

林子伦,郭丽娜,郭飞燕,等. 山东半岛夏季降水异常的环流型及影响因子分析[J].海洋气象学报,2019,39(1):55-67.
LIN Zilun, GUO Lina, GUO Feiyan, et al. Analysis of atmospheric circulation patterns and influencing factors for summer precipitation anomaly in Shandong Peninsula [J]. Journal of Marine Meteorology, 2019, 39(1): 55-67. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.01.006. (in Chinese)

山东半岛夏季降水异常的环流型及影响因子分析

林子伦¹,郭丽娜²,郭飞燕²,赵传湖¹,马艳²,孙即霖¹

(1.中国海洋大学海洋与大气学院海洋气象学系,山东 青岛 266100;2.青岛市气象台,山东 青岛 266003)

摘要: 利用1961—2016年华东地区106个气象观测站的日降水数据和再分析资料,分析引起山东半岛夏季降水异常的大气环流型及其与前期下垫面因子(海温和土壤湿度)的关系,结果发现:1)当孟加拉湾出现西南风异常,日本列岛以南和贝加尔湖西南侧地区分别呈反气旋和气旋式环流异常时,加强了向山东半岛的水汽输送,配合区域大气上升运动异常最终导致山东半岛夏季降水偏多;反之,当孟加拉湾出现西北风异常,日本列岛以南和贝加尔湖西南地区分别呈气旋和反气旋式环流异常时山东半岛降水偏少。2)孟加拉湾和北太平洋中部关键区的对流层整层位势高度与下垫面海温自春季持续至夏季存在显著正相关,当两个地区的整层位势高度均呈正异常时,分别对应夏季孟加拉湾的强西风气流和日本列岛以南的反气旋环流异常。3)区域土壤湿度异常引起的感热和潜热通量异常,可能是引起贝加尔湖关键区位势高度和山东半岛局地对流异常的原因:贝加尔湖西南地区土壤湿度偏大时,其上空对流层位势高度为负异常;山东半岛地区土壤湿度偏大时,其上空对流层大气出现异常上升运动。4)利用关键区春季下垫面因子(海温和土壤湿度)建立山东半岛夏季降水的统计预测模型,留一交叉检验的距平同号率达到75%。这些结果可为山东半岛夏季降水预测提供重要参考。

关键词: 山东半岛;夏季降水预测;大气环流异常;下垫面因子

中图分类号: P434 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2019)01-0055-13

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.01.006

Analysis of atmospheric circulation patterns and influencing factors for summer precipitation anomaly in Shandong Peninsula

LIN Zilun¹, GUO Lina², GUO Feiyan², ZHAO Chuanhu¹, MA Yan², SUN Jilin¹

(1. Department of Marine Meteorology in College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Qingdao Meteorological Observatory, Qingdao 266003, China)

Abstract According to the daily precipitation data of 106 meteorological stations in East China and NCEP reanalysis data from 1961 to 2016, the atmospheric circulation patterns that cause the summer precipitation anomaly in Shandong Peninsula and their correlations with the underlying surface factors (SST and soil moisture) are analyzed. The results are as follows. 1) When anomalous southwesterly winds occur over the Bay of Bengal, anomalous anticyclonic circulations occur over the south of Japanese Islands, and anomalous cyclonic circulations occur over the southwest of Lake Baikal, the transfer of water vapor to Shandong Peninsula is intensified, and coordinated with anomalous atmospheric ascending

收稿日期:2018-12-18; 修订日期:2019-01-09

基金项目:青岛市气象局局校合作科研项目(2015qdqxh02);公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306027)

作者简介:林子伦,男,硕士研究生,主要从事海气相互作用与短期气候预测研究,linzilun@stu.ouc.edu.cn。

通信作者:赵传湖,男,博士,副教授,主要从事海气相互作用与短期气候预测研究,chzhao@ouc.edu.cn。

movement, the summer precipitation in Shandong Peninsula is more. On the contrary, with the occurrence of anomalous northwesterly winds over the Bay of Bengal, anomalous cyclonic circulations over the south of Japanese Islands, and anomalous anticyclonic circulations over the southwest of Lake Baikal, Shandong Peninsula gets less precipitation in summer. 2) A significant positive correlation between geopotential height of the whole troposphere and underlying SST in the critical regions of the Bay of Bengal and central Pacific can persist from spring to summer, and when the geopotential height anomaly of the whole troposphere in the two regions is in the positive phase, the strong westerly wind over the Bay of Bengal and the anticyclone circulation over the south of Japanese Islands occur in summer, respectively. 3) The anomalous sensible heat and latent heat flux caused by the soil moisture anomaly could explain the geopotential height anomaly in the critical regions of Lake Baikal and local convection anomaly in Shandong Peninsula. Higher soil moisture in the southwest of Lake Baikal corresponds to negative anomaly of geopotential height in the upper troposphere and higher soil moisture in Shandong Peninsula corresponds to anomalous ascending movement in the upper troposphere. 4) Using the underlying surface factors (SST and soil moisture) in spring in critical regions, a multivariate statistical regress-forecasting model for summer precipitation is established in Shandong Peninsula, whose anomaly coincidence rate is about 75% by leave-one-out cross validation. These results can provide important reference for summer precipitation prediction in Shandong Peninsula.

Key words Shandong Peninsula; summer precipitation prediction; atmospheric circulation anomaly; underlying surface factors

引言

山东半岛降水主要集中在夏季,6—8月总降水量可达全年的62.4%^[1],夏季降水异常分析及预测是区域气候变化研究的重要内容^[2]。由于山东半岛地处华北与江淮之间过渡地区,其独特地理位置和复杂地形条件导致其气候变化规律与华北或江淮地区既有联系又有差异,尤其体现在夏季降水方面,影响因子复杂而预测较为困难^[3-5]。

西太平洋副热带高压(简称“西太副高”)活动异常及东亚夏季风的强弱变化等大气环流变化可能引起中国东部降水异常^[6-9]。比如阿拉伯半岛—北太平洋遥相关型(Arabian Peninsula-North Pacific Oscillation, APNPO)对亚洲季风区的水汽输送有显著影响,在中国东部地区形成较强的水汽辐合辐散从而导致区域降水异常^[10-11]。山东半岛夏季降水的水汽主要来源于热带印度洋、南海—西太平洋以及中国大陆—日本海关键区^[12-13],贝加尔湖及西侧地区和我国东部到日本海的位势高度呈负—正异常“跷跷板”形势时,东亚大槽减弱、乌拉尔山区阻塞加强和西太副高的北进引起的三支暖湿气流在山东地区上空汇集,提供了充沛的降水条件,可能造成降水偏多^[14]。

引起大气环流异常变化的影响因子表现出复

杂性和不确定性^[15]。关键海区海温变化可能导致山东半岛夏季降水异常。杨晓霞等^[16]认为热带太平洋海温通过影响西太副高的位置进而影响山东半岛夏季降水,张苏平等^[17]利用赤道东太平洋和北太平洋(30°~45°N, 180°~150°W)海温建立关于山东半岛夏季降水的统计回归模型。顾伟宗等^[18]以南太平洋南美洲西岸和大西洋墨西哥湾海温为预报因子建立的山东盛夏降水预报模型的准确率达到70%。副热带印度洋和热带印度洋偶极子对山东半岛夏季降水也有重要影响^[19]。在年代际尺度上,刘永平等^[20]认为北太平洋年代际振荡(Pacific decadal oscillation, PDO)通过调制东亚夏季风强弱进而影响山东半岛降水。

陆面积雪或土壤湿度等下垫面强迫因子对局地气候变化也有重要贡献^[21-22]。土壤湿度能够通过改变地表的反照率、热容量和向大气输送的感热、潜热等,进而影响降水变化^[23]。SHUKLA and MINTZ^[24]指出,在中高纬度土壤湿度对西伯利亚地区气候变化的影响与海温的作用相当。土壤湿度具有良好的记忆性,前期土壤湿度的异常与后期局地降水和气温变化有重要关系^[25]。以往研究较多关注海洋因素对山东半岛夏季降水的影响^[16-18, 26-28],同时结合陆面因素影响大气环流系统进而影响山东半岛夏季降水的研究较少。因此,本

