

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, 2020, 40(2): 169-179.

江淮梅雨与东亚副热带夏季风进程变异的关系

唐玉 李栋梁

(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/气候与环境变化
国际合作联合实验室 南京信息工程大学,南京 210044)

摘要 根据中国气象局《梅雨监测业务规定》中的入、出梅标准,结合1960—2016年全国661个常规气象站逐日气象资料,以及NCEP/NCAR月平均再分析资料,分析了江淮梅雨和东亚副热带夏季风进程变异的时空特征,提取季风关键区($32^{\circ}\sim 34^{\circ}\text{N}$, $112^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$,包含17个站点),并分析了江淮梅雨和季风关键区的联系与成因。结果表明:1960—2016年平均梅雨期为6月8日—7月15日,平均梅雨量为303 mm。比东亚平均梅雨季的开始时间早9 d,比其结束时间晚7 d。梅雨量在近57 a中也呈波动式变化,但整体为上升趋势。入梅越早,出梅越晚,则梅雨期越长,梅雨量越多。副热带夏季风推进到关键区的平均时间为5月19日,其在1970s末和1990s末分别发生了由偏晚向偏早和由偏早向偏晚的突变。夏季风到达关键区偏早时,出梅日偏晚,梅雨量偏多,季风到达偏晚时,出梅日偏早,梅雨量偏少。副热带夏季风推进时间和江淮梅雨量呈全区一致的负相关,负相关区位于湖南、湖北及江西三省临近的两湖地区。东亚副热带夏季风到达关键区时间偏早(晚)年,500 hPa高度场上乌拉尔山—鄂霍茨克海为正(负)距平,阻塞高压增强(减弱);日本海附近为负(正)距平,东亚大槽加深(西退北缩),加强(削弱)了槽后冷空气向南输送且不(有)利于中低纬度副热带高压的北跳,西太平洋副热带高压中心强度增强(减弱),位置偏西(东),其西北侧的西南暖湿气流输送加强(减弱),江淮地区有水汽的辐合(辐散),有(不)利于梅雨量偏多。

关键词 江淮梅雨; 东亚副热带夏季风; 关键区; 环流异常

分类号 P426.6 **doi**: 10.3969/2018jms.0103 **文献标识码**: A

The relationship between the Meiyu in the Yangtze-Huaihe Region and the variation of the East Asian subtropical summer monsoon process

TANG Yu LI Dongliang

(Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD) / Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME) / Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract Based on the Meiyu criterion provided by China Meteorological Administration, the daily meteorological data of Meiyu from 661 conventional stations in China during the period of 1960—2016, and the monthly mean reanalysis data of NCEP/NCAR, the spatial and temporal characteristics of Meiyu and the variation of the East Asian subtropical summer monsoon process were analyzed; the key monsoon areas ($32^{\circ}\sim 34^{\circ}\text{N}$, $112^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$, including 17 stations) are extracted, and the relationship between key

收稿日期(Received): 2018-10-09; 修改稿日期(Revised): 2018-11-21

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506001-1); 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2013CB430202); 国家自然科学基金资助项目(91337109; 41305080); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

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

monsoon areas and Meiyu and their causes of formation are analyzed. The results show that the average Meiyu period during the period of 1960—2016 lasted from June 8 to July 15, and the average precipitation is 303 mm. The average onset time of the Meiyu period is nine days earlier than that in the East Asia, and the end time of the Meiyu period is seven days later than that in the East Asia. The precipitation in the Meiyu period has fluctuated in the past 57 years, but shows a rising trend on the whole. An earlier start of Meiyu season is always followed by a later end, and a longer Meiyu period means more precipitation. The average time for the subtropical summer monsoon to advance to the key area is May 19. The subtropical summer monsoon suddenly changed from early arrival to late arrival, and from late arrival to early arrival in the late 1970s and late 1990s, respectively. When the summer monsoon arrives at the key area early, the Meiyu period will end late, accompanied with a large amount of precipitation. When the summer monsoon arrives at the key area late, the Meiyu period will end early, accompanied with less precipitation. The subtropical summer monsoon and the Meiyu precipitation are consistently negatively correlated with the whole region, and the negative correlation center is at the junction of Hunan, Hubei and Jiangxi. The East Asian subtropical summer monsoon arrives at the key area early (late), the Ural Mountains-Okhotsk Sea is positive (negative) anomalies at the level of 500 hPa, and the blocking high pressure is enhanced (weakened). The pressure anomaly near the Sea of Japan is negative (positive), the East Asian deep trough is strengthened (weakened), which strengthens (weakens) the cold air that is transported southward after the trough and is (not) beneficial to the northward jump of the mid-low latitude subtropical high. The West Pacific subtropical high-pressure center is strengthened (weakened), and moves westward (eastward). The southwestern warm and humid airflow at the northwestern side is strengthened (weakened), and water vapor converges (diverges) at the Yangtze-Huaihe Region, which is (not) conducive to the increase of precipitation.

Key words Meiyu in the Yangtze-Huaihe region; East Asian subtropical summer monsoon; key area; abnormal circulation

引 言

梅雨是东亚夏季风在向北推进过程中产生的, 江淮地区平均每年发生在6月中旬至7月中上旬, 梅雨期降水的异常偏多和偏少, 极有可能造成该地区的洪涝和干旱灾害。通过研究梅雨的变化特征和成因, 较为准确地预测梅雨, 对该区域的工农业生产和人民生活具有十分重要的意义^[1]。我国处于东亚季风区, 东部地区的雨季长短、起讫和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。

关于江淮梅雨特征量变化的诊断分析, 前人已开展了大量工作。徐群^[2-3]将梅雨划分为早梅雨和典型梅雨两种, 早梅雨是一种异常的雨带北跃过程, 出现于5月上、中旬; 典型梅雨为一般所熟知的平均出现于6月中旬至7月上旬的梅雨, 并根据江苏省中部和南部各5站逐日雨量和西太平洋副热带高压逐候脊线纬度资料, 分别划分出苏南和江淮两区梅雨期。姚学祥等^[4]将6、7月符合梅雨划分标

准的降水定义为“典型梅雨”, 其余达不到标准的5—7月降水称为“非典型梅雨”, 研究认为非典型梅雨期一般要比典型梅雨期(正常梅雨)短。魏凤英等^[5]研究了梅雨较长时间尺度的变化特征发现, 梅雨的主要周期为3 a、6 a和8 a, 且分别与低纬100 hPa高度场、热带系统以及全球陆地温度的变化有关。丁一汇等^[6]对东亚梅雨季的气候学研究表明, 梅雨雨季有平均21 d的长度, 从6月17日开始到7月8日结束。梁萍等^[7-8]则认为经典的梅雨实际是每年初夏6、7月在中国长江中下游流域(江淮流域)、日本中南部、韩国南部等地出现的连阴雨现象, 采用连续5个滑动候满足候内雨日 ≥ 4 d的站点覆盖率指标, 并结合西太平洋副热带高压脊线位置, 提出了江淮区域梅雨入、出梅的确定方法。长江中下游梅汛期暴雨量、暴雨日数显著增加, 暴雨量和暴雨降水集中度在时空上的叠加是造成长江中下游地区大旱大涝趋势加重的重要原因之一^[9]。胡娅敏等^[10]指出, 江淮地区梅雨在1965年前后1970s末—1980s和1990s初发生了三次显著的气

