

陈兵, 蒋元春, 李栋梁, 等. 江淮梅雨对东亚副热带夏季风进程及海温异常的响应. 气象科学, 2020, 40(5): 669-678.

CHEN Bing, JIANG Yuanchun, LI Dongliang, et al. Response of Meiyu in Jianghuai region on the process of East Asian subtropical summer monsoon and sea surface temperature anomaly. Journal of the Meteorological Sciences, 2020, 40(5): 669-678.

## 江淮梅雨对东亚副热带夏季风进程 及海温异常的响应

陈兵<sup>1</sup> 蒋元春<sup>2</sup> 李栋梁<sup>2</sup> 唐玉<sup>2</sup>

(1 江苏省气候中心, 南京 210009;

2 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/气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044)

**摘要** 利用 1960—2020 年江淮地区 75 个气象站逐日降水量、气温、相对湿度资料以及 NCEP/NCAR 再分析资料和 Hadley 中心海表温度资料, 研究了东亚副热带夏季风进程变异对江淮梅雨的影响, 揭示了不同类型梅雨期太平洋海温及大气环流异常特征。结果表明: 8 种江淮梅雨类型中, 多雨型占 45.9%, 少雨型占 54.1%, 其中多雨型在前 30 a 占 36.7%, 后 31 a 占 63.3%。江淮典型梅雨年(高温高湿多雨)的主要特征为安徽南部、江苏中部及湖北东部地区降水偏多, 安徽南部、江西东北部及浙江西北部气温偏高, 淮河流域湿度大; 而在非典型梅雨年(低温低湿少雨)大部分地区雨量偏少, 气温呈“东高西低”分布, 低温中心区位于淮河中游, 湿度呈“西大东小”分布。欧亚大陆中高纬度阻塞高压增强, 脊前向南输送的西北气流加强且路径偏东, 中国东北冷涡强度较强且位置偏西南, 东亚大槽加深, 槽后冷空气向南输送, 有利于典型梅雨形成。当前期冬春季赤道东太平洋海温异常偏高, 西太平洋海温异常偏低时, 西太平洋副热带高压强度偏强、面积偏大、脊线位置偏南、西伸脊点偏西, 东亚副热带夏季风推进到江淮地区的时间偏早, 出梅偏晚, 梅雨期降水量偏多。

**关键词** 江淮梅雨; 东亚副热带夏季风; 环流异常; 海表面温度异常

分类号: P426.6

doi: 10.3969/2020jms.0072

文献标识码: A

## Response of Meiyu in Jianghuai region on the process of East Asian subtropical summer monsoon and sea surface temperature anomaly

CHEN Bing<sup>1</sup> JIANG Yuanchun<sup>2</sup> LI Dongliang<sup>2</sup> TANG Yu<sup>2</sup>

(1 Jiangsu Climate Center, Nanjing 210009, China; 2 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters / Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract** According to the Meiyu monitoring indices, by using the daily precipitation, air temperature, relative humidity data of 75 meteorological stations in Jianghuai region from 1960 to 2020, the NCEP/NCAR reanalysis data and Hadley central SST (Sea Surface Temperature) data, the influence of East Asian subtropical summer monsoon variation on Meiyu was studied, and the anomalous characteristics of Pacific SST and atmospheric circulation during different types (typical and atypical) of Meiyu periods were revealed. The results show that among the eight types of Jianghuai Meiyu, the rainy type accounts for 45.9%, and the less rainy type accounts for 54.1%. The rainy type accounted for

收稿日期(Received): 2020-08-03; 修改稿日期(Revised): 2020-08-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2013CB430202); 国家自然科学基金资助项目(91337109; 41305080)

通信作者(Corresponding author): 李栋梁(LI Dongliang). lidl@nuist.edu.cn

36.7% in the first 30 years and 63.3% in the last 31 years. The typical Meiyu ( high temperature, high humidity and rainy years) in Jianghuai is mainly more precipitation in southern Anhui, central Jiangsu and eastern Hubei, high temperature in southern Anhui, northeastern Jiangxi and northwestern Zhejiang, and high humidity in the Huaihe River Basin. However, in the atypical Meiyu ( low temperature, low humidity and little rain) , there is less rainfall in most areas, mainly in Jiangsu Province; the temperature is high in the east and low in the west, the central area of low temperature is located in the middle reaches of the Huaihe River, and the humidity is big in the west and small in the east. The blocking high pressure in the middle and high latitudes of Eurasia is strengthened, the northwest air flow conveying southward in front of the ridge is strengthened and the path is eastward, the cold vortex in Northeast China is strong and its position is inclined to the southwest, the East Asian trough is deepened, and the cold air behind the trough is transported to the south. It is beneficial to the formation of typical Meiyu. When the SST in the equatorial eastern Pacific is abnormally high in winter and spring, and the SST in the western Pacific is abnormally low, the intensity of the western Pacific subtropical high is stronger, the area is larger, the position of the ridge line is southward, and the westward extension of the ridge point is west. The time of the East Asian subtropical summer monsoon advancing to the Jianghuai region is earlier, the plum is late, and the precipitation is more in the Meiyu period.

**Key words** Jianghuai Meiyu; East Asian subtropical summer monsoon; circulation anomaly; sea surface temperature anomaly

## 引言

梅雨是我国江淮地区夏季重要的天气气候现象,主要是由于东亚夏季风北推过程中在江淮地区滞留引起的。我国处于东亚季风区,西太平洋副热带高压(以下简称“副高”)、马斯克林高压是东亚夏季风体系中的重要成员<sup>[1]</sup>,对流圈加热场影响我国东部降水以及江淮流域旱涝<sup>[2]</sup>,因此东部地区雨季的长短、起讫时间、雨带南北进退以及夏季雨型结构、旱涝变化等,都与东亚夏季风进退过程及其变异关系密切。陶诗言等<sup>[3]</sup>研究表明,东亚夏季风的进程变异导致季风系统成员位置的偏北或偏南,其推进的快慢和强弱<sup>[4]</sup>影响江淮流域入、出梅时间及梅期长度,进而影响该区域的旱涝情况。

在全球变暖背景下,江淮梅雨的入(出)梅时间、梅期长度、梅雨强度、雨带位置等特征量,以及相关的环流背景都发生了显著变化,其中平均梅雨季长度为 21 d<sup>[5]</sup>。以降水<sup>[6]</sup>、气温、湿度和雨日频率<sup>[7]</sup>为依据,将梅雨划分成典型和非典型两类,分析发现江淮地区梅雨期所具有的高温高湿多雨的典型程度呈减弱趋势。江淮地区梅雨在 1965 年前后、1970s 末至 1980s 初和 1990s 初发生了三次显著的气候跃变<sup>[8]</sup>。梅汛期暴雨雨量、暴雨日数显著增加<sup>[9]</sup>,降水空间分布不均匀加剧,导致极端降水频发。同时,梅雨雨带北跳日期存在明显的年际变