文以山东半岛夏季降水为研究对象,分析降水异常的大气环流型,综合考虑海洋(海温)和陆面(土壤湿度)因素,研究形成这种大气环流异常的可能物理机制,在此基础上尝试建立关于山东半岛夏季降水的多元回归模型,以期提高山东半岛夏季降水预测水平。

1 资料与方法

本文所用资料包括华东(30°~42°N, 110°~125°E)区域 106 站 1961—2016 年日降水资料,同时段的美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)再分析资料的月平均位势高度、海平面气压场、风场、温度、垂直速度场(水平分辨率为 2.5°×2.5°),美国海洋和大气局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)月平均海面温度(水平分辨率为 1°×1°)和陆面温度以及其气候预测中心(Climatic Prediction Center, CPC)的月平均土壤湿度资料(水平分辨率为 0.5°×0.5°)。

首先对华东地区夏季降水进行经验正交函数分解(empirical orthogonal function, EOF)和旋转经验正交函数分解(rotated empirical orthogonal function, REOF),揭示山东半岛区域夏季降水变化特征,然后依据合成分析方法研究其出现降水异常时的大气环流特征,再通过相关分析和回归分析等方法探讨前期影响因子并建立回报山东半岛夏季降水的多元线性回归模型。

2 山东半岛夏季降水变化特征

将华东区域内标准化的逐年夏季降水进行 EOF 展开,前 4 个模态累积方差贡献率为 49.42%,且均通过了 North 检验。EOF 第一模态显示该区域夏季降水存在南北反位相变化,其中山东半岛地区处于中间过渡地带(图 1a);第二模态主要揭示了黄淮流域的降水一致性变化特征(图 1b);第三模态呈三极分布,反映山东半岛与华北和江淮地区降水变化的相反形式(图 1c);第四模态主要反映区域内东西部地区降水异常变化的差异(图 1d)。

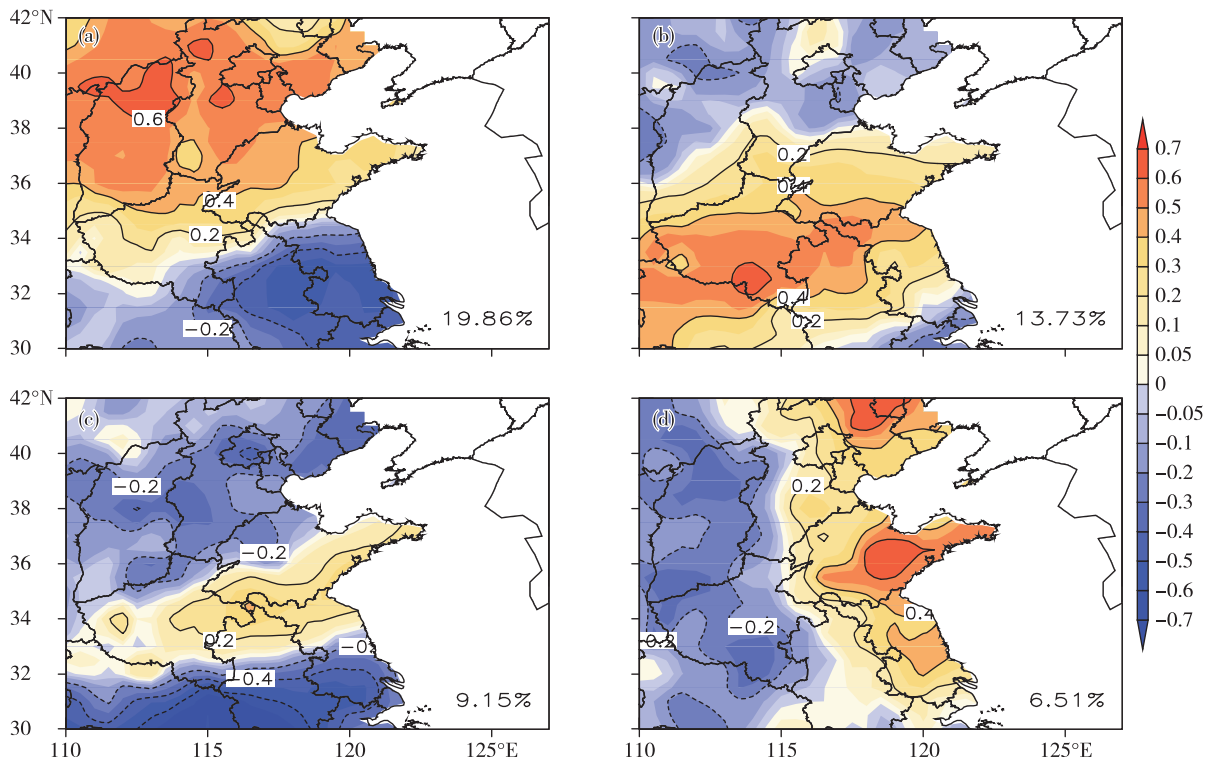


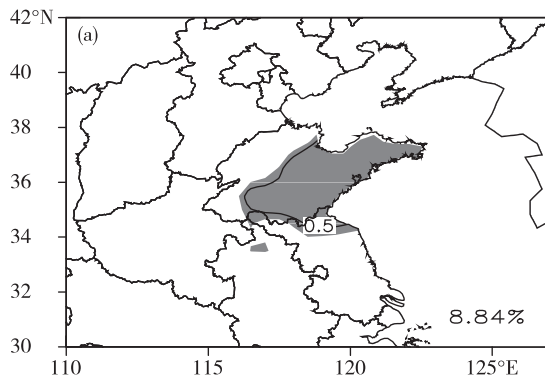
图 1 1961—2016 年华东地区夏季降水(标准化) EOF 前 4 个模态(a-d)(百分数为各个模态的方差贡献率)

Fig.1 Spatial distribution of the four leading EOFs (a-d) of summer precipitation in East China from 1961 to 2016 (the percentage is the variance contribution rate of each mode)

为更好地揭示山东半岛夏季降水的区域性变化特征,利用 REOF 方法,确定了龙口、成山头、沂

源、潍坊、海阳、兖州、莒县、日照和赣榆等 9 个站点代表山东半岛地区(图 2a),其区域平均的夏季降水

序列与相应的 REOF 第 7 模态时间系数(PC7)相关系数达到 0.92(图 2b),因此取这 9 个站 6—8 月降水量的平均值表示山东半岛夏季降水序列。山东半岛地区夏季降水具有明显的年际和年代际变化。根据山东半岛区域平均的夏季降水标准化序列,提取绝对值大于一个标准差的年份,定义符号为正的年份是降水偏多年,符号为负的年份是降水偏少年



(表 1)。可知,夏季降水偏多年共 10 年,偏少年共 8 年,其中 1964 年夏季降水最多(751.09 mm),1992 年夏季降水最少(241.76 mm)。11 a 滑动平均结果显示,以 20 世纪 70 年代中期和 90 年代前期为转折点,山东半岛夏季降水呈现出偏多—偏少—正常的年代际变化趋势^[1]。

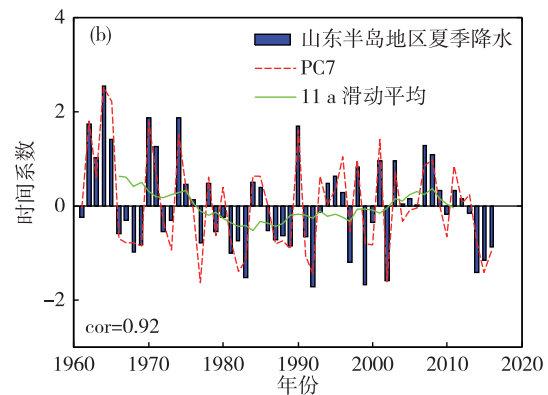


图 2 1961—2016 年华东地区夏季降水 REOF 第七模态(a)和山东半岛夏季降水的标准化时间序列(b;蓝色柱状图:山东半岛夏季降水;红色虚线:PC7;绿色实线:实际降水变化趋势;“cor”:相关系数)

