

# 春季青藏高原感热对中国东部夏季降水的影响和预测作用<sup>\*</sup>

李秀珍<sup>1,2</sup> 唐旭紫<sup>3</sup> 李施华<sup>1</sup> 简茂球<sup>1</sup> 温之平<sup>4</sup>  
LI Xiuzhen<sup>1,2</sup> TANG Xuzi<sup>3</sup> LI Shihua<sup>1</sup> JIAN Maoqiu<sup>1</sup> WEN Zhiping<sup>4</sup>

1. 中山大学季风与环境研究中心/大气科学学院, 广州, 510275
2. 中山大学广东省气候变化与自然灾害研究重点实验室, 广州, 510275
3. 湘西州气象局, 湖南吉首, 416000
4. 复旦大学大气科学研究院, 上海, 200433

1. *Center for Monsoon and Environment Research and Department of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China*
2. *Guangdong Province Key Laboratory for Climate Change and Natural Disaster Studies, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China*
3. *Xiangxi Autonomous Prefecture Meteorological Bureau, Hunan Jishou 416000, China*
4. *Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200433, China*

2018-04-02 收稿, 2018-10-11 改回.

李秀珍, 唐旭紫, 李施华, 简茂球, 温之平. 2018. 春季青藏高原感热对中国东部夏季降水的影响和预测作用. 气象学报, 76(6):930-943

**Li Xiuzhen, Tang Xuzi, Li Shihua, Jian Maoqiu, Wen Zhiping. 2018. Impact of the spring sensible heat flux over the Tibetan Plateau on summer rainfall over East China and its role in rainfall prediction. *Acta Meteorologica Sinica*, 76(6):930-943**

**Abstract** By using observational data from 71 stations over the central and eastern Tibetan Plateau, monthly rainfall data from 756 rain gauges throughout China, HadISST v1.1 and ERA-Interim reanalysis data, impacts of the spring sensible heat flux over the Tibetan Plateau along with the global SST on rainfall over East China were investigated. The present study aims to improve the prediction skill of summer rainfall over China by using the sensible heat observations over the Tibetan Plateau in the preceding spring. Results show that there is a close relationship between the spring sensible heat flux over the Tibetan Plateau and rainfall over East China. When the upward sensible heat flux over the Tibetan Plateau increases in the spring, rainfall increases over the middle and lower Yangtze River valley in the spring and throughout the Yangtze River valley in the subsequent summer, whereas rainfall over Southeast China decreases. The increase of the sensible heat flux over the Tibetan Plateau concurs with a Rossby wave train along the middle-high latitudes of the northern hemisphere. The anticyclone robe over the North Pacific extends southwestward to the western North Pacific and transports abundant moisture to the Yangtze River valley. In the subsequent summer, the South Asian high shifts eastward and the western Pacific subtropical high shifts westward in the lower and middle troposphere, while a cyclonic anomaly occurs to the north. Under the control of the subtropical high, rainfall over Southeast China is inhibited; however, rainfall over the Yangtze River valley increases as abundant moisture is transported to this region by southerly flow to the west of the subtropical high. The southerly flow converges with the northerly flow to west of the cyclonic anomaly over the Yangtze River valley. The sensible heat flux over the Tibetan Plateau in the spring could

<sup>\*</sup> 资助课题:第三次青藏高原大气科学试验——边界层与对流层观测(GYHY201406001)、国家自然科学基金项目(41405045)。

作者简介:李秀珍,主要从事东亚季风、气候变化研究。E-mail: lixiuzhen@mail.sysu.edu.cn

通信作者:温之平,主要从事季风气象学、气候动力学研究。E-mail: eeswzp@mail.sysu.edu.cn

be a key precursor of summer rainfall over Southeast China and the Yangtze River valley. With its impact considered, the rainfall predictions are highly consistent with observations, and the prediction skill of the summer rainfall increases by nearly 15%.

**Key words** Sensible heat flux, Tibetan Plateau, Rainfall over East China, Prediction skill

**摘要** 利用1980—2012年青藏高原中、东部71个站点观测资料、全中国756站的月降水资料、哈得来中心提供的HadISST v1.1海温资料以及ERA-Interim再分析资料,综合青藏高原的感热加热以及全球海温,研究了春季青藏高原感热对中国东部夏季降水的影响,并建立预报方程,探讨了青藏高原春季感热对中国降水的预报作用。结果表明,青藏高原春季感热与中国东部降水关系密切,青藏高原春季感热异常增强伴随着长江流域中下游同期降水增多,后期夏季长江流域整流域降水也持续偏多,华南东部降水偏少。春季青藏高原感热的增强与环北半球中高纬度的罗斯贝波列密切相关,扰动在北太平洋形成的反气旋环流向西南方向延伸至西北太平洋,为长江流域输送大量的水汽,有利于降水的发生。夏季,伴随着前期青藏高原感热的增强,南亚高压位置偏东,西北太平洋副热带高压(西太副高)位置偏西偏南,西太副高北侧为气旋式环流异常。在西太副高的控制下,华南东部降水减少;西太副高西侧的偏南气流为长江流域带来大量水汽,并与来自北部气旋式环流异常西侧的偏北风发生辐合,降水增多。青藏高原春季感热异常是华南和长江流域夏季降水异常的重要前兆信号。加入青藏高原春季感热后,利用海温预报的华南、长江流域夏季降水量与观测值的相关系数有所提高,预报方程对区域降水的解释方差提高约15%。

**关键词** 感热通量, 青藏高原, 中国东部降水, 预报技巧

**中图法分类号** P457.6

## 1 引言

青藏高原位于欧亚大陆的副热带中东部地区,被称为“世界屋脊”,平均海拔高度在4000 m以上,约占对流层的三分之一。青藏高原对大气环流的作用主要通过机械作用和热力作用实现,当基本流较弱时,地形的热力作用更为重要。青藏高原上的加热直接作用于对流层中层大气,与周围的大气形成强烈的热力对比。青藏高原冬季为热汇,夏季是热源(Yeh, 1957; 叶笃正等, 1979)。随着季节演变,在北半球春季,青藏高原上空从热汇变为热源,地面感热是大气从冷源变为热源的主要贡献者(Shen, et al, 1986; Zhao, et al, 2001b)。Yanai等(1998)通过计算季节平均的大气显热源、显水汽汽垂直加热廓线,指出青藏高原大气热源春季的主要贡献来自地面感热,而夏季则来源于地面感热和潜热释放的共同作用(叶笃正等, 1979; Yanai, et al, 1998; Duan, et al 2005; Yang, et al, 2011)。春季作为由冬至夏的过渡季节,既是青藏高原由冷源向热源转换的时节,也是大气环流发生季节性突变的阶段。因此,研究青藏高原气候变化及其影响过程中关注春季感热的作用十分必要。

春季的感热加热异常信号可能通过土壤温度和湿度的“记忆”(吴国雄等, 1997; 赵勇等, 2009; 朱玉祥等, 2007)以及非绝热加热-局地环流的正反馈

过程(Wang, et al, 2014)得到维持,并影响夏季的气候。青藏高原春季感热加热作用是青藏高原气泵影响夏季风的驱动者,并被命名为“感热驱动气泵(Sensible Heat driven Air Pump)”。春季青藏高原表面感热加热与季节转换期间东亚大气环流的突变密切相关,并导致亚洲夏季风首先在孟加拉湾东部地区爆发(吴国雄, 2004)。若没有青藏高原表面的感热加热,青藏高原上空的抽/排气泵只能影响对流层中、上层的环流,不能影响低空环流及季风(吴国雄, 2004)。青藏高原感热加热作用在调节东亚季风、南亚季风以及整个亚—澳季风区及全球气候中具有重要作用(杨伟愚等, 1992; Wu, et al, 2012; 张盈盈等, 2015)。

青藏高原春季感热加热与中国东部降水关系密切。青藏高原春季热状况对中国东部夏季降水具有重要的指示意义(Zhao, et al, 2001a, 2007)。夏季长江中下游流域降水与青藏高原春季感热和印度中部地区春季感热异常显著正相关,春季地表感热通量异常影响后期印度夏季风的强弱,进而通过印度季风和东亚夏季风环流的遥相关关系导致东亚季风强度变化及中国夏季降水的异常(王林等, 2011)。Hu等(2015)对比了印度洋全区海温与青藏高原加热作用对东亚夏季气候的影响,指出青藏高原的热力加热作用对长江流域—日本的梅雨雨带的影响比印度洋海温的影响更大。当青藏高原的热