候跃变。黄青兰等^[11]认为入梅时间和出梅时间几乎是独立的,入梅早晚年同期大气环流存在明显的差异。副热带夏季风的强弱和推进快慢对入梅的早晚有重要影响。梁萍等^[12]和陈艳丽等^[13]的研究表明,梅雨雨带北跳日期存在明显的年际变化,水汽输送的变化和对流层中层的垂直运动是影响梅雨雨带位置分布的关键因素。陈旭等^[14]分析了江淮梅雨降水的时空变化,并以温度、湿度和雨日频率作为判据,将梅雨划分为典型和非典型两类,对其变化特征进行了讨论,认为江淮梅雨的典型程度(高湿、高温、多雨)随时间呈减弱趋势,非典型程度整体呈增加趋势。赵俊虎等^[15]重点研究了江南入梅早、晚的气候特征,及其与同期(5—6月)大气环流及前期海表温度变化的关系,认为江南入梅偏早和偏晚年,对流层高层至低层的同期大尺度环流存在明显的差异。

关于东亚夏季风对中国东部降水影响的研究,陶诗言等^[16]认为,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会对江淮流域入出梅时间及梅期长度造成影响,进而引起该区域的旱涝。而表征副热带夏季风指数的研究也主要是从季风雨带建立、环流转变或海陆热力差异出发。如将副热带东西向海平面气压差与低纬地区高低层纬向风切变相联系,定义了一个东亚夏季风指数,该指数对东亚夏季风的进程变异有较强的反映能力,其年际异常能较好的反映夏季西太平洋副热带高压南北位置变动和江淮地区旱涝情况^[17]。SUN, et al^[18]用中国大陆东部地面温度和西太平洋海表温度之差及华南地温和南海海温之差加权组合,定义了一个东亚季风指数,该指数与江淮地区的降水显著相关,并且通过其相关系数的正负、大小基本能够区别我国夏季的三类雨型。WANG, et al^[19]和王亚非等^[20]建立和改进了东亚季风指数与江南地区的汛期降水量及梅雨量密切相关。ZHAO, et al^[21]发现东亚夏季盛行的西南风伴随着季风雨季的开始,最早出现在副热带地区。QI, et al^[22]和ZHU, et al^[23]分别发现,纬向海陆热力差异和经向风的转变最早于3月底、4月初在副热带地区发生。张灵玲等^[24]发现,近50 a来发生在1970s中后期亚洲及其邻近海域夏季整层大气热源变异年代际位相转换与东亚夏季风年代际减弱的时间一致。风向反转和干湿交替也是季风的两个基本元素,周兵等^[25]用区域经向风垂直切变来构造季风指数,并认为东亚副热带季风与西太平洋副热带高压及长江

中下游降水密切相关,高指数年副热带高压偏南,长江中下游为涝;低指数年则相反。黄菲等^[26]用连续过程透雨次数定义了一个反映东亚副热带夏季风进程的指数,也可确定其东亚副热带夏季风的爆发地点、推进位置,分析了东亚夏季风北边缘变化机制及其与我国三类雨型的关系,认为东亚副热带夏季风北边缘位置偏北,北方(西北东部、河套、华北及东北)夏季降水偏多;夏季风北边缘位置偏南,则长江流域和华南降水偏多。

可见,东亚副热带夏季风对梅雨发生发展有重要影响,本文提取了副热带夏季风进程中的关键区,进一步分析了其进程变异与江淮梅雨的关系和成因,为梅雨的诊断和预测提供参考。

1 资料与方法

所用资料包括:(1)中国气象局预报与网络司印发的《梅雨监测业务规定》中涉及的江淮梅雨区1960—2016年的入(出)梅日期、梅期长度等资料;(2)国家气候中心整编的全国661个站自建站以来的逐日降水资料,选取江淮区域的(28°~34°N, 110°~122°E)范围内,1960年1月—2016年12月资料记录完整且无连续缺测的75个测站(图1);(3)美国NCEP/NCAR月平均再分析资料,包括各层的位势高度场、水平风场、垂直速度场和地面气压资料,水平分辨率为2.5°×2.5°。

研究方法主要包括线性倾向估计、经验正交函数分析(EOF)、M-K检验和合成分析等方法。东亚副热带夏季风指数用连续6次过程透雨方法^[20, 27],即用连续6次过程透雨开始时间表示夏季风的推进时间。

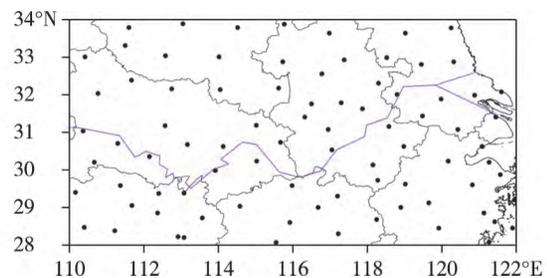


图1 江淮地区75个站分布
Fig.1 Distribution of 75 stations in Yangtze-Huaihe area

2 江淮梅雨的时空变化特征

2.1 江淮梅雨特征量的时间变化

根据新的梅雨划分标准,分析了江淮梅雨的气候特征。1960—2016年平均梅雨期为6月8日—

月 15 日(图 2a),平均梅雨量为 303 mm。比东亚平均梅雨季^[6]的开始时间(6 月 17 日)早 9 d,比其结束时间(7 月 8 日)晚 7 d,即江淮梅雨的持续时间比东亚平均梅雨季长 16 d。近 57 a 入梅日、出梅日均具有明显的年际和年代际变化,2000 年之后入梅日多为偏迟,而出梅日则以偏早居多,但近年来入梅日又出现偏早的现象。

从图 2b 可以看出,梅雨量在近 57 a 中也呈波动式变化,但整体为上升趋势。梅雨在 1970s 中后期到 1980s 末偏少,1990s 呈上升趋势,进入 2000s 以来整体偏少,但近年来又有上升趋势。梅期长度与入梅日的相关系数为-0.39,与出梅日的相关系数为 0.47,梅雨量与入梅日的相关系数为-0.36,与出梅日的相关系数为 0.44,均通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验。一般来说,入梅越早,出梅越晚,则梅雨期越长,梅雨量越多。

2.2 江淮梅雨特征量的空间变化

对江淮地区 1960—2016 年梅雨期降水量进行 EOF 分解,得到方差贡献率较大的前 3 个载荷向量场,累计方差贡献率为 57.4%。根据 North 准则,选取前 3 个载荷向量场反映梅雨量的空间分布特征。第一载荷向量场(图 3a)占总方差的 27.1%,除河南和湖北等部分区域外呈全区域一致的正值,即反映了江淮梅雨量具有一致偏多(少)的特征,其载荷向量的两个最大值(大于 0.8)分别位于安徽的黄山站(30.13°N,118.15°E)和湖北的英山站(30.73°N,115.67°E)。对应的时间系数(图 3b)在 1960s 和 1980s 中后期至 1990s 表现为偏大,即该时段梅雨量偏多。1970s 时间系数的明显偏小表明该时段梅雨量偏少。第二载荷向量场(图 3c)占总方差的 20.6%,大致以长江为界呈南北相反。长江以北的载荷向量正值区中心位于淮河流域,代表站为安徽

