序列的某一数值作为阈值(如+1.0和-1.0)挑选正位相年和负位相年，但有些年份会出现几个模态时间系数接近的情况，并且EOF的模态越靠后异常年份的参考价值越小。为了解决这个问题，文中进一步采用三个步骤选取各个模态正负位相的典型年份：首先，计算历年降水量距平百分率与EOF第一模态特征向量的空间符号一致率，规定符号一致率≥80%为全区一致模态的偏多年份、≤20%为全区一致模态的偏少年份；其次，计算其他各年降水量距平百分率与EOF前3个模态特征向量的相关系数，去除3个相关系数全部通过或全部未通过0.02显著性水平检验的年份(如1980年)；最后，规定剩余年份中相关系数绝对值最大的模态为该年的降水模态，相关系数的正负号对应模态的正负位相。表1和图3分别给出6种年际降水型态的相应年份以及各型态的降水量距平百分率合成场。

表1 山东夏季降水6种型态的异常年份

Table 1 Anomalous years for six summer precipitation patterns over Shandong Province

一致偏多(11年)	一致偏少(10年)	西北多—东南少(9年)	西北少—东南多(7年)	东北多—西南少(6年)	东北少—西南多(4年)
1962	1968	1969	1965	1966	1982
1963	1983	1973	1970	1975	1993
1964	1986	1977	1985	1976	2000
1971	1989	1981	2001	1988	2006
1974	1992	1987	2003	1996	
1978	1997	1991	2007	2011	
1990	1999	2010	2008		
1994	2002	2013			
1995	2014	2016			
1998	2015				
2004					

3 大气环流特征

以上分析揭示了山东夏季降水存在3种年际优势模态，可划分为6种异常型态。由于大气环流异常是导致山东降水异常的直接影响因子，因此下面将根据表1所列年份，利用合成分析方法探寻各降水模态正负位相年份的异常环流形势。

3.1 全区一致模态

由降水全区一致偏多年的500 hPa位势高度距平合成场(图4a)可见，西太平洋副高偏东偏北，新地岛以北为正异常，在东欧平原—贝加尔湖—堪察加半岛呈现"-+-"的波状环流异常，在中亚—蒙古高原—日本本州岛呈现"+-+"的波状异常，与印度夏季风降水异常有关的环半球遥相关型(circum global teleconnection，CGT)波列结构(Ding and Wang，2005；刘芸芸和丁一汇，2008)相似，东亚地区表现为"-+-"的经向波列，与EAP遥相关型相似，研究表明(吕俊梅等，2006)，当静止Rossby波和EAP波列叠加，副高易在日本附近加强，利于我国北方多雨。当降水为全区一致偏少时(图4b)，副高偏东，波罗的海—喀拉海—外兴安岭为"+-+"的波列，蒙古高原—日本海呈"西高东低"的环流形势，这种反向异常结构也是影响我国北方地区降水多寡的典型环流形势(李妍等，2016)，东亚地区表现为"+-+"经向波列结构。

高空急流的强度和经向偏移与中国夏季雨带有密切关系，山东省位于东亚急流的出口区，其上空急流的异常特征能够反映出降水条件。从200 hPa纬向风异常合成场来看，降水全区一致偏多时(图4c)，西欧至中亚地区在急流轴及其以北的纬向风增强，日本附近急流轴北侧和南侧分别有一个正、负异常中心，利于急流偏强偏北，山东省位于急流南侧，而急流轴的右侧有偏差风辐散，有利于该地区出现异常上升气流。降水全区一致偏少时(图4d)，急

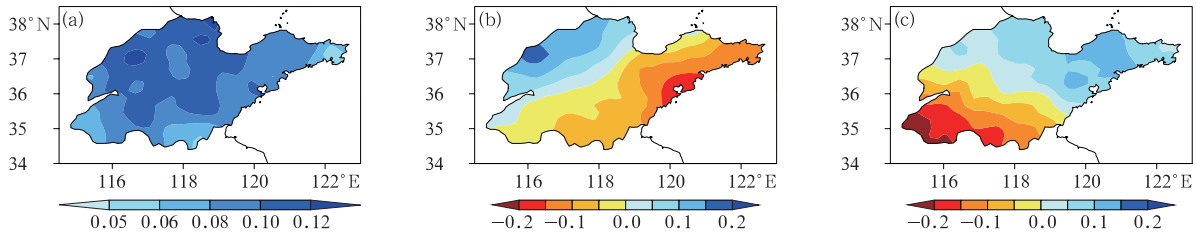


图 2　山东夏季降水量距平百分率 EOF 前 3 个模态的空间分布
(a)第一模态,(b)第二模态,(c)第三模态

Fig. 2　Spatial distribution of the first three EOF modes of summer precipitation anomaly percentage over Shandong Province
(a) first mode, (b) second mode, (c) third mode

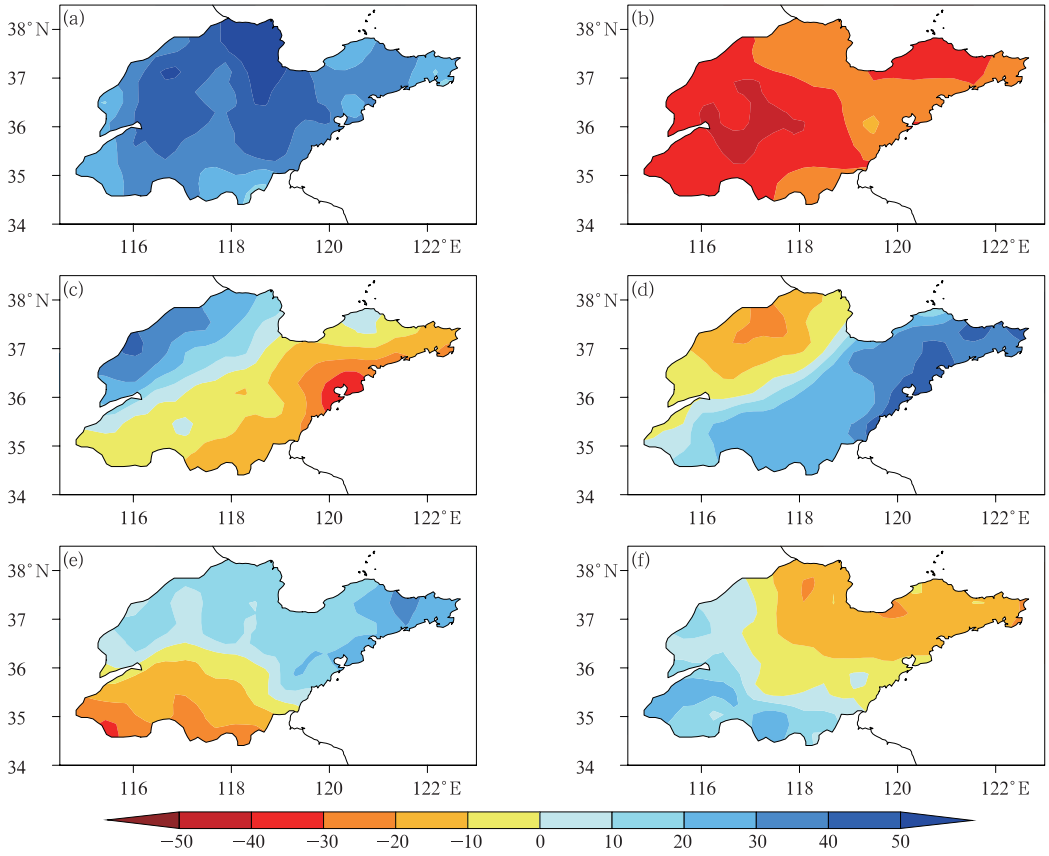


图 3　山东夏季降水 6 种型态的降水量距平百分率合成场(单位:%)
(a,b)全区一致模态的正、负异常年,(c,d)西北—东南反位相模态的正、负异常年,(e,f)东北—西南反位相模态的正、负异常年