力加热作用偏强时,可激发青藏高原上空反气旋环流异常,低层在中国南部的偏南风异常和北部的偏北风异常,南、北风异常在长江流域—日本一带汇合,有利于降水的发生。青藏高原上的热源减弱,可导致东侧低层南风减弱、华南降水(包括强降水、降水强度以及降水频率)增多(吴国雄等,2016),同时中国北部及东北部降水减少(Duan, et al, 2013)。

青藏高原热状况在亚洲区域气候的年代际变化中扮演着重要的角色。刘森峰等(2017)研究指出,春季青藏高原感热在年际和年代际尺度上对中国东部夏季降水都有着较好的预报作用。20世纪80年代以来,青藏高原表面感热加热持续下降,华南夏季降水增多,同时伴随南亚高压的增强和南亚上空的显著变暖(Wu, et al, 2015)。Duan等(2013)利用观测资料以及数值模拟试验指出,青藏高原春季感热近几十年的减弱趋势可推迟海-陆温差的季节转换以及减弱季风的强度。青藏高原感热的变化原因至今尚未清楚,部分工作指出青藏高原表面风速变化是影响青藏高原热状况的关键(Duan, et al, 2008; Yang, et al, 2011; Liu, et al, 2012)。

除趋势变化外,青藏高原春季感热也存在明显的年际变化,占总变率的40%(图1b),过去关于青藏高原感热及其对东亚气候影响的研究颇多,但大部分研究只单独考虑青藏高原热状况的影响,并没

有将青藏高原热状况与其他影响因子,如海温联系起来进行综合分析。实际上,青藏高原本身的干、湿及热力状况与海温是密切相关的,如Cui等(2009)指出,北大西洋海温异常三极型分布将激发一个稳定的向下游传播的罗斯贝波列,使得青藏高原上空的西风加强,从而使得青藏高原大部分地区的感热加强。因而,本研究将综合青藏高原的感热加热以及全球海温来考察其对中国东部降水的影响,并建立预报方程,揭示青藏高原春季感热可作为重要的预报因子提升中国夏季降水的预报能力。

## 2 资料与方法

所用的青藏高原感热是由青藏高原中、东部共71个站点(图1a)观测的地表温度、2 m气温及10 m风速按以下计算公式得出

$$SH = c_p \rho C_{DH} V_{10} (T_s - T_a) \quad (1)$$

式中,SH为感热; $c_p = 1005 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 为定压比热; $\rho$ 为大气密度,取 $\rho = 0.8 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;  $C_{DH}$ 是整体热交换系数,对于青藏高原中、东部(青藏高原 $85^\circ\text{E}$ 以东地区),取 $C_{DH} = 4 \times 10^{-3}$ , $V_{10}$ 为10 m风速; $T_s$ 为地表温度; $T_a$ 为2 m气温(Duan, et al, 2011)。资料的时间分辨率为逐6 h一次。文中采用所有站点平均的感热代表青藏高原的感热强度。

季节降水量是中国气象局气象数据中心提供的

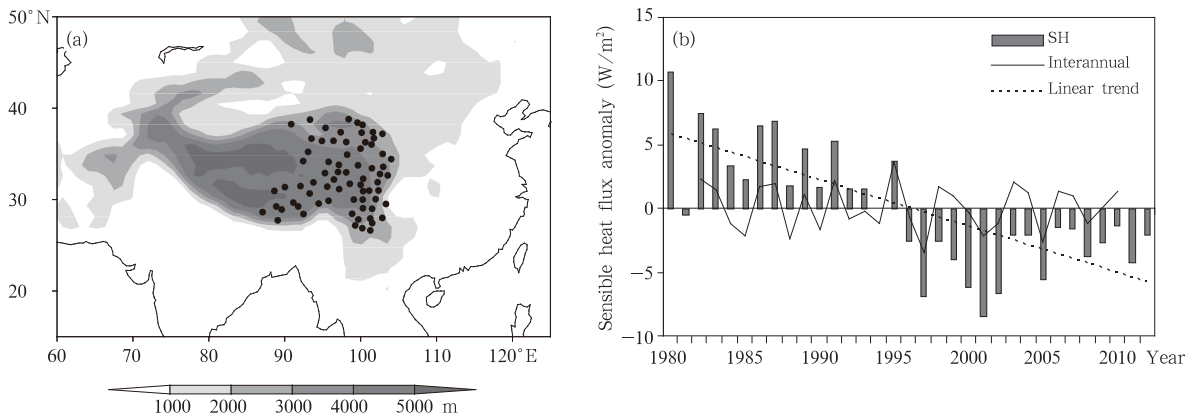


图1 (a)青藏高原的地形(灰阶)以及中、东部71个站点分布,(b)青藏高原春季感热距平的时间序列(柱状图)、年际分量(实线,为利用高通滤波得出的10 a周期以下的信号)及线性趋势(虚线)

Fig. 1 (a) Spatial distribution of terrain (shaded) and locations of 71 stations over the central and eastern Tibetan Plateau; (b) time series of regionally averaged sensible heat flux anomaly over the Tibetan Plateau in the spring (columns), its inter-annual component (solid line, the inter-annual component is calculated by using high-pass (<10 a) filter) and linear trend (dashed line)

全中国 756 站的降水月值资料计算所得。其他再分析资料包括哈得来中心提供的空间分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$  的月平均海温资料以及欧洲中期天气预报中心提供的空间分辨率为  $1.25^\circ \times 1.25^\circ$  的 ERA-Interim 资料中的风场、垂直运动场、高度场以及整层积分的水汽输送通量场等。由于青藏高原感热数据的限制,文中所用资料的时间长度为 1980—2012 年,共 33 a。

本研究重点关注年际变化尺度,采用 Lanczos 高通滤波分析,10 a 以下周期的信号代表年际变化信号。除了采用传统的相关分析、偏相关、偏回归分析方法外,还引用逐步回归分析,利用海温以及青藏高原感热作为预报因子,建立中国东南部、长江流域夏季降水的预报方程。文中的冬季为 12 月一次年 2 月,春季为 3—5 月,夏季为 6—8 月的平均。

### 3 青藏高原春季感热与中国降水的关系

青藏高原感热与中国尤其是东部降水的关系密切。由青藏高原春季感热与中国春季、夏季降水的相关分析(图 2)可见,同期春季,青藏高原感热与青藏高原以及中国西南部的降水呈显著负相关,这可能与导致青藏高原感热减少的大气环流密切相关;另一显著负相关的区域位于中国东北北部以及西北部。春季青藏高原感热与长江中下游春季降水呈显著正相关,当青藏高原感热增大时,长江中下游降水显著增多。春季青藏高原感热与夏季降水相关的空间分布则较为分散。总的来说,当春季青藏高原感热增大时,后期夏季青藏高原东侧以及整个长江流域降水增多,华南东部以及河套流域、东北中部降水减少。刘森峰等(2017)的工作中也指出,青藏高原

