

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^{*}

赵俊虎¹ 陈丽娟^{1,2} 熊开国³

ZHAO Junhu¹ CHEN Lijuan^{1,2} XIONG Kaiguo³

1. 中国气象局国家气候中心,中国气象局气候研究开放实验室,北京,100081

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,南京,210044

3. 武汉区域气候中心,武汉,430074

1. *Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, CMA, Beijing 100081, China*

2. *Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China*

3. *Wuhan Regional Climate Center, Wuhan 430074, China*

2017-12-28 收稿,2018-03-30 改回.

赵俊虎, 陈丽娟, 熊开国. 2018. 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, 76(5):680-698

Zhao Junhu, Chen Lijuan, Xiong Kaiguo. 2018. Climate characteristics and influential systems of Meiyu to the south of the Yangtze River based on the new monitoring rules. *Acta Meteorologica Sinica*, 76(5):680-698

Abstract Using the NCEP/NCAR reanalysis data, NOAA Sea Surface Temperature (SST) data, the Chinese Meiyu onset dates determined based on "Meiyu Monitoring Business Rules" released by China Meteorological Administration in 2014, and other data from 1951–2015, anomalous climate characteristics of the Meiyu onset date in three regions of South China are analyzed. The relationships between the Meiyu onset date to the south of the Yangtze River (MODSYR) with variations of atmospheric circulation in May–June and preceding SST are analyzed using the correlation and composition analysis methods. The results show that MODSYR has significant interannual variability in the recent 65 years. The mean MODSYR during 1951–2015 was on 8 June. The difference between the earliest and the latest MODSYR was 47 days. The MODSYR was usually in June (accounting for 80.0%). There exist significant differences in the large-scale circulation from the upper troposphere to the lower troposphere during the same period (May to June) between the earlier and later MODSYR years. In the early MODSYR years, the South Asia high (SAH) and East Asia subtropical westerly jet stream (SWJS) establish earlier and are stronger compared with their climatological means in the upper troposphere, the SAH moves northward to the Tibetan Plateau earlier than normal, and the SWJS also moves northward earlier. The mid- and high-latitudes is dominated by strong meridional circulation, and the first northward jump of the western Pacific subtropical high (WPSH) occurs earlier than normal. The cross-equatorial flow in the lower troposphere establishes earlier, and the onset of the South China Sea summer monsoon is earlier, too. However, the opposite is true for late MODSYR years. SST anomalies (SSTA) in the preceding winter and spring are important forcing factors that affect the MODSYR, and they are also critical early predictive signals. When the eastern Pacific SSTA is abnormally cold in the preceding winter, the SST gradient index to the East Australia (ASI) is in positive phase to the East of Australia and the spring North Atlantic Triassic (NAT) is in the positive phase, the MODSYR is earlier than normal.

^{*} 资助课题:国家重点基础研究发展计划(2015CB453203)、国家自然科学基金项目(41875093,41505061,41705074,41275073)与公益性行业(气象)科研重大专项(GYHY201506001)。

作者简介:赵俊虎,主要从事短期气候预测研究。E-mail: zhaojh@cma.gov.cn

通讯作者:陈丽娟,主要从事短期气候预测研究。E-mail: chenlj@cma.gov.cn

The relationship between the December ASI, the March NAT and MODSYR are the closest. When the December ASI is in positive phase, the first northward jump of the WPSH occurs earlier than normal. When the NAT is on positive phase in March, the SWJS will be stronger and located more northward in June, which is favorable for earlier MODSYR.

Key words Meiyu, Meiyu onset date, Climatic characteristics, Atmospheric circulation, SSTA

摘 要 利用中国气象局 2014 年发布的《梅雨监测业务规定》中的入梅日期资料、NCEP/NCAR 再分析资料及 NOAA 海温资料等,重点研究了 1951—2015 年江南入梅早、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。结果表明,近 65 年来江南入梅日具有显著的年际变化特征,入梅平均日期为 6 月 8 日,最早和最晚相差 47 d。入梅日主要出现在 6 月,占 80.0%。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。入梅偏早年,高层南亚高压和东亚副热带西风急流(西风急流)的建立较早,强度较强,南亚高压北移到青藏高原上空亦偏早,西风急流北跳偏早;中层中高纬度经向环流较强,而西北太平洋副热带高压(副高)第 1 次北跳偏早;低层索马里越赤道气流建立较早,强度较强,西太平洋为反气旋式距平环流;入梅偏晚年上述环流系统演变特征则基本相反。冬、春季海表温度的异常是影响入梅早、晚的重要的外部强迫因子,也是重要的前期预测信号:当冬季东太平洋海表温度为负距平、澳大利亚东部海表温度偶极子为正位相及春季北大西洋三极子处于正位相时,江南入梅偏早;上一年 12 月澳大利亚东侧海表温度偶极子和当年 3 月北大西洋三极子与江南入梅早、晚关系最为密切,当 12 月澳大利亚东部海表温度偶极子为正位相时,副高第 1 次北跳偏早,当 3 月北大西洋三极子为正位相时,6 月西风急流偏强、偏北,有利于江南入梅偏早。

关键词 梅雨,入梅,气候特征,大气环流,海温异常

中图法分类号 P461

1 引 言

传统梅雨指的是每年 6—7 月在中国长江中下游地区、朝鲜半岛最南部(称为 Changma)和日本中南部(称为 Baiu)出现的以持续多雨为主要特征的气候现象(竺可桢,1934;Tao, et al,1987;魏凤英等,2004;丁一汇等,2007;周兵等,2007;闵岫等,2008)。它是一种季风气候现象,且为东亚地区所特有,其出现的早晚和强度与东亚大气环流的季节变化,特别是夏季风的变化特征紧密关联(陶诗言等,1958;Ding,1992;徐海明等,2001a;2001b;张庆云等,2003;葛全胜等,2007)。梅雨期(6—7 月)是东亚夏季风季节性北推过程中的重要阶段,这一时期中国东部雨带主要徘徊在江南至淮河之间,梅雨对这一地区夏季旱涝有重要的影响(施能等,1996;鲍名,2009;梁萍等,2010;刘屹岷等,2013)。梅雨期的强降水与梅雨区洪涝灾害密切相关,如 1998 年夏季,长江中下游梅雨期降水强度大,7 月下旬还出现二度梅,导致该地区出现严重涝灾(李维京,1999)。因此,揭示梅雨的变化规律及其与东亚季风气候系统的关系,具有重要的科学意义;在此基础上准确预测梅雨趋势,对当地的工农业生产及防灾、减灾具有