Fig.2 The seventh REOF mode of summer precipitation in East China (a) and standardized time series of summer precipitation in Shandong Peninsula (b; the blue bar represents the summer precipitation in Shandong Peninsula, the red dashed line represents PC7, the green solid line represents trend of actual precipitation in Shandong Peninsula, "cor" is the correlation coefficient) from 1961 to 2016

表 1 山东半岛夏季降水多寡年

Table 1 Representative years of more and less summer precipitation in Shandong Peninsula

类别	年份									
偏多年	1962	1963	1964	1965	1970	1971	1974	1990	2007	2008
偏少年	1981	1983	1992	1997	1999	2002	2014	2015		

3 山东半岛夏季降水异常的大气环流特征

大气环流的持续异常与区域旱涝灾害的发生密切相关^[15]。依据表 1 结果,分别对降水偏多年和偏少年的 500 hPa 位势高度场进行合成(图 3)。结果发现:在降水偏多年份,北半球上空整体呈位势高度负异常,乌拉尔山地区、阿拉伯海—北印度洋、赤道太平洋等区域存在显著负异常(图 3a),西太副高 586 dagpm 线明显偏东;在降水偏少年份,欧亚大陆总体呈现位势高度正异常,两个正异常中心分别位于斯堪的纳维亚半岛和贝加尔湖西南地区;日本海—北太平洋中部地区则呈负异常,低纬地区的阿拉伯海—印度洋地区呈显著正异常,西太副高 586 dagpm 线明显偏西(图 3b)。两类年份中位势高度场的差异主要集中在中高纬的斯堪的纳维亚半

岛和贝加尔湖西南地区,以及整个低纬热带地区,即在偏多年份这些地区的位势高度低于偏少年份;此外,在北太平洋中部和日本海地区,偏多年份这两个地区位势高度高于偏少年份。

对降水偏多年份和偏少年份海平面气压场进行合成分析,结果显示,在降水偏多(偏少)年份,欧亚大陆地区总体呈现负(正)异常,贝加尔湖南部及其周围地区为最大负(正)异常中心(图 4)。在降水偏多年份,阿拉伯半岛气压呈负异常,北太平洋中部地区呈正异常,对应强的阿拉伯半岛—北太平洋遥相关型,通过加强孟加拉湾西南风和激发西太平洋地区异常东南风,进而加强东亚夏季风水汽的向北输送;反之,在降水偏少年份,对应弱的阿拉伯半岛—北太平洋遥相关型,抑制东亚夏季风向北的水汽输送。

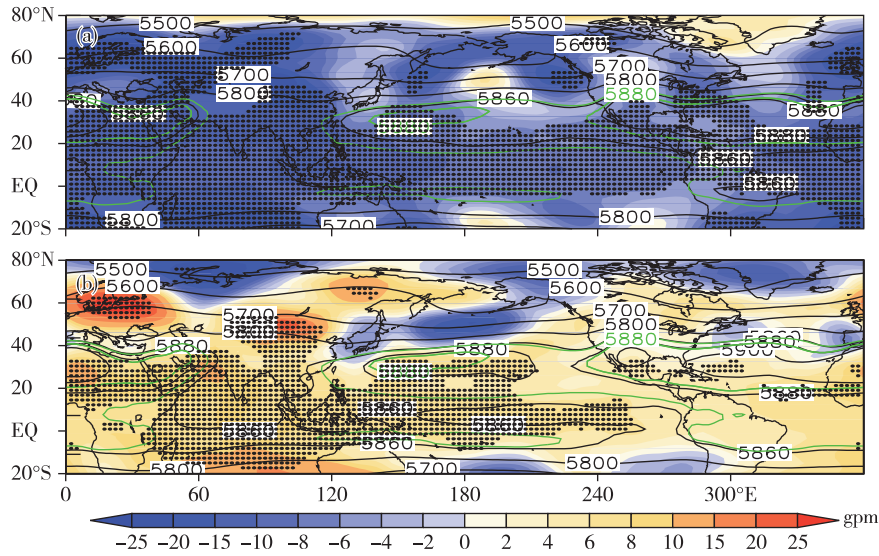


图 3 山东半岛夏季降水异常的 500 hPa 位势高度场合成(a.偏多年,b.偏少年;填色:合成的位势高度异常,暖色为正,冷色为负;黑色实线:合成的位势高度线;绿色实线:气候态 5 860 和 5 880 线;打点区域通过 0.01 显著性水平检验;单位:gpm)

Fig.3 Synthesis of the geopotential height at 500 hPa for summer precipitation anomaly in Shandong Peninsula (a. years of more precipitation, b. years of less precipitation; the colored area represents the synthesis of geopotential height anomaly, warm/cold color for positive/negative; the black solid line represents the synthesis of geopotential height; the green solid lines are the 5 860 and 5 880 climate state contours; the dotted area denotes passing the significance test at 0.01 level based on *t*-test; units: gpm)

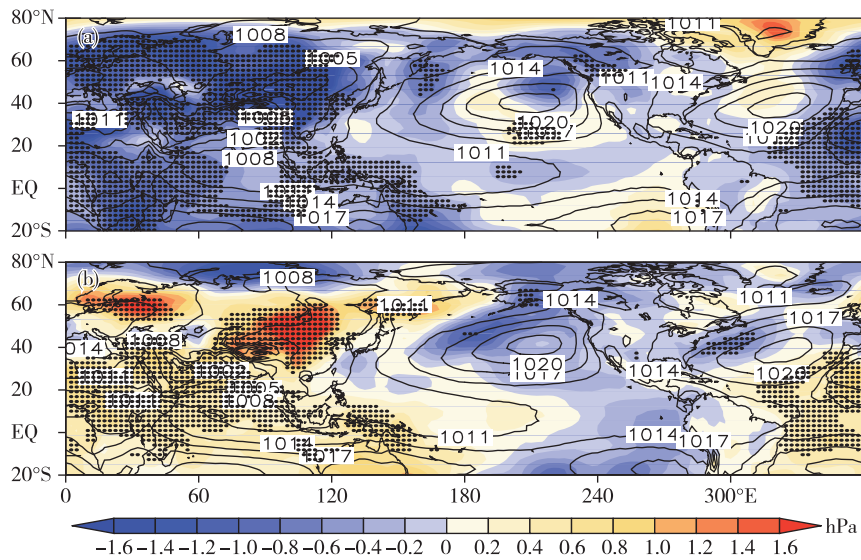


图 4 山东半岛夏季降水异常的海平面气压场合成(a.偏多年,b.偏少年;填色:合成的海平面气压异常,暖色为正,冷色为负;黑色实线:合成的海平面气压;打点区域通过 0.01 显著性水平检验;单位:hPa)

Fig.4 Synthesis of the sea-level pressure for summer precipitation anomaly in Shandong Peninsula (a. years of more precipitation, b. years of less precipitation; the colored area represents the synthesis of sea-level pressure anomaly, warm/cold color for positive/negative; the black solid line represents the synthesis of sea-level pressure; the dotted area denotes passing the significance test at 0.01 level based on *t*-test; units: hPa)