的蚌埠站(32.92°N,117.38°E),载荷向量值为 0.704;长江以南的载荷向量负值区中心位于江南,代表站为江西的樟树站(28.07°N,115.55°E),载荷向量值为-0.75。时间系数(图 3d)呈波动变化,但近 57 a 整体线性趋势不明显。1980s 到 1990s 中后期为下降趋势,1990 年中后期到 2000s 初为上升趋势,此后又以下降趋势为主。第三特征向量场(图 3e)占总方差的 9.7%,表现为中部与南北相反的特征。其载荷向量的正值中心位于安徽的亳州站(33.87°N,115.77°E),载荷向量值为 0.65,对应的时间序列(图 3f)呈波动状态,1970s 初到 1985 年为下降趋势,1985—2000 年呈显著上升趋势,2000s 初为下降趋势,近年来呈波动变化。

3 东亚副热带夏季风推进的异常特征

3.1 副热带夏季风推进的气候态特征

选取连续 6 次过程透雨出现时间表示东亚副热带夏季风到达该地区的时间^[20-27]。从图 4a 可以看出,副热带夏季风最早于 3 月中旬在江南地区爆发,开始时间方差较小,说明每年副热带夏季风最早爆发的时间较为稳定,早期季风以向南推进为主要特征,4 月中上旬推进到华南地区。随后,季风开始渐进式向西向北推进,4 月中下旬推进到长江中下游地区,且在江淮流域推进速度慢、停留时间长(江淮梅雨期),于 6 月底推进到黄河下游地区,副热带夏季风在长江—黄河区域共停留约 60 d,其中梅雨期 38 d。同时,该区域季风到达时间的方差是最大的(图 4b),即季风每年到达该区域的时间存在较大的不确定性。季风在江淮流域的推进情况复杂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。挑选出副热带夏季风推进到江淮地区时方差最大的区域(32°~34°N,

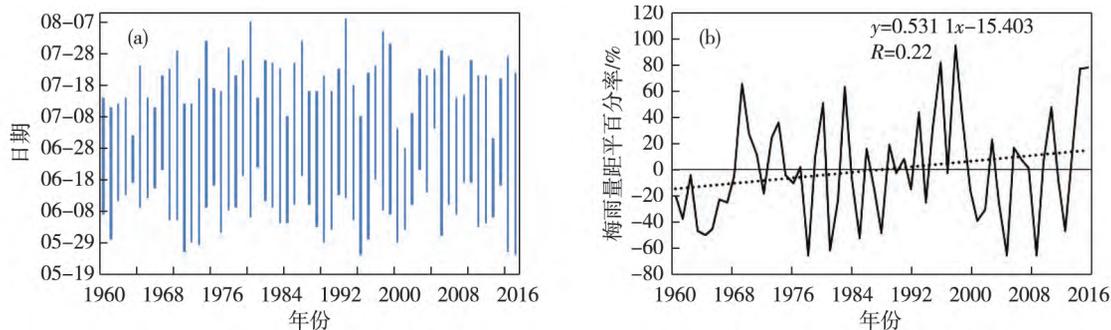


图 2 (a) 1960—2016 年入梅日期(柱线下段)、出梅日期(柱线上段)和(b)梅雨量距平百分率及其线性趋势

Fig.2 (a) The interannual changes of the onset date, the end date and (b) the percentage of precipitation anomaly of Meiyu in the Yangtze-Huaihe region from 1960 to 2016 (The bar charts are the onset date and end date of Meiyu; the curve is the time series of anomalous percentage of precipitation; the dotted line is the linear trend)

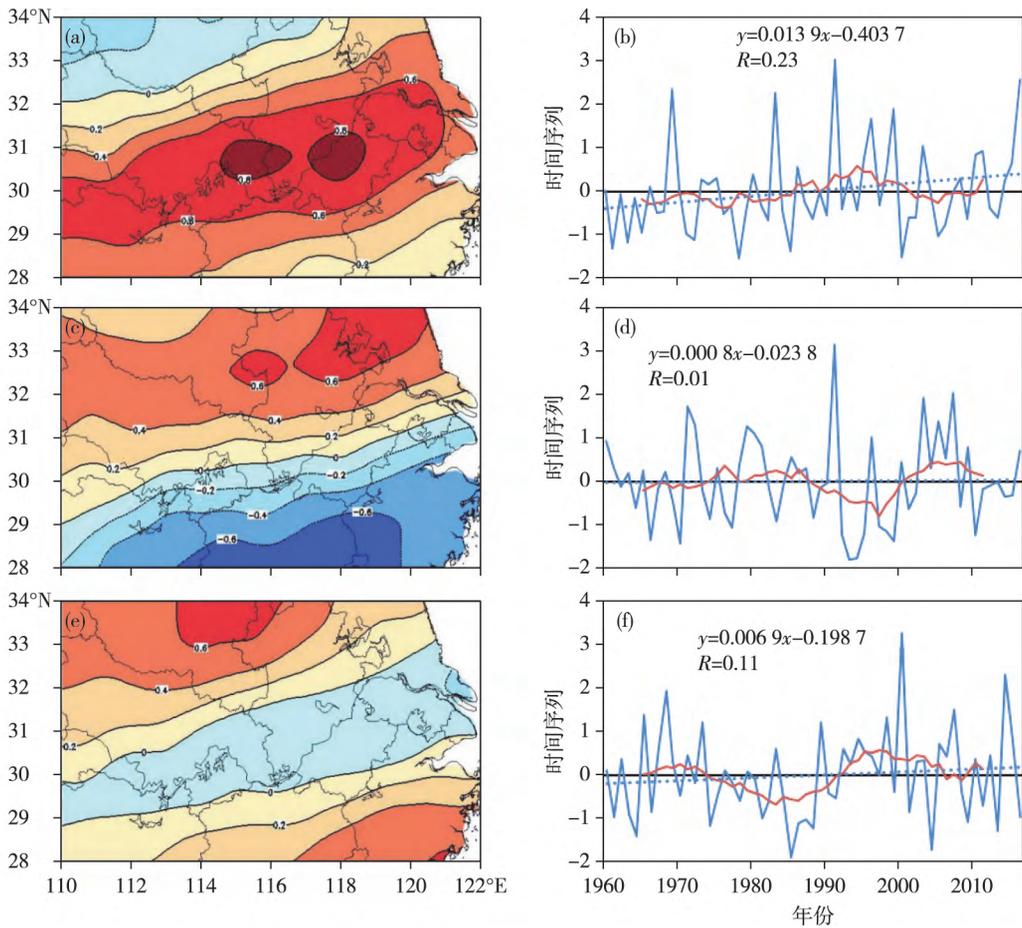


图3 1960—2016年江淮梅雨量的前3个载荷向量及其对应的主分量 a、c、e 分别为第一、二、三载荷向量; b、d、f 分别为第一、二、三主分量 (右图实线: 时间序列; 短横线: 11 a 滑动平均; 点线: 趋势线)