十分重要的指导意义。

有关梅雨的定义、年际变化及其影响机制已有许多研究成果。20 世纪 80 年代初,中国气象界开展了关于梅雨问题尤其是入、出梅标准的讨论。讨论的分歧主要在于:是以天气(降水)实况为主或是以环流调整为主或二者兼顾来划分入、出梅日期(林春育,1979;上海气象局预报组,1980;李小泉,1981)。总体来说,目前中国各个省(市)主要通过西北太平洋副热带高压(副高)位置、气温、雨日或雨量来确定入、出梅日期。由于划分标准因地、因人而异,因而所得结果的可比性较差(周后福,2005;胡娅敏等,2008;李勇等,2017)。此外,各省(市)台站主要关心本地的梅雨开始、结束,迟迟未开展整个区域梅雨的开始、结束时间的划定业务。从整个长江中下游地区层面出发,亟待有一种统一的认定梅雨的思路和方法。为了进一步做好梅雨监测工作,建立适用于中国国家级和省级业务相对统一的指标体系,在中国国家气候中心和相关省、市业务试运行的效果检验评估基础上,2014 年 5 月,中国气象局发布了中国《梅雨监测业务规定》^①,作为中国国家级和相关省(市)级气象部门开展梅雨监测预测业务的重要依据。

^①中国气象局预报与网络司. 2014. 关于印发《梅雨监测业务规定》的通知(气预函(2014)28 号)。

由于东亚夏季风活动年际变率大,直接影响梅雨的年际变化。叶笃正等(1958)指出,印度西南季风爆发后深入中国大陆东南部,与北方冷空气交汇形成梅雨锋。陶诗言等(1958)指出印度西南季风爆发与东亚入梅之间相互关联,两者在日期上存在一致性。Tao等(1987)、陶诗言等(1988)对东亚夏季风系统的成员进行了详细分析,认为东亚夏季风的异常活动导致东亚季风系统成员的偏北或偏南会影响到江淮流域的入梅时间及梅雨持续天数。已有的诸多研究往往是将长江和淮河流域作为一个整体,研究时段多选定为整个梅汛期来探讨梅雨形成的大气环流特征及其影响机制。而《梅雨监测业务规定》对梅雨进行了气候分区:按照气候类型可将梅雨监测区域分为江南区、长江中下游区、江淮区。由于各区梅雨均受到外强迫信号和季风系统的影响,使得它们具有一定的共性,但各区梅雨受季风季节内变率的作用以及天气系统的影响不同,使得不同区域梅雨异常对应的对流层高、中、低层多个大尺度环流系统有明显差异(吴志伟等,2006;牛若芸等,2009)。因此,需要对不同区域进行有针对性的分析。江南地区位于华南地区和江淮地区之间,是中国梅雨监测定义的最南区域。江南梅雨是春末夏初华南前汛期(平均4月第2候入汛)向江淮梅雨过渡季节中的重要天气、气候现象,每年梅雨的开始与结束、梅雨期的长短、梅雨量的多寡,不仅反映了该年从春季过渡到盛夏期间,亚洲上空大气环流季节变化与调整的各种演变特征,而且直接与江南地区旱涝灾害的形成与持续有关。因此揭示江南入梅早、晚的变化特征及其成因对于深入认识东亚季风气候系统的演变具有重要意义。那么基于新的监测结果,江南入梅早、晚有何特征?与长江和江准入梅之间有何联系?影响入梅早、晚的高、低层环流系统有哪些?前期预测信号是什么?对这些问题的回答是开展江南梅雨预测的基础和依据。

基于此,利用《梅雨监测业务规定》中提供的1951—2015年中国三个区域入梅的监测结果,分析了三个区域入梅早、晚的气候特征,在此基础上重点分析了与江南入梅异常相联系的东亚夏季风系统及其演变,以及与前冬、春季关键区域海表温度异常的关系,所得研究结论对准确预测江南梅雨的特征具有重要意义。

2 资料和方法

所用资料主要包括:美国国家环境预报中心和国家大气研究中心(NCEP/NCAR)再分析资料(Kalnay, et al, 1996),水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$;美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的全球 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 月平均海温重建资料(Reynolds, et al, 2002),时段均为1948年1月—2015年12月。Nino4指数和北大西洋海表温度三极子(NAT)指数来自中国国家气候中心(获取网址为:http://cmdp.ncc-cma.net/Monitoring/cn_index_130.php)。其中,Nino4指数定义为(5°S — 5°N , 160°E — 150°W)内海表温度距平(SSTA)的区域平均值;北大西洋海表温度三极子指数定义为北大西洋中纬度(34° — 44°N , 62° — 72°W)海表温度距平与高纬度(44° — 56°N , 24° — 44°W)和低纬度(0° — 18°N , 24° — 46°W)平均的海表温度距平之差。气候平均值均采用1981—2010年平均。

梅雨新的监测指标是按照《梅雨监测业务规定》来确定,中国梅雨主要分布在江南至江淮流域,即西自湖北宜昌,东至华东沿海,南端以南岭以北的 28°N 为界,北抵淮河沿线 34°N 一带,其范围为(28° — 34°N , 110° — 123°E);涉及的行政区域包含上海、江苏、安徽、浙江、江西、湖北、湖南等6省1市。按照气候类型可将梅雨监测区域分为江南区(I)、长江中下游区(II,以下简称长江区)、江淮区(III)(图1)。确定区域入(出)梅与梅雨期的主要依据是区域内各监测站的降水条件,副高脊线、日平均温度、中国南海夏季风爆发时间等为辅助条件,其中入梅日定义方法如下:

(1) 雨日的确定:某日区域中有 $1/3$ 以上气象监测站出现 $\geq 0.1\text{ mm}$ 的降水,且区域内日平均降水量 $\geq R_d$,该日为一个雨日。其中,安徽江淮之间、江苏(长江区)、湖南和上海等地 R_d 取为 1.0 mm ,其他区域 R_d 均为 2.0 mm 。