化<sup>[10]</sup>,且有雨带北移的趋势<sup>[11]</sup>。

海温异常通过影响西太平洋副热带高压和水汽输送影响东亚夏季风和梅雨<sup>[12]</sup>。影响东亚夏季风异常的海温变化有两个关键区,分别位于北太平洋东部和南印度洋中部<sup>[13]</sup>,而影响江淮梅雨的海温关键区是北太平洋西风漂流区<sup>[14]</sup>,在印度洋偶极子正位相海温异常和赤道东太平洋暖海温的共同作用下,长江流域及其以南地区降水偏多<sup>[15]</sup>。冬季 Niño3 区、黑潮海温异常对夏季长江流域降水有显著影响<sup>[16]</sup>;春季赤道东太平洋海温偏暖年,夏季西太平洋副热带高压偏强、偏西、偏南,长江流域降水偏多<sup>[17]</sup>。高辉等<sup>[18]</sup>认为在 1980s 中期之后,前冬赤道东太平洋海温偏高时,淮河流域降水偏少,同时入梅日偏晚的对应关系较难成立,应在汛期预测业务中参考 ENSO 作用时充分考虑年代际差异。

综上,随着全球气候变暖,梅雨的基本特征发生了变化,东亚副热带夏季风进程也发生了变异。在气候变暖前后<sup>[19]</sup>,东亚副热带夏季风进程发生了怎样的变化,江淮梅雨的时空变化与东亚夏季风进程变异及 ENSO 的不同类型有什么样的关系? 这些都需要进一步研究,从而为准确预报梅雨特征提供更有效的参考依据。

## 1 资料与方法

(1) 选取 1960—2020 年江淮梅雨区域的入

(出) 梅日期、梅期长度及梅雨量资料; (2) 国家气候中心提供的西太平洋副热带高压 4 个特征量资料, 包括强度、面积、脊线和西伸脊点; (3) 同期江淮区域(28°~34°N, 110°~122°E) 记录完整的 75 个气象站(图 1) 逐日降水量资料; (4) NCEP/NCAR 月平均再分析资料, 包括 500 hPa 位势高度场、850 hPa 水平风场, 水平分辨率为 2.5°×2.5°; (5) 海表温度资料来自 Hadley 中心, 水平分辨率为 1°×1°。主要采用线性倾向估计、奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD) 等常规气象统计方法。

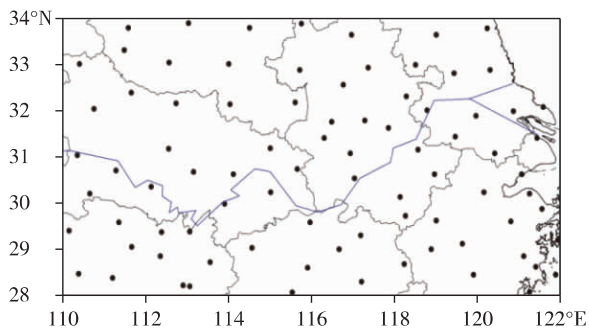


图 1 江淮地区地面气象观测站分布  
Fig.1 Distribution of meteorological stations in Jianghuai region

## 2 江淮梅雨演变的新特征

气候平均的江淮梅雨期为 6 月 8 日至 7 月 19 日, 比东亚平均梅雨期开始时间(6 月 17 日) 早 9 d<sup>[5]</sup>, 比其结束时间(7 月 8 日) 晚 11 d, 即江淮梅雨期的平均持续时间比东亚梅雨期长 20 d。近 60 a 江淮入梅、出梅日均呈明显的年际变化(图略): 入梅日期最早为 5 月 25 日(1995、2016 年), 比气候平均偏早 14 d, 而最晚为 7 月 10—11 日(1981、2005 年), 比气候平均偏晚 32 d, 入梅日期最早与最晚相差 41 d; 出梅日期最早为 6 月 28 日(2001 年), 比气候平均偏早 21 d, 最晚为 8 月 7—8 日(1980、1993 年), 比气候平均偏晚 20 d, 出梅最早与最晚相差

40 d<sup>[4]</sup>。

由表 1 可见, 2000—2010 年江淮地区平均在 6 月 11 日入梅, 为 6 个年代中入梅最晚, 1970s 与 1990s 则是入梅最早的; 江淮地区平均出梅日从 1960s 的 7 月 14 日推迟到 1990s 的 7 月 23 日, 但进入 2000s 后则比 1990s 提前了 7 d。

表 1 各年代平均江淮梅雨特征量统计

Table 1 Statistics of characteristic quantity of Meiyu over Jianghuai River in different years

年代	入梅日期	出梅日期	梅雨长度/d	梅雨量/mm
1960s	06-10	07-14	34	238.5
1970s	06-05	07-21	46	299.0
1980s	06-09	07-22	43	277.8
1990s	06-05	07-23	48	370.2
2000s	06-11	07-16	35	237.7
2010s	06-06	07-18	42	379.9
平均	06-08	07-19	41	301.8

图 2a 为区域平均的江淮梅雨期历年梅雨期降水量距平。由此可见, 近 60 a 气候平均梅雨量为 301.8 mm, 呈明显的年际变化且整体有增多趋势。1998 年和 2020 年的梅雨期降水量分别达到了 575.6 mm 和 732.4 mm, 较气候平均偏多 91% 和 143%; 1978、2005、2009 年的梅雨期降水量比气候平均偏少 66% 以上, 仅为 102 mm; 梅雨期降水量最多年是最少年的 7.1 倍。从梅雨期降水量年代际变化情况看, 1990s 和 2010s 最多, 1960s 和 2000s 最少, 这与入梅早晚以及梅汛期长短有关。一般来说, 入梅越早、出梅越晚, 则梅期越长、梅雨期降水量越多。从 1960—2020 年平均来看, 江淮梅雨期降水量的空间分布不均匀(图 2b), 南部为梅雨期降水量大值区, 最大降水量中心在安徽南部的黄山(30.13°N, 118.15°E) 附近, 多年平均降水量达 550 mm 以

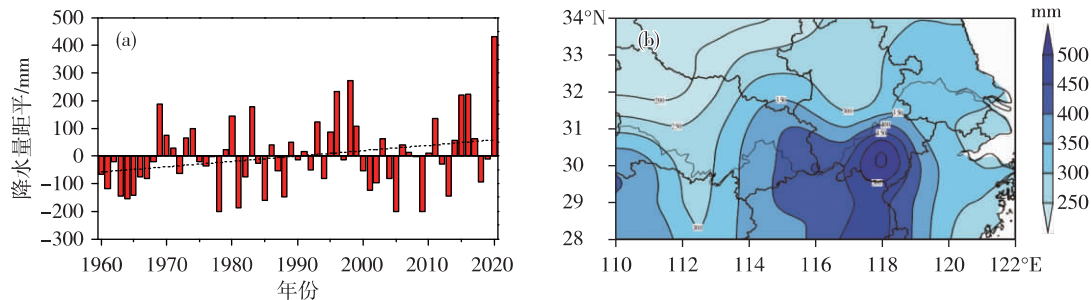


图 2 1960—2020 年梅雨期降水量距平(a, 单位: mm) 和江淮地区气候平均梅雨期降水量分布(b, 单位: mm)  
Fig.2 Anomaly of precipitation in Meiyu period (a, unit: mm) and the distribution of climate mean precipitation in Meiyu period of Jianghuai region (b, unit: mm) from 1960 to 2020