Fig.3 (a c e) The spatial distribution and (b d f) temporal evolution of the first four eigenvectors field for EOF of precipitation departure over the Changjiang-Huaihe region during the Meiyu period from 1960 to 2016 (On the right ,the curves are the time series; the straight lines are the mean values; the dashed lines are 11 years moving average; the dotted lines are the linear trends)

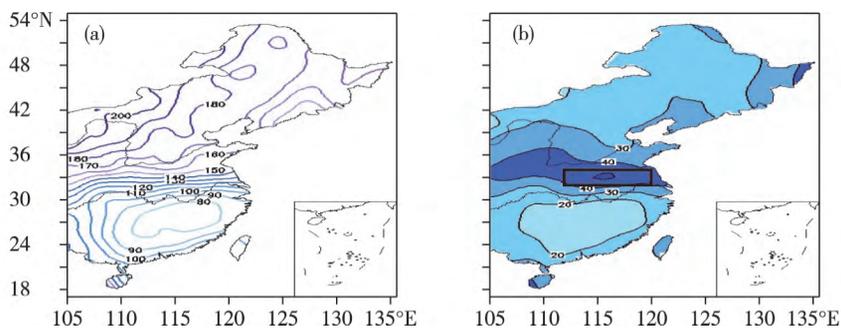


图4 1960—2016年平均连续6次过程透雨出现时间(距1月1日)(a)及其年际方差(b)(单位:d)(红线方框为江淮梅雨关键区)

Fig.4 The propulsion process of the East Asian subtropical summer monsoon from 1960 to 2016 (a; the red lines are the onset date and end date of Meiyu) and the variance distribution and key area of the starting time of continuous rain in stations across the country (b)

112°~120°E) 总共包括 17 个站点。

3.2 东亚副热带夏季风推进到关键区的年际变化

提取关键区(图 4b)内 17 个站点的连续 6 次透雨过程的第一次透雨出现的时间,平均后得到反映 1960—2016 年东亚副热带夏季风推进到关键区的

时间序列(图 5a)。从图中可以看出,副热带夏季风推进到关键区的平均时间为 5 月 19 日,其年际波动明显。1960s—1970s 末时间序列存在上升趋势,即在这一时间段内,副热带夏季风到达关键区的时间有推迟的趋势。1980—2000 年,时间序列呈明显的下降趋势,即季风推进到江淮关键区的时间有所提

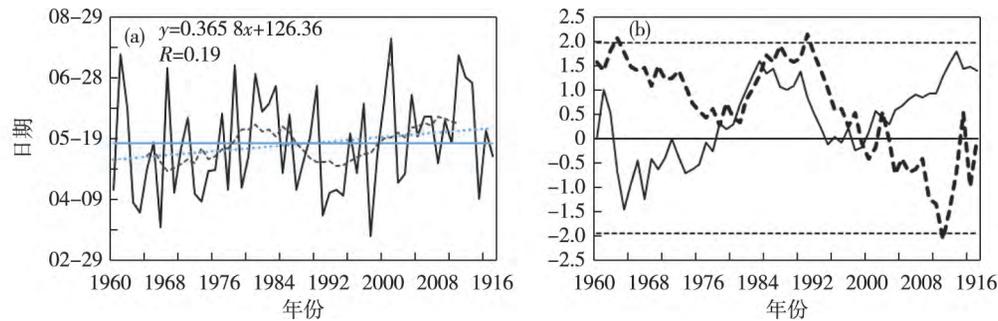


图5 1960—2016年关键区(32°~34°N, 112°~120°E)历年第一次过程透雨出现的平均时间(a) (实线: 时间序列; 短横线: 11 a 滑动平均) 及其 M-K 检验(b) (实线: UF; 虚线: UB; 点线: $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验线)

Fig.5 Time series of East Asian subtropical summer monsoon processes to key areas from 1960 to 2016 (a) and M-K test (b) (Solid line: UF; dashed line: UB; dotted line: a significant level test line of $\alpha = 0.05$)

早, 1980s 初季风在 6 月末到达, 1990s 末则在 3 月末就到达。2000s 以来时间序列呈波动变化, 趋势不明显, 但相比 1990s 季风到达时间有所偏晚。

M-K 突变检验显示(图 5b), 东亚副热带夏季风到达关键区的时间在 1970s 末发生了由偏晚向偏早的突变, 在 1990s 末又发生了由偏早向偏晚的突变。副热带夏季风推进到关键区时间的年代际转变的两个时间段分别为 1980 年前后和 2000 年前后, 而北半球气候变暖的突变年份为 1979 年。IPCC 第五次报告指出, 全球气候变暖的速率在 2000 年后有所趋缓。副热带夏季风推进时间变化趋势的转变时段和全球气候变暖的转变时段相同, 原因有待进一步分析。

4 夏季风进程变异对江淮梅雨的影响

4.1 夏季风与江淮梅雨各特征量的关系

东亚副热带夏季风到达关键区的时间和梅雨量、出梅日的相关系数分别为 -0.27 和 -0.35, 均通过了 $\alpha=0.5$ 的信度检验。说明夏季风到达关键区偏早时, 梅雨量偏多, 出梅日偏晚; 季风到达偏晚时, 梅雨量偏少, 出梅日偏早。从东亚副热带夏季风推进到关键区的平均时间与江淮各站点梅雨量的空间相关分布(图 6) 上可以看出, 副热带夏季风和江淮梅雨量呈全区域一致的负相关, 显著负相关区位于湖南、湖北及江西三省临近的两湖地区, 中心在湖南北部的常德站(29.05°N, 111.68°E), 最大相关系数为 -0.4, 达到 $\alpha=0.01$ 显著性水平, 说明该地区的梅雨量受东亚副热带夏季风推进时间的影响最大。

从江淮地区入梅日、出梅日及梅雨量与东亚副热带夏季风到达江淮地区各站点时间的相关系数分布(图 7) 可以看出, 梅雨特征量与东亚副热带夏

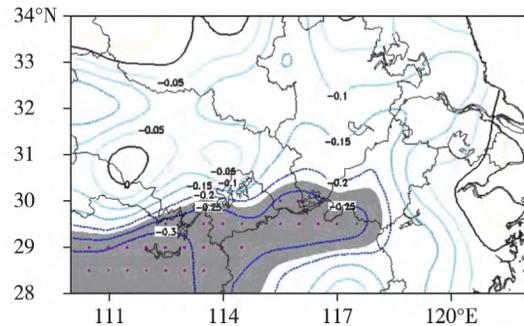


图6 东亚副热带夏季风推进到江淮关键区的平均时间与江淮梅雨量的相关系数及其检验(1960—2016年) (阴影区为通过 $\alpha=0.1$ 的显著性检验, 打点区为通过 $\alpha=0.5$ 的显著性检验)