(2) 雨期开始日的确定:从第1个雨日算起,往后2,3,...,10日中的雨日数占相应时段内总日数的比例 $\geq 50\%$,则第1个雨日为雨期开始日。

(3) 入梅时间的确定:第1个雨期的开始日即为入梅日。

关于梅雨的其他业务规范可参考《梅雨监测业务规定》。

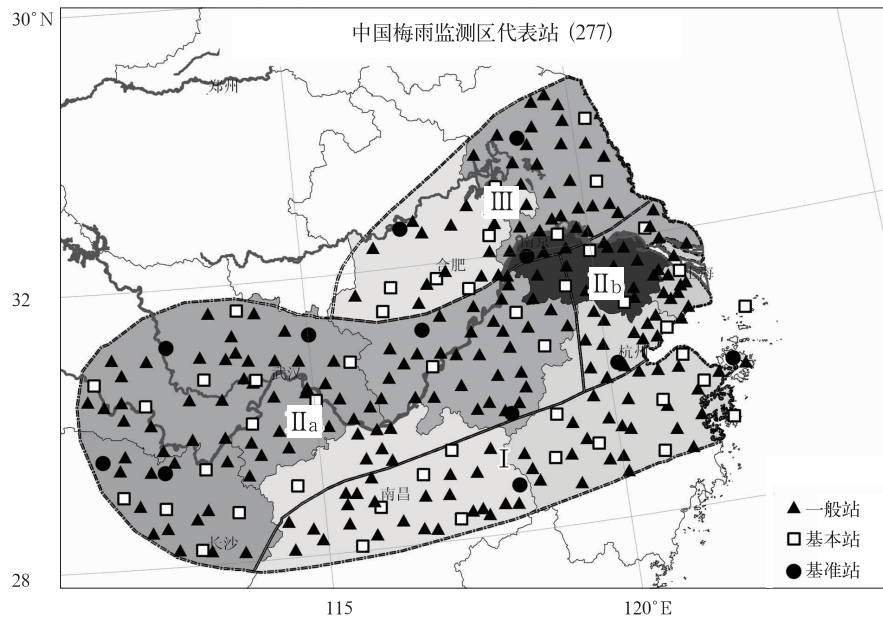


图1 梅雨监测区域划分及监测站点空间分布(引自《梅雨监测业务规定》;

I表示江南区, II表示长江区, III表示江淮区)

Fig.1 Schematic diagram of the division of the Meiyu monitoring area and spatial distribution of monitoring stations (I indicates the region to the south of the Yangtze River, II indicates the region of the Yangtze River basin, III indicates the regions of the Yangtze-Huaihe basin)

3 中国梅雨入梅日的气候特征

图2为1951—2015年3个区域梅雨入梅日的年际变化、线性趋势及其9年滑动平均曲线。可见3个区域入梅日均存在显著的年际变化。1951—2015年江南区入梅平均日期为6月8日,标准差为8 d(表1);入梅最早的为1995年(5月25日),入梅最晚为2005年(7月11日),最早和最晚相差47 d。入梅日主要出现在6月(52年,占80.0%),其次是5月(10年,占15.6%),只有2年出现在7月(占3.1%)。长江区入梅平均日期为6月14日,标准差为11 d;江淮区入梅平均日期为6月21日,标准差为11 d(表1)。年际尺度上,3个区域入梅时间较一致,江南区和长江(江淮)区的相关系数为0.48(0.45),长江区和江淮区的相关系数为0.57。从入梅日的9年平滑曲线看其存在显著的年代际变化:江南区入梅从20世纪50年代直至60年代末主要以偏晚为主,70年代初期以偏早为主,70年代中后期至80年代末以偏晚为主,90年代以偏早为主,21

世纪初以偏晚为主。由功率谱分析可见(图略),江南区入梅日存在显著的6年周期。线性趋势显示近65年来江南、长江和江淮区的入梅日无明显长期变化趋势(图2)。

旧的梅雨监测主要利用上海、南京、芜湖、九江、汉口5个站的逐日降水量和副高在110°—125°E范围内的脊线位置作为基本资料,来划分长江中下游地区的梅雨期,平均入梅日在6月17日前后(陶诗言等,1958;徐群,1965;杨义文等,2001;竺夏英等,2008)。而新的梅雨监测则主要考虑了中国梅雨的区域性特征,江南区至江淮区南北跨度6个纬度,入、出梅的早晚、梅雨期的长短及梅雨量的多寡,均具有明显的区域差异。新的监测指标正是考虑到这种区域差异,对梅雨区进行了客观的划分,将旧的梅雨监测区域拓展并细化为江南区、长江中下游区和江淮区3个区域,从表1也可见,3个区域平均入梅日具有先后差异,江南区较长江中下游区偏早一周,而长江中下游区较江淮区偏早一周。从梅雨量来看,3个区域也具有明显的年际差异。由此可见,新

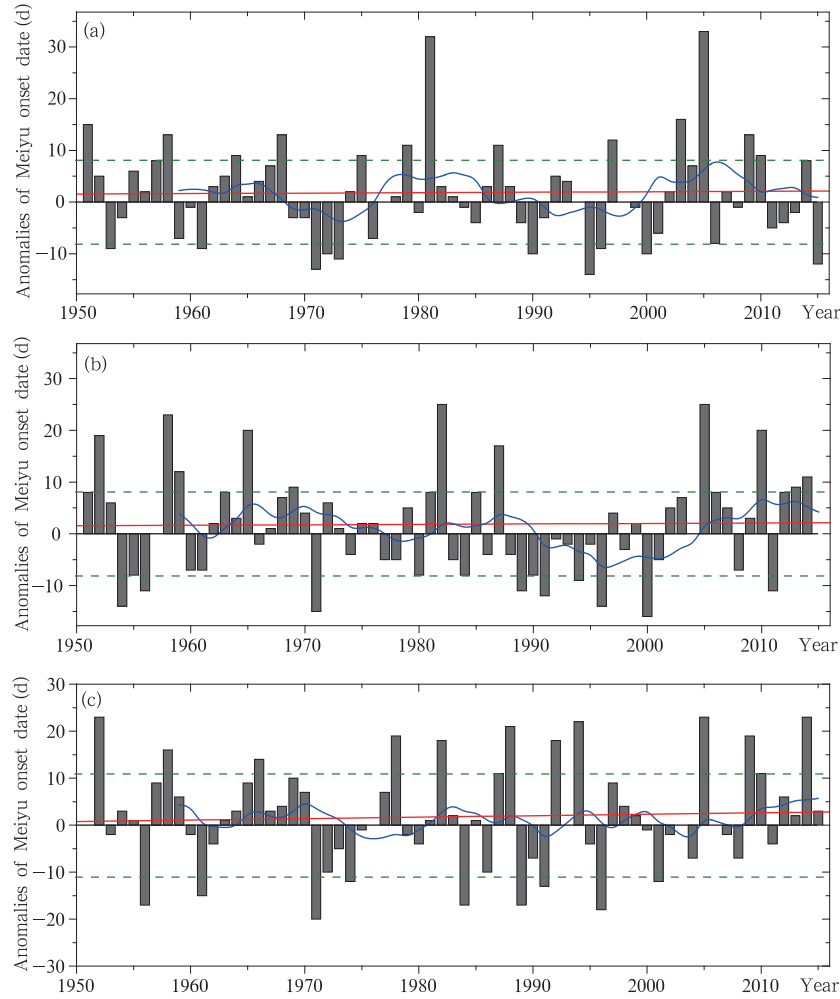


图2 1951—2015年3个区域入梅日距平

(a. 江南区, b. 长江区, c. 江淮区; 红色直线表示线性趋势, 蓝色曲线表示9年滑动平均, 虚线表示1倍标准差)

Fig. 2 Anomalies of Meiyu onset date from 1951 to 2015

(a. in the region to the south of the Yangtze River, b. in the region of the Yangtze River basin, c. in the region of the Yangtze-Huaihe basin; The red straight line in each panel represents the linear trend, the blue curve represents the 9-year running average, and the dotted line represents the 1-fold standard deviation)