上,表明该地区是梅雨区的中心,而其西北部的淮河上游地区则不足 200 mm。

采用气温、相对湿度和梅雨期降水量等 3 项指标研究梅雨的典型性与非典型性,将梅雨期内某日气温高(低)于常年的定为高(低)温日,梅雨期内某日相对湿度大(小)于常年的定为高(低)湿日,梅雨期降水量多(少)于常年的年份定为多(少)雨年。在考虑梅雨期连阴雨日数的基础上确定多雨或少雨年,同时梅雨期内高温或低温日、高湿或低湿日占梅雨期长度的百分比大于等于 50%,则该年份即为指标占比高所代表的类型,从而可划分出高温高湿多雨、低温高湿多雨、高温低湿多雨和低温低湿多雨;高温高湿少雨、低温高湿少雨、高温低湿少雨和低温低湿少雨,共 8 种类型梅雨年(表 2),并根据 ENSO 事件划分不同的异常类别<sup>[20]</sup>。

表 2 8 种类型的梅雨年份  
Table 2 Eight types of Meiyu years

梅雨型	年份(海温异常年类别)
高温高湿多雨	1979, 1991, 1996 <sup>2</sup> , 2011 <sup>4</sup> , 2015, 2017
高温低湿多雨	1969 <sup>3</sup> , 1971 <sup>2</sup> , 1977 <sup>1</sup> , 1983 <sup>1</sup> , 1995 <sup>3</sup> , 1999, 2007 <sup>3</sup> , 2008 <sup>2</sup>
低温高湿多雨	1973 <sup>1</sup> , 1974 <sup>4</sup> , 1980 <sup>3</sup> , 1986, 1989 <sup>4</sup> , 1993, 1998 <sup>1</sup> , 2003 <sup>3</sup> , 2014, 2016 <sup>1</sup> , 2020 <sup>3</sup> ,
低温低湿多雨	1970 <sup>1</sup> , 2006 <sup>2</sup> , 2010 <sup>3</sup>
低温低湿少雨	1960, 1975, 1984 <sup>4</sup> , 1997, 2004, 2005 <sup>3</sup>
高温高湿少雨	1961, 1962, 1964, 1965 <sup>2</sup> , 1988, 1992 <sup>1</sup> , 2009 <sup>4</sup> , 2012 <sup>4</sup> , 2013
低温高湿少雨	1963, 1966 <sup>1</sup> , 1968, 1978 <sup>3</sup> , 1981, 1982, 1987 <sup>1</sup> , 1990
高温低湿少雨	1967, 1972, 1976 <sup>4</sup> , 1985 <sup>2</sup> , 1994, 2000 <sup>2</sup> , 2001, 2002, 2018 <sup>2</sup> , 2019 <sup>3</sup>

注:标注 1 表示前冬为 EP 型 El Niño 年;2 表示前冬为 EP 型 La Niña 年;3 表示前冬为 CP 型 El Niño 年;4 表示前冬为 CP 型 La Niña 年。

在上述 8 种类型中,4 种多雨型占 45.9%,4 种少雨型占 54.1%。4 种多雨型(共 28 a)中,11 a 出现在气候变暖前(1960—1989 年),占 39.3%;17 a 出现在气候变暖后(1990—2020 年),占 60.7%。按多雨时间比,气候相对冷期只有三分之一的年份可能多梅雨,而在气候暖期则有三分之二的年份出现多梅雨,表明气候变暖且前冬发生厄尔尼诺事件(占海温异常年的 50.0%)有利于江淮梅雨期降水量偏多。相应地,在少雨的 4 种梅雨类型(共 33 a)中,有 19 a 出现在气候变暖前,占 57.6%;有 14 a 出现在气候变暖后,占 42.4%。同样按少雨出现时间

比,气候相对冷期出现少梅雨的年份占 63.3%,而在气候暖期只有 45.2%的年份出现少梅雨,表明气候相对冷期且前冬发生 La Niña 事件(占海温异常年的 57.1%),使得江淮梅雨期降水量偏少。图 3 给出江淮梅雨类型中高温高湿多雨年和低温低湿少雨年的平均梅雨期降水距平百分率、气温距平和相对湿度距平。可以看出,在高温高湿多雨年:江淮地区梅雨区主体降水量偏多(图 3a),降水距平百分率超过 80%的区域主要包括安徽南部、江苏中部以及湖北东部地区,安徽南部梅雨期降水量超过正常年份的 120%;江淮地区气温整体偏高,高温区位于安徽南部、江西东北部及浙江西北部(图 3c),高温中心区与多雨中心区吻合;相对湿度大值区则主要在河南南部、安徽北部和江苏北部的淮河流域(图 3e),淮河流域气候平均的相对湿度较小,梅雨期湿度增加明显,而长江中下游气候平均的相对湿度较大,梅雨期湿度增加相对不明显。在低温低湿少雨年:梅雨区除安徽南部降水量偏多 20%(图 3b),湖北东部、河南南部降水量正常外,其余大部分地区降水量偏少,江苏整个区域少雨情况更加明显;平均气温呈“东高西低”分布(图 3d),除浙江、上海和江苏东南部气温偏高外,其他区域整体气温偏低,低温中心区位于淮河中游;湿度则表现为“西大东小”,相对干燥区主要位于安徽东部、江苏、浙江和上海(图 3f),即低温低湿少雨的非典型性主要表现在研究区的东部。

### 3 江淮梅雨与东亚副热带夏季风的关系

选用连续 6 次过程透雨最早出现时间表示东亚副热带夏季风到达该地区(气象站)的时间<sup>[21-22]</sup>。唐玉等<sup>[4]</sup>认为季风到达江淮地区的时间方差是最大的,即季风每年到达该区域的时间存在较大的不稳定性。季风在江淮流域复杂的推进情况可能是造成该地区春夏季降水年际变率大,降水不稳定、情况复杂的原因之一。从东亚副热带夏季风推进时间的方差年代际分布可以看出(图 4),各年代方差最大值中心有明显变化。1960s(图 4a)东亚副热带夏季风推进时间方差最大在渭河下游、黄河中游至淮河上游,即季风到达江南的时间晚,但在此地推进的速度快,而到达黄淮的时间早,夏季风强,雨带总体位置偏北,江淮梅雨期降水量偏少。1970s(图 4b)季风到达时间方差的大值区在黄淮之间(河南南阳附近)。季风到达整个梅雨区的时间偏晚、