Fig.6 The correlation coefficient between the time when the East Asian subtropical summer monsoon was advanced to the key area and the rainfall of the Yangtze-Huaihe Rivers in 1960—2016 and its test (the shaded area passes the 90% confidence level test, and the dotted area passes the 95% confidence level test)

季风到达时间的相关基本上以负为主, 说明副热带夏季风到达江淮地区的时间是影响梅雨的重要因子。当副热带夏季风到达江淮地区的时间较早时, 可能导致除湖南和江西以外的大部地区的入梅时间偏晚(图 7a), 偏早最显著的地方在湖南沅江(28.85°N, 112.37°E), 相关系数为 0.27, 偏晚最显著的地方在浙江玉环(28.08°N, 121.27°E), 相关系数为 -0.32, 均达到 $\alpha=0.05$ 的显著性水平; 当副热带夏季风到达江淮地区的时间较早时, 长江以北的出梅日显著偏晚(图 7b), 偏晚最显著的地方在河南南部的信阳(32.13°N, 114.05°E), 最大相关系数为 -0.39, 达到 $\alpha=0.01$ 的显著性水平。副热带夏季风到达江淮地区的时间较早, 还会使得该地区梅雨量普遍偏多(图 7c), 多雨中心主要位于江苏及河南部分分地区, 负相关最显著的地区在江苏北部的高邮(32.8°N, 119.45°E), 最大相关系数为 -0.36, 达到 0.01 信度的显著性水平。且这两个负相关中心均

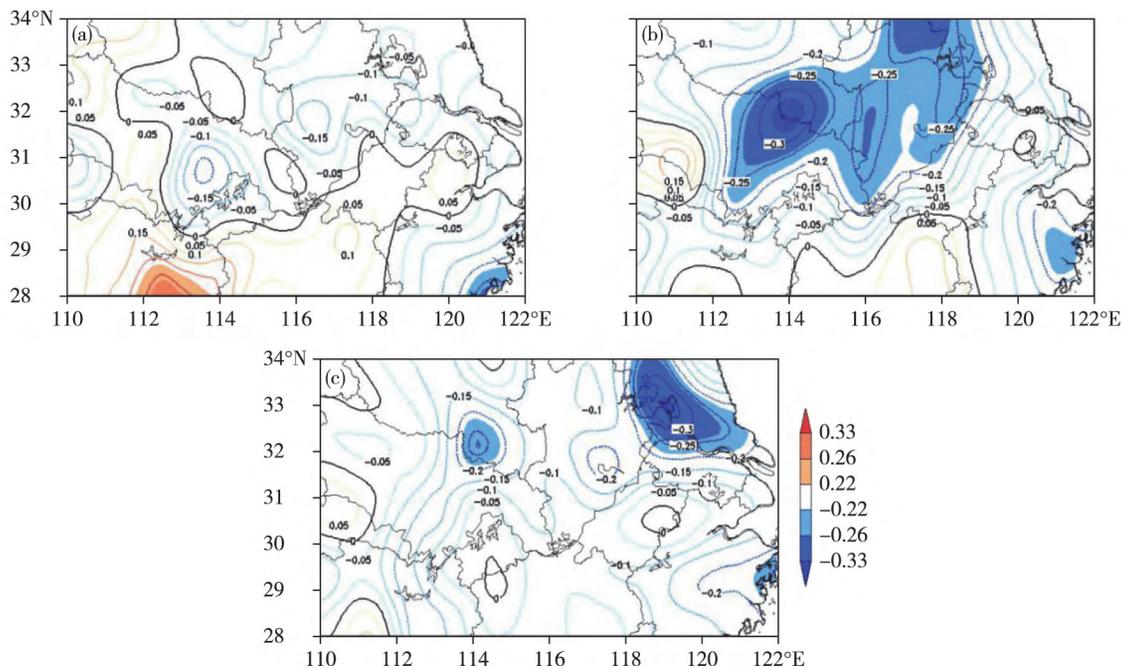


图7 1960—2016年江淮入梅日(a)、出梅日(b)、梅雨量(c)与东亚副热带夏季风到达江淮地区的时间的相关系数(阴影区由浅到深分别为通过 $\alpha=0.1$ 、 0.5 、 0.01 的显著性检验)

Fig.7 Correlation between onset date (a), the end date (b) and the precipitation (c) of Meiyu from 1960 to 2016 and the time when the East Asian subtropical summer monsoon reached the Yangtze-Huaihe River (the shadows passed 90%, 95%, 99% significance test, respectively)

在季风关键区内。

为了分析东亚副热带夏季风到达江淮地区的时间与江淮梅雨量的关系,图8分别给出了江淮梅雨量经EOF分解的前3个载荷向量所对应的主分量(图3b、d、f)与东亚副热带夏季风到达江淮地区时间的相关系数。图8a的负相关表明,当长江流域及江南地区梅雨量偏多(图3b的PC1为正)时,表明东亚副热带夏季风到达江淮地区时间偏早,偏早最显著的地区位于江苏西部的盱眙(32.98°N , 118.52°E)和高邮(32.8°N , 119.45°E),最大相关系数均为 -0.31 ,达到了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验。

从图8b来看,江淮地区梅雨量的南北反向型(图3c)的变化(PC2)与东亚副热带夏季风到达江淮地区的时间关系,只在江淮地区西北部的河南信阳(33.03°N , 112.58°E)和湖北枣阳(32.15°N , 112.75°E),为正相关,最大相关系数为 0.27 ,仅达到了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,即当东亚副热带夏季风到达这里的时间偏晚时有利于该地区梅雨量的偏多。

江淮地区梅雨量的第三模态(图3e)对应的主分量(图3f)与东亚副热带夏季风到达的时间关系最好(图8c),在整个江南地区都为一致的负相关,最显著相关中心分别位于湖南平江站(28.72°N , 113.57°E)和浙江金华(29.12°N , 119.65°E),相关

系数分别为 -0.37 和 -0.4 ,达到了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验。这一结果表明,东亚副热带夏季风到达江南的时间偏早时,有利于该地区梅雨量偏多。

4.2 夏季风与江淮梅雨的年代际关系

从东亚副热带夏季风到达关键区的时间与梅雨各特征量的11a滑动相关可以看出,东亚副热带夏季风到达关键区的时间与入梅日(图9a)的相关不明显,只有在1985—1995年达到了显著性检验,在1963—1984年为正相关,1984年后以负相关为主,2006—2016年又开始转为正相关。到达时间与出梅日(图9b)为稳定的负相关,且相关显著。1965年以前为正相关,1975年后除2002—2012年以外均为负相关,且在1990—2010年的负相关通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验。与梅期长度(图9c)和梅雨量(图9d)的滑动相关均是正相关与负相关交替出现,且阶段性明显。1960s为正相关,1970s—1980s为显著负相关,1980s—1990s中期为正相关,1990s中期—2000s初又转为显著负相关。