的梅雨监测更加客观和合理,有利于细致刻画东亚夏季风的季节内进程,并使得监测和预测业务更有针对性。

此外,3个区域的入梅日与各自的梅雨期日数的相关系数分别为 -0.55 、 -0.57 和 -0.70 ,3个区域的入梅日与各自的梅雨量的相关系数分别为 -0.49 、 -0.45 和 -0.49 ,6个相关系数均通过了99.9%的置信度 t 检验。表明入梅早、晚与梅雨期的长短及梅雨量的多寡均有密切的关系,入梅偏早,

通常梅雨期就容易偏长、同时梅雨量偏多;入梅偏晚,通常梅雨期就容易偏短、同时梅雨量偏少。这也从侧面反映了研究入梅早、晚的影响系统和预测信号的重要意义,即通过预测入梅早晚,可以预判梅雨期的长短和梅雨量的多寡,进而预测梅雨异常是否会导致某一区域发生旱涝灾害。由于中国雨季开始后一般从南向北推进,3个梅雨区中,江南入梅最早,是东亚夏季风系统影响中国的最早体现之一。因此,选取江南区,研究影响其入梅早晚的系统。

表1 1951—2015年3个区域入梅日的特征
Table 1 Climatic characteristics of the Meiyu onset date from 1951 to 2015

	江南	长江	江淮
平均	6月8日	6月14日	6月21日
标准差(d)	8	11	11
最早	5月25日(1995年)	5月29日(2000年)	6月1日(1971年)
最晚	7月11日(2005年)	7月9日(1982年)	7月14日(1952年)
异常偏早10年	1953,1961,1971,1972,1973, 1990,1995,2000,2006,2015	1954,1955,1956,1971,1989, 1991,1994,1996,2000,2011	1956,1961,1971,1972,1974, 1984,1989,1991,1996,2001
异常偏晚10年	1951,1958,1964,1968,1979, 1987,1997,2003,2005,2010	1952,1958,1959,1965,1969, 1982,1987,2005,2010,2014	1952,1958,1978,1982,1988, 1992,1994,2005,2009,2014

4 江南区入梅早晚与东亚夏季风环流系统的关系

由于梅雨是东亚夏季风环流系统季节性调整的产物,入梅前后环流系统发生明显的变化。因此,首先从环流形势的角度出发,分析江南区入梅早、晚与高层到低层大气环流系统的关系。

4.1 高层环流系统对入梅早、晚的影响

南亚高压是亚洲夏季风系统的主要成员之一,也是梅雨天气系统的重要组成部分(王黎娟等,2013)。选取江南区入梅异常偏早和偏晚各10年(表1)进行典型年份合成分析,5月28日为平均偏早日,平均偏早11 d;6月8日为入梅平均日;6月25日为平均偏晚日,平均偏晚17 d。图3给出了江南区入梅偏早年和偏晚年分别在平均偏早日、平均日、平均偏晚日对应的200 hPa高度场的差值及南亚高压的位置。5月28日,江南区入梅偏早与偏晚年的差值场上(图3a),伊朗高原至日本岛及其东南洋面这一纬度带为正距平差值,两个正距平中心分别位于伊朗高原和日本岛东北洋面上,而西太平洋为负距平,中心位于菲律宾群岛及其以东洋面;且偏早年12500 gpm等值线较偏晚年偏西、偏北,表明入梅偏早年南亚高压建立和北移至青藏高原上空较早,而偏晚年相反。6月8日与5月28日的空间分布类似,偏早年12500 gpm等值线区域较偏晚年明显偏大和偏北(图3b)。表明入梅偏早年南亚高压建立后,强度较强,北跳较早,而偏晚年相反。6月25日,西太平洋为正距平,而其余大部分地区为负距平(图3c)。由于此时偏晚年份也已入梅,偏早年份已处于梅雨期,二者环流系统差异不大,但是偏早年南亚高压仍呈偏东的特征。

在南亚高压的北侧,有一条纬向风速较大的西风气流,即东亚副热带西风急流(西风急流),它通常与高空锋区相对应,东亚大气环流的季节转换、中国大部分地区雨季的开始和结束都与西风急流的南北位置及强度变化有密切关系(况雪源等,2006;杨莲梅等,2007;刘芸芸等,2008)。陶诗言等(1958)指出,东亚梅雨的开始和结束与亚洲上空南支西风急流的两次北跳过程密切相关。从多年平均来看,5月西风急流主要位于东亚东部上空,中心位于江淮流域至日本岛,急流轴位置位于35°N附近(图略);6月西风急流强度减弱,主体位置发生北抬,中心向西伸展至中国西北地区上空,急流轴位置北抬至40°N附近;7月西风急流强度进一步减弱,主体位置进一步北抬,中心位于新疆上空,急流轴位置北抬至40°N以北。图4分别给出了江南区入梅偏早和偏晚年东亚(110°—140°E平均)上空200 hPa西风急流随时间变化的剖面。从图4a可见,入梅偏早年,5月第4候西风急流中心风速增至35 m/s以上,急流轴位置第1次北跳至37°N以北,此时江南区梅雨开始。此后西风急流稳定维持,直至6月中下旬发生第2次北跳。入梅偏晚年,5月第5候之后,西风急流风速较常年明显弱,中心风速在35 m/s以下,急流轴位置第1次北跳较晚,急流轴在35°N以南(图4b),导致入梅明显偏晚。

以上分析表明,江南区入梅之前,高层的大气环流发生快速的调整,南亚高压不断北推,中心强度逐渐加强,范围增大,其北侧的西风急流随之加强北跳。总体来看,入梅偏早年,南亚高压和西风急流调整较常年偏早,南亚高压偏强、偏东,西风急流偏强、偏北,且稳定维持,有利于梅雨的维持,而偏晚年调整较常年偏晚。