Fig. 3　Composite precipitation anomaly percentage for six summer precipitation patterns over Shandong Province (unit: %)
(a, b) 'consistent distribution' anomalous positive and negative years, (c, d) 'northwest-southeast seesaw distribution' anomalous positive and negative years, (e, f) 'northeast-southwest seesaw distribution' anomalous positive and negative years

流偏弱偏南,山东省位于急流北侧,急流轴左侧的偏差风辐合利于该地区出现异常下沉气流。

从 850 hPa 水平风和整层大气水汽通量散度的异常合成场来说明冷暖空气交汇特征。降水全区一致偏多时(图 4e),一方面,贝加尔湖东、西两侧为反气旋式环流,山东省上空为气旋式环流,它们的异常偏北风将高纬冷空气向内蒙古中部输送并进一步入侵山东;另一方面,西北太平洋和菲律宾上空的异常

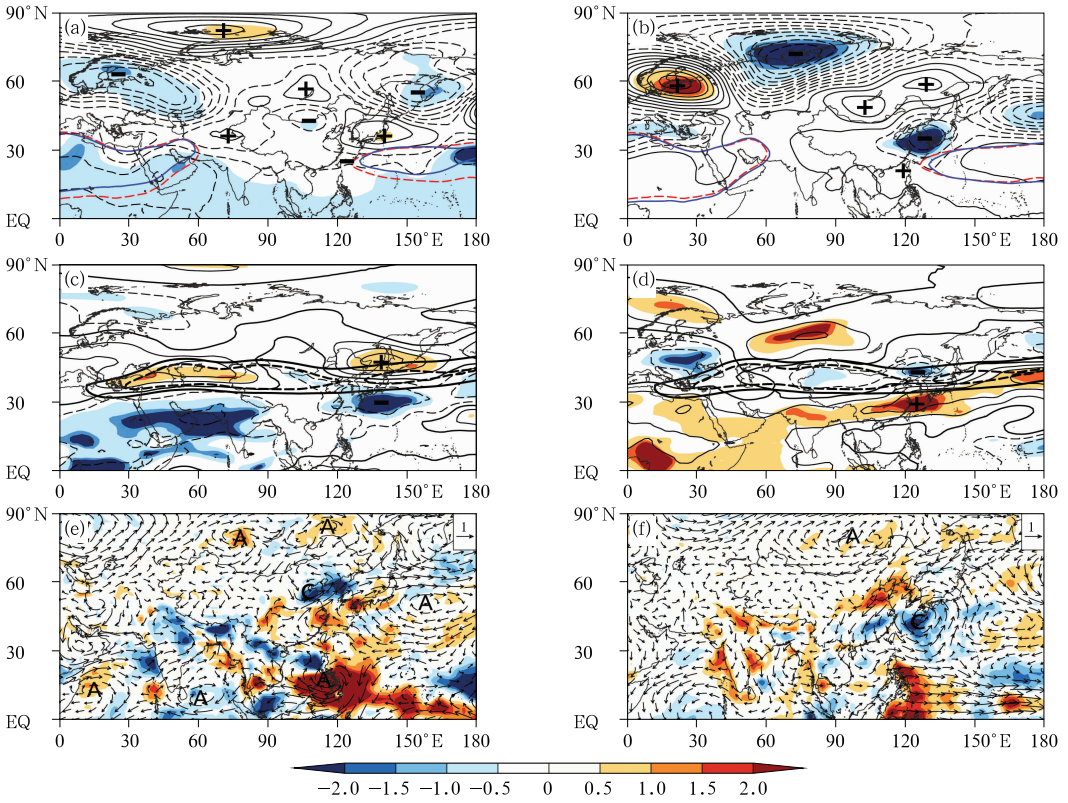


图 4 山东夏季降水全区一致模态的(a,b)500 hPa 位势高度距平合成场(单位:gpm,等值线间隔为 10 gpm,阴影区域通过 0.1 显著性水平检验,红色虚线和蓝色实线分别代表气候平均和合成场的 5870 gpm),(c,d)200 hPa 纬向风异常合成场(单位:m·s^{-1},等值线间隔为 1 m·s^{-1},黑色粗实线和粗虚线分别代表气候平均的 20 和 25 m·s^{-1}风速的纬向风),(e,f)850 hPa 水平风异常合成场(箭头)和整层大气水汽通量散度异常合成场(阴影,单位:10^{-8} g·s^{-1}·cm^{-2})
(a,c,e)正异常年,(b,d,f)负异常年

Fig. 4 (a, b) Composite 500 hPa geopotential height anomalies for the 'consistent distribution' of summer precipitation over Shandong Province (unit: gpm, contour interval=10 gpm, shading marks regions having passed the significance test at 0.1 level, red dash and blue solid lines represent the climate average and composite 5870 gpm); (c, d) 200 hPa zonal wind anomalies (unit: m·s^{-1}, contour interval=1 m·s^{-1}, thick black solid and dashed lines represent the climate average zonal wind speeds of 20 and 25 m·s^{-1} respectively); (e, f) 850 hPa horizontal wind anomalies (arrow) and total atmosphere column water vapour flux divergence anomalies (shading, unit: 10^{-8} g·s^{-1}·cm^{-2})
(a, c, e) anomalous positive years, (b, d, f) anomalous negative years

反气旋式环流将副高南侧和南海的水汽向北输送,阿拉伯海和孟加拉湾的反气旋式环流北侧的异常偏西风有利于这两个区域的水汽东传并与来自南海的水汽汇合,3 个方向的暖湿气流源源不断地向北输送,山东省表现为显著的水汽通量辐合,冷暖空气交汇有利于该地区降水增多。降水全区一致偏少时(图 4f),贝加尔湖的反气旋式环流和日本九州岛的气旋式环流使高纬冷空气经我国东北地区入侵至华南,我国东部地区上空盛行异常偏北风,山东省表现为明显的水汽通量辐散,不利于降水的发生。

通过 850 和 200 hPa 辐散风、相对涡度和速度势的异常合成场来探讨高低空环流配置。根据 ω 方程:

$$\left(\sigma\nabla^2+f^2\frac{\partial^2}{\partial p^2}\right)\omega=f\frac{\partial}{\partial p}[\boldsymbol{V}_g\cdot\nabla(f+\xi_g)]-\nabla^2\left[\boldsymbol{V}_g\cdot\nabla\frac{\partial\Phi}{\partial p}\right]-\frac{R}{c_p p}\nabla^2\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} \quad (3)$$

式中,右端第一项为涡度平流随高度变化项,当对流

层低层为正(负)涡度平流、高层为负(正)涡度平流时,涡度平流随气压减小(增加),利于该地区出现上升(下沉)运动(朱乾根等,2007)。降水表现为全区一致偏多时(图 5a,5c),对流层低层菲律宾附近和贝加尔湖的东西两侧各有一个点源,大气表现为异常辐散和负散度风涡度平流;对流层高层在菲律宾附近为点汇,日本及其以西地区表现为负散度风涡度平流,与图 4c 中高空急流在这一区域的负异常中心相对应。菲律宾附近易出现异常下沉气流,有利于低层的水汽向北输送;山东省在低层有水平风辐合和正散度风涡度平流,在高层为异常负散度风涡度平流,有利于该地区冷暖气流的交汇以及上升运动的加强。降水全区一致偏少年份(图 5b,5d),菲律宾地区在低层依然表现为点源,但辐散风远弱于降水偏多年份,高层的点汇中心消失,高低空都没有明显的散度风涡度异常;山东省在低层表现为弱的水平风辐散和负散度风涡度平流,在高层有水平风辐合和正散度风涡度平流,有利于该地区大气下沉运动的发展,不利于降水发生。