5 东亚副热带夏季风对江淮梅雨影响的大气环流特征

东亚副热带夏季风进程变异与江淮梅雨具有显著相关关系,为了分析其联系机理,将东亚副热带夏季风到达关键区的时间标准化后,选取到达最

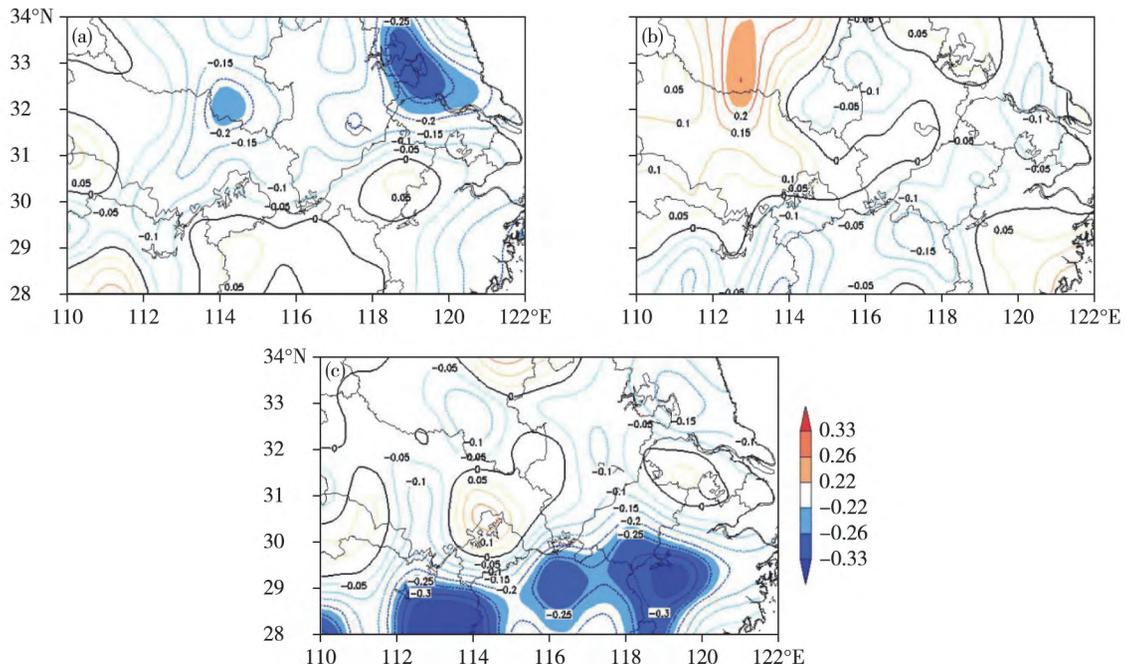


图 8 江淮地区梅雨量 EOF 分解的 PC1 (a) ,PC2 (b) 和 PC3 (c) 分别与东亚副热带夏季风到达江淮地区时间的相关系数 (阴影区由浅到深分别为通过 $\alpha=0.1$, 0.5 , 0.01 的显著性检验)
 Fig.8 The correlation between (a) PC1 , (b) PC2 , (c) PC3 and the time of the East Asian subtropical summer monsoon reaching the Yangtze-Huaihe region (the shadows passed 90% , 95% , 99% significance test , respectively)

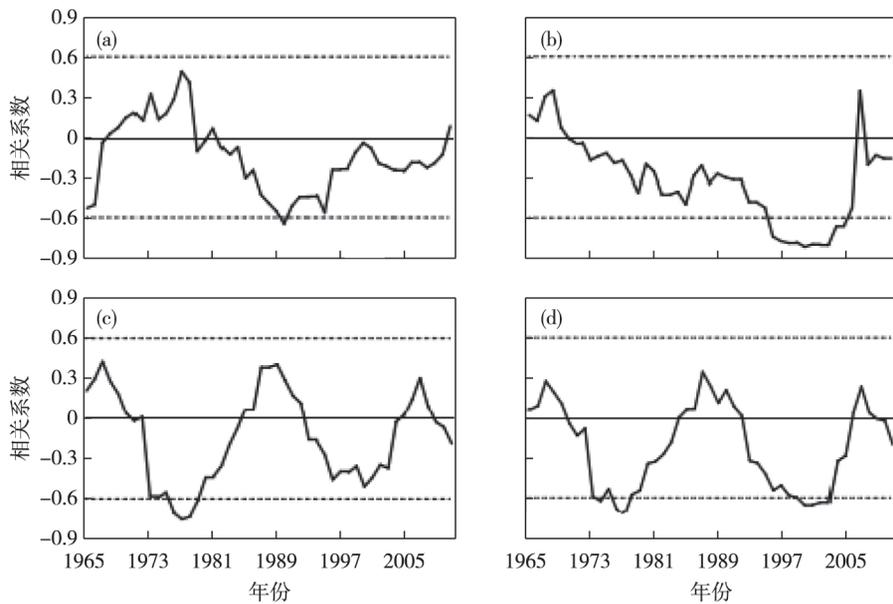


图 9 1960—2016 年东亚副热带夏季风到达关键区的时间与入梅日、出梅日、梅期长度、梅雨量的 11 a 滑动相关:
 (a) 入梅日; (b) 出梅日; (c) 梅期长度; (d) 梅雨量(虚线: 相关系数的 $\alpha=0.05$ 显著性水平)
 Fig.9 The correlation coefficient between the time when the East Asian subtropical summer monsoon was advanced to the key area and (a) onset date , (b) the end date , (c) the length of and (d) the precipitation of Meiyu from 1960 to 2016 (dotted line: passes the 95% confidence level)

早的 3 a (标准化距平 < -1.5 ; 1967、1991、1998 年) 和最晚的 5 a (标准化距平 > 1.5 ; 1961、1968、1978、2001、2011 年) 作为异常年, 分析在东亚副热带夏季风到达关键区的异常年份, 其梅雨期内平均的欧亚大气环流特征。

从 1960—2016 年东亚副热带夏季风到达关键

区时间偏早年的 500 hPa 高度距平场(图 10a) 可以看出, 500 hPa 欧亚大陆中高纬度在乌拉尔山东部为正距平, 表明乌拉尔山阻塞高压向东增强, 使得脊前向南输送的西北气流加强且路径偏东。我国东北到日本海为负距平, 说明东北冷涡增强、东亚大槽加深, 东亚大槽与高纬的阻塞形势形成稳定的