对山东半岛降水偏多年、偏少年的对流层位势高度场进行合成,并用偏多年减去偏少年,然后从 30°~70°N 每 10 个纬度平均的气压-经度剖面图

(图 5)可以看到,位势高度异常信号从对流层高层到低层均有体现。在中纬度(40°~50°N)位势高度异常的分布呈近似“正压”结构,贝加尔湖西南和北

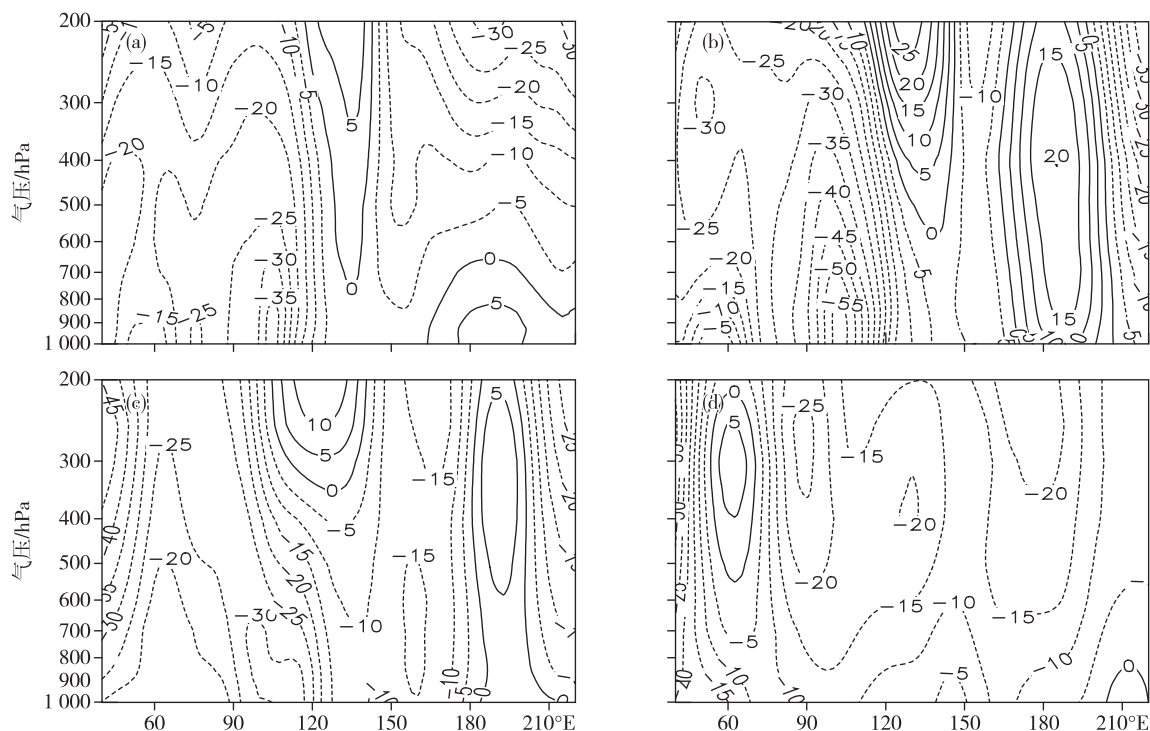


图5 经向平均的位势高度差异场(山东半岛降水偏多年减去偏少年)的气压-经度剖面图(a.30°~40°N, b.40°~50°N, c.50°~60°N, d.60°~70°N;单位:gpm)

Fig.5 Pressure-longitude cross section of the meridional mean geopotential height difference between years of more precipitation and years of less precipitation in Shandong Peninsula (a.30°~40°N, b.40°~50°N, c.50°~60°N, d.60°~70°N; units: gpm)

太平洋中部地区分别对应负、正异常中心。

进一步对东亚地区降水偏多和偏少年夏季对流层整层水汽通量及其散度异常进行合成。由图6可知,降水偏多年,在孟加拉湾西南风异常和西太暖池区东风异常的共同作用下,水汽在中国东部陆地上空辐合;同时,贝加尔湖西南地区气旋式环流异常东南侧的异常西南风也加强了向北的水汽输送,山东半岛地区(34°~38°N)为水汽辐合异常区(图6a)。此外,中国东部大约以32°N为界,北侧的对流层中低层大气为异常上升,南侧为异常下沉运动(图6c),山东半岛夏季降水偏多。偏少年份的环流形势大致相反,孟加拉湾的西北风异常和西太暖池的西风异常导致水汽在热带西太平洋海面上空辐合,向中国东部陆地的水汽输送减弱,贝加尔湖西南地区的反气旋式环流东南侧的异常东北风抑制了向北的水汽输送,山东半岛地区处于水汽辐散异常区,而辐合区主要位于长江流域以及华南地区(图6b)。此时,32°N以北的中国东部地区对流层大气为异常下沉运动,以南为异常上升(图6d),山东半岛夏季降水偏少。

4 山东半岛夏季降水异常与前期下垫面因子的关系

影响山东半岛夏季降水的异常环流系统主要位于孟加拉湾(5°~15°N, 80°~98°E),日本列岛南部(30°~40°N, 130°~140°E)和贝加尔湖西南侧地区(45°~50°N, 95°~105°E)。前两者与向北的水汽输送增强有关,后者除加强水汽向北输送之外,还可能与气旋活动有关^[29-30]。此外,在北太平洋中部(40°~50°N, 180°~170°W)自对流层低层到高层存在降水多寡年的显著位势高度差值中心,与山东夏季降水可能有遥相关关系^[17]。

由于降水多寡年的位势高度异常信号从对流层低层到高层均有体现,所以分别选取四个关键区夏季区域平均的对流层整层位势高度异常(标准化),以及山东半岛地区(34°~38°N, 115°~125°E)的对流层平均垂直速度为自变量(图7),山东半岛夏季降水(标准化)为因变量(Y),建立回归方程:

$$Y = -0.31H_1 - 0.04H_2 + 0.26H_3 - 0.12H_4 - 0.49W$$

(1)

方程拟合效果(复相关系数为0.70)显著,通过0.05显著性水平的F检验,距平同号率达到

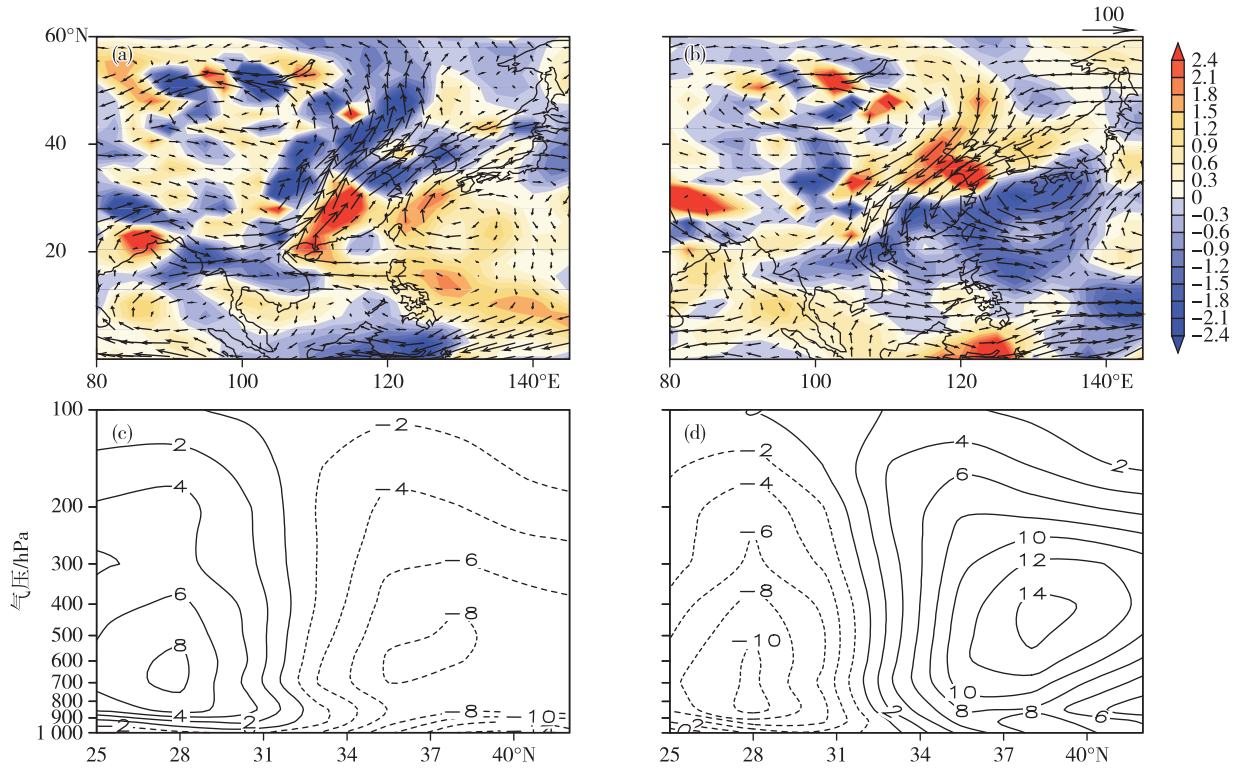


图 6 东亚夏季对流层整层水汽通量(箭头,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)和散度(填色,单位: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)的合成(a,b)及中国东部($110^{\circ} \sim 125^{\circ}\text{E}$)纬向平均的垂直速度异常的气压-纬度剖面(c,d;单位: $10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)(a,c.降水偏多年;b,d.降水偏少年)