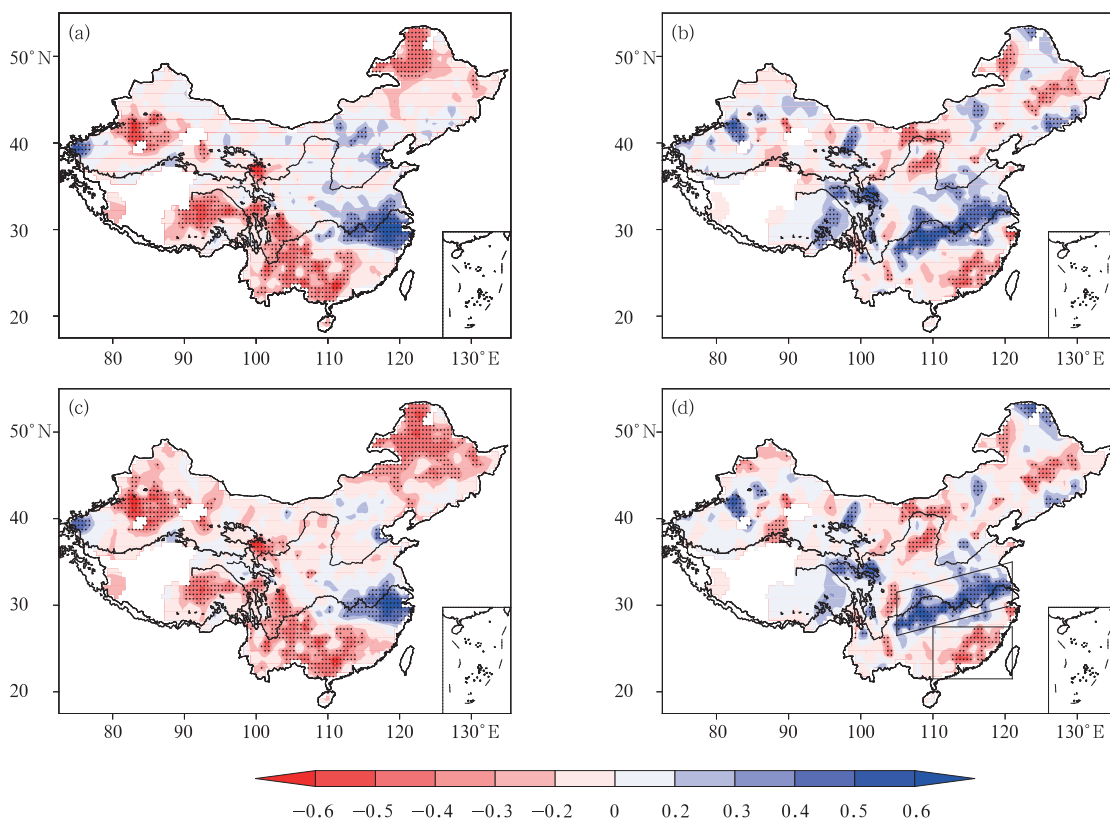


图 2 青藏高原春季感热的年际分量与中国季节降水的相关系数分布  
(a. 春季, b. 夏季, c, d. 同 a, b, 但为去掉前期冬季 Nino 3.4 区海温影响后的偏相关系数; 打点区域为通过 90% 置信水平的区域)

Fig. 2 Correlation coefficients between sensible heat flux over the Tibetan Plateau in the spring and seasonal rainfall over China on inter-annual timescale

(a) spring; (b) summer; (c, d) are similar to (a, b) but with pre-winter Nino 3.4 index being removed. Dotted areas are for results significant at the 90% confident level

春季感热的年际变化与长江流域的降水关系密切,主要的关联区与本研究中的高相关区一致。

东太平洋海温异常也是调控东亚降水的关键因子。厄尔尼诺事件发生时可通过调控菲律宾反气旋及西北太平洋副热带高压(西太副高)的活动,为东亚地区输送大量的水汽,导致衰亡期春季整个中国东部降水偏多,夏季华南降水偏少,长江流域降水偏多(Li, et al, 2012, 2014)。厄尔尼诺/南方涛动(ENSO)事件能解释中国东部降水变率的 20% (Wu, et al, 2003)。为分析青藏高原春季感热对东亚降水的影响是否独立于 ENSO 信号,图 2c、d 给出去掉 ENSO 影响后,感热与同期以及后期夏季降水的偏相关。对比图 2a、b 与图 2c、d 可发现,东太平洋海温异常在青藏高原春季感热对同期以及后期

东亚夏季降水的调节作用中影响很弱。青藏高原春季感热对东亚降水的影响在一定程度上独立于 ENSO 的影响。

#### 4 青藏高原感热影响中国东部夏季降水的机制

##### 4.1 环流及水汽条件

青藏高原感热加热作为青藏高原加热的初步加热,是青藏高原影响季风的关键。青藏高原感热加热增强后,可驱动东侧季风的增强及对流降水,进一步影响高层大气,从而影响后期东亚降水(吴国雄等, 1999; Liu, et al, 2001)。利用青藏高原春季感热指数回归低层环流以及 500 hPa 垂直运动速度(图 3a)可见,春季,当青藏高原地面对上空大气的

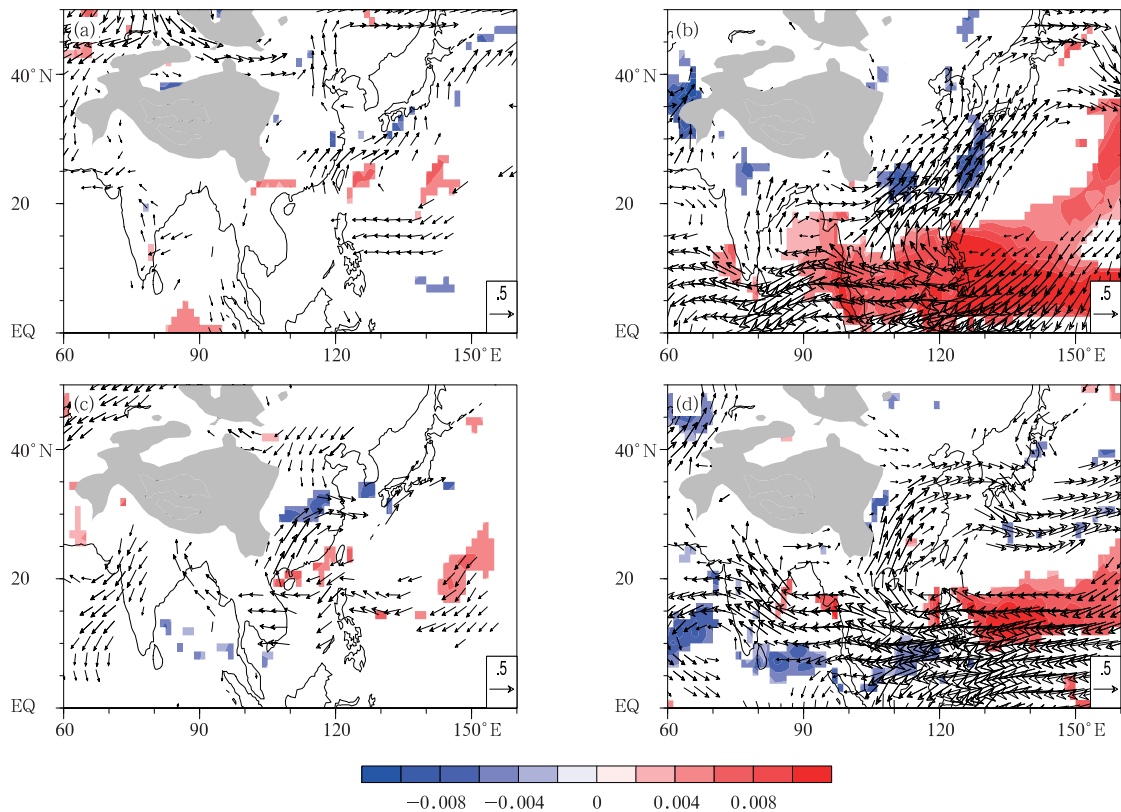


图 3 青藏高原春季感热的年际分量偏回归的季节平均 850 hPa 风场(矢线,单位: m/s)和 500 hPa 垂直运动场(色阶,单位: hPa/s)

(a. 春季, c. 夏季, 去掉前期冬季 Nino3.4 区海温影响, b, d. 同 a, c, 但为 Nino3.4 指数偏回归, 去掉青藏高原春季感热的影响, 结果均通过 90% 置信水平  $t$  检验)

Fig. 3 Partial regressions of seasonal 850 hPa horizontal wind (vectors, unit: m/s) and 500 hPa vertical motion (shadings, unit: hPa/s) on the sensible heat flux over the Tibetan Plateau with pre-winter Nino3.4 index being removed.

(a) spring, (c) summer; (b), (d) are similar to (a), (c), but for regressions against pre-winter Nino 3.4 index with the spring sensible heat flux over the Tibetan Plateau being removed.

Only those results significant at the 90% confident level  $t$ -test are shown



感热加热作用增强时,伴随着低层由北太平洋延伸至中国东南部的反气旋式气流,来自西北太平洋的东风异常在中国南海北部折向成西南风异常,并在长江中、下游发生辐合上升;整层积分的水汽输送异常与低层的环流异常一致,大量来自西北太平洋的水汽,在异常风场的作用下输送至长江中下游至日本一带并发生辐合,有利于降水的发生(图 4a)。夏季,青藏高原前期感热加强可导致夏季西太副高位置偏西、偏南,同时,在中国北部诱发一气旋式环流异常;来自西北太平洋的东风异常在中国南海中、北部转向为西南风异常,与华北的偏北风异常在长江流域至日本南部一带辐合上升,与此对应,华南受反

气旋环流控制,以下沉运动为主(图 3c)。水汽环流场上也呈现相似的特征,反气旋式环流控制的华南区域,水汽辐散,不利于降水的形成;向北的水汽输送异常与来自中纬度的气旋环流西侧的向南水汽输送异常在长江流域至日本南部一带辐合,有利于降水的增多(图 4c)。为了进一步探讨青藏高原春季感热对东亚降水的影响是否独立于 ENSO 的影响,图 3b、d 与 4b、d 也给出由 Nino 3.4 指数偏回归的环流场及水汽输送场。ENSO 对低层风场以及水汽输送通量的影响较青藏高原感热作用强,但其相应的辐合以及垂直运动在长江流域较弱,尤其在夏季,尽管大量的水汽在西北太平洋反气旋异常环流的作