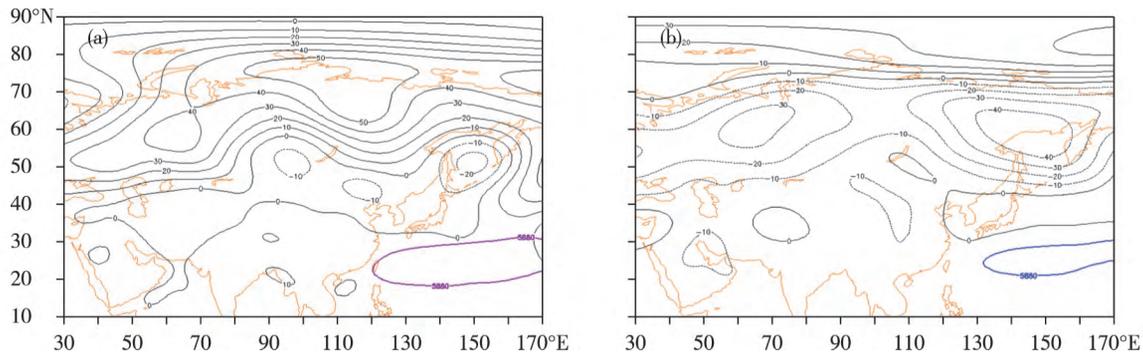


图 10 1960—2016 年东亚副热带夏季到达关键区时间异常年 500 hPa 高度距平合成场: (a) 偏早年; (b) 偏晚年
(单位: gpm, 红色为气候平均 5 880 gpm 线, 紫色为偏早年 5 880 gpm 线, 蓝色为偏晚年 5 880 gpm 线)

Fig.10 500 hPa geopotential height field of the time of East Asia subtropical summer monsoon reached the key area abnormal year: (a) early years; (b) late years (unit: gpm, red is the average climate of 5 880 gpm line; purple is 5 880 gpm line in early years; blue is 5 880 gpm line in late years)

偶极型,加强了槽后冷空气向南输送,使西伸的副热带高压不易北抬。由于冷空气在大陆上很快变性,冷锋大多只能到达长江沿岸,逐步转化为稳定的梅雨准静止锋,使雨带在江淮流域维持稳定,出梅日偏晚,有利于梅雨量偏多。西太平洋为正距平,说明西太平洋副热带高压中心强度增强,位置偏西,其西北侧的西南暖湿气流输送加强,为梅雨发生提供有利的水汽条件。偏晚年(图 10b)与偏早年基本呈反相分布,极涡中心正距平,说明极涡强度减弱,不利于极地冷空气南侵。中高纬乌拉尔山以西—鄂霍次克海为带状负距平区,对应乌拉尔山和鄂霍次克海双阻形势减弱,东亚大槽西退北缩,不利于冷空气的向南输送。西太平洋副热带高压强度偏弱,不利于其边缘的西南暖湿气流北上至江淮流域。从合成场(图 11)也可以看出,极涡中心为

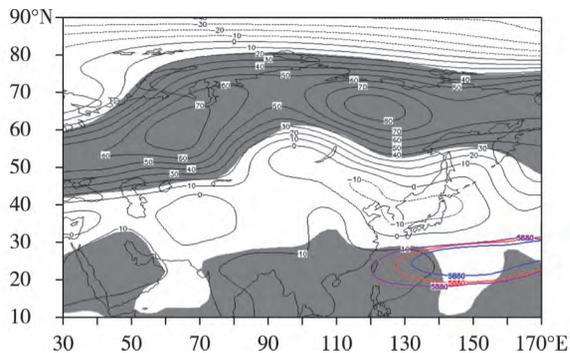


图 11 1960—2016 年东亚副热带夏季到达关键区时间异常年 500 hPa 高度距平偏早年—偏晚年合成场差值场(单位: gpm; 红色为气候平均 5 880 gpm 线; 紫色为偏早年 5 880 gpm 线; 蓝色为偏晚年 5 880 gpm 线; 阴影区为通过 $\alpha = 0.5$ 置信水平 t 检验)

Fig.11 500 hPa geopotential height field of the time of East Asia subtropical summer monsoon reached the key area abnormal year synthetic difference field (unit: gpm, red is the average climate of 5 880 gpm line; purple is 5 880 gpm line in early years; blue is 5 880 gpm line in late years; the shaded area passes the 95% confidence level t test)

负距平,中高纬度乌拉尔山到鄂霍次克海为带状正距平区,阻塞高压增强,日本海附近为负距平,东亚大槽加深,有利于水汽向江淮地区的输送和雨带的维持。

从整层水汽通量及其散度距平图上可以看出(图 12),东亚副热带夏季风到达关键区偏早的年份(图 12a),西太平洋及南海地区水汽通量较大,但其散度距平为正,而江淮地区水汽通量散度距平为负,说明该地区水汽辐合较强,表明来自西太平洋的大量水汽经过南海、华南地区,最终在江淮地区汇合,有利于该地区的降水。季风到达偏晚年(图 12b),环流形势与偏早年存在显著差异。西太平洋及华南地区水汽通量散度为负,水汽在该地区有辐合,而江淮地区水汽通量散度距平为正,表明该地区有水汽辐散,来自南海和华南的水汽输送较弱,不利于江淮地区降水的产生。

6 结论

通过对 1960—2016 年江淮梅雨和东亚副热带夏季风的特征及其关系的分析,得到以下几点结论:

(1) 江淮地区平均梅雨期为 6 月 8 日—7 月 15 日,梅雨量为 303 mm。2000 年之后入梅日偏迟,出梅日以偏早居多,但近年来入梅日又出现偏早的趋势;进入 2000s 以来梅雨量整体偏少,但近年来梅雨量有显著增加趋势。

(2) 东亚副热带夏季风推进到江淮关键区的平均时间为 5 月 19 日,其年际波动明显,夏季风到达关键区的时间在 1970s 末发生了由偏晚向偏早的突变,在 1990s 末又发生了由偏早向偏晚的突变。

(3) 东亚副热带夏季风到达关键区偏早时,出梅日偏晚,梅雨量偏多,季风到达偏晚时,出梅日偏早,梅雨量偏少。副热带夏季风和江淮梅雨量呈全

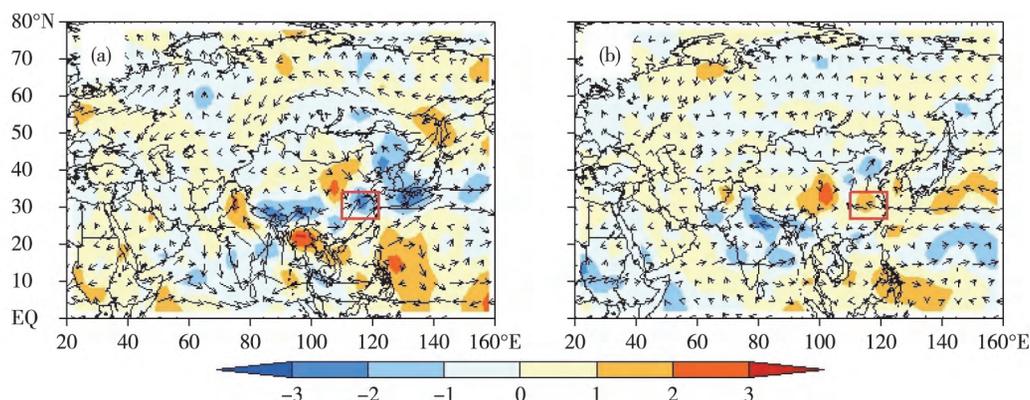


图 12 1960—2016 年东亚副热带夏季风到达关键区时间偏早年 (a) 和偏晚年 (b) 的整层水汽通量距平及其散度

Fig.12 The whole layer of water vapor flux anomalies and their divergence of the East Asian subtropical summer monsoon reaches the key area from 1960 to 2016 in (a) the early years and (b) the late years