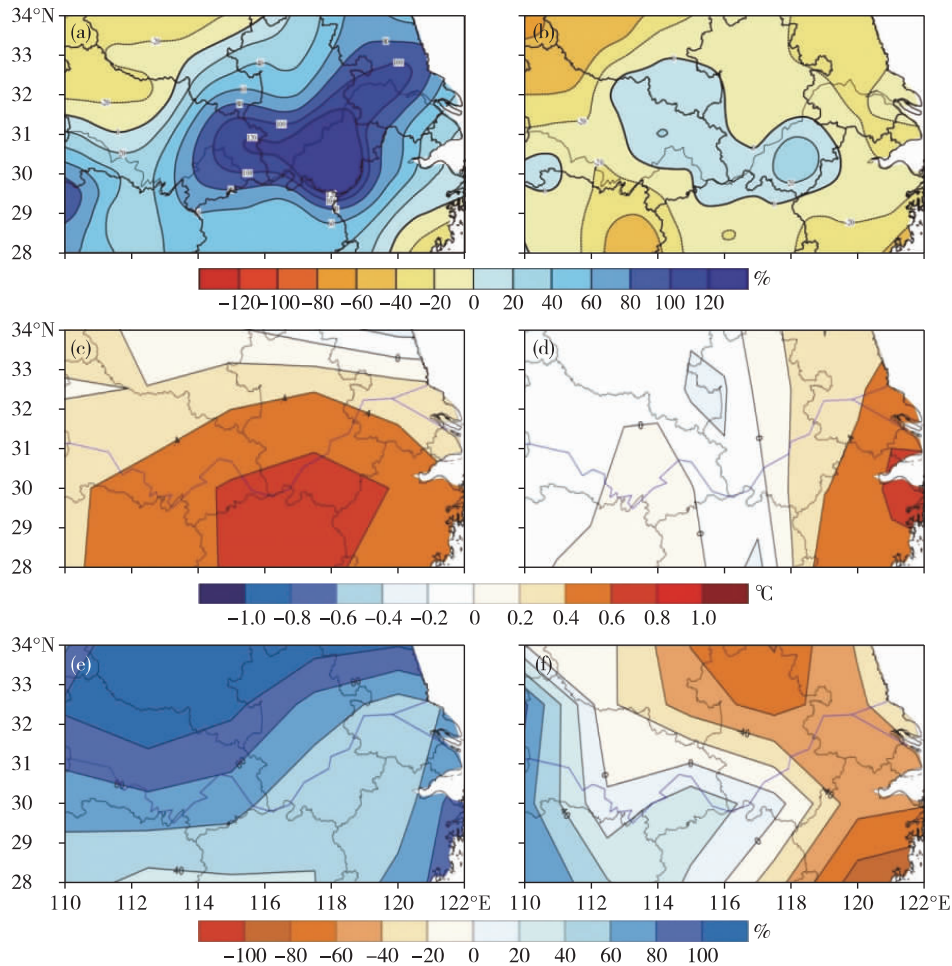


图3 江淮地区高温高湿多雨年(a、c、e)和低温低湿少雨年(b、d、f)平均梅雨期降水距平百分率(a、b,单位:%), 温度距平(c、d,单位:°C)及相对湿度距平(e、f,单位:%)

Fig.3 The average percentage of precipitation anomaly (a, b; unit: %), temperature anomaly (c, d; unit: °C) and relative humidity anomaly (e, f; unit: %) in high temperature, high humidity and rainy years (a, c, e) and low temperature, low humidity and little rain years (b, d, f)

推进速度较快,强度较1960s有所减弱,雨带位置略偏南,梅雨期降水量略多。1980s(图4c)东亚副热带季风在江南爆发的时间偏晚,但在江淮推进的时间比较快,到达黄河流域的时间偏早近50d,使江淮梅雨区的降水量偏少。1990s(图4d)方差较大,反映了季风进入江淮地区的时间早,导致江淮地区入梅早、出梅晚、梅雨期长、梅雨期降水量大(表1)。2000s前10a(图4e)副热带夏季风向西北推进,方差大值区显示季风到达黄河中游的时间晚且向西推进,北方雨带位于黄河流域,南方雨带位于华南,梅雨区降水量少。2010s(图4f)季风进入长江流域的时间早,离开黄河流域的时间偏晚,江淮流域梅雨期降水量偏多,年际变率大。

为了揭示江淮梅雨与东亚副热带夏季风的关系,图5给出了东亚副热带夏季风推进时间(图5a,左场)与江淮梅雨期降水量的SVD第一主模态(图5b,右场)及其对应的时间系数(图5c),其协方差贡

献为48%。整体而言,当副热带夏季风推进到江淮地区的时间偏晚时(大值区主要位于长江中下游和汉水中上游),梅雨期降水量偏少,少雨中心位于安徽、湖北、河南的交界地区。江淮地区降水量异常场(图5b)与降水EOF分析的第一主模态<sup>[4]</sup>基本一致,说明江淮降水异常第一模态主要受副热带夏季风推进时间的影响。从图5c可以看出,左右场的时间序列在年际尺度上基本相反,两系数之间的相关为-0.41。在不同时间段上,1970s中期、1980s中期以及2000s初,夏季风推进到江淮地区的时间偏晚,梅雨期降水量偏少;1980s初期和1990s中期,夏季风推进到江淮地区的时间偏早,梅雨期降水量偏多。