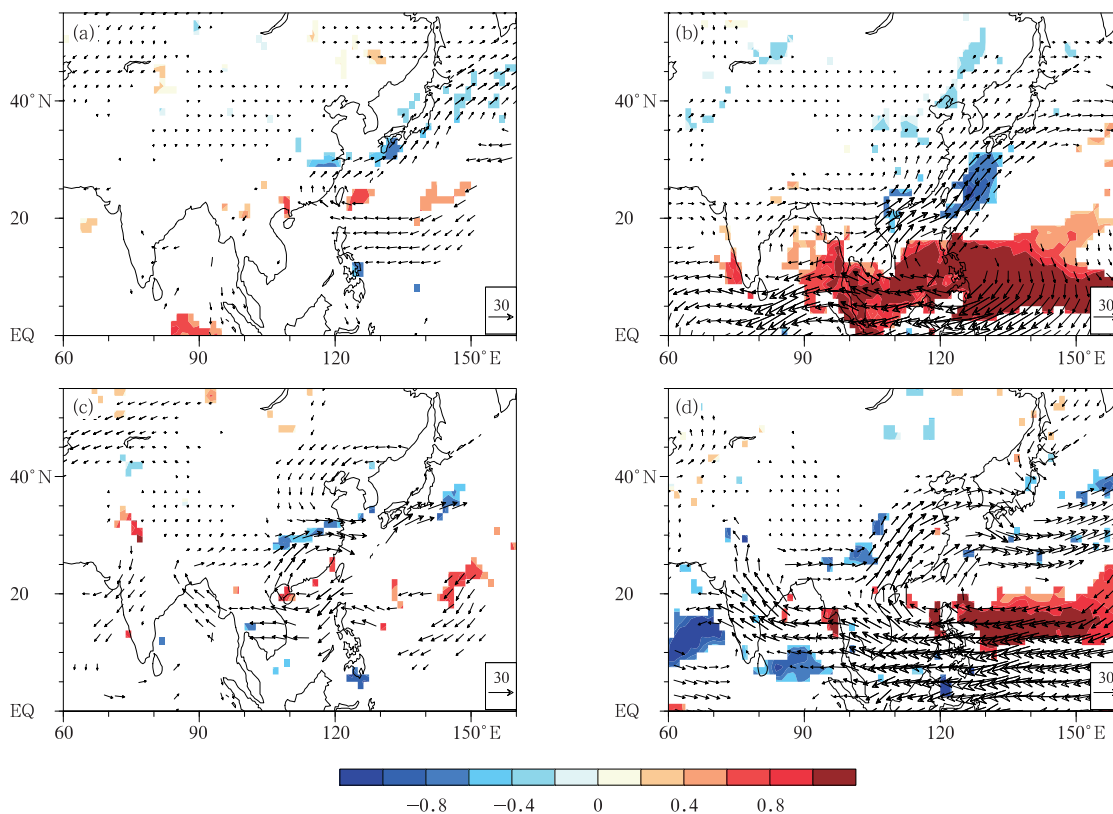


图 4 青藏高原春季感热的年分量偏回归的季节整层积分水汽输送通量(矢量,单位:kg/(m·s))及其散度(色阶,单位:10<sup>-5</sup> kg/(m<sup>2</sup>·s))

(a. 春季、c. 夏季,去掉前期冬季 Nino3.4 区海温影响,b,d. 同 a,c,但为 Nino 3.4 指数偏回归,去掉青藏高原春季感热的影响。结果均通过 90%置信水平 t 检验)

Fig. 4 Partial regressions of seasonal vertical integral of water vapor flux (vectors, unit: kg/(m·s)) and its divergence (shadings, unit: 10<sup>-5</sup> kg/(m<sup>2</sup>·s)) on the sensible heat flux over the Tibetan Plateau with pre-winter Nino 3.4 index being removed.

(a) spring, (c) summer; (b), (d) are similar to (a), (c), but for regressions on pre-winter Nino 3.4 index with the spring sensible heat flux over the Tibetan Plateau being removed.

Only those results significant at the 90% confident level t-test are shown

用下被输送至东亚上空,由于缺少水汽辐合的机制,水汽辐合/辐散在陆地上较弱,主要位于海洋上(图4d)。相对于夏季,ENSO对春季华南地区水汽供应的影响显著,厄尔尼诺衰减期的春季华南水汽辐合增强,伴随上升运动,降水增多(图略),这也是在去掉ENSO影响后青藏高原春季感热与春季华南降水的负相关稍微增强(图2c)的原因。

#### 4.2 遥相关波列

由前文分析可见,青藏高原春季感热的异常与春季、夏季东亚降水的耦合关系都是通过调控西北太平洋的反气旋异常实现,但两者的形态存在明显差异,春季反气旋是由北太平洋延伸至西北太平洋,夏季反气旋主要以纬向分布为主,位于西北太平洋。为了进一步分析该反气旋的结构,以及可能的形成机制,利用青藏高原春季感热回归各高度上的位势

高度,结果如图5所示。春季,当青藏高原感热加热增强时,中、高纬度大气出现一支由北大西洋经欧亚大陆北部向太平洋,然后经北美中部传向北大西洋的环绕北半球的波列。垂直方向上该波列呈准正压结构,各活动中心在高、中、低层大气中的位置变化不大(图5a,c,e)。图6给出相应的波活动通量和准地转流函数。由图5、6可见,波列中位于亚欧大陆北部的正位势高度活动中心信号最为显著,输出的波活动通量最强,该活动中心输出的能量经下游位于贝加尔湖的负位势高度活动中心向北太平洋传播(图6a,c,e),导致北太平洋为一反气旋式气流异常控制,它向西北太平洋延伸可影响东亚的水汽环流,导致长江中下游降水增多;贝加尔湖上的活动中心异常在高层除了向北太平洋传播外,还向南传播至青藏高原上空,对应春季青藏高原上空的正位势高

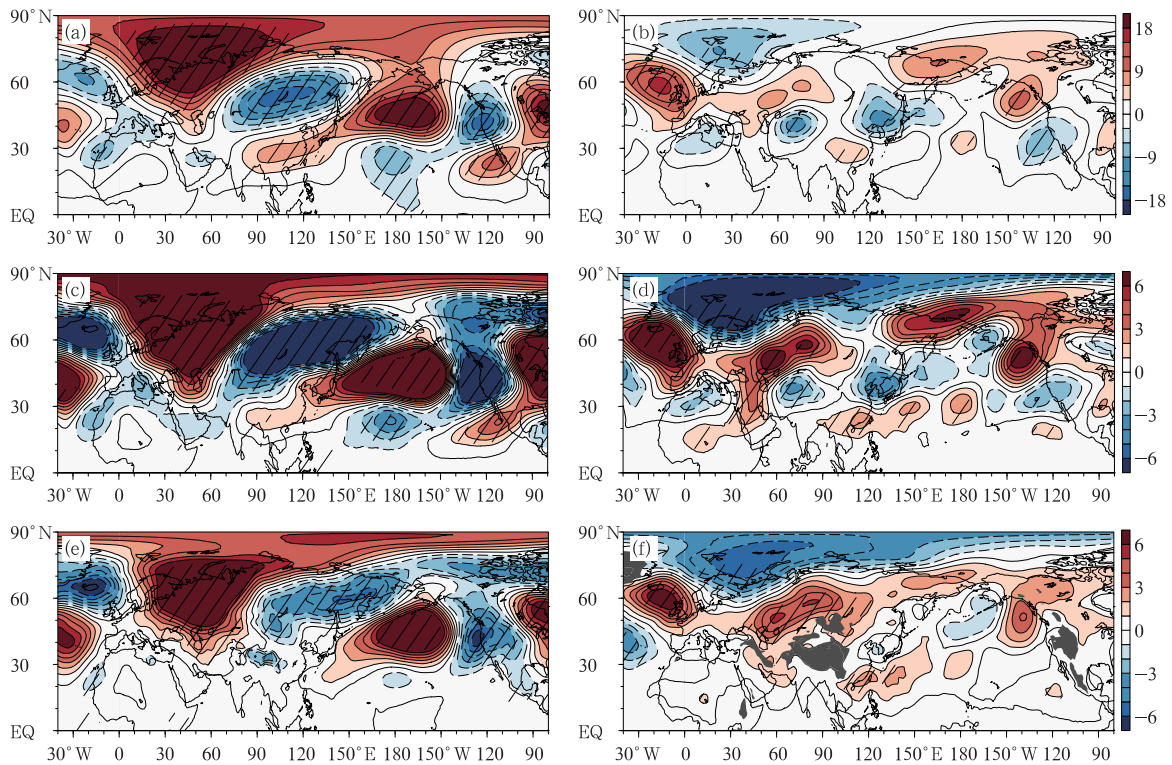


图5 去掉前期冬季 Nino3.4 区海温影响后的青藏高原春季感热的年际分量偏回归的位势高度场

(a,c,e. 春季, b,d,f. 夏季, 单位: gpm; a, b. 200 hPa, c, d. 500 hPa, e, f. 850 hPa; 斜线填充区域为通过 90% 置信水平  $t$  检验)

Fig. 5 Partial regressions of seasonal geopotential height (gpm) on sensible heat flux over the Tibetan Plateau with the pre-winter Nino 3.4 index being removed (a, c, e) spring; (b, d, f) summer; (a, b) 200 hPa; (c, d) 500 hPa; (e, f) 850 hPa.