Fig.6 Synthesis of water vapor flux (arrow, units: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and divergence (colored, units: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) of the whole troposphere (a, b) in East Asia in summer & pressure-latitude cross section of the zonal mean vertical velocity anomaly (c, d, units: $10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) in the eastern China ($110^{\circ} \sim 125^{\circ}\text{E}$) (a, c. years of more precipitation; b, d. years of less precipitation)

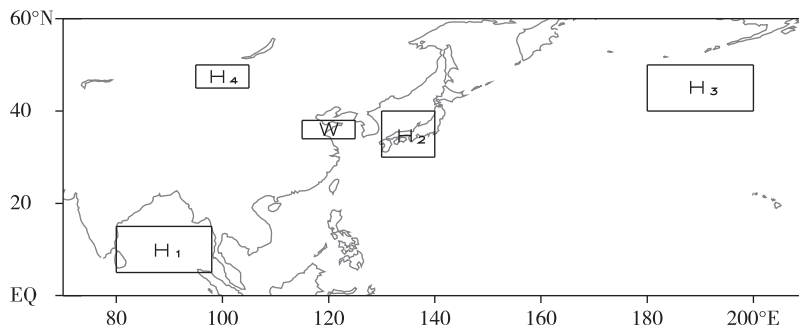


图 7 大气环流异常关键区示意图

Fig.7 Sketch of the critical regions related to the anomalous atmospheric circulation

85.71%,较好地反映了山东半岛地区夏季降水的变化趋势(图 8)。H₁和 W 项回归系数超过 0.05 显著性水平的 t 检验,即线性趋势主要由孟加拉湾的整层位势高度异常项(H₁)和山东半岛对流层平均垂直速度项(W)决定。这说明孟加拉湾、日本列岛南部、贝加尔湖西南和中太平洋地区夏季的位势高度以及山东半岛地区的垂直运动异常,对山东半岛夏

季降水变化有重要影响。而这五个关键区大气环流的异常与其下垫面(海洋或陆地)温度的变化密切相关。

孟加拉湾的海温异常可能是引起其上层大气位势高度变化的原因。表 2 是孟加拉湾夏季区域平均的整层位势高度异常(H₁)与同区域内平均海温的时滞相关分析,可以看出,自前一年冬季开始,持

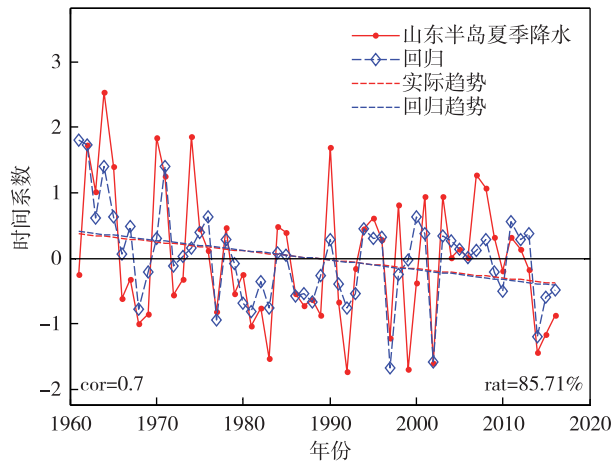


图8 1961—2016年山东半岛夏季降水(红色实线)及其回归值(蓝色虚线)的标准化时间序列(“cor”:相关系数;“rat”:距平同号率)

Fig.8 Standardized time series of summer precipitation (red solid line) and regression value (blue dashed line) in Shandong Peninsula from 1961 to 2016 (“cor” is the correlation coefficient, “rat” is the ratio of the anomaly coincidence rate)

续至当年夏季,该区域内海温与夏季位势高度呈显著正相关,当年3月相关系数达到最高值。这表明,该地区位势高度变化对海温异常有较好的响应,这种响应可自春季持续至夏季。同时,该区域内整层的位势高度异常与纬向风异常呈显著正相关(两者相关系数为0.40),当前期(春季)海温异常偏高时,整层位势高度呈正异常,对应于夏季的强西风气流,使水汽在中国大陆东侧洋面(热带西太平洋)上空辐合,向中国东部陆地的水汽输送减少。

日本列岛南部(H_2)和北太平洋中部地区(H_3)出现位势高度异常可能是受PDO的影响。利用夏季太平洋海温分别对 H_2 和 H_3 区位势高度异常的标准时间序列进行回归,亦具有较为相似的类PDO模态的海温回归场分布(图9)。 H_2 和 H_3 区位势高度的正异常对应北太平洋中部地区海温偏暖,赤道中东太平洋海温偏冷,即PDO处于冷位相。反之,

当两个地区处于位势高度负异常时,PDO处于暖位相。两个关键区的位势高度异常与PDO之间的联系枢纽可能是西太平洋副高。 H_2 、 H_3 的位势高度异常和PDO指数均与西太副高的面积和强度呈显著正相关,与西伸脊点呈显著负相关(表3)。这说明PDO通过影响夏季西太副高造成两个关键区位势高度异常,引起西太暖池向中国东部的的水汽输送变化,即PDO可能通过调制西太副高的变化导致中国东部夏季降水发生异常^[31]。

表2 孟加拉湾夏季整层位势高度异常(H_1)与同区域平均海温的时滞相关(均通过0.01显著性水平的t检验)

Table 2 Lag correlation between geopotential height anomaly and mean SST in the Bay of Bengal (H_1 area) (All pass the significance test at 0.01 level based on t-test)

时间	相关系数
去年12月	0.54
同年1月	0.53
2月	0.62
3月	0.68
4月	0.63
5月	0.55
6月	0.45
7月	0.40
8月	0.48

热带和中纬度的相互作用是PDO形成机制中的一种观点,热带海温通过大气桥影响中纬度,而中纬度海温则通过沿等密度面的潜沉通道将信号传至热带^[32-33]。此外,中纬度大气对北太平洋海温异常的响应是敏感的^[34], H_3 区的位势高度异常与其下垫面的海温呈正相关(图9b)。因此, H_3 区位势高度异常与山东半岛夏季降水的遥相关可能是PDO影响中国东部夏季降水的体现,而北太平洋中部($35^\circ\sim 45^\circ\text{N}$, $180^\circ\sim 160^\circ\text{W}$)的平均海温变化与 H_3 区

表3 西太平洋副热带高压各项指数与日本列岛南部(H_2)、北太平洋中部(H_3)关键区的整层位势高度异常和PDOI的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between the western Pacific subtropical high indices and the geopotential height in the south of Japanese Islands (H_2) and the central North Pacific (H_3) as well as the Pacific decadal oscillation index (PDOI)

	面积	强度	西伸脊点	脊线
日本列岛南部(H_2)	0.25	0.28*	-0.29*	0.20
北太平洋中部(H_3)	0.35**	0.36**	-0.39**	0.17
PDOI	0.42**	0.35**	-0.39**	0.11