从大气垂直运动的异常特征来看,降水全区一致偏多时,沿赤道平均的纬向垂直环流(图 6a)在印度尼西亚为异常上升运动,在太平洋洋面上主要表现为异常下沉运动,沃克环流加强;从沿 115°～125° E 平均的经向垂直环流(图 6c)可见,菲律宾以北为异常上升气流,对流活动得到加强,有利于副高北抬(顾伟宗等,2016);山东省所在纬度 34°～39°N 盛行异常上升气流,有利于全区降水的发生发展。当降水全区一致偏少时,沃克环流(图 6b)偏弱偏东,赤道西太平洋区域的对流活动受到抑制;菲律宾以南和山东受异常下沉气流支配(图 6d)。

3.2　西北—东南反位相模态

从 500 hPa 位势高度距平合成场来看,当山东夏季降水呈西北多—东南少分布时(图 7a),副高偏大偏强偏西,贝加尔湖及其以东地区为负异常,乌拉尔山和鄂霍次克海以北的大陆上有两个明显的正异常中心,中高纬阻塞高压活动频繁,在西欧—地中海东部—阿拉伯海地区表现为“－＋－”的波列特征,

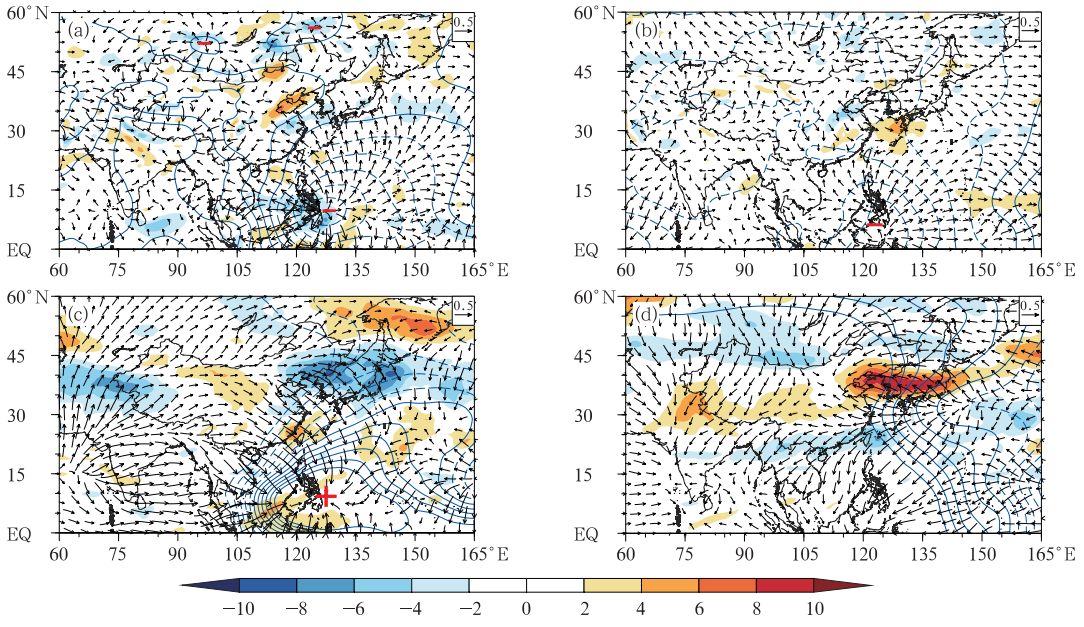


图 5　山东夏季降水全区一致模态的(a,b)850 hPa 和(c,d)200 hPa 辐散风(箭头,单位:s^{-1})、相对涡度(阴影,单位:s^{-1})和速度势(等值线,单位:$m^2 \cdot s^{-1}$)的异常合成场
(a,c)正异常年,(b,d)负异常年

Fig. 5　Composite 850 hPa (a, b) and 200 hPa (c, d) divergence wind anomalies (arrow, unit: s^{-1}), relative vorticity anomalies (shading, unit: s^{-1}), velocity potential anomalies (contour, unit: $m^2 \cdot s^{-1}$) for the 'consistent distribution' of summer precipitation over Shandong Province
(a, c) anomalous positive years, (b, d) anomalous negative years

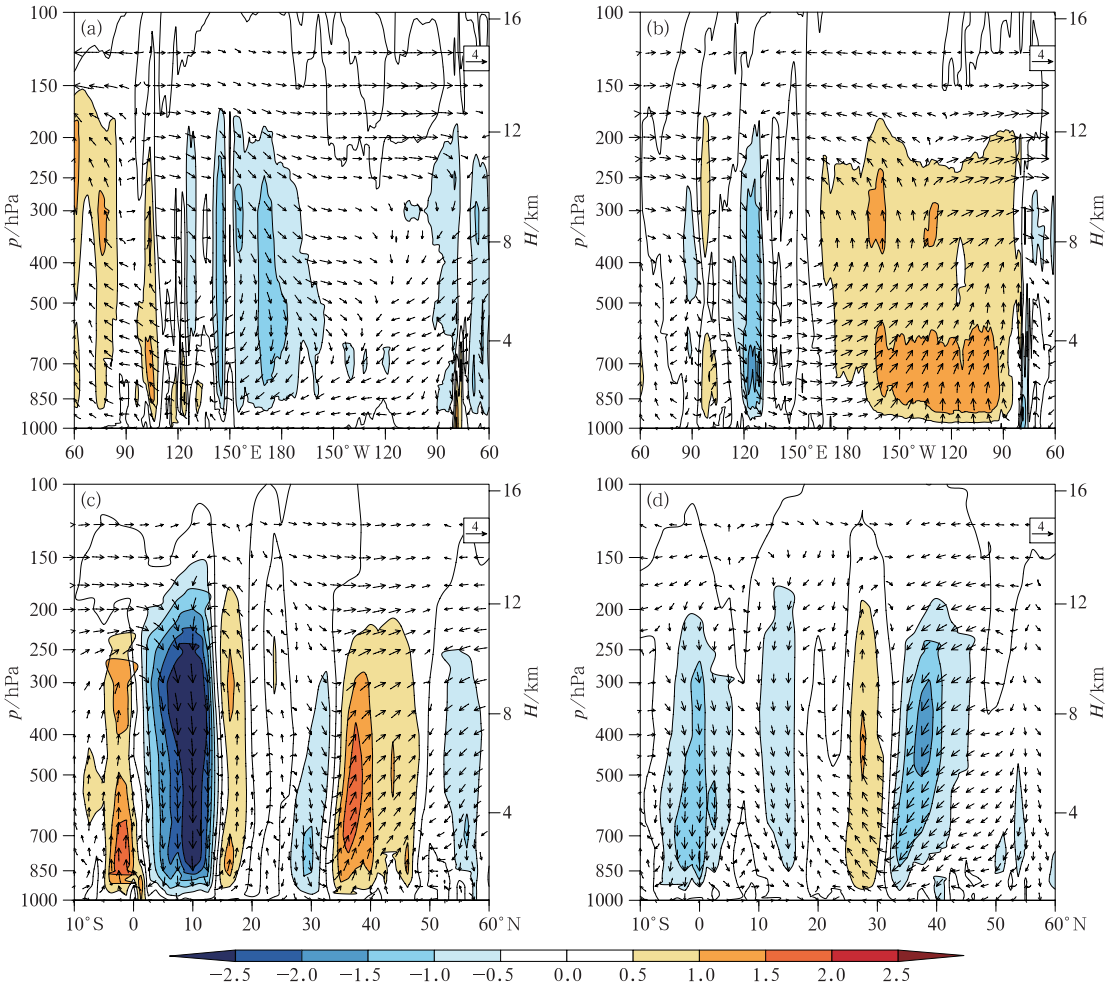


图 6 山东夏季降水全区一致模态的垂直风速的异常合成场(阴影,单位:Pa·s^{-1})
(a,b)沿赤道(5°S～5°N)平均的高度-经度剖面,(c,d)沿 115°～125°E 平均的高度-纬度剖面
(a,c)正异常年,(b,d)负异常年