The slashes indicate results significant at the 90% confident level  $t$ -test

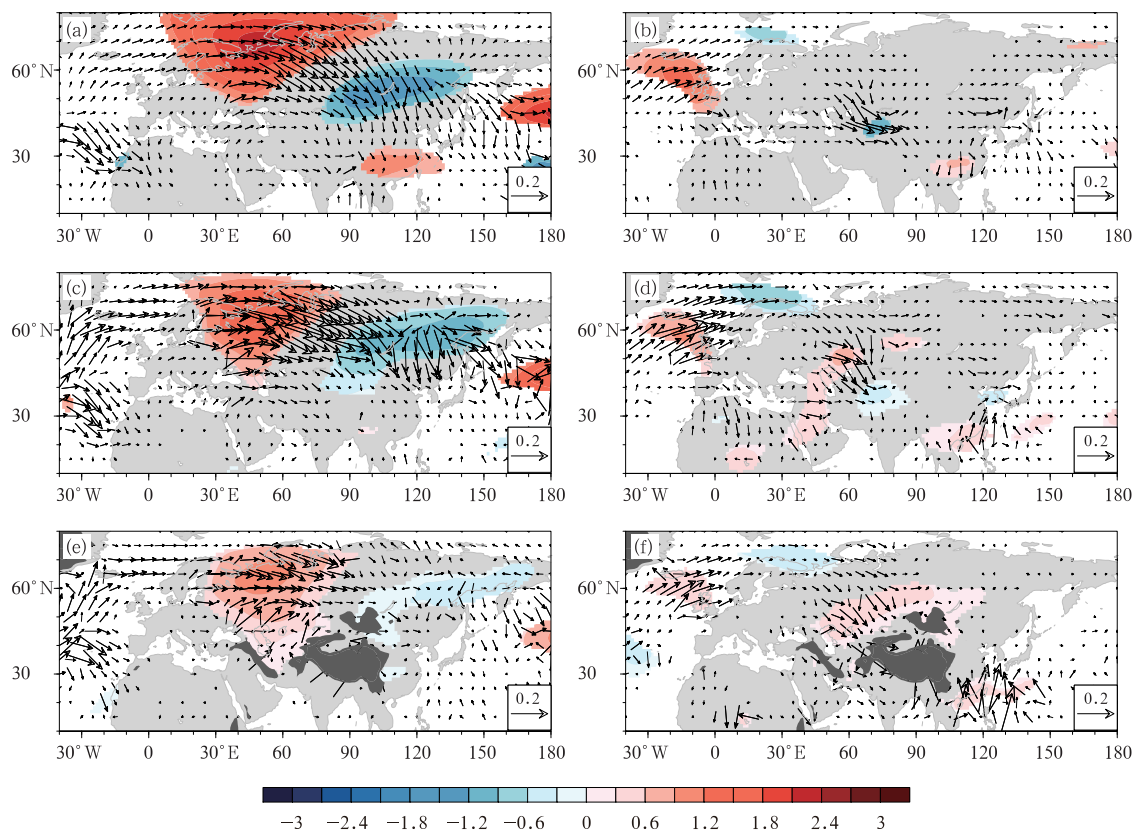


图6 去掉前期冬季 Nino 3.4 区海温影响后的青藏高原春季感热的年际分量偏回归的波活动通量(矢线,单位: $\text{m}^2/\text{s}^2$ )及准地转流函数(色阶,单位: $10^6 \text{m}^2/\text{s}$ ,通过 90%置信水平  $t$  检验)  
(a、c、e. 春季, b、d、f. 夏季; a、b. 200 hPa, c、d. 500 hPa, e、f. 850 hPa)

Fig. 6 Partial regressions of seasonal Rossby wave activity flux (vectors, unit:  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ) and quasi-geostrophic stream function (shadings, unit:  $10^6 \text{m}^2/\text{s}$ ) on the sensible heat flux over the Tibetan Plateau (Only those results significant at the 90% confident level  $t$ -test are shown) with the pre-winter Nino 3.4 index being removed  
(a, c, e) spring, (b, d, f) summer; (a, b) 200 hPa, (c, d) 500 hPa, (e, f) 850 hPa

度异常(图 5a)。因而,青藏高原的感热加热的异常及其耦合的东亚降水异常都可能是上游波列,尤其是亚欧大陆北部的扰动传播的结果。

夏季,前期春季环北半球中、高纬度的波列消失,取而代之出现一支西北大西洋—北欧—里海西北侧—青藏高原西北侧的波列(图 6b、d、f),来自大西洋的扰动信号可通过波列调控路径上各活动中心,并影响青藏高原西北侧的气候异常。波活动通量场上可见,东亚地区的环流异常与来自大西洋的波列关系不大。由前面的分析得知,长江流域夏季的降水异常与青藏高原春季感热异常的正相关关系与西北太平洋反气旋和北部的气旋式异常密切相关。该反气旋-气旋对在高度场上显著,但主体位于不同高度。南侧的反气旋主要位于低、中层大气,北

侧的气旋式异常则主要处于中、高层大气(图 5b、d、f)。王林等(2011)指出对应于中国东部  $30^\circ\text{N}$  青藏高原春季的感热通量异常,中国东南部有一反气旋性环流异常,西南部地区则有一气旋性环流异常,伴随着春季江南地区西南风强度的改变,进而引起东亚夏季风强度的异常,这与图 3a、c 的结果一致,青藏高原春季感热加热偏强时,低层华南受西南风异常控制,该西南风异常可由春季一直持续至夏季,对应着东亚夏季风偏强、长江降水偏多。高层,200 hPa 高度场上可见青藏高原东部及中国东南部为正高度场异常(图 5b),对应着南亚高压的位置偏东,这可能是青藏高原前期感热加热作用增强的结果。过去的研究指出,青藏高原感热加热作为初步加热,进一步可激发东侧季风对流加热,从而影响整



个对流层的环流变化,尤其是南亚高压的形成及其剧烈增长(叶笃正等, 1979b; 吴国雄等, 1999; Liu, et al, 2001)。伴随着南亚高压的位置偏东,中层以及低层西太副高的位置偏西,导致华南地区受异常高压控制(图 5d、f),降水偏少。这与陶诗言等(1964)提出的南亚高压与西太副高的变动存在“相向而行”或“相背而行”的联系(刘屹岷等, 1999)以及吴国雄(2004)指出的当南亚高压偏东时中国南方降水偏少,长江流域降水偏多一致。此外, Hu 等(2015)指出,青藏高原加热作用的增强可在华北地区激发偏北风异常,从图 5b、d 可见,偏北风异常与中心位于中国北部至日本之间的气旋性异常密切相关,其西侧的偏北风异常与西太副高西侧的偏南风异常在长江流域发生强烈辐合,是导致长江流域降水增多的重要原因。

从夏季波活动通量场上可见,中、低层波活动通量由副热带地区向中纬度的气旋异常活动中心输送,但气旋活动较强的高层大气则不明显。因而中国北部的气旋异常一方面可能是受青藏高原感热增强直接调控的结果(Hu, et al, 2015),另一方面则可能是青藏高原感热通过调控南亚高压的位置,继而导致西太副高偏西偏强,通过遥相关作用激发产生的。

## 5 青藏高原春季感热在华南、长江流域夏季降水预报中的作用

由以上分析可知,青藏高原春季感热与中国夏季长江流域以及华南地区降水关系密切。前期春季感热的增强,可通过激发西太副高位置偏西偏南,以及华北的气旋异常,导致华南降水偏少,长江流域降水偏多。青藏高原春季感热是中国东部夏季降水异常的前兆信号。为了更好地对中国东部夏季降水进行预报,文中利用青藏高原春季感热作为预报因子建立夏季华南区域以及长江流域降水的预报方程,并结合海温的作用,评价青藏高原春季感热对两个区域降水的预报作用。