#### 4 江淮梅雨异常对大气环流及前期海温的响应

将高温高湿多雨年作为江淮典型梅雨年,低温低湿少雨年作为非典型梅雨年,进一步分析梅雨异

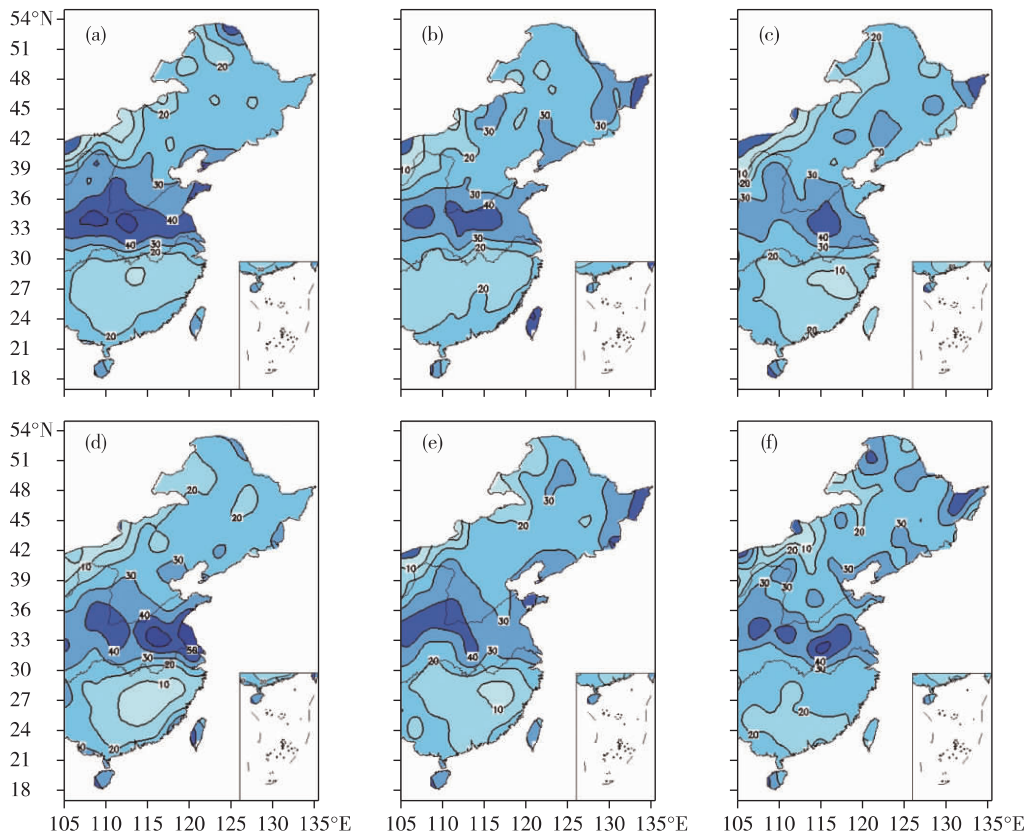


图4 1960—2016年连续过程透雨开始时间的方差年代际分布: (a) 1960s; (b) 1970s; (c) 1980s; (d) 1990s; (e) 2000s; (f) 2010s  
Fig.4 Variance distribution of each decade of the onset time of continuous process infiltration at stations in China from 1960 to 2016:

(a) 1960s; (b) 1970s; (c) 1980s; (d) 1990s; (e) 2000s; (f) 2010s

常的大气环流特征。从高温高湿多雨年合成的500 hPa高度距平场看出(图6a)欧亚大陆中高纬度在乌拉尔山到贝加尔湖为正距平带,表明阻塞高压增强,使得脊前向南输送的西北气流加强且路径偏东。中国东北到鄂霍次克海为负距平,其中在(43°N,120°E)附近有一个负距平中心,说明东北冷涡强度较强且位置偏西南,东亚大槽加深,槽后冷空气向南输送。

西太平洋副热带高压中心强度偏强,位置偏西,其西北侧的西南暖湿气流输送加强。对流层底层850 hPa(图6c)上,西太平洋在20°N左右有一支东南风距平气流,与来自北方的冷空气在江淮地区辐合,为梅雨提供了有利的水汽条件。在副高影响下,东部沿海地区气温偏高、湿度偏小。低温低湿少雨年(图6b)与高温高湿多雨年基本呈反相分布。中高纬西西伯利亚地区为负距平区,中国东北到日本海为正距平,东亚大槽西退北缩,不利于冷空气的向南输送。低纬西太平洋地区为负距平,西太平洋副热带高压强度异常偏弱,位置异常偏东。西太平洋地区为西风距平气流,江淮地区为距平风场辐散,不利于其边缘的西南暖湿气流北上至江淮流域

(图6d)。

从表3可以看出,入梅日与6—7月西太平洋副热带高压的相关不显著。出梅日、梅雨期降水量与6—7月西太平洋副热带高压强度、面积为显著正相关,与副高脊线位置呈负相关。这说明当6—7月副高强度偏强、面积偏大、脊线较偏南、西伸脊点偏西时,江淮出梅偏晚,梅雨期降水量偏多。东亚副热带夏季风推进到江淮区的时间与副高强度、面积呈负相关,与副高脊线、西伸脊点为正相关,均通过

表3 江淮梅雨特征量与6—7月西太平洋副热带高压的相关系数  
Table 3 Correlation coefficients of Meiyu characteristics over the Yangtze—Huaihe River basin with the western Pacific subtropical high from June to July

	副高强度/ hPa	副高脊线/ °N	西伸脊点/ °E	副高面积
入梅日	0.08	-0.2	0	0.11
出梅日	0.3**	-0.31**	-0.21	0.26**
梅雨量/mm	0.32**	-0.17	-0.31**	0.31**
夏季风推进时间	-0.26*	0.30**	0.27**	-0.29**

注:\*\*\*为通过 $\alpha=0.01$ 信度检验;\*\*为通过 $\alpha=0.05$ 信度检验;\*为通过 $\alpha=0.1$ 信度检验。

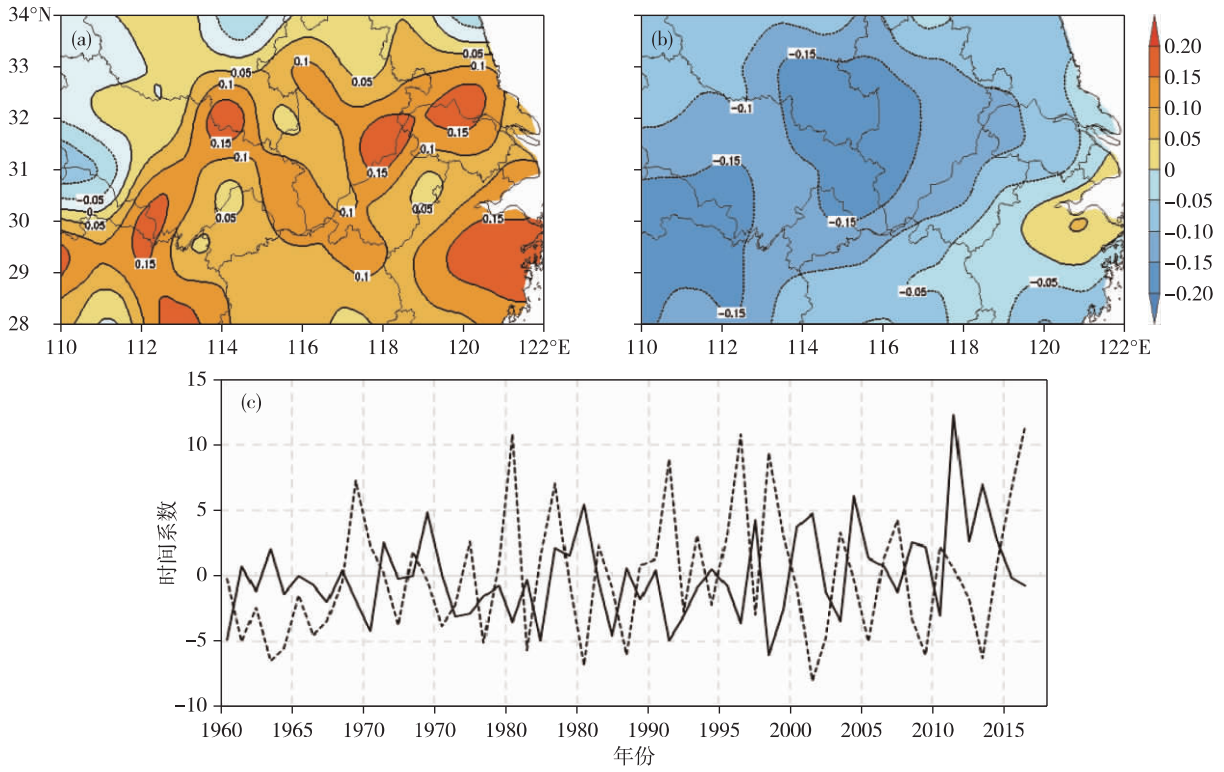


图5 东亚副热带夏季风推进时间 (a, 左场) 与江淮梅雨期降水量 (b, 右场) 的 SVD 第一主模态及其对应的时间系数 (c) (实线为副热带夏季风推进到江淮地区的时间; 虚线为降水量)