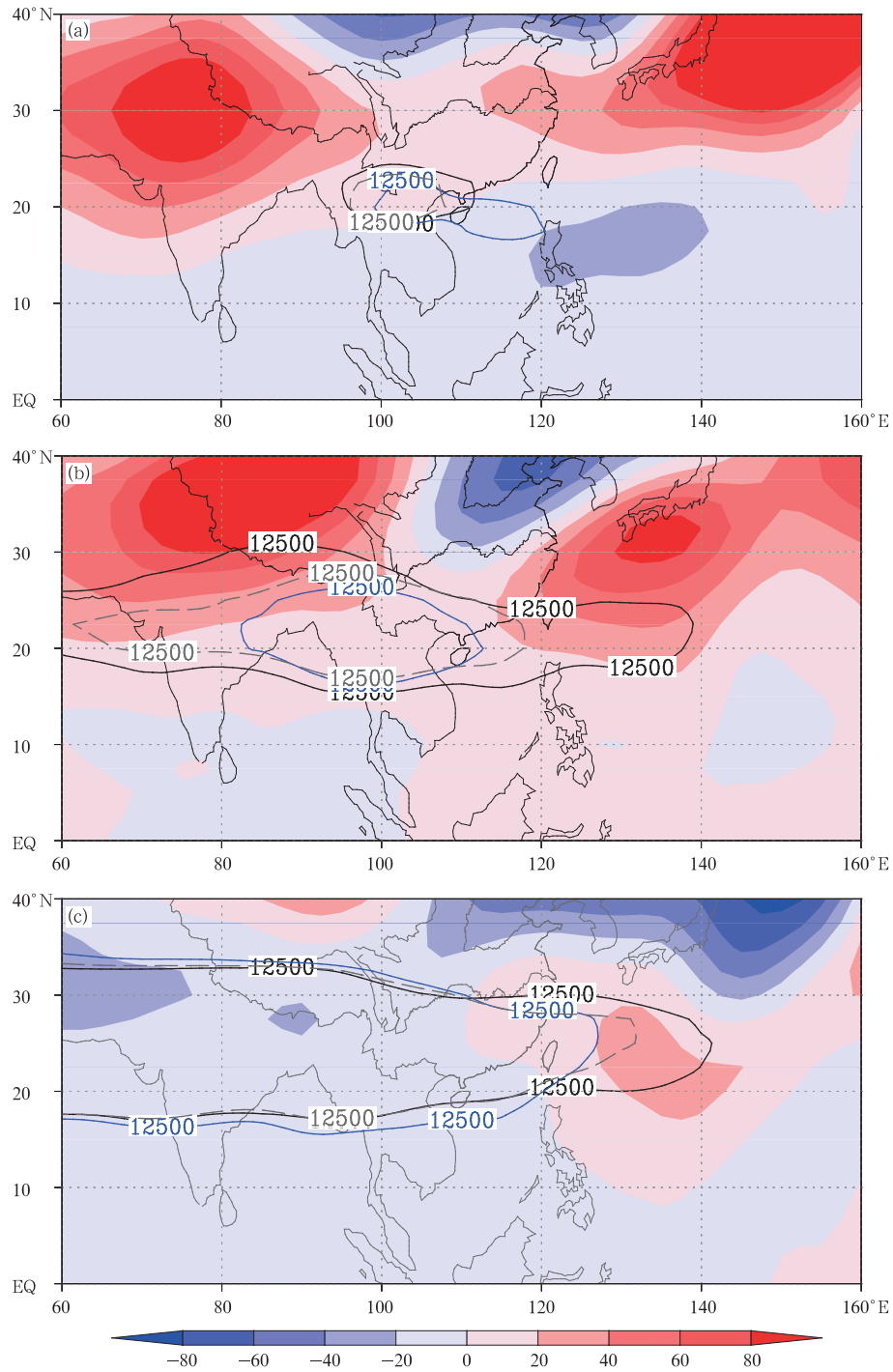


图3 江南区入梅偏早与偏晚年不同阶段 200 hPa 高度场的差异(单位:gpm)

(a. 平均偏早日(5月28日), b. 平均日(6月8日), c. 平均偏晚日(6月25日);

阴影区表示偏早年与偏晚年的差值,等值线为 12500 gpm,黑色等值线表示偏早年,蓝色等值线表示偏晚年,灰色虚线表示多年平均)

Fig. 3 Differences in 200 hPa geopotential height at different time between the early and late Meiyu onset years in the region to the south of the Yangtze River (unit: gpm)

(a. On 28 May, b. on 8 June, c. on 25 June; The black and blue contours in each panel are the isolines of 12500 gpm in early and late Meiyu onset years;

the gray dashed line represents the multi-year average)

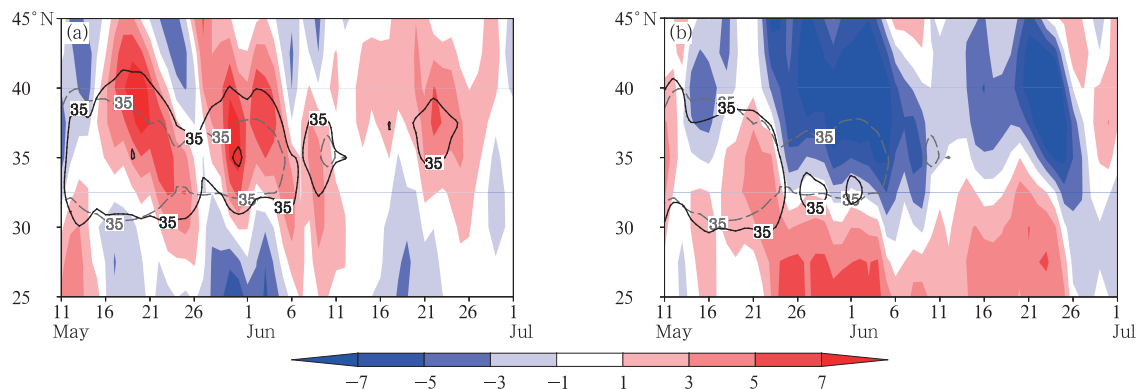


图4 江南区入梅偏早年(a)和偏晚年(b)东亚110°—140°E平均的

200 hPa 纬向风距平(单位:m/s)时间-纬度剖面

(虚线表示气候平均的35 m/s等值线,实线表示异常年平均的35 m/s等值线)

Fig. 4 Time-latitude cross sections of zonal wind anomaly (unit: m/s) at 200 hPa averaged

over 110°–140°E in (a) early Meiyu onset years to the south of

the Yangtze River and in (b) late years

(The dotted line represents the climatological mean of 35 m/s, and the solid line represents the average of 35 m/s in anomalous years)

4.2 中层环流系统对入梅早、晚的影响

500 hPa 高度场作为对流层中层大气环流的代表,可以较清晰地反映东亚气候异常所对应的大气环流特征(Feng, et al, 2013;赵俊虎等,2014)。这一层环流中,低纬度的副高和中、高纬度的环流对中国的天气、气候有重要的影响。图5给出了5月28日、6月8日和25日3个阶段的江南区入梅偏早和偏晚年合成的500 hPa 高度场及其距平场。

入梅偏早年500 hPa 高度距平场上,5月28日,乌拉尔山为显著的正高度距平,阻塞明显,蒙古高原至日本岛为显著的负高度距平,欧亚中、高纬度西高东低,以经向型环流为主;副高偏强、偏西、偏北(图5a),这样的环流配置有利于冷、暖空气在江南至长江中下游地区交汇,导致江南区入梅偏早;6月8日,欧亚中、高纬度仍维持较强的经向环流,副高维持偏强、偏西(图5b);6月25日,乌拉尔山和鄂霍次克海西部均为负高度距平,欧亚中、高纬度呈弱的经向环流,副高强度和位置接近常年(图5c),这种中、高纬度和副热带环流的配置及演变,有利于梅雨较长时间的维持。