华南以及长江流域的区域范围如图 2d 所示,两个区域的年际夏季降水量与青藏高原春季感热的相关系数分别为  $-0.44$  和  $0.53$ ,通过 98% 的信度  $t$  检验。此外,为了检验青藏高原感热加热对降水的预报作用是否独立于海温的影响,文中先利用区域降水与前期海温进行偏相关分析,找出与降水关系密

切且独立于青藏高原感热作用的高相关海温作为夏季降水的预报因子,并对比引入青藏高原感热作用前后,区域降水的预报效果是否有所提高。由于前期冬季以及春季的关键海区(图略)的位置仅存在微小差别,结果类似,故重点分析冬季海温和春季青藏高原感热对中国东部夏季降水的预报作用。结果如图 7 以及表 1、2 所示。华南区域平均降水与前期冬季海温偏相关的显著区大多位于南半球,赤道东太平洋海温与华南降水的偏相关较弱。最强的相关海区出现在南印度洋东侧,成负相关( $-0.56$ ),其与西侧的暖海区呈一偶极子结构。该偶极子结构的海温异常与华南夏季降水的联系一直持续至春季(图略),一定程度上说明该海温异常信号具有一定的持续性。这与副热带印度洋偶极子的海温异常结构(Behera, et al, 2001)非常相似。副热带偶极子的正位相对应着澳大利亚西侧冷海温异常和马达加斯加南侧的暖海温异常,往往在北半球冬季达到最强,春季持续,夏初减弱消失,其形成与副热带高压的位置异常及其导致的局地海表蒸发异常密切相关。该偶极子可通过调控马斯克林高压的位置从而影响印度夏季风活动(Behera, et al, 2001),导致西太副高加强南撤西伸,南亚高压偏强位置偏东,对中国东部夏季降水异常产生显著的影响(贾小龙等, 2005)。值得注意的是,前人定义的偶极子多呈西南—东北走向,但图 7a 中印度洋海温的正—负中心主要以西—东向为主,且信号中心位置偏南,这种海温结构的差别在其影响中国南部降水的机制上是否存在差别仍有待进一步探究。

挑选出如图 7a 所示的分别位于南印度洋、南太平洋以及南大西洋的 5 个关键海区的标准化的海温作为华南夏季降水的预报因子进行拟合分析,拟合方程如式(2)所示。只有东印度洋海区、西南大西洋的海温异常是华南夏季降水的显著预报因子,其中东印度洋的海温对华南夏季降水的预报作用(拟合系数:  $-12.8$ )比西南大西洋的( $8.3$ )更为重要。拟合值与实际降水量的相关系数为  $0.63$ ,通过 99% 的信度  $t$  检验;当加入青藏高原春季感热加热的影响后,拟合方程如式(3)所示,虽然只有东印度洋海区的海温异常仍是华南夏季降水的显著预报因子,但由于增加了青藏高原感热的作用,拟合值与实际降水量的相关系数提升至  $0.75$ ,预报因子对降水的解释方差上升 16%。由拟合方程的系数可见,东印度

洋海区的海温的预报作用仍最为重要,比青藏高原春季感热的作用稍高。区域平均降水量与拟合降水

量的变化曲线如图 8a 所示,增加青藏高原春季感热作用的降水拟合值比仅考虑海温作用的拟合值更接

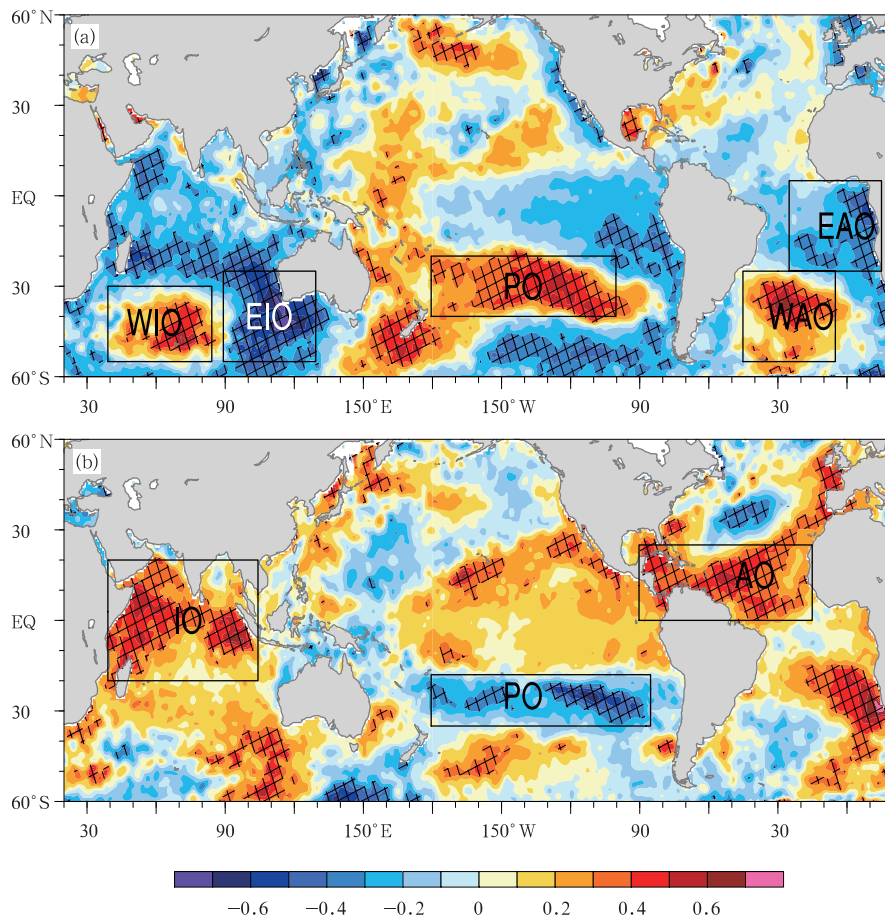


图 7 去掉青藏高原春季感热影响后的区域平均夏季降水与前期冬季海温的偏相关系数

(a. 华南东部, b. 长江流域; 菱形填充区域为通过 90% 置信水平  $t$  检验。长江流域及华南东部区域范围如图 2d 所示)

Fig. 7 Partial correlation coefficients between rainfall in the summer and sea surface temperature in the preceding winter with the impact of sensible heat flux over the Tibetan Plateau in the spring being removed (a. Southeast China, b. Yangtze River valley; Square-filled areas indicate results significant at the 90% confident level  $t$ -test; The areas of Southeast China and Yangtze River valley are shown in Fig. 2d)

表 1 华南东部夏季降水的逐步回归分析

Table 1 Stepwise regression of summer rainfall over Southeast China

夏季 华南	冬季					春季 SH	相关系数 (拟合, 观测)
	WIO	EIO	PO	WAO	EAO		
1	/	-12.8	/	8.3	/	—	0.63**
2	/	-17.2	/	/	/	-13.9	0.75**

注: 预报因子为前期冬季海温和青藏高原春季感热, 其中各海区的范围如图 7a 所示。 \*\* 代表相关系数通过 99% 置信水平。

表 2 长江流域夏季降水的逐步回归分析

Table 2 Stepwise regression of summer rainfall over Yangtze River valley

夏季 长江流域	IO	冬季 PO	AO	春季 SH	相关系数 (拟合,观测)
1	/	-14.3	/	—	0.52**
2	/	/	10.5	13.6	0.65**