Fig. 6 Composite vertical velocity anomalies for the 'consistent distribution' of summer precipitation over Shandong Province (shading, unit: Pa·s^{-1})
(a, b) vertical-longitude cross section averaged over 5°S−5°N
(c, d) vertical-latitude cross section averaged over 115°−125°E
(a, c) anomalous positive years, (b, d) anomalous negative years

欧洲西海岸的大槽加深。降水西北少—东南多的年份(图 7b),贝加尔湖地区呈正异常,乌拉尔山阻塞高压活动受到抑制。

200 hPa 纬向风异常合成场,正位相年(图 7c)在 40°N 沿高空急流轴自西向东有"+−+−"异常分布的纬向波状结构,类似于"丝绸之路"遥相关型(廖清海等,2006;孙照渤等,2016);另外,山东省以北地区的纬向风加强、以南地区的纬向风减弱,与图 4c 中的分布特征相似,但异常程度较弱,且异常中心主要位于山东及其上游地区,有利于该区域的急流略偏北。负位相年(图 7d)纬向风没有表现出东西方向的异常波列,山东省附近的急流略偏南。

从冷暖空气交汇的情况来看,正位相年份(图 7e),850 hPa 水平风场在外兴安岭有一个气旋式环流中心,其西侧的异常偏北风有利于高纬冷空气经我国东北地区南下入侵山东北部;另一方面,菲律宾以东的洋面上表现为异常反气旋式环流,有利于副高南侧的水汽西传并在海南岛附近北折后输送向我国华中和华北地区,山东西北地区表现为水汽通量辐合,东北地区为水汽通量辐散,导致降水出现西北多—东南少的异常分布。负位相年(图 7f),贝加尔湖东侧和我国东北地区东部各有一个反气旋式

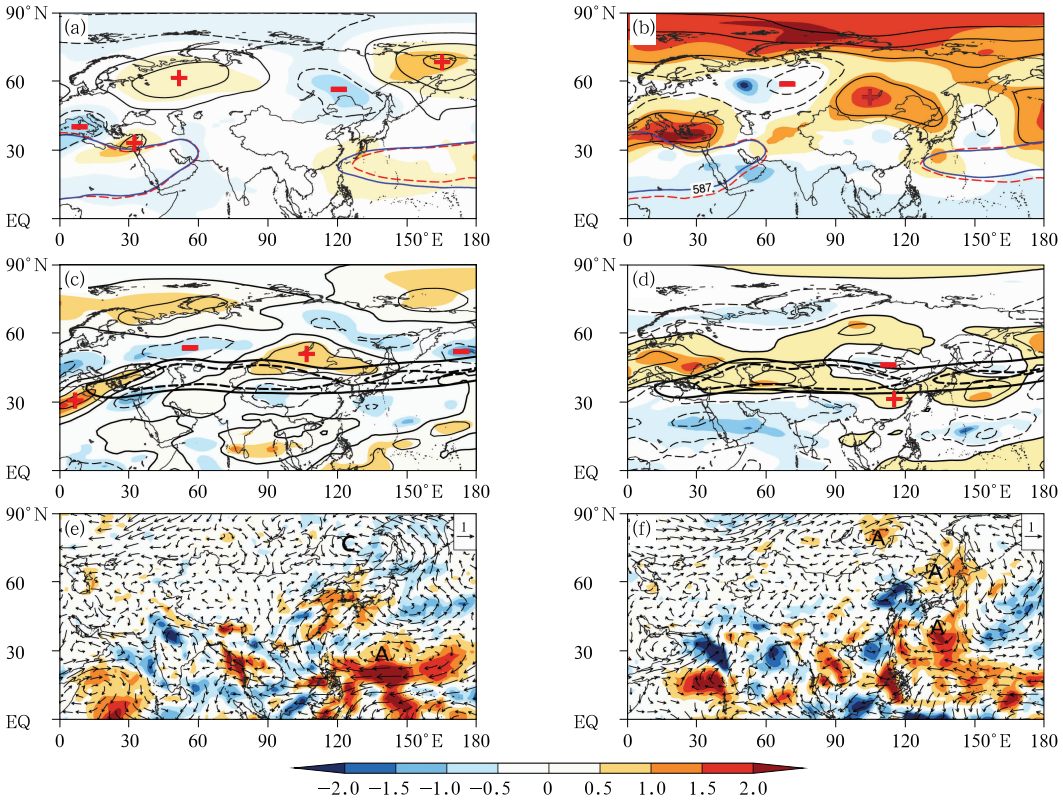


图 7　同图 4,但为山东夏季降水西北—东南反位相模态

Fig. 7　Same as Fig. 4, but for the second mode of summer precipitation over Shandong Province with a northwest-southeast seesaw distribution

异常环流中心,高纬冷空气沿这两个环流中心东部的偏北气流南下,在日本海西折后侵入山东;另外,与副高偏东偏北相对应,琉球群岛及其以东洋面上为反气旋式环流,异常偏南风将东海的水汽向北输送,山东的东南地区表现为水汽通量辐合,导致该地区出现多雨。

从高低空环流配置来看,降水正位相年份(图 8a,8c)在 10°N、140°E 附近对流层低层为点源、高层为点汇(图 8a),我国北方地区 850 hPa 大气以正散度风涡度平流为主,200 hPa 以负散度风涡度平流为主,利于上升运动的发展。在负位相年份(图 8b,8d),850 hPa 在 15°N、140°E 附近和贝加尔湖东侧各有一个点源,山东省东南地区有正散度风涡度平流,上升运动得到发展;200 hPa 在 15°N、140°E 附近为点汇,山东西部有正散度风涡度平流,下沉运动得到发展。

由图 9 可见,当降水呈西北—东南模态时(图 9a,9b),沃克环流都有所加强,但负位相年份时上升支相对偏东;另外,在全省多雨的年份,沃克环流下沉支的范围更大、异常性更加显著(图 6a)。相对于降水负位相年,在降水呈西北多—东南少分布时(图 9c),山东省在 35°N 南北两侧气流的垂直运动差异更明显,南侧为异常下沉气流、北侧为异常上升气流,有利于山东西北部多雨。

3.3　东北—西南反位相模态

由图 10a,10b 可见,该模态下副高都偏小偏东,正位相年份时的异常程度更高,在地中海—东欧平原—喀拉海分别有“－＋－”和“＋－＋”的异常波列。

高空急流的异常特征表明,正位相年(图 10c),蒙古高原至我国东北地区为正异常,我国东部沿海至朝鲜半岛为负异常,利于该区域急流稍向北抬,负位相年份(图 10d)的特征则相反。

从冷空气和水汽的交汇特征来看,正位相年份(图 10e),外兴安岭有一个反气旋式异常环流,山东北部有一个气旋式异常环流,高纬冷空气经俄罗斯东部和日本海南下并通过两个环流中间的异常偏东风影响山东北部地区;另一方面,吕宋岛以东的洋面上有一个反气旋式异常环流,利于副高西侧的水汽西传北折后并入山东北部的气旋式环流,导致该地