入梅偏晚年中高纬度和副热带环流的配置及演变与偏早年相反:5月28日,乌拉尔山及其以东为负高度距平,贝加尔湖至中国东北为正高度距平,欧亚中、高纬度以纬向环流为主,副高偏弱、偏东(图

5d),这种环流形势不利于入梅;6月8日,欧亚中、高纬度仍维持纬向环流,不利于冷空气南下,而副高偏弱、偏东(图5e),整体环流条件不利于梅雨的形成;6月25日,乌拉尔山和鄂霍次克海南部均转为正高度距平,欧亚中高纬度调整为经向型环流,有利于冷空气南下,副高强度和位置也接近常年(图5f),环流配置利于梅雨的形成。

由此可见,中、高纬度环流和副高的配置对梅雨的开始和维持起到了关键性的作用。研究表明,副高的季节性变异对短期气候异常有重要影响(张庆云等,1999;赵俊虎等,2012),其阶段性地北跳与中国东部地区的雨季及位置直接相关,从初夏至盛夏副高有两次明显的季节性北跳,第1次北跳东亚夏季风推进到长江流域,江淮流域入梅,第2次北跳东亚夏季风推进到华北,江淮流域梅雨结束,华北雨季开始(张庆云等,1999;陶诗言等,2006;Ye, et al, 2014)。《梅雨监测业务规定》中也指出了梅雨期副高脊线活动范围,江南区南界 $\geq 18^\circ\text{N}$,北界 $< 25^\circ\text{N}$ 。即脊线 $\geq 18^\circ\text{N}$ 时有利于江南入梅,而脊线在 18°N — 25°N 这个范围内,有利于江南区梅雨的维持。图6给出了江南区入梅异常年500 hPa 高度场沿副高区域($110^\circ\text{—}140^\circ\text{E}$)平均的时间-纬度剖面。由图6a可见,入梅偏早年,5月中旬起副高区域为显著的正高度距平,一直持续到6月下旬初,副高脊线总体

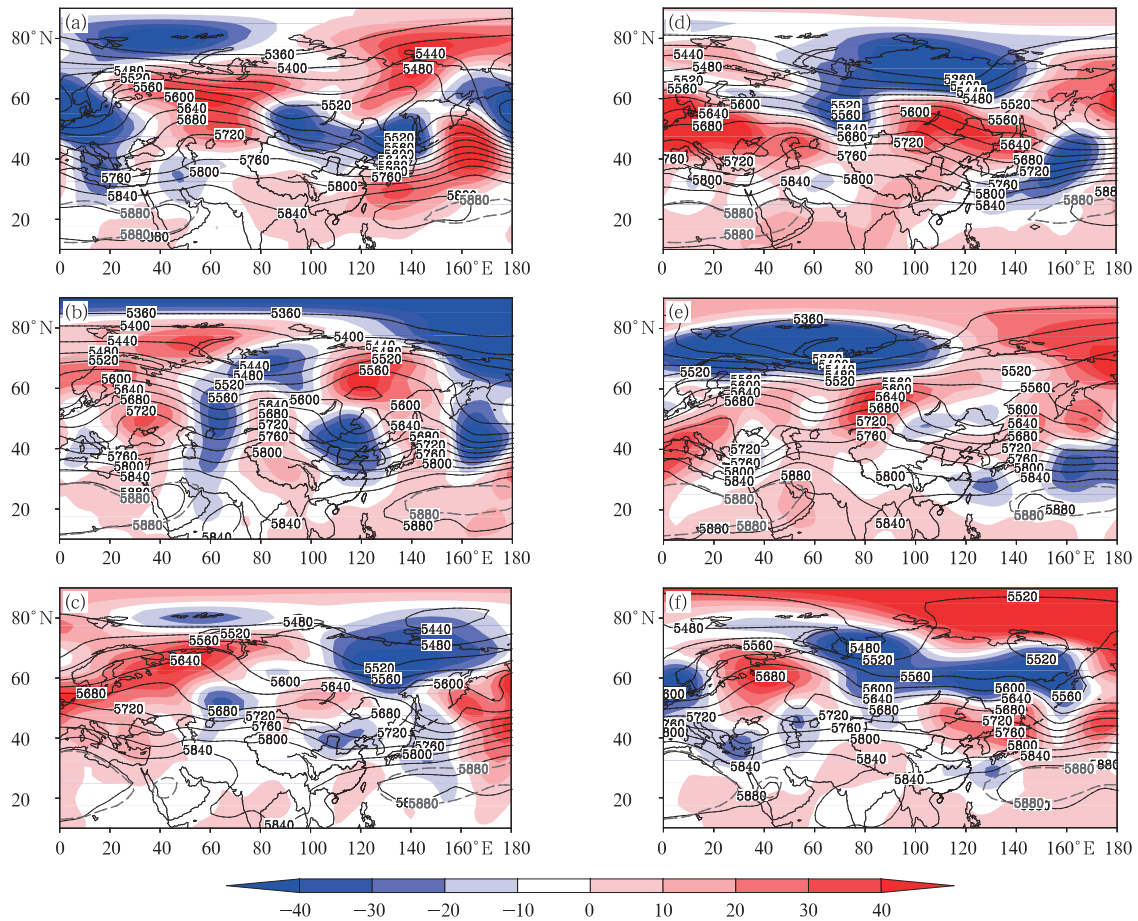


图5 江南区入梅偏早年(a、b、c)和偏晚年(d、e、f)不同阶段500 hPa高度场(单位:gpm)的特征
(阴影区为距平,黑色等值线为合成的高度场,灰色虚线为气候态;a、d.平均偏早日(5月28日),
b、e.平均日(6月8日),c、f.平均偏晚日(6月25日))

Fig. 5 Characteristics of 500 hPa geopotential height (unit: gpm) at different stages in (a, b, c) early Meiyu onset years and (d, e, f) late Meiyu onset years to the south of the Yangtze River
(shaded areas indicate the anomaly field, black contours show the composite geopotential height, gray dotted lines indicate the climatological mean; a and d. 28 May, b and e. 8 June, c and f. 25 June)