注:“*”表示通过t检验的0.05显著性水平,“**”则是0.01显著性水平。

大气位势高度异常的显著关系,对山东半岛夏季降

水年代际变化具有指示意义。

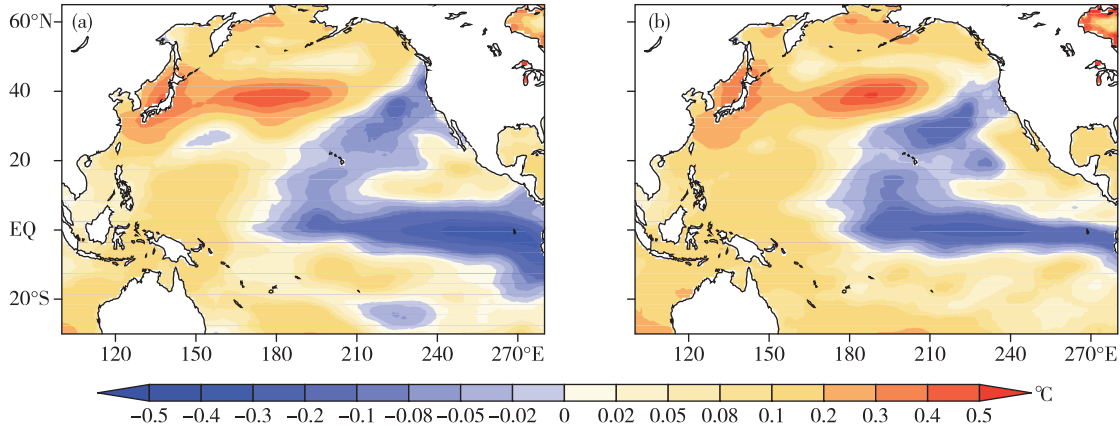


图 9 夏季太平洋海温对日本列岛 H_2 (a) 和中太平洋 H_3 (b) 区域平均的整层位势高度的标准化时间序列的回归(单位: $^{\circ}\text{C}$)
 Fig.9 Pacific SST regressed by standardized time series of geopotential height in Japanese Islands (H_2) (a) and the central Pacific (H_3) (b) in summer (units: $^{\circ}\text{C}$)

除太平洋外,印度洋的海温异常对西太副高变化也有重要贡献^[35-36],且表现出较好的持续性。陈迪等^[37]发现,赤道东太平洋 ($10^{\circ}\sim 10^{\circ}\text{N}$, $150^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{W}$)海温异常通过影响中低层经向环流进而影响西太副高变化,西太副高强度与赤道东太平洋海温自前一年秋季开始至当年早夏存在显著正相关(图 10a);而热带印度洋-南海暖池 ($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$, $40^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$)海温则通过影响低层季风环流和水汽输送

而影响副高强度,两者亦存在显著持续性的正相关(图 10b)。即当前期春季赤道东太平洋和热带印度洋-南海暖池出现海温正异常,且持续至夏季时,夏季西太副高异常偏强,而导致日本列岛南部关键区 (H_2) 位势高度出现正异常,对应西太暖池的东风异常,加强暖池水汽向中国东部输送,最终导致山东半岛夏季降水偏多。

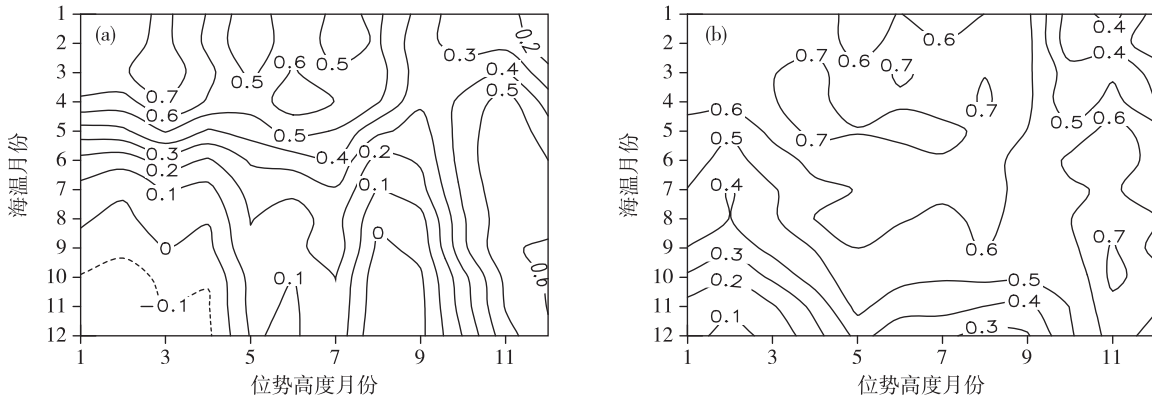


图 10 西太平洋副高强度与赤道东太平洋(a)和热带印度洋-南海暖池(b)的相关
 Fig.10 Correlation between the western Pacific subtropical high intensity and SST in the equatorial eastern Pacific (a) as well as in the tropical Indian Ocean-South China Sea warm pool area (b)

贝加尔湖西南关键区位势高度异常 (H_4) 则可能与其下垫面土壤湿度变化有关。贝加尔湖西南地区土壤湿度具有良好的记忆性,春季和夏季土壤湿度的相关系数达到 0.69,超过 0.01 显著性水平的 t 检验。利用夏季整层位势高度异常场对贝加尔湖西南地区平均土壤湿度的标准化时间序列进行回归,发现关键区内,前期春季(图 11a)和同期夏季

土壤湿度(图 11b)均与上层位势高度变化呈负相关,当土壤湿度增大时,位势高度降低。这种影响可从春季持续至夏季。其中的物理机制可能是:当春季土壤湿度出现异常减小时,贝加尔湖地区出现大范围的感热通量正异常^[38],可能导致低层大气和陆面温度上升^[39],这种温度异常可能导致贝加尔湖地区对流层中低层经向温度梯度减小,大气斜压性

减弱^[40],增加大气稳定度,即可能表现为异常高压;由于土壤湿度具有良好的记忆性,这种影响将能从春季持续至夏季,导致夏季贝加尔湖西南地区位势高度异常偏高,出现异常反气旋,其东南侧的异常东北风不利于水汽向北输送,最终可能导致山东半岛夏季降水偏少。

同理,利用夏季中国东部地区垂直上升速度场对山东半岛(110°~125°E,34°~39°N)平均土壤湿度的标准化时间序列进行回归,结果发现以32°N

为界,关键区内出现“偶极子”的分布特征(与图6相似),前期春季(图12a)和同期夏季土壤湿度(图12b)均与32°N以北地区呈负相关,而与32°N以南地区呈正相关。这说明,当山东半岛地区春季土壤湿度增大并持续至夏季时,其上空大气上升运动加强,而南方江淮地区则呈现异常下沉;相反地,当山东半岛地区前期土壤湿度减小并持续至夏季时,其上空呈现异常下沉,而南方江淮地区对流上升发展。

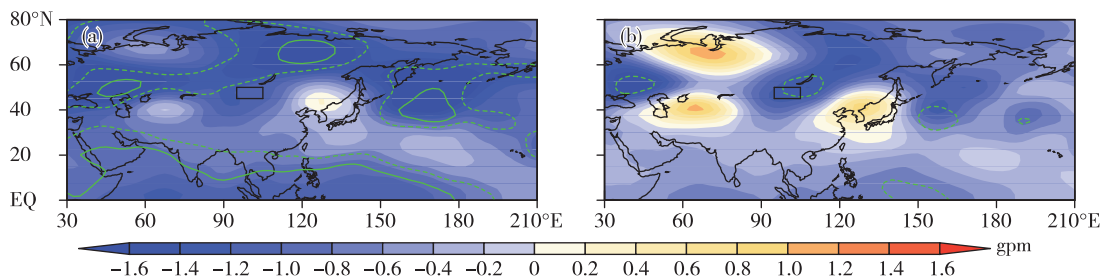


图11 夏季整层位势高度异常场对贝加尔湖西南地区平均土壤湿度标准化时间序列的回归(a.春季,b.夏季;绿色虚线内区域通过 t 检验0.05显著性水平,实线内区域通过 t 检验0.01显著性水平;单位:gpm)