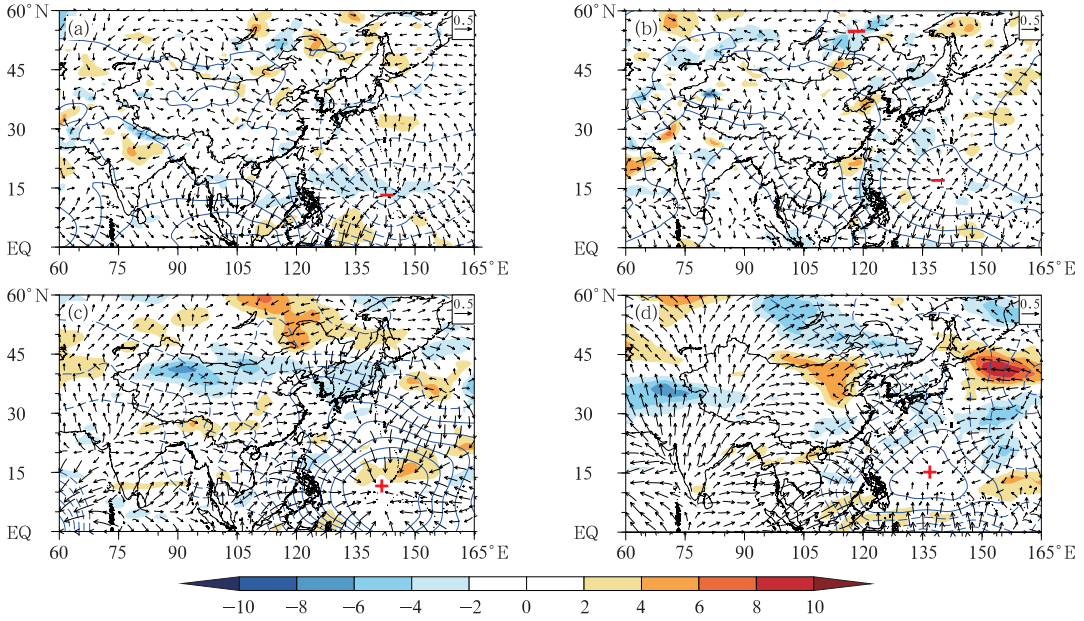


图 8 同图 5,但为山东夏季降水西北—东南反位相模态

Fig. 8 Same as Fig. 5, but for the second mode of summer precipitation over Shandong Province with a northwest-southeast seesaw distribution

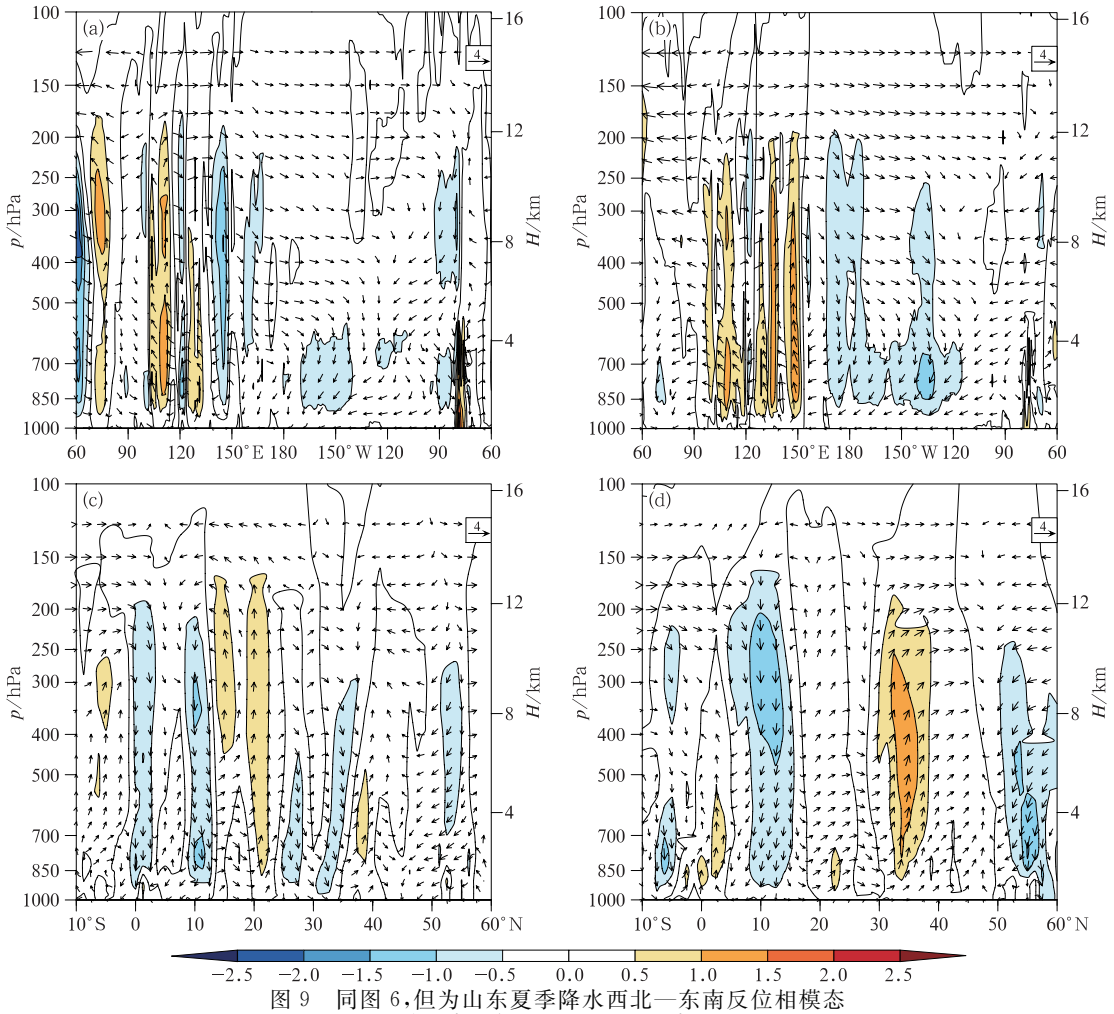


图 9 同图 6,但为山东夏季降水西北—东南反位相模态

Fig. 9 Same as Fig. 6, but for the second mode of summer precipitation over Shandong Province with a northwest-southeast seesaw distribution