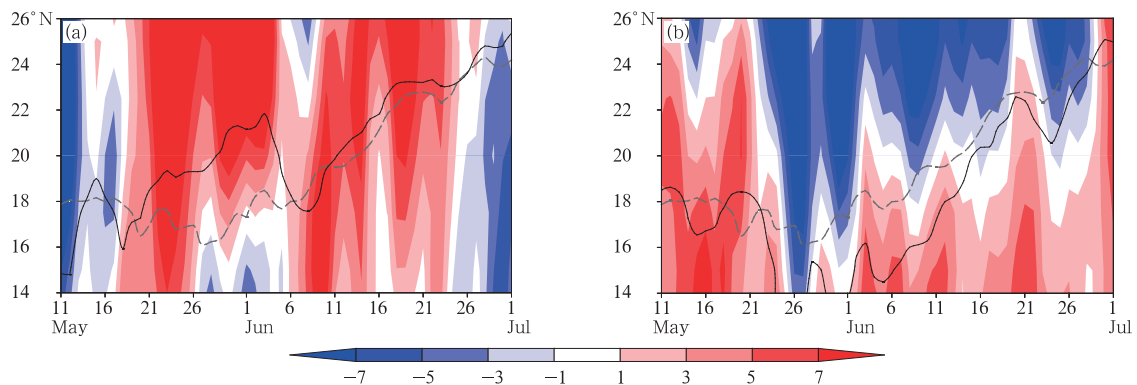


图6 江南区入梅异常年500 hPa高度场(单位:gpm)沿110°—140°E平均的时间-纬度剖面
(a.偏早年,b.偏晚年;阴影区为距平,虚线表示气候平均副高脊线,实线表示异常年平均副高脊线)

Fig. 6 Time-latitude cross sections (unit: gpm) of 500 hPa geopotential height averaged over 110°–140°E
(a. early Meiyu onset years, b. late onset years to the south of the Yangtze River; shaded areas indicate the anomaly field, the dotted line represents the climatological subtropical high ridge line, and the solid line represents the mean subtropical high ridge line in anomalous years)

偏北,并维持在 20°N 以北;入梅偏晚年,5月下旬起副高区域北部(副高多年平均的脊线北部)为明显的负高度距平,副高区域南部为正高度距平,这一特点一直持续到6月下旬;5月下旬至6月中旬副高脊线明显偏南,维持在 20°N 以南(图 6b)。

Ye 等(2014)研究了副高两次北跳的定义及量化计算方法,利用其定义,计算出 1951—2015 年副高脊线第 1 次北跳的时间,多年平均为 6 月第 2 候,与张庆云等(1999)的研究结论一致。江南区入梅的平均时间也为 6 月第 2 候,与副高第 1 次北跳时间相对应。图 7 给出了江南区入梅时间与副高第 1 次北跳时间距平的年际变化及二者的 21 年滑动相关。由图 7a 可见,二者的年际变化具有较好的一致性,江南区入梅极端早(晚)年,副高第 1 次北跳也

偏早(晚),如 1953、1961、1971、1990、1995 和 1996 年(1967、1968、1987、1992、1997、2003、2004、2005、2009 和 2014 年)。65 年中二者距平符号一致的有 48 年,占 74%。其中,1951—1980 年距平符号一致的有 17 年,占 57%,二者的相关系数也仅为 0.15;但 1986—2015 年距平符号一致的有 26 年,占 87%,二者的相关系数为 0.55。从二者的 21 年滑动相关系数(图 7b)也可以清楚地看出,1986 年之前为弱的正相关,1986 年之后为显著的正相关。以上分析表明,副高第 1 次北跳对江南区入梅有重要的作用,副高第 1 次北跳偏早,有利于水汽向江南输送,有利于梅雨的开始,但这种关系存在年代际的变化,20 世纪 80 年代之前关系不显著,80 年代之后关系显著。这可能与变暖后副高膨胀有关系,20 世纪

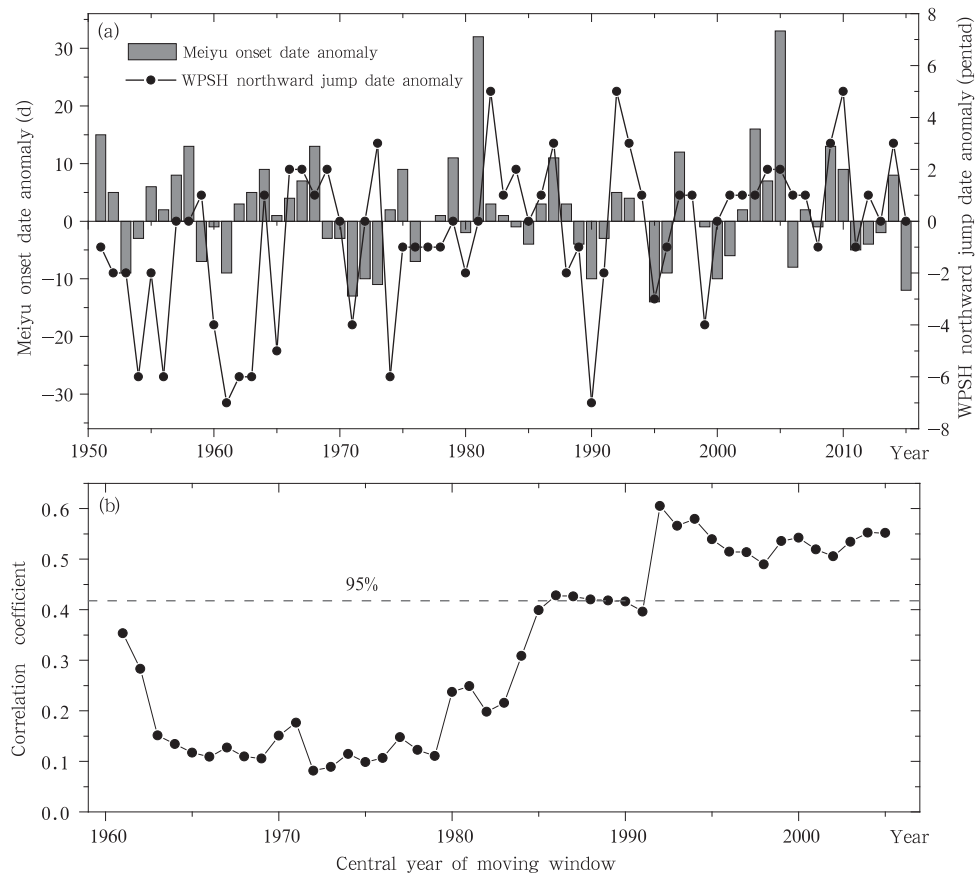


图 7 江南区入梅时间与副高第 1 次北跳时间距平的(a)年际变化及(b)二者 21 年滑动相关(虚线表示通过 95% 的置信度 t 检验)

Fig. 7 Time series of anomalies of the first northward jump of the western Pacific subtropical high and the Meiyu onset date to the south of the Yangtze River

(a. interannual variability, b. 21-year sliding correlations;

The dashed line indicates significance at/above the 95% confidence level)

80 年代之后副高偏强、偏西(Li, et al, 2012; 赵俊虎等, 2012; Zhao, et al, 2014), 北跳偏晚(Ye, et al, 2014), 江南区入梅也处于偏晚的年代际特征。在年代际变化一致的背景下, 副高第 1 次北跳对江南区入梅的作用在加强, 二者的年际关系也更密切。