Fig.11 Regressed geopotential height anomaly of the whole troposphere at 850 hPa by standardized time series of spring (a) and summer (b) soil moisture in the southwest of Lake Baikal (green dashed and solid lines denote passing the significance test at 0.05 and 0.01 level based on the t -test, respectively; units: gpm)

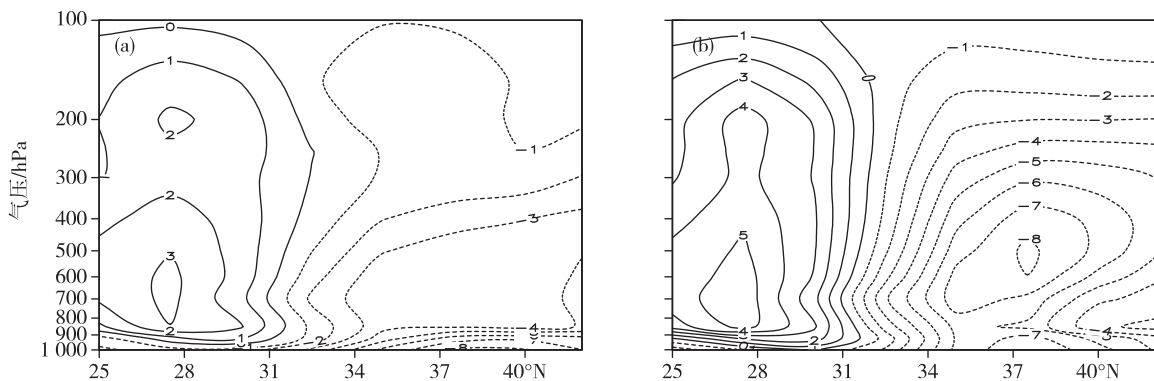


图12 夏季中国东部地区纬向平均垂直上升速度场对山东半岛(110°~125°E,34°~38°N)平均土壤湿度的标准化时间序列回归(a.春季,b.夏季;单位: $10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig.12 Zonal mean vertical velocity over East China in summer regressed by standardized time series of the mean soil moisture in Shandong Peninsula (110°~125°E, 34°~39°N) (a. spring, b. summer; units: $10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)

综上所述,可利用标准化的当年春季的4个关键区(孟加拉湾、赤道东太平洋、热带印度洋-南海暖池以及北太平洋中部)海温和2个关键区土壤湿度(贝加尔湖西南地区和山东半岛及周边地区)为预报因子,山东半岛夏季降水为预报量(Y),建立多元回归方程:

$$Y = -0.34X_1 - 0.45X_2 + 0.46X_3 - 0.09X_4 + 0.14X_5 + 0.48X_6 \quad (2)$$

其中, Y 是夏季降水(标准化), X_1 、 X_2 、 X_3 和 X_4 分别

是春季孟加拉湾、赤道东太平洋、热带印度洋-南海暖池以及北太平洋中部地区的海温, X_5 和 X_6 分别是春季贝加尔湖西南地区和山东半岛区域的土壤湿度。回归方程复相关系数是0.60,通过0.01显著性水平检验,经过留一交叉检验后,距平同号率达到75%,对山东半岛夏季降水变化趋势有较好的拟合效果(图13)。

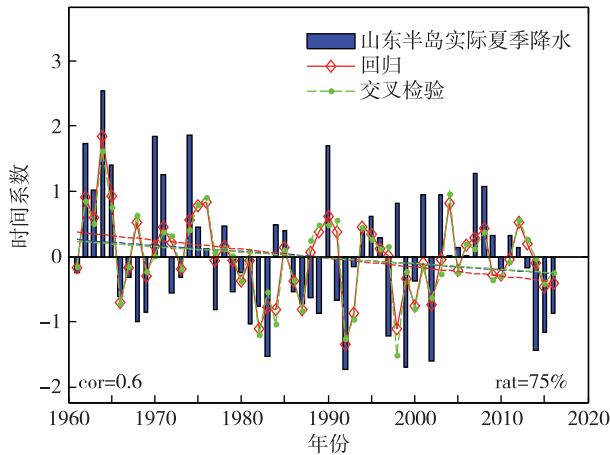


图 13 1961—2016 年山东半岛夏季降水(蓝色柱状)和回归(红色实线)及其交叉检验结果(绿色虚线)标准化时间序列(“cor”:相关系数,“rat”:距平同号率)

Fig.13 Standardized time series of the actual summer precipitation (blue bar), the regressed precipitation (red solid line), and cross validation results (green dashed line) in Shandong Peninsula from 1961 to 2016 (“ cor ” is the correlation coefficient, “ rat ” is the anomaly coincidence rate)

由公式(2)可知,区域土壤湿度项(X_6)对山东半岛夏季降水预测贡献较为明显。因此,选出1961—2016年区域土壤湿度项贡献最大的年份(表4)。可以看出,当其贡献为正时,大部分年份出现山东半岛夏季降水偏多,其中1962、1963、1964、1965和1990年的夏季降水绝对值大于一个正标准差;当其贡献为负时,与山东半岛夏季降水的偏少年有较好对应关系,其中1981、1999和2002年是夏季降水明显偏少年,其绝对值亦大于一个负标准差(表3)。同时,山东半岛春季的土壤湿度与春季降水量存在显著的正相关(相关系数为0.31),即春季降水增多(少)可能引起区域土壤湿度偏高(低),而使得夏季降水偏多(少),也就是说山东半岛容易出现“春夏连涝”或“春夏连旱”。但是,这种关系在1962年(春季降水偏少,但土壤湿度偏高,夏季降水偏多)和2002年(春季降水偏多,但土壤湿度偏低,当年夏季降水偏少)不成立,说明降水量不是影响土壤湿度的唯一因子。另外,1997年夏季实际降水偏少,而模型预测结果是降水偏多,还需要进一步考虑影响山东半岛夏季降水的其他因子的作用。

表 4 山东半岛区域土壤湿度项对夏季降水贡献最大的年份

Table 4 Representative years of maximum soil moisture contribution to summer precipitation in Shandong Peninsula

贡献性质	年份										
正	1962	1963	1964	1965	1979	1990	1991	1997	2004	2012	
负	1981	1982	1984	1986	1999	2000	2002				

5 结论与讨论

利用台站逐日降水资料和再分析资料,揭示了山东半岛夏季降水异常的大气环流特征,初步分析了引起大气环流异常的前期下垫面因子,建立了预测山东半岛夏季降水的统计模型。结论如下:

1) 山东半岛夏季降水偏多年和偏少年的大气环流形势有显著差异。夏季贝加尔湖西南地区、日本列岛以南海域以及孟加拉湾海区三大关键区的环流异常将通过影响向北的水汽输送而影响山东半岛夏季降水。当孟加拉湾北部为西南风异常,日本南部海域为东风异常(反气旋式环流南侧)时,使水汽在中国东部大陆上空辐合,同时贝加尔湖西南地区呈气旋式环流异常,其东南侧的异常西南风加强了向北的水汽输送并在黄淮—华北—辽东地区辐合,配合冷空气南下和局地的对流上升异常,使得山东半岛地区夏季降水偏多;反之,当孟加拉湾

北部呈西北风异常,日本南部海域为西风异常(气旋式环流南侧)时,使水汽在热带西太平洋上空辐合,结合贝加尔湖西南地区反气旋式环流东南侧的异常东北风导致水汽向北输送减弱,最终使得山东半岛地区夏季降水偏少。

2) 春季海温或土壤湿度的异常与关键区大气环流指标(位势高度和垂直速度)变化密切相关。孟加拉湾关键区的位势高度异常与其下垫面前期春季海温呈显著正相关,这种海温异常与位势高度相关可从春季持续至夏季。赤道中东太平洋和印度洋-南海暖池海温正异常可能引起西太副高的加强,进而导致日本列岛和中太平洋地区位势高度出现正异常。