注:各海区的范围如图 7b 所示,\*\*代表相关系数通过 99%置信水平。

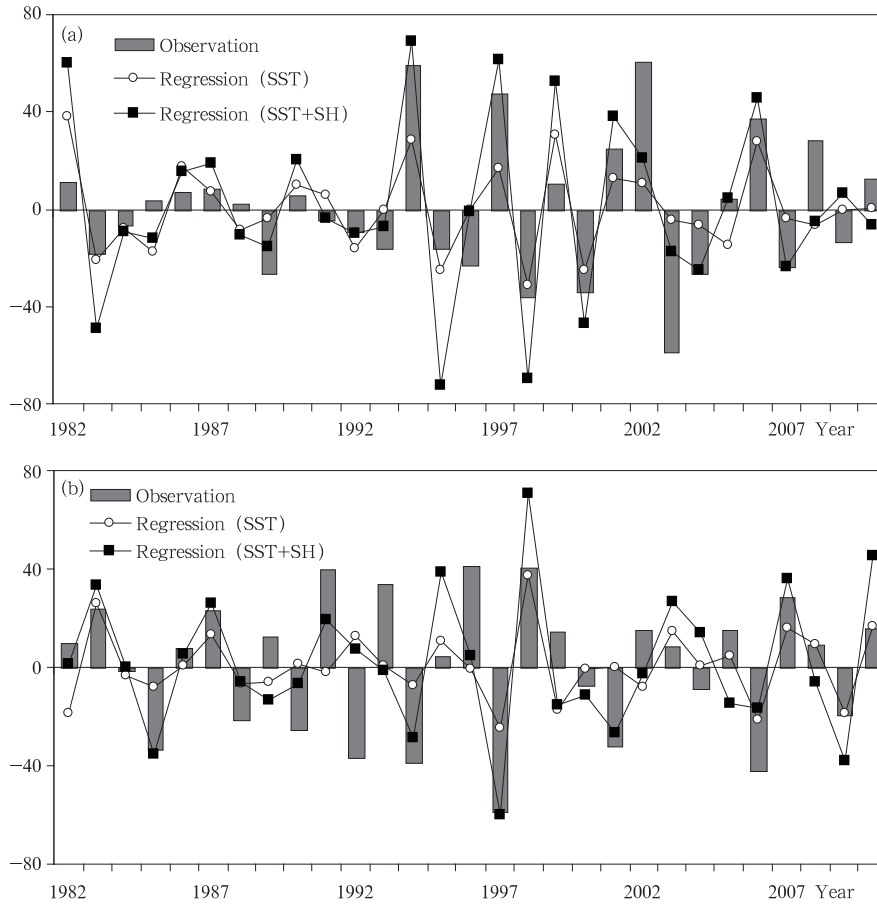


图 8 区域平均夏季降水异常(单位:mm)的观测值与拟合值的时间序列  
(a. 华南东部, b. 长江流域)

Fig. 8 Times series of observed and regressed summer rainfall abnormal over (a) Southeast China and (b) Yangtze River valley

近实际降水。

$$P_{SC} = 0.48 - 12.8SST_{EIO} + 8.3SST_{WAO} \quad (2)$$

$$P_{SC} = 0.49 - 17.2SST_{EIO} - 13.9SH \quad (3)$$

式中,  $P_{SC}$  为华南夏季降水,  $SST_{EIO}$  为南印度洋冬季海表温度,  $SST_{WAO}$  为南大西洋冬季海表温度,  $SH$  为青藏高原春季感热。

长江流域的区域平均夏季降水与全球海温的偏相关结果(图 7b)显示关键海区主要位于赤道印度

洋、南太平洋以及北大西洋低纬度海域,其他海域亦存在显著相关,但由于海区较小,故未被挑选为预报因子。在加入青藏高原春季感热作用前后,拟合方程如式(4)、(5)所示,拟合值与观测值的相关系数由 0.52 升至 0.65,预报因子对降水的解释方差上升 15%。值得一提的是,与华南地区不同,青藏高原感热对长江流域降水的预报作用比海温稍高。同样地,增加青藏高原春季感热作用的降水拟合值比仅

考虑海温作用的拟合值更接近实况(图 8b)。

$$P_{YRV} = 0.80 - 14.3SST_{PO} \quad (4)$$

$$P_{YRV} = -0.79 + 10.5SST_{AO} + 13.6SH \quad (5)$$

式中,  $P_{YRV}$  为长江流域夏季降水,  $SST_{PO}$  为南太平洋冬季海表温度,  $SST_{AO}$  为北大西洋冬季海表温度,  $SH$  为青藏高原春季感热。

由此可见,青藏高原春季感热在华南以及长江流域的夏季降水预报中作用明显。引入青藏高原感热作用后,两个区域的降水预报能力均提升约 15%。因而,在中国东部夏季短期气候预报中,前期青藏高原春季感热的作用不可忽略。

## 6 小 结

青藏高原春季感热与中国东部降水关系密切,青藏高原春季感热异常增强伴随着长江流域中下游同期降水增多,后期夏季长江流域整流域降水持续偏多,华南东部降水偏少。此关系独立于 ENSO 信号,并在环流场以及水汽输送场上表现一致。春季,青藏高原感热的增强与环北半球中高纬度的波列密切相关,在东亚地区波列路径分裂为两支,一支向青藏高原上空传播,可能是导致青藏高原上空感热变异的原因之一,另一支则向北太平洋传播,形成的反气旋环流向西南方向延伸至西北太平洋,并为长江流域降水输送大量的水汽,为降水的发生创造有利条件。夏季,波列的结构发生变化,来自大西洋的波列较春季弱,且只影响青藏高原西侧,春季青藏高原感热的增强伴随着高层夏季南亚高压位置偏东,中层和低层西太副高位置偏西偏南,同时西太副高北侧存在一气旋式环流异常。在西太副高的控制下,华南东部降水减少;西太副高西侧的偏南气流为长江流域带来大量水汽,并与来自北部的偏北风异常发生辐合,降水增多。

青藏高原春季感热异常是华南和长江流域夏季降水异常的重要前兆信号。利用青藏高原感热结合前期冬季/春季全球海温作为预报因子,对华南东部、长江流域夏季降水分别进行逐步回归分析发现,加入青藏高原春季感热后,拟合的降水量与实际降水量的相关系数均有所提高,两个区域的降水预报能力均提升约 15%。

本研究仅考虑了青藏高原春季感热异常在年际

尺度上对中国东部降水的影响和预报。已有的研究指出,二者在年代际尺度上也是密切联系的(朱玉祥等, 2007; 刘森峰等, 2017)。朱玉祥等(2007)指出,青藏高原大气热源和冬、春积雪与中国东部降水型的年代际变化有很强的相关。青藏高原春、夏季热源减弱使得海-陆热力差异减小,致使东亚夏季风强度减弱,更多的水汽在长江流域辐合而不是继续向北输送至华北;同时,也导致西太副高偏西,雨带在长江流域长时间维持;导致长江流域降水偏多,华北偏少,形成“南涝北旱”雨型(Ding, et al, 2008, 2009)。此外,刘森峰等(2017)也指出,在年代际尺度上,青藏高原春季感热对中国东部夏季降水的预报能力更优。因而,要更好地预报中国东部夏季降水必须从年际变化、年代际变化甚至趋势变化多个时间尺度综合考虑。

## 参考文献

- 贾小龙, 李崇银. 2005. 南印度洋海温偶极子型振荡及其气候影响. 地球物理学报, 48(6): 1238-1249. Jia X L, Li C Y. 2005. Dipole oscillation in the Southern Indian Ocean and its impacts on climate. Chinese J Geophys, 48(6): 1238-1249 (in Chinese)
- 刘森峰, 段安民. 2017. 基于青藏高原春季感热异常信号的中国东部夏季降水统计预测模型. 气象学报, 75(6): 903-916. Liu S F, Duan A M. 2017. A statistical forecast model for summer precipitation in eastern China based on spring sensible heat anomaly in the Tibetan Plateau. Acta Meteor Sinica, 75(6): 903-916 (in Chinese)
- 刘屹岷, 吴国雄, 刘辉等. 1999. 空间非均匀加热对副热带高压形成和变异的影响 III: 凝结潜热加热与南亚高压及西太平洋副高. 气象学报, 57(5): 525-538. Liu Y M, Wu G X, Liu H, et al. 1999. The effect of spatially nonuniform heating on the formation and variation of subtropical high Part III: Condensation heating and South Asia high and western Pacific subtropical high. Acta Meteor Sinica, 57(5): 525-538 (in Chinese)
- 陶诗言, 朱福康. 1964. 夏季亚洲南部 100 毫巴[hPa]流型的变化及其与西太平洋副热带高压进退的关系. 气象学报, 34(4): 386-396. Tao S Y, Zhu F K. 1964. The 100-mb[hPa] flow patterns in southern Asia in summer and its relation to the advance and retreat of the west-pacific subtropical anticyclone over the far east. Acta Meteor Sinica, 34(4): 386-396 (in Chinese)
- 王林, 刘鹏, 林朝晖等. 2011. 春季亚洲中东部地表感热通量的变化特征及其与中国夏季降水的关系. 气候与环境研究, 16(3): 310-321. Wang L, Liu P, Lin Z H, et al. 2011. The distribution of surface sensible heat flux in spring over central and eastern Asia and its relationship with summer precipitation in Chi-