Fig.5 The first principal mode of SVD of (a, left field) advancing time of East Asia subtropical summer monsoon and (b, right field) Jianghuai Meiyu precipitation as well as its corresponding time coefficient (c) (the solid line is the time when the subtropical summer monsoon advances to the Jianghuai region; the dotted line is the precipitation)

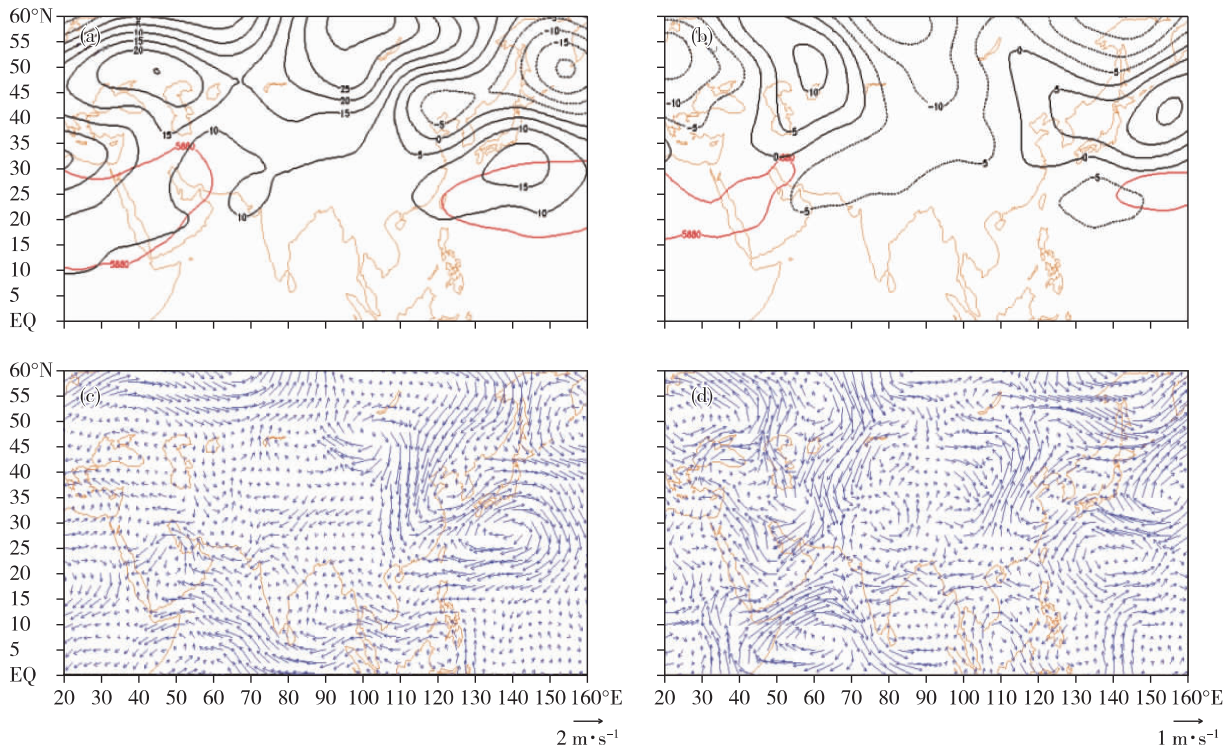


图6 江淮典型梅雨年 (a,c) 和非典型梅雨年 (b,d) 的 500 hPa 高度距平合成场 (a,b) 和 850 hPa 距平风场 (c,d) (a,b 中红色实线为气候平均的 588 gpm)

Fig.6 500 hPa height anomaly synthetic field (a, b) and 850 hPa anomalous wind field (c, d) in typical Meiyu years (a, c) and a typical Meiyu years (b, d) in the Jianghuai Meiyu period (the red solid lines in a, b are average climate of 588 gpm)

了  $\alpha=0.05$  的显著性检验。说明当西太平洋副热带高压强度偏强、面积偏大、脊线偏南、西伸脊点偏西,有利于东亚副热带夏季风推进到江淮区的时间偏早,江淮入梅早、出梅晚,梅雨期降水量偏多。

太平洋和印度洋的海温异常都会对中高纬度大气环流产生影响。当前期太平洋海温异常偏高或偏低时,对副热带夏季风进程产生影响,可引起西太平洋副热带高压强度和位置发生变化,进而对江淮流域夏季降水产生影响<sup>[23]</sup>。由图5可见,东亚副热带夏季风推进时间与梅雨期降水量有很好地对应关系,但夏季风推进时间和梅雨期降水量与前期冬、春季海温相关是否稳定一致,需进一步讨论。

从东亚副热带夏季风推进到江淮地区的时间

和梅雨期降水量与前期冬春季海温的相关分布可以看出,东亚副热带夏季风推进到江淮梅雨区的时间与西太平洋海温相关较好(图7a1、b1),梅雨期降水量和赤道东太平洋以及印度洋—南海海温相关较好(图7a2、b2)。

选取(5°S~5°N,40°~120°E)区域平均SSTA代表印度洋和南海暖池(I区);(10°S~20°N,120°~160°E)区域代表西太平洋(II区);(5°S~5°N,150°W~90°W)区域代表赤道东太平洋(III区)。各区域冬、春季海温与西太平洋副热带高压,副热带夏季风推进到江淮地区时间和梅雨特征量的相关系数(表4)可以看出,江淮梅雨期(6—7月)西太平洋副热带高压强度、面积与I区和III区冬、春季海温均为

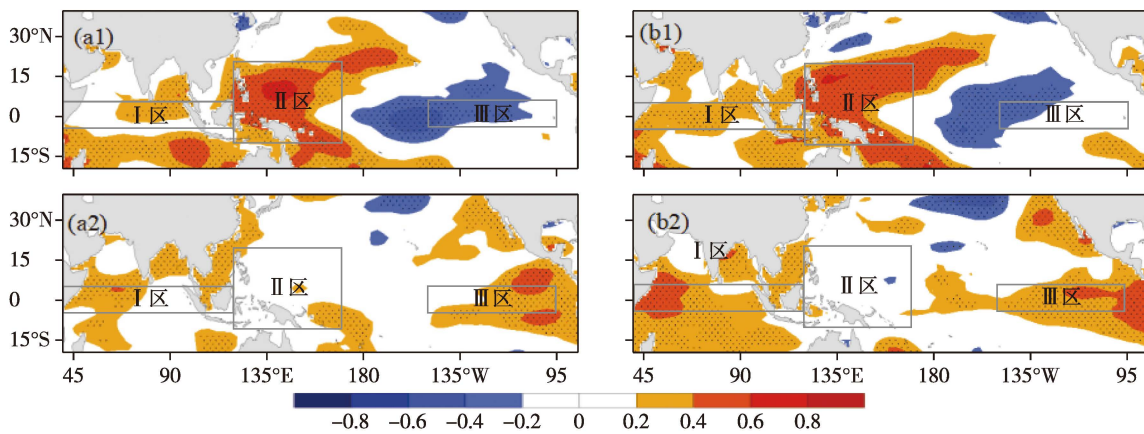


图7 1960—2016年东亚副热带夏季风推进到江淮地区的时间(a1、b1)和梅雨量(a2、b2)与海温的相关分布:

(a) 前期冬季; (b) 前期春季(打点部分为通过  $\alpha=0.05$  显著性检验)

Fig.7 Correlation distribution of the time (a1, b1) and Meiyu (a2, b2) of the East Asian subtropical summer monsoon pushing into the Yangtze Huaihe region from 1960 to 2016 and the SST in winter (a) and spring (b) in the earlier period (the sampling part passed the 95% significance test)

表4 1960—2016年I(印度洋—南海),II(西太平洋),III(东太平洋)区冬、春季海温距平与梅雨期西太平洋副热带高压以及副热带夏季风到达江淮地区的时间、梅雨特征量的相关系数

Table 4 Correlation coefficients of SST anomalies in winter and spring in regions I (Indian Ocean—South China Sea), II (western Pacific), and III (eastern Pacific) with the arrival time of the western Pacific subtropical high, and subtropical summer monsoon in the Meiyu period and the characteristic quantity of Meiyu during 1960—2016

海温关键区季节	I区		II区		III区	
	冬季	春季	冬季	春季	冬季	春季
副高强度/hPa	0.530***	0.570***	-0.150	0.060	0.580***	0.470***
副高脊线/°N	-0.150	-0.190	0.430***	0.320**	-0.400***	-0.320**
西伸脊点/°E	-0.540***	-0.530***	0.140	-0.030	-0.590***	-0.410***
副高面积	0.560***	0.590***	-0.110	0.080	0.570***	0.450***
入梅日	-0.044	-0.053	-0.097	-0.002	0.018	0.026
出梅日	-0.013	0.048	-0.310**	-0.330**	0.240*	0.370***
梅雨量/mm	0.230*	0.300**	0.020	-0.050	0.320**	0.380***
夏季风推进时间	-0.080	-0.020	0.370***	0.330*	-0.280**	-0.220*

注: \*\*\* 为通过  $\alpha=0.01$  信度检验; \*\* 为通过  $\alpha=0.05$  信度检验; \* 为通过  $\alpha=0.1$  信度检验。



显著正相关;副热带高压脊线的南北位置与Ⅱ区海温为显著正相关,而与Ⅲ区海温为负相关;副高西伸脊点则与Ⅰ区、Ⅲ区的海温均为显著负相关。说明当Ⅰ区和Ⅲ区海温偏高,Ⅱ区海温偏低时,西太平洋副热带高压强度偏强、面积偏大、脊线偏南、西伸脊点偏西<sup>[24]</sup>。

东亚副热带夏季风推进到江淮地区的时间与Ⅱ区海温异常变化为显著正相关,与Ⅲ区海温为负相关;江淮梅雨期降水量与Ⅰ区以及Ⅲ区海温异常为显著正相关;江淮入梅日与海温的相关不显著,出梅日与东亚副热带夏季风推进时间呈反相关,与Ⅱ区海温异常变化为显著负相关,与Ⅲ区为显著正相关。说明当Ⅱ区海温异常偏高,Ⅲ区海温异常偏低时,东亚副热带夏季风推进到江淮梅雨区的时间偏晚,出梅偏早;当Ⅰ区和Ⅲ区海温异常偏高时,梅雨期降水量偏多。因此,前期冬、春季海温异常通过影响东亚副热带夏季风,进而影响江淮梅雨。

## 5 结论

本文对 1960—2020 年江淮梅雨与东亚副热带夏季风进程变异及海温时空特征的关系及变化成因进行分析,主要结论如下:

(1) 在 8 种江淮梅雨类型中,4 种多雨型占 45.9%,4 种少雨型占 54.1%。多雨型在气候变暖前(1960—1989 年)占 36.7%,气候变暖后(1990—2020 年)占 63.3%。江淮典型梅雨年(高温高湿多雨)主要表现为安徽南部、江苏中部及湖北东部地区降水偏多;安徽南部、江西东北部及浙江西北部气温偏高;淮河流域湿度偏大。而在非典型梅雨年(低温低湿少雨)大部地区降水量偏少,主要集中在江苏;气温呈“东高西低”分布,低温中心区位于淮河中游;湿度呈“西大东小”分布。

(2) 欧亚大陆中高纬度阻塞高压增强,脊前向南输送的西北气流加强且路径偏东,中国东北冷涡强度较强且位置偏向西南,东亚大槽加深,槽后冷空气向南输送,则有利于形成典型梅雨。

(3) 当前期冬春季赤道东太平洋海温异常偏高,西太平洋海温异常偏低时,西太平洋副热带高压强度偏强、面积偏大、脊线位置偏南、西伸脊点偏西,东亚副热带夏季风推进到江淮地区的时间偏早,出梅偏晚,梅雨期降水量偏多。

梅雨预测中,外强迫影响是重要的参考因素之一,需密切关注赤道太平洋、印度洋和大西洋海温变化。随着全球变暖,海洋和陆地的温度都在升

高,但升温存在区域差异,且这种差异存在年际和年代际变化。ENSO 由传统的东部型(EP 型)演变为中部型(CP 型),或 EP/CP 混合型,对中国气候变化的影响也相应地在变化。1997/1998 年强的 EP 型 ENSO 造成 1998 年长江全流域洪水灾害,2019/2020 年弱的 CP 型 ENSO 同样造成了 2020 年长江全流域洪涝。ENSO 与中国东部夏季降水(包括梅雨)、东亚副热带夏季风与梅雨的关系也在发生变化,不同海区海温异常对东亚夏季风和梅雨的影响机理还需进一步研究。