区一致的负相关,负相关中心在湖南北部地区。江淮地区出梅日及梅雨量与东亚副热带夏季风到达江淮地区的时间的相关系数分布以负相关为主,负相关中心均在关键区内。

(4) 东亚副热带夏季风到达关键区时间偏早年,乌拉尔山阻塞高压增强东移,加强了脊前西北气流的向南输送;东北冷涡增强、东亚大槽加深,槽后冷空气向南输送加强,抑制了中低纬度副热带高压的北跳,西太平洋副热带高压中心强度增强,位置偏西,副热带高压西北侧的西南暖湿气流输送加强,有利于江淮地区水汽的辐合,为梅雨发生提供有利的水汽条件,使雨带在江淮流域维持稳定,有利于梅雨量偏多。

参 考 文 献

- [1] 蒋薇,高辉. 21 世纪长江中下游梅雨的新特征及成因分析. 气象, 2013, 39(9): 1139-1144.
JIANG Wei, GAO Hui. New features of Meiyu over middle-lower reaches of Yangtze River in the 21st century and the possible causes. Meteorological Monthly (in Chinese), 2013, 39(9): 1139-1144.
- [2] 徐群. 近 80 年长江中、下游的梅雨. 气象学报, 1965, 35(4): 507-518.
XU Qun. Meiyu in the middle and lower reaches of the Yangtze River in the past 80 years. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 1965, 35(4): 507-518.
- [3] 徐群. 近 46 年江淮下游梅雨期的划分和演变特征. 气象科学, 1998, 18(4): 316-329.
XU Qun. The delimitation of Meiyu period in the lower reaches of Yangtze-Huaihe river and their evolving characteristics for 46 recent years. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 1998, 18(4): 316-329.
- [4] 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 Xiwen, LI Yuean. Comparison analysis of non-typical and typical Meiyu. Meteorological Monthly (in Chinese), 2004, 30(11): 38-42.
- [5] 魏凤英,张京江. 1885—2000 年长江中下游梅雨特征量的统计分析. 应用气象学报, 2004, 15(3): 313-321.
WEI Fengying, ZHANG Jingjiang. Climatic variation of Meiyu in the middle-lower reaches of Changjiang River during 1885—2000. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 2004, 15(3): 313-321.
- [6] 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.
- [7] 梁萍,汤绪,柯晓新,等. 中国梅雨影响因子的研究综述. 气象科学, 2007, 27(4): 464-471.
LIANG Ping, TANG Xu, KE Xiaoxin, et al. Review of study on influencing factors of China Meiyu. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 2007, 27(4): 464-471.
- [8] 梁萍,陈丽娟,丁一汇,等. 长江梅雨的长期变率与海洋的关系及其可预报性研究. 气象学报, 2018, 76(3): 379-393.
LIANG Ping, CHEN Lijuan, DING Yihui, et al. Relationship between long-term variability of Meiyu over the Yangtze River and ocean and Meiyu's predictability study. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 2018, 76(3): 379-393.
- [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] 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.
- [11] 黄青兰,王黎娟,李熠,等. 江淮梅雨区域入、出梅划分及其特征分析. 热带气象学报, 2012, 28(5): 749-756.
HUANG Qinglan, WANG Lijuan, LI Yi, et al. Determination of the onset and ending of regional Meiyu over Yangtze-Huaihe River Valley and its characteristics. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 2012, 28(5): 749-756.
- [12] 梁萍,丁一汇,何金海,等. 江淮区域梅雨的划分指标研究. 大气科学, 2010, 34(2): 418-428.
LIANG Ping, DING Yihui, HE Jinhai, et al. A study of determination index of regional Meiyu over the Yangtze-Huaihe Basin. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2010, 34(2): 418-428.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 赵俊虎,陈丽娟,熊开国. 基于新监测指标的江南入梅早晚的气候特征及影响系统分析. 气象学报, 2018, 76(5): 680-698.
ZHAO Junhu, CHEN Lijuan, XIONG Kaiguo. Climate characteristics and influential systems of Meiyu to the south of the Yangtze River based on the new monitoring rules. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 2018, 76(5): 680-698.
- [16] 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 Shiyang, LI Jishun, WANG Angsheng. East Asian monsoon and flood disaster in China. Disaster Reduction in China (in Chinese), 1997, 7(4): 17-24.
- [17] 祝从文,何金海,吴国雄. 东亚季风指数及其与大尺度热力环流年际变化关系. 气象学报, 2000, 58(4): 391-402.
ZHU Congwen, HE Jinhai, WU Guoxiong. East Asian monsoon index and its inter-annual relationship with largescale thermal dynamic circulation. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 2000, 58(4): 391-402.
- [18] SUN Xiurong, CHEN Longxun, HE Jinhai. Interannual variation of index of East Asian land-sea thermal difference and its relation to monsoon circulation and rainfall over China. Acta Meteorologica Sinica, 2001, 15(1): 71-85.
- [19] WANG Yafei, WANG Bin, OH J H. Impact of the preceding El Niño on the East Asian summer atmosphere circulation. J. Meteor. Soc. Japan, 2001, 79(1B): 575-588.
- [20] 王亚非,张雁,陈菊英. 一个能反映梅雨现象的东亚夏季风指数. 气候与环境研究, 2001, 6(2): 146-152.
WANG Yafei, ZHANG Yan, CHEN Juying. An East Asian summer Monsoon index in description of Meiyu phenomenon. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 2001, 6(2): 146-152.
- [21] ZHAO Ping, ZHANG Renhe, LIU Jiping, et al. Onset of southwesterly wind over eastern China and associated atmospheric circulation and rainfall. Climate Dyn., 2007, 28(7/8): 797-811.
- [22] QI Li, HE Jinhai, ZHANG Zuqiang, et al. Seasonal cycle of the zonal land-sea thermal contrast and East Asian subtropical monsoon circulation. Chinese Sci. Bull., 2008, 53(1): 131-136.
- [23] ZHU Zhiwei, HE Jinhai, QI Li. Seasonal transition of East Asian subtropical monsoon and its possible mechanism. J. Trop. Meteor., 2012, 18(3): 305-313.
- [24] 张灵玲,谢倩,杨修群. 大气热源年代际异常与20世纪70年代末期东亚夏季风年代际减弱. 气象科学, 2015, 35(6): 663-671.
ZHANG Lingling, XIE Qian, YANG Xiuqun. Interdecadal anomaly of atmospheric diabatic heating and interdecadal weakening of East Asian summer monsoon at the end of 1970s. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 2015, 35(6): 663-671.
- [25] 周兵,何金海,吴国雄,等. 东亚副热带季风特征及其指数的建立. 大气科学, 2003, 27(1): 123-135.
ZHOU Bing, HE Jinhai, WU Guoxiong, et al. Characteristics of east Asian subtropical monsoon index and its definition. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2003, 27(1): 123-135.
- [26] 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.
- [27] 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.