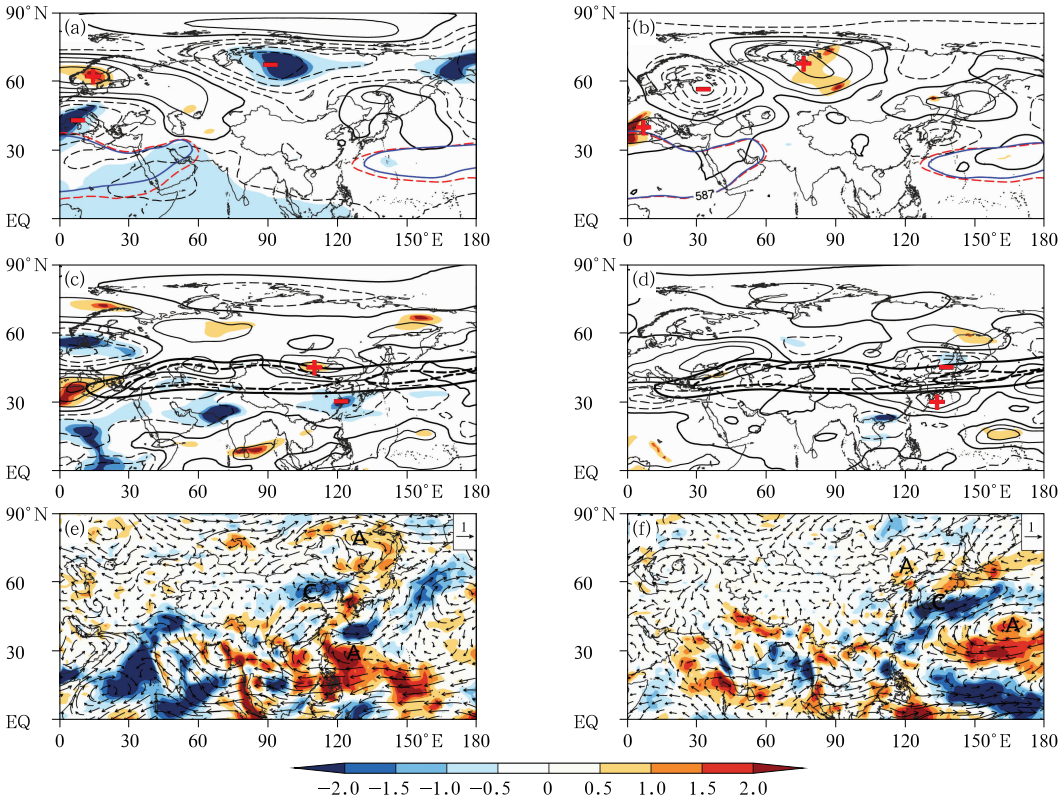


图 10　同图 4,但为山东夏季降水东北—西南反位相模态

Fig. 10　Same as Fig. 4, but for the third mode of summer precipitation over Shandong Province with a northeast-southwest seesaw distribution

区水汽通量辐合。负位相年(图 10f)冷暖空气的输送特征相对不明显,日本九州岛有气旋式异常环流,西北太平洋上的水汽经其北侧的偏东风进入山东南部,另外,孟加拉湾的异常偏西风有利于该区域的水汽东传后与上述气旋式异常环流汇合,受此影响,山东西南部有弱的水汽通量辐合。

高低空的环流配置,降水正位相年份(图 11a,11c)850 hPa 位于吕宋岛以东和黑河以北分别有一个点源,山东北部有水平风辐合和正散度风涡度平流,200 hPa 在吕宋岛以东有一个点汇,山东及其以北地区的偏西辐散风加强,有负散度风涡度平流,有利于山东北部和东部地区出现上升运动。负位相年(图 11b,11d),850 hPa 日本九州岛以东洋面有水平风辐合,200 hPa 上该地区表现为水平风辐散,山东全区盛行异常偏东辐散风并有正散度风涡度平流,降水发生的条件整体较弱。

沃克环流(图 12a,12b)的异常特征与全区一致模态(图 6a,6b)的相似,但异常的区域相对较小。正位相年份(图 12c),山东省 35°N 南北两侧的大气分别为异常下沉和上升运动,利于降水出现北多南少的分布型;而在负位相年份(图 12d)山东省上空大气垂直运动异常性并不明显,35°N 以南在对流层中下层弱的上升运动对南部多雨较为有利。

4　结　论

基于 1962—2016 年的山东省降水资料和 JRA-55 再分析资料,本文对山东省夏季(6—8 月)的年际降水特征进行了研究,得到了降水的主要模态,并分析了每一种模态对应的大气环流形势。主要结论如下:

(1) 山东夏季降水存在 3 种年际优势模态,即全区一致模态、西北—东南模态和东北—西南模态。

(2) 在全区一致模态的正(负)位相年,山东降水偏多(少)。多雨年,副高偏北,东亚地区分别有一个“西低东高”的纬向异常环流结构和“－＋－”分布的经向波列结构,阿拉伯海、孟加拉湾和菲律宾低层为异常反气旋式环流,高空急流偏强偏北,沃克环流加强;高纬冷空气经内蒙古中部南下,南方水汽输送充足。反之,当上述环流特征表现为反位相时,我国

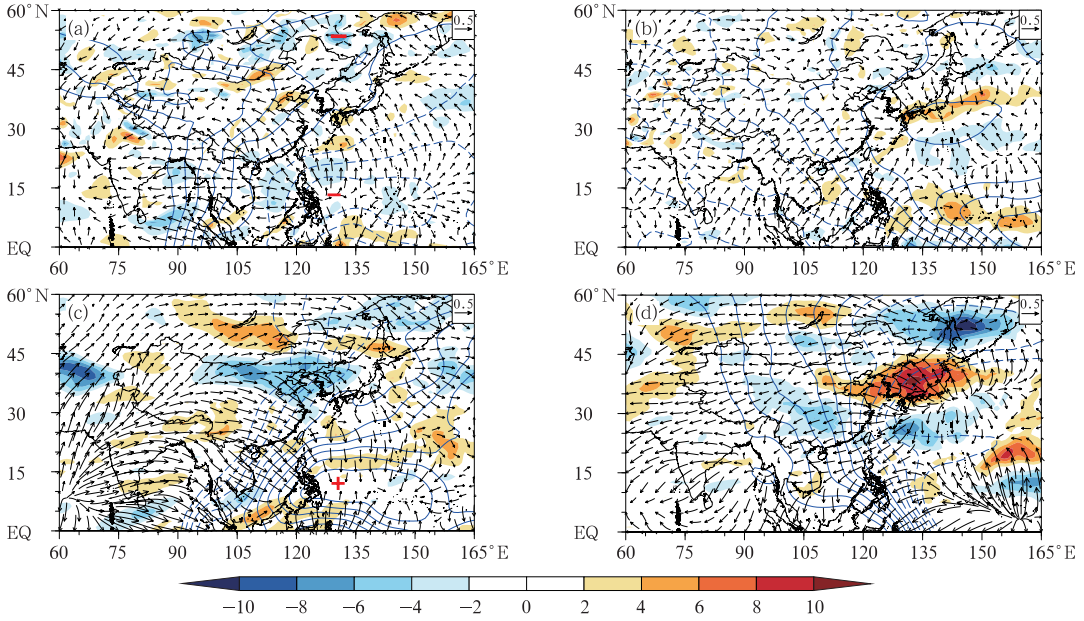


图 11 同图 5,但为山东夏季降水东北—西南反位相模态

Fig. 11 Same as Fig. 5, but for the third mode of summer precipitation over Shandong Province with a northeast-southwest seesaw distribution