## 参 考 文 献

- [1] 黄士松,汤明敏.论东亚夏季风体系的结构.气象科学,1987,7(3):1-14.  
HUNG Shisong, TANG Mingmin. On the structure of the summer monsoon regime of East Asia. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 1987, 7(3):1-14.
- [2] 王召民,黄士松.对流圈加热场特征及其同我国江淮流域旱涝联系的初步研究.气象科学,1989,9(4):353-368.  
WANG Zhaomin, HUANG Shisong. Features of the tropospheric heating fields and the relation to drought or flood in the reaches of Yangtze River and Huaihe River. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 1989, 9(4):353-368.
- [3] 陶诗言,李吉顺,王昂生.东亚季风与我国洪涝灾害.中国减灾,1997,7(4):17-20,24.  
TAO Shiyan, LI Jishun, WANG Angsheng. East Asian monsoon and flood disaster in China. Disaster Reduction in China (in Chinese), 1997,7(4):17-20,24.
- [4] 唐玉,李栋梁.江淮梅雨与东亚副热带夏季风进程变异的关系.气象科学,2020,40(2):169-179.  
TANG Yu, LI Dongliang. The relationship between the Meiyu in the Yangtze-Huaihe Region and the variation of the East Asian subtropical summer monsoon process. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 2020, 40(2):169-179.
- [5] 丁一汇,柳俊杰,孙颖,等.东亚梅雨系统的天气—气候学研究.大气科学,2007,31(6):1082-1101.  
DING Yihui, LIU Junjie, SUN Ying, et al. A study of the synoptic-climatology of the Meiyu system in East Asia. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2007, 31(6):1082-1101.
- [6] 姚学祥,王秀文,李月安.非典型梅雨与典型梅雨对比分析.气象,2004,30(11):38-42.  
YAO Xuexiang, WANG Xiuwen, LI Yuean. Comparison analysis of non-typical and typical Meiyu. Meteorological Monthly (in Chinese), 2004, 30(11):38-42.
- [7] 陈旭,李栋梁.新标准下江淮梅雨特征的分析.气象科学,2016,36(2):165-175.  
CHEN Xu, LI Dongliang. The features of Meiyu under the new standard. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 2016, 36(2):165-175.

- [8] 胡娅敏,丁一汇,廖菲.江淮地区梅雨的新定义及其气候特征.大气科学,2008,32(1):101-112.  
HU Yamin, DING Yihui, LIAO Fei. A study of updated definition and climatological characters of Meiyu season in the Yangtze-Huaihe Region. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2008, 32(1): 101-112.
- [9] 杜银,张耀存,谢志清,等.长江中下游梅汛期强降水过程非均匀特征.气象科学,2007,27(2):133-139.  
DU Yin, ZHANG Yaocun, XIE Zhiqing, et al. Study on heterogeneity characteristics of durative heavy precipitation during the Meiyu period in low-middle reach of Yangtze River. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 2007, 27(2): 133-139.
- [10] 陈艳丽,宋洁,李崇银.梅雨雨带北跳过程研究.大气科学,2016,40(4):703-718.  
CHEN Yanli, SONG Jie, LI Chongyin. A study on northward jump of the Meiyu rainbelt. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2016, 40(4): 703-718.
- [11] 司东,丁一汇,柳艳菊.中国梅雨雨带年代际尺度上的北移及其原因.科学通报,2010,55(1):68-73.  
SI dong, DING Yihui, LIU Yanju. Decadal northward shift of the Meiyu belt and the possible cause. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(1): 65-73.
- [12] Luft C, Reibold M M P, De Matos D B, et al. Modelagem Matemática de propulsores eletromecânicos utilizando os estimadores gauss-newton e levenberg-marquardt // Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics. 2018.
- [13] 胡娟,晏红明,周建琴.影响东亚夏季风降水异常的前期海温信号.热带气象学报,2018,34(3):401-409.  
HU Juan, YAN Hongming, ZHOU Jianqin. The research of antecedent SST signal to East Asia summer monsoon. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 2018, 34(3): 401-409.
- [14] 毛文书,王谦谦,彭骏,等.江淮梅雨特征及其与北太平洋海温的SVD分析.热带气象学报,2008,24(3):259-264.  
MAO Wenshu, WANG Qianqian, PENG Jun, et al. Characteristics of Meiyu precipitation and SVD analysis of precipitation over the Changjiang-Huaihe River Valley and the sea surface temperature in the northern Pacific Ocean. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 2008, 24(3): 259-264.
- [15] 李琰,王亚非,魏东.前期热带太平洋、印度洋海温异常对长江流域及以南地区6月降水的影响.气象学报,2007,65(3):393-405.  
LI Yan, WANG Yafei, WEI Dong. Effects of anomalous SST in tropical Indian Ocean and Pacific Ocean on next June rainfall over the Yangtze River Basin and area south of the basin. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 2007, 65(3): 393-405.
- [16] 郭玲,何金海,祝从文.影响长江中下游夏季降水的前期潜在预报因子评估.大气科学,2012,36(2):337-349.  
GUO Ling, HE Jinhai, ZHU Congwen. Evaluations of prior potential predictors for the summer rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2012, 36(2): 337-349.
- [17] 彭加毅,孙照渤.春季赤道东太平洋海温异常对西太平洋副高的影响.南京气象学院学报,2000,23(2):191-195.  
PENG Jiayi, SUN Zhaobo. Influence of spring equatorial eastern Pacific SSTA on western Pacific subtropical high. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 2000, 23(2): 191-195.
- [18] 高辉,王永光. ENSO对中国夏季降水可预测性变化的研究.气象学报,2007,65(1):131-137.  
GAO Hui, WANG Yongguang. On the weakening relationship between summer precipitation in China and ENSO. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 2007, 65(1): 131-137.
- [19] LI Dongliang, JIANG Yuanchun, ZHANG Liping, et al. Onset and retreat dates of the South China Sea summer monsoon and their relationships with the monsoon intensity in the context of climate warming. J. Trop. Meteor., 2016, 22(3): 362-373.
- [20] LI Zhiyu, ZHANG Wenjun, Stuecker M F, et al. Different effects of two ENSO types on Arctic surface temperature in boreal winter. J. Climate, 2019, 32(16): 4943-4961.
- [21] 黄菲,李栋梁,汤绪,等.用过程透雨量确定的东亚夏季风北边缘特征.应用气象学报,2009,20(5):530-538.  
HUANG Fei, LI Dongliang, TANG Xu, et al. Determination on the north boundary of summer monsoon in East Asian with soaking rainfall. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 2009, 20(5): 530-538.
- [22] 李栋梁,邵鹏程,王慧,等.中国东亚副热带夏季风北边缘带研究进展.高原气象,2013,32(1):305-314.  
LI Dongliang, SHAO Pengcheng, WANG Hui, et al. Advances in research of the north boundary belt of East Asia subtropical summer monsoon in China. Plateau Meteorology (in Chinese), 2013, 32(1): 305-314.
- [23] 彭加毅,孙照渤,倪东鸿.春季赤道东太平洋海温异常与东亚夏季风的关系.南京气象学院学报,2000,23(3):385-390.  
PENG Jiayi, SUN Zhaobo, NI Donghong. Relation of eastern Asian summer monsoon with the equatorial eastern Pacific spring SSTA. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 2000, 23(3): 385-390.
- [24] 孙圣杰,李栋梁.气候变暖背景下西太平洋副热带高压体形态变异及热力原因.气象学报,2019,77(1):100-110.  
SUN Shengjie, LI Dongliang. Morphological variation of the western Pacific subtropical high and its possible thermodynamic causes under the background of climate warming. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 2019, 77(1): 100-110.