- na. *Climatic Environ Res*, 16(3): 310-321 (in Chinese)
- 吴国雄, 李伟平, 郭华等. 1997. 青藏高原感热气泵和亚洲夏季风 // 叶笃正. 赵九章纪念文集. 北京: 科学出版社, 116-126. Wu G X, Li W P, Guo H, et al. 1997. Tibetan Plateau sensible heat pump and Asia summer monsoon // Ye Duzheng. Memorial Corpus for Zhao Jiuzhang. Beijing: Science Press, 116-126 (in Chinese)
- 吴国雄, 刘屹岷, 刘平. 1999. 空间非均匀加热对副热带高压带形成和变异的影响 I: 尺度分析. *气象学报*, 57(3): 257-263. Wu G X, Liu Y M, Liu P. 1999. The effect of spatially nonuniform heating on the formation and variation of subtropical high I: Scale analysis. *Acta Meteor Sinica*, 57(3): 257-263 (in Chinese)
- 吴国雄. 2004. 我国青藏高原气候动力学研究的近期进展. 第四纪研究, 24(1): 1-9. Wu G X. 2004. Recent progress in the study of the Qinghai-Xizang Plateau climate dynamics in China. *Quat Sci*, 24(1): 1-9 (in Chinese)
- 吴国雄, 何编, 刘屹岷等. 2016. 青藏高原和亚洲夏季风动力学研究的新进展. *大气科学*, 40(1): 22-32. Wu G X, He B, Liu Y M, et al. 2016. Recent progresses on dynamics of the Tibetan Plateau and Asian summer monsoon. *Chinese J Atmos Sci*, 40(1): 22-32 (in Chinese)
- 杨伟愚, 叶笃正, 吴国雄. 1992. 夏季青藏高原热力场和环流场的诊断分析 II: 环流场的主要特征及其大型垂直环流场. *大气科学*, 16(3): 287-301. Yang W Y, Ye D Z, Wu G X. 1992. The influence of the Tibetan Plateau on the thermal and circulation fields over East Asia in summer II: Main features of the local circulation fields and the large-scale vertical circulation fields. *Scientia Atmos Sinica*, 16(3): 287-301 (in Chinese)
- 叶笃正, 高由禧, 罗四维等. 1979. 青藏高原气象学. 北京: 科学出版社, 316pp. Ye D Z, Gao Y X, Luo S W, et al. 1979. *Meteorology of Tibetan Plateau*. Beijing: Sciences Press, 316pp (in Chinese)
- 张盈盈, 李忠贤, 刘伯奇. 2015. 春季青藏高原表面感热加热的年际变化特征及其对印度夏季风爆发时间的影响. *大气科学*, 39(6): 1059-1072. Zhang Y Y, Li Z X, Liu B Q. 2015. Interannual variability of surface sensible heating over the Tibetan Plateau in boreal spring and its influence on the onset time of the Indian summer monsoon. *Chinese J Atmos Sci*, 39(6): 1059-1072 (in Chinese)
- 赵勇, 钱永甫. 2009. 青藏高原地区地表热力异常与夏季东亚环流和江淮降水的关系. *气象学报*, 67(3): 397-406. Zhao Y, Qian Y F. 2009. Relationship between the Tibetan Plateau surface thermal anomalies and the summer circulation over East Asia and rainfall in the Yangtze and Huaihe river areas. *Acta Meteor Sinica*, 67(3): 397-406 (in Chinese)
- 朱玉祥, 丁一汇, 徐怀刚. 2007. 青藏高原大气热源和冬春积雪与中国东部降水的年代际变化关系. *气象学报*, 65(6): 946-958. Zhu Y X, Ding Y H, Xu H G. 2007. The decadal relationship between atmospheric heat source of winter and spring snow over Tibetan Plateau and rainfall in East China. *Acta Meteor Sinica*, 65(6): 946-958 (in Chinese)
- Behera S K, Yamagata T. 2001. Subtropical SST dipole events in the southern Indian Ocean. *Geophys Res Lett*, 28(2): 327-330
- Cui Y, Wang C H. 2009. Comparison of sensible and latent heat fluxes during the transition season over the western Tibetan Plateau from reanalysis datasets. *Prog Nat Sci*, 19(6): 719-726
- Ding Y H, Sun Y, Wang Z Y, et al. 2009. Inter-decadal variation of the summer precipitation in China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part II: Possible causes. *Int J Climatol*, 29(13): 1926-1944
- Ding Y H, Wang Z Y, Sun Y. 2008. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences. *Int J Climatol*, 28(9): 1139-1161
- Duan A M, Wu G X. 2005. Role of the Tibetan Plateau thermal forcing in the summer climate patterns over subtropical Asia. *Climate Dyn*, 24(7-8): 793-807
- Duan A M, Wu G X. 2008. Weakening trend in the atmospheric heat source over the Tibetan Plateau during recent decades. Part I: Observations. *J Climate*, 21(13): 3149-3164
- Duan A M, Li F, Wang M R, et al. 2011. Persistent weakening trend in the spring sensible heat source over the Tibetan Plateau and its impact on the Asian summer monsoon. *J Climate*, 24(21): 5671-5682
- Duan A M, Wang M R, Lei Y H, et al. 2013. Trends in summer rainfall over China associated with the Tibetan Plateau sensible heat source during 1980-2008. *J Climate*, 26(1): 261-275
- Hu J, Duan A M. 2015. Relative contributions of the Tibetan Plateau thermal forcing and the Indian ocean sea surface temperature basin mode to the interannual variability of the East Asian summer monsoon. *Climate Dyn*, 45(9-10): 2697-2711
- Li X Z, Zhou W. 2012. Quasi-4-yr coupling between El Niño-Southern Oscillation and water vapor transport over East Asia-WNP. *J Climate*, 25(17): 5879-5891
- Li X Z, Zhou W, Chen D L, et al. 2014. Water vapor transport and moisture budget over eastern China: Remote forcing from the two types of El Niño. *J Climate*, 27(23): 8778-8792
- Liu Y M, Wu G X, Liu H, et al. 2001. Condensation heating of the Asian summer monsoon and the subtropical anticyclone in the eastern Hemisphere. *Climate Dyn*, 17(4): 327-338
- Liu Y M, Wu G X, Hong J L, et al. 2012. Revisiting Asian monsoon formation and change associated with Tibetan Plateau forcing: II. Change. *Climate Dyn*, 39(5): 1183-1195, doi: 10.1007/s00382-012-1335-y
- Shen R J, Reiter E R, Bresch J F. 1986. Some aspects of the effects

- of sensible heating on the development of summer weather systems over the Tibetan Plateau. *J Atmos Sci*, 43(20): 2241-2260
- Wang Z Q, Duan A M, Wu G X. 2014. Time-lagged impact of spring sensible heat over the Tibetan Plateau on the summer rainfall anomaly in East China: Case studies using the WRF model. *Climate Dyn*, 42(11-12): 2885-2898, doi: 10.1007/s00382-013-1800-2
- Wu G X, Liu Y M, Dong B W, et al. 2012. Revisiting Asian monsoon formation and change associated with Tibetan Plateau forcing: I. Formation. *Climate Dyn*, 39(5): 1169-1181, doi: 10.1007/s00382-012-1334-z
- Wu G X, He B, Liu Y M, et al. 2015. Location and variation of the summertime upper-troposphere temperature maximum over South Asia. *Climate Dyn*, 45(9-10): 2757-2774, doi: 10.1007/s00382-015-2506-4
- Wu R G, Hu Z Z, Kirtman B P. 2003. Evolution of ENSO-related rainfall anomalies in East Asia. *J Climate*, 16(22): 3742-3758
- Yanai M, Tomita T. 1998. Seasonal and interannual variability of atmospheric heat sources and moisture sinks as determined from NCEP-NCAR Reanalysis. *J Climate*, 11(3): 463-482
- Yang K, Guo X F, He J, et al. 2011. On the climatology and trend of the atmospheric heat source over the Tibetan Plateau: An experiment-supported revisit. *J Climate*, 24(5): 1525-1541
- Yeh T C. 1957. On the formation of quasi-geostrophic motion in the atmosphere. *J Meteor Soc Japan (the 75th Anniversary Volume)*: 130-134
- Zhao P, Chen L X. 2001a. Climatic features of atmospheric heat source/sink over the Qinghai-Xizang Plateau in 35 years and its relation to rainfall in China. *Sci China Ser D: Earth Sci*, 44(9): 858-864
- Zhao P, Chen L X. 2001b. Interannual variability of atmospheric heat source/sink over the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and its relation to circulation. *Adv Atmos Sci*, 18(1): 106-116
- Zhao P, Zhou Z J, Liu J P. 2007. Variability of Tibetan spring snow and its associations with the hemispheric extratropical circulation and East Asian summer monsoon rainfall: An observational investigation. *J Climate*, 20(15): 3942-3955