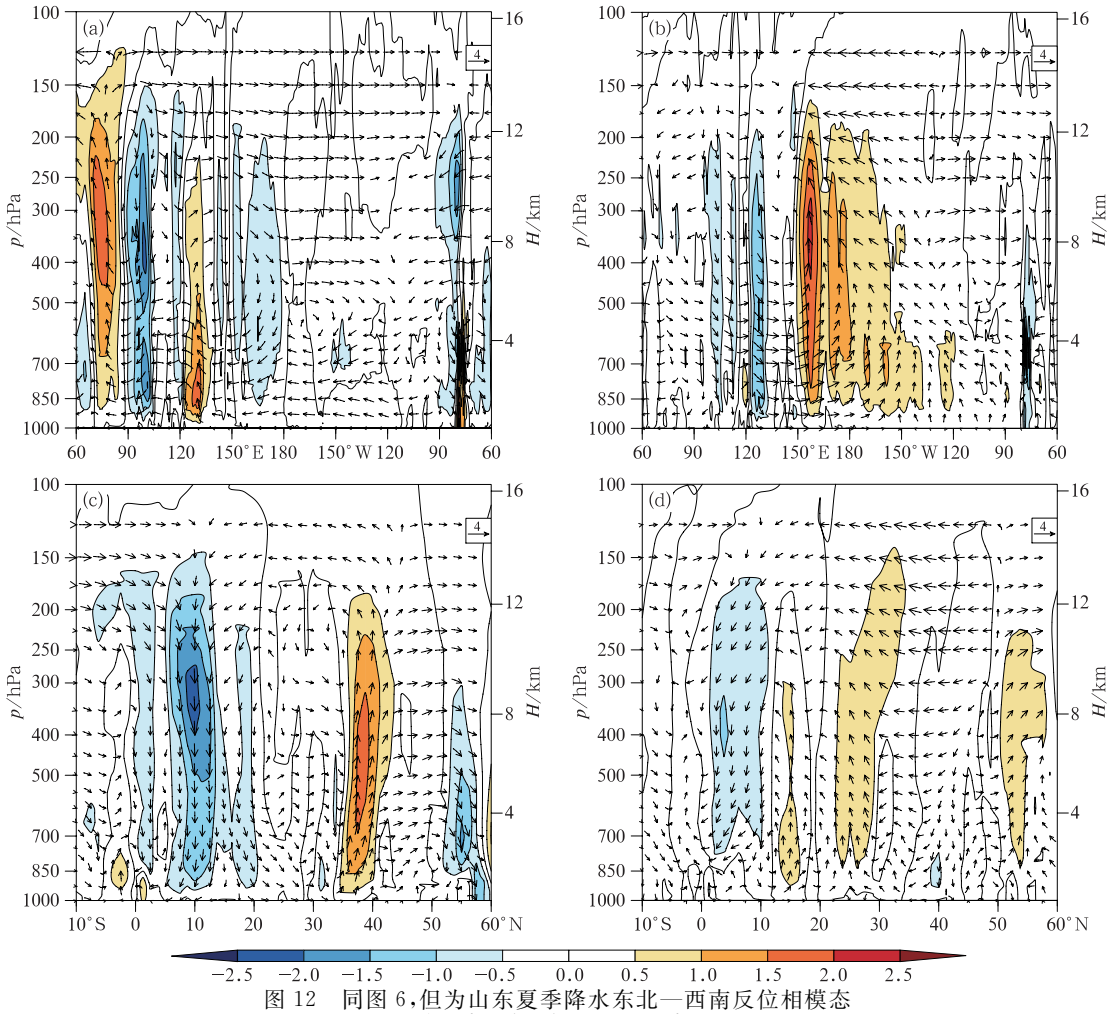


图 12 同图 6,但为山东夏季降水东北—西南反位相模态

Fig. 12 Same as Fig. 6, but for the third mode of summer precipitation over Shandong Province with a northeast-southwest seesaw distribution

东部地区上空盛行偏北风,山东没有有效的水汽来源,导致干旱少雨。

(3) 在西北—东南模态的正(负)位相年,山东西北部降水偏多(少),东南部降水偏少(多)。正位相年,副高偏西,欧亚中高纬阻塞高压活动频繁,高空纬向风呈类似"丝绸之路"遥相关型波列结构;来源于南海的水汽与经我国东北地区南下的冷空气在山东西北部汇合。反之,负位相年上述环流基本相反,沃克环流上升支较前者偏东,来源于东海的水汽与经外兴安岭南下的冷空气在山东的东南部汇合。

(4) 在东北—西南模态的正(负)位相年,山东的东北地区降水偏多(少),西南地区降水偏少(多)。正(负)位相年,在欧亚大陆中西部有"－＋－"("＋－＋")的异常波列,欧亚大陆东部和西北太平洋上呈反气旋、气旋、反气旋式经向环流结构,热带地区表现为东(西)风异常,沃克环流得到加强(削弱),但第一模态的异常程度更高。正位相年,来源于南海的水汽与经俄罗斯东部南下的冷空气在山东北部汇合,负位相年冷空气活动较弱,水汽主要来源于孟加拉湾和东海。

本文只分析了引起山东夏季降水年际异常的同期环流因子,以后还需要进一步研究前期和同期外强迫因子的作用。

参考文献

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. Chen L J,Gu W,Ding T,et al,2016. Overview of the precursory signals of seasonal climate prediction in summer 2015[J]. Meteor Mon,42(4):496-506(in Chinese).

迟竹萍,2009. 近 45 年山东夏季降水时空分布及变化趋势分析[J]. 高原气象,28(1):221-226. Chi Z P,2009. Spatial and temporal distributions and climatic change of summer precipitation in Shandong Province[J]. Plateau Meteor,28(1):221-226(in Chinese).

崔童,王东阡,李多,等,2015. 2014 年夏季我国气候异常及成因简析[J]. 气象,41(1):121-125. Cui T,Wang D Q,Li D,et al,2015. Analysis on climate anomalies in China in summer 2014[J]. Meteor Mon,41(1):121-125(in Chinese).

董旭光,顾伟宗,孟祥新,等,2014. 山东省近 50 年来降水事件变化特征[J]. 地理学报,69(5):661-671. Dong X G,Gu W Z,Meng X X,et al,2014. Change features of precipitation events in Shandong Province from 1961 to 2010[J]. Acta Geogr Sinica,69(5):661-671(in Chinese).

高安春,申培鲁,张延龙,2006. 夏季西太平洋副热带高压与山东降水的关系[J]. 气象科技,34(1):62-67. Gao A C,Shen P L,Zhang Y L,2006. Influence of western Pacific subtropical high on summer precipitation in Shandong Province[J]. Meteor Sci Technol,34(1):62-67(in Chinese).

高辉,袁媛,洪洁莉,等,2017. 2016 年汛期气候预测效果评述及主要先兆信号与应用[J]. 气象,43(4):486-494. Gao H,Yuan Y,Hong J L,et al,2017. Overview of climate prediction of the summer 2016 and the precursory signals[J]. Meteor Mon,43(4):486-494(in Chinese).

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. Gu W,2016. Possible impact of the western tropical Pacific SSTA on precipitation during the El Nino developing summers in the eastern part of China[J]. Meteor Mon,42(5):548-556(in Chinese).

顾伟宗,陈丽娟,左金清,等,2016. 多因子协同作用对 1992 年和 1998 年黄淮地区夏季降水异常的影响[J]. 大气科学,40(4):743-755. Gu W Z,Chen L J,Zuo J Q,et al,2016. Combined effect of multiple factors on the summer rainfall anomalies over the Huanghe-Huaihe Valley in 1992 and 1998[J]. Chinese J Atmos Sci,40(4):743-755(in Chinese).

顾伟宗,张莉,王辉,2012. 气候变化背景下山东盛夏降水异常成因及预测研究[J]. 中国海洋大学学报,42(12):8-31. Gu W Z,Zhang L,Wang H,2012. Research of abnormity and prediction for mid-summer rainfall in Shandong Province in climate change background[J]. Periodical of Ocean University of China,42(12):8-31(in Chinese).

胡桂芳,2011. 山东夏季降水分布型及与全国雨型的关系[J]. 山东气象,31(1):1-4. Hu G F,2011. The relationship between the dominant patterns of Shandong summer rainfall and the patterns of China[J]. J Shandong Meteor,31(1):1-4(in Chinese).

黄荣辉,孙凤英,1994. 热带西太平洋暖池的热状态及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常的影响[J]. 大气科学,18(2):141-151. Huang R H,Sun F Y,1994. Impacts of the thermal state and the convective activities in the tropical western warm pool on the summer climate anomalies in East Asia[J]. Sci Atmos Sinica,18(2):141-151(in Chinese).