3) 贝加尔湖西南地区的位势高度和山东半岛上空垂直速度异常则与前期土壤湿度的异常均呈负相关,即当春季土壤湿度偏低并持续至夏季时,局地的感热和潜热通量变化引起贝加尔湖西南地

区的位势高度正异常和山东半岛地区异常下沉运动。

4) 利用五个关键区前期春季的下垫面因子(海温和土壤湿度)构建山东半岛夏季降水的多元线性回归模型,经过留一交叉检验之后,预测距平符号准确率达到75%。

研究结果还显示山东半岛夏季降水存在年代际变化,在水汽输送方面也有以印度洋为主向以太平洋为主的转变趋势^[1]。本文中发现北太平洋中部地区位势高度异常与山东半岛夏季降水的遥相关^[17]可能是PDO影响中国东部夏季降水的体现,但对山东半岛夏季降水年代际变化问题并未深入考虑。不同年代下垫面因子的变化与水汽输送方向转换的关系,这种关系如何影响山东半岛夏季降水需要进一步分析。另外,海温或土壤湿度与上层大气之间相互作用的物理过程也有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] 商林, 顾伟宗, 汤子东, 等. 山东省夏季降水与赤道中东太平洋前期冬季海温对应关系的年代际变化[J]. 干旱气象, 2017, 35(4): 552-558.
- [2] 于群. 山东降水的多尺度性与地域特征研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [3] 陈菊英. 山东区域汛期旱涝预测概论[J]. 山东气象, 2001, 21(3): 12-17.
- [4] 王庆, 龚佃利, 孙即霖, 等. 山东夏季旱涝指数的振荡特征[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2004, 34(2): 173-181.
- [5] 胡桂芳. 山东夏季降水分布型及与全国雨型的关系[J]. 山东气象, 2011, 31(1): 1-4.
- [6] 张庆云, 陶诗言. 亚洲中高纬度环流对东亚夏季降水的影响[J]. 气象学报, 1998, 56(2): 199-211.
- [7] 徐桂玉, 杨修群, 孙旭光. 华北降水年代际、年际变化特征与北半球大气环流的联系[J]. 地球物理学报, 2005, 48(3): 511-518.
- [8] 郝立生, 闵锦忠, 顾光芹. 华北夏季降水减少与北半球大气环流异常的关系[J]. 大气科学学报, 2010, 33(4): 420-426.
- [9] 张寿荣, 陈余明, 胡永松, 等. 印缅槽和高原指数与春季降水的短期气候预测[J]. 贵州气象, 2013, 37(1): 29-30, 44.
- [10] 孙建奇, 袁薇, 高玉中. 阿拉伯半岛-北太平洋型遥相关及其与亚洲夏季风的关系[J]. 中国科学D辑: 地球科学, 2008, 38(6): 750-762.
- [11] 王会军, 范可, 郎咸梅, 等. 我国短期气候预测的新理论、新方法和新技术[M]. 北京: 气象出版社, 2012.
- [12] 王庆. 山东夏季降水与东亚夏季风以及大气环流异常的关系[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2003.
- [13] 王庆, 刘诗军. 影响山东夏季降水的季风水汽输送特征分析[J]. 气象科学, 2006, 26(2): 197-202.
- [14] 杨士恩, 王启. 山东夏季降水的气候特征及其成因[J]. 热带气象学报, 2007, 23(1): 65-71.
- [15] 滕华超. 山东省夏季降水与大气环流型关系分析[J]. 干旱气象, 2016, 34(5): 789-795.
- [16] 杨晓霞, 刘厚赞, 刘梦玉, 等. 海温场与副热带高压及山东夏季降水关系分析[J]. 南京气象学院学报, 1997, 20(2): 243-247.
- [17] 张苏平, 朱平盛, 胡桂芳. 山东夏季降水与北太平洋SST和大气环流的关系[J]. 气象, 1997, 23(4): 3-8.
- [18] 顾伟宗, 张莉, 王辉. 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(自然科学版), 2012, 42(12): 8-13.
- [19] 孟祥新, 王娜, 商林. 海温异常对山东夏季降水的影响分析[J]. 气象, 2017, 43(10): 1259-1266.
- [20] 刘永平, 张潇潇, 薛峰. 山东省夏季降水的年代际变化和年际变化[J]. 气象科技进展, 2016, 6(1): 21-25.
- [21] 陈乾金, 高波, 李维京, 等. 青藏高原冬季积雪异常和长江中下游主汛期旱涝及其与环流关系的研究[J]. 气象学报, 2000, 58(5): 582-595.
- [22] 马柱国, 魏和林, 符淙斌. 中国东部区域土壤湿度的变化及其与气候变率的关系[J]. 气象学报, 2000, 58(3): 278-287.
- [23] 马柱国, 符淙斌, 谢力, 等. 土壤湿度和气候变化关系研究中的某些问题[J]. 地球科学进展, 2001, 16(4): 563-568.
- [24] SHUKLA J, MINTZ Y. Influence of land-surface evapotranspiration on the Earth's climate[J]. Science, 1982, 215(4539): 1498-1501.
- [25] ALFARO E J, GERSHUNOV A, CAYAN D. Prediction of summer maximum and minimum temperature over the central and western United States: The roles of soil moisture and sea surface temperature[J]. J Climate, 2006, 19(8): 1407-1421.
- [26] 郭飞燕, 左卫强, 郭飞龙, 等. 伴随IOD型和独立型ENSO对山东气候年际变化的影响[J]. 海洋气象学报, 2017, 37(4): 34-48.
- [27] 郭飞燕, 毕玮, 郭飞龙, 等. 山东气候年际变化特征及其与ENSO的关系[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(3): 465-474.
- [28] 顾伟宗, 陈丽娟, 左金清, 等. 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, 2016, 40(4): 743-755.
- [29] 徐康, 祝从文, 何金海. 近50年环贝加尔湖区变暖对

- 中国华北夏季降水的影响机理[J]. 高原气象, 2011, 30(2):309-317.
- [30] 赵平, 周自江. 东亚副热带夏季风指数及其与降水的关系[J]. 气象学报, 2005, 63(6):933-941.
- [31] 程乘, 朱益民, 丁黄兴, 等. 中国东部地区夏季降水和环流的年代际转型及其与 PDO 的联系[J]. 气象科学, 2017, 37(4):450-457.
- [32] 杨修群, 朱益民, 谢倩, 等. 太平洋年代际振荡的研究进展[J]. 大气科学, 2004, 28(6):979-992.
- [33] NEWMAN M, ALEXANDER M A, AULT T R, et al. The pacific decadal oscillation, revisited[J]. J Climate, 2012, 29(12):4399-4427.
- [34] PENG S, ROBINSON W A, HOERLING M P. The modeled atmospheric response to midlatitude SST anomalies and its dependence on background circulation states[J]. J Climate, 1997, 10(5):971-987.
- [35] 陈烈庭. 热带印度洋—太平洋海温纬向异常及其对亚洲夏季风的影响[J]. 大气科学, 1988, 12(增刊):142-148.
- [36] 吴国雄, 刘平, 刘屹岷, 等. 印度洋海温异常对西太平洋副热带高压的影响——大气中的两级热力适应[J]. 气象学报, 2000, 58(5):513-522.
- [37] 陈迪, 高山红, 陈锦年, 等. 赤道东太平洋和印度洋—南海暖池海温场的协同作用对西太平洋副热带高压的影响[J]. 海洋学报, 2016, 38(2):1-15.
- [38] 王妍凤, 孙旭光, 杨修群. 积雪在 El Niño 影响东亚夏季气候异常中的作用[J]. 地球物理学报, 2017, 60(9):3325-3337.
- [39] PAL J S, ELTAHIR E A B. A feedback mechanism between soil-moisture distribution and storm tracks[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 2003, 129(592):2279-2297.
- [40] 张莞昕, 陈海山. 陆面热力异常与东亚夏季中纬度气旋年代际变化的联系[J]. 气象科学, 2017, 37(4):458-465.