李君,郜庆国,韩国泳,等,2009. 山东伏期旱涝特征与大气环流异常[J]. 气象科学,29(1):106-109. Li J,Tai Q G,Han G Y,et al,2009. Characterestic of rainfall in mid-summer over Shandong Province and its relationship with anomalous atmospheric circulation[J]. Sci Meteor Sinica,29(1):106-109(in Chinese).

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. Li W J,Zuo J Q,Song Y L,et al,2015. Changes in spatio temporal distribution of drought/flood disaster in southern China under global climate warming[J]. Meteor Mon,41(3):261-271(in Chinese).

李妍,布和朝鲁,林大伟,等,2016. 内蒙古夏季降水变率的优势模态及其环流特征[J]. 大气科学,40(4):756-776. Li Y,Bueh C L,Lin D W,et al,2016. The dominant modes of summer precipitation over Inner Mongolia and its typical circulation characteristics[J]. Chinese J Atmos Sci,40(4):756-776(in Chinese).

廉丽姝,李为华,朱平盛,2006. 山东省近 40 年气候变化特征[J]. 气象科技,34(1):57-61. Lian L S,Li W H,Zhu P S,2006. Analysis of climate change in Shandong Province since 1961[J]. Meteor Sci Technol,34(1):57-61(in Chinese).

廖清海，陶诗言，王会军，2006. 东亚地区夏季7～8月大气环流季节演变异常的内部动力学过程[J]. 地球物理学报，49(1)：28-36. Liao Q H，Tao S Y，Wang H J，2006. Internal dynamics related to anomalies of seasonal evolution of summer circulations in East Asia during July－August[J]. Chinese J Geophys，49(1)：28-36(in Chinese).

刘芸芸，丁一汇，2008. 印度夏季风与中国华北降水的遥相关分析及数值模拟[J]. 气象学报，66(5)：789-799. Liu Y Y，Ding Y H，2008. Analysis and numerical simulation of the teleconnection between Indian summer monsoon and precipitation in North China[J]. Acta Meteor Sinica，66(5)：789-799(in Chinese).

吕俊梅，琚建华，张庆云，等，2006. 热带西太平洋海温距平与Rossby波传播对1993和1994年东亚夏季风异常影响的差异[J]. 大气科学，30(5)：977-987. Lü J M，Ju J H，Zhang Q Y，et al，2006. Differences of influences of tropical western Pacific SST anomaly and Rossby wave propagation on East Asian monsoon in the summers of 1993 and 1994[J]. Chinese J Atmos Sci，30(5)：977-987(in Chinese).

孟祥新，王娜，商林，2017. 海温异常对山东夏季降水的影响分析[J]. 气象，43(10)：1259-1266. Meng X X，Wang N，Shang L，2017. Influence of the early SST anomaly on the summer precipitation in Shandong Province[J]. Meteor Mon，43(10)：1259-1266(in Chinese).

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. Shao X，Zhou B，2016. Monitoring and diagnosis of the 2015/2016 super El Nino event[J]. Meteor Mon，42(5)：540-547(in Chinese).

孙照渤，曹蓉，倪东鸿，2016. 东北夏季降水分型及其大气环流特征[J]. 大气科学学报，39(1)：18-27. Sun Z B，Cao R，Ni D H，2016. A classification of summer precipitation patterns over Northeast China and their atmospheric circulation characteristics[J]. Trans Atmos Sci，39(1)：18-27(in Chinese).

魏凤英，2007. 现代气候统计诊断与预测技术：第2版[M]. 北京：气象出版社：15-28，105-111. Wei F Y，2007. Statistical Diagnosis and Prediction Technology of Modern Climate：Edition 2[M]. Beijing：China Meteorological Press：15-28，105-111(in Chinese).

魏凤英，陈官军，李茜，2012. 中国东部夏季不同雨带类型的海洋和环流特征差异[J]. 气象学报，70(5)：1004-1020. Wei F Y，Chen G J，Li Q，2012. Differences of oceanic and atmospheric circulation features among the rainfall-band patterns in summer in eastern China[J]. Acta Meteor Sinica，70(5)：1004-1020(in Chinese).

余贞寿，孙照渤，曾刚，2005. 太平洋SSTA对中国东部夏季降水的影响Ⅰ——观测分析[J]. 热带气象学报，21(5)：467-477. Yu Z S，Sun Z B，Zeng G，2005. The effects of Pacific SSTA on summer precipitation over eastern China Ⅰ－observational analysis[J]. J Trop Meteor，21(5)：467-477(in Chinese).

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. Yuan Y，Gao H，Jia X L，et al，2016. Influences of the 2014－2016 super El Nino event on climate[J]. Meteor Mon，42(5)：532-539(in Chinese).

袁媛，高辉，李维京，等，2017a. 2016年和1998年汛期降水特征及物理机制对比分析[J]. 气象学报，75(1)：19-38. Yuan Y，Gao H，Li W J，et al，2017a. Analysis and comparison of summer precipitation features and physical mechanisms between 2016 and 1998[J]. Acta Meteor Sinica，75(1)：19-38(in Chinese).

袁媛，高辉，柳艳菊，2017b. 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. Yuan Y，Gao H，Liu Y J，2017b. Analysis of the characteristics and causes of precipitation anomalies over eastern China in the summer of 2016[J]. Meteor Mon，43(1)：115-121(in Chinese).

岳如画，徐海明，2017. 春季赤道印度洋纬向-垂直环流的变化特征及其与Walker环流的关系[J]. 大气科学，41(1)：213-226. Yue R H，Xu H M，2017. Variations of the spring equatorial Indian Ocean zonal-vertical circulation and its correlation with the Walker circulation[J]. Chinese J Atmos Sci，41(1)：213-226(in Chinese).

赵振国，1999. 中国夏季旱涝及环境场[M]. 北京：气象出版社：1-9. Zhao Z G，1999. Drought/Flood Disaster and the Environment Field in China during Summer[M]. Beijing：China Meteorological Press：1-9(in Chinese).

朱乾根，林锦瑞，寿绍文，等，2007. 天气学原理和方法：第4版[M]. 北京：气象出版社：120-121. Zhu Q G，Lin J R，Shou S W，et al，2007. Principles and Methods of Synoptic Meteorology：Edition 4[M]. Beijing：China Meteorological Press：120-121(in Chinese).

Ding Q H，Wang B，2005. Circumglobal teleconnection in the Northern Hemisphere summer[J]. J Climate，18(17)：3483-3505.

Ding Y H，Si D，Sun Y，et al，2014. Inter-decadal variations，causes and future projection of the Asian summer monsoon[J]. Eng Sci，12(2)：22-28.

Kobayashi S，Ota Y，Haradar et al，2015. The JRA-55 reanalysis general specifications and basic characteristics[J]. Meteor Soc Japan，93(1)：5-48.

North G R，Bell T L，Cahalan R F，et al，1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal function[J]. Mon Wea Rev，110(7)：699-706.

Onogi K，Tsutsui J，Koide H，2007. The JRA-25 reanalysis[J]. J Meteor Soc Japan，85(3)：369-432.

Wang B，Wu R G，Fu X H，2000. Pacific-East Asian teleconnection：how does ENSO affect East Asian climate? [J]. J Climate，13(9)：1517-1536.

Zhang Q，Sun P，Singh V P，et al，2012. Spatial-temporal precipitation changes (1956－2000) and their implications for agriculture in China[J]. Global Planet Change：82-83，86-95.

Zhang Q，Xu C Y，Zhang Z，et al，2009. Spatial and temporal variability of precipitation over China，1951－2005[J]. Theor Appl Climatol，95(1/2)：53-68.