4.3 低层环流系统对入梅早、晚的影响

低层环流系统可直接反映越赤道气流、东亚夏季风爆发早晚及其强弱及水汽的辐合、辐散等。图 8 分别给出了江南区入梅偏早和偏晚年 5 月 28 日、6 月 8 日、25 日 3 个时期的 850 hPa 风场距平。

入梅偏早年 850 hPa 风距平场上, 5 月 28 日(图 8a), 热带印度洋西部为南风距平, 并在阿拉伯海转为西风距平, 表明索马里急流爆发偏早; 同时, 西太平洋为较强的反气旋式距平环流, 中心在台湾以东地区, 表明菲律宾反气旋显著。越赤道气流加强、菲律宾反气旋显著均有利于水汽向中国南方地区输送, 而中国西北地区为偏西北风距平, 有利于冷空气南下。低层环流系统的这种配置有利于冷暖空气在中国江南地区交汇, 进而有利于梅雨的开始。6 月 8 日(图 8b), 孟加拉湾至中南半岛西南风距平明

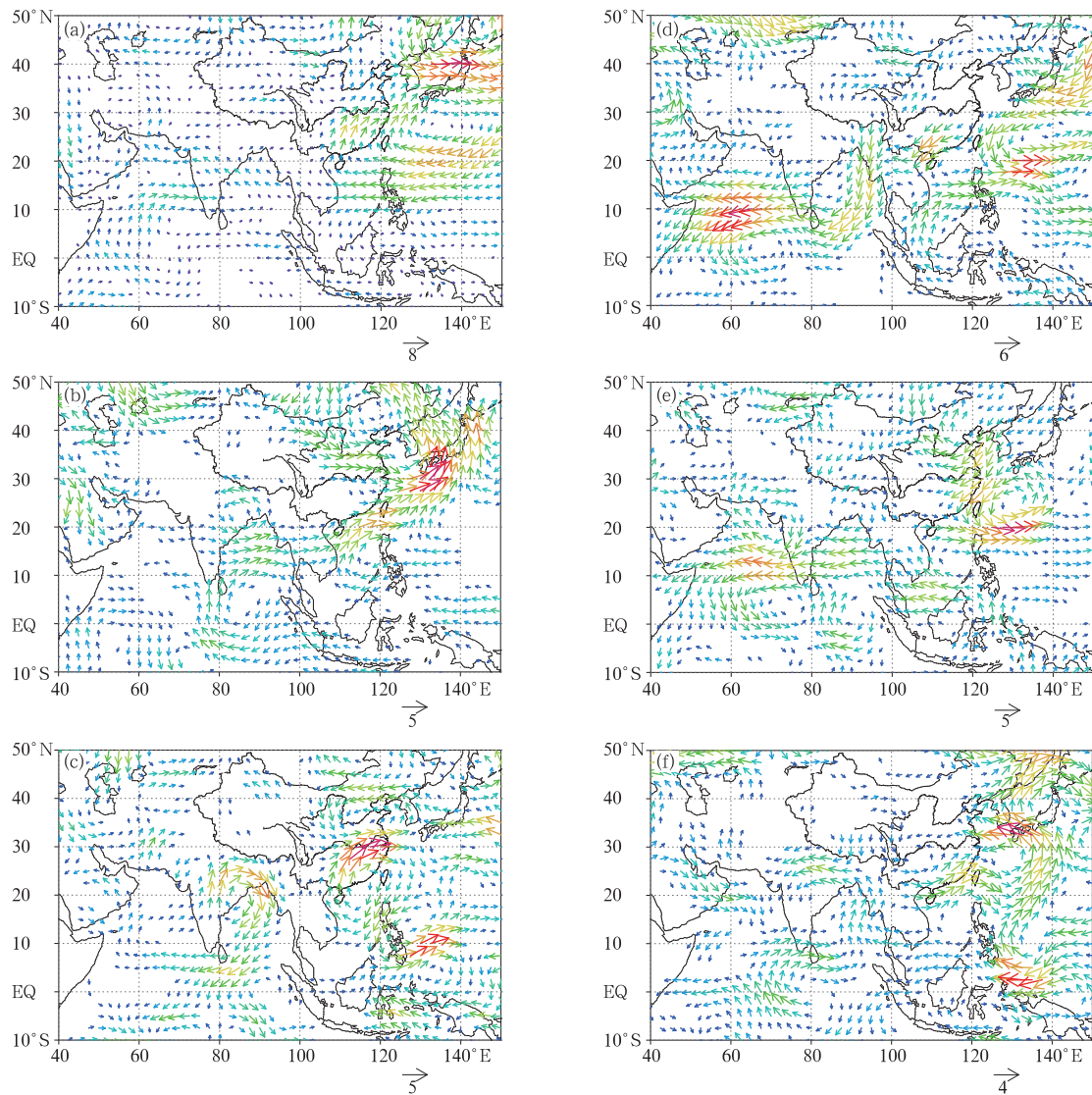


图 8 江南区入梅偏早年(a、b、c)和偏晚年(d、e、f)不同阶段 850 hPa 风场(单位:m/s)的特征

(a、d. 平均偏早日(5 月 28 日), b、e. 平均日(6 月 8 日), c、f. 平均偏晚日(6 月 25 日))

Fig. 8 Characteristics of 850 hPa wind field at different stages in (a, b, c) early Meiyu onset years and (d, e, f) late onset years to the south of the Yangtze River (unit: m/s)

(a and d. 28 May, b and e. 8 June, c and f. 25 June)

显加强,表明南海夏季风已爆发,同时,中国南海至菲律宾为反气旋式距平环流,中心西移至菲律宾附近,加强了印度洋至中国南海的水汽向中国南方地区输送;中国西北至长江流域为强盛的西北风距平,有利于冷空气南下,这样的低层环流系统配置有利于梅雨形势的维持。6月25日(图8c),孟加拉湾为反气旋式距平环流,西太平洋仍为反气旋式距平环流,中心北移至中国南海北部,中国西北地区东部至长江流域为西北风距平,有利于冷空气南下,冷、暖空气在长江流域辐合,这样的低层环流系统配置有利于梅雨较长时间的维持,且此时梅雨从江南扩大至江淮的广大区域。

偏晚年则相反,5月28日(图8d),热带印度洋西部为北风距平,阿拉伯海至孟加拉湾地区为东风距平,表明索马里急流爆发偏晚,越赤道气流较弱,西太平洋为气旋式距平环流,中国西北地区为偏东风距平,这样的环流系统配置不利于冷空气南下和水汽向中国南方地区输送,不利于入梅;6月8日(图8e),中南半岛经孟加拉湾至阿拉伯海仍为东风距平,表明越赤道气流仍较弱,西太平洋仍维持气旋式距平环流,这样的低层环流系统演变不利于中国

南海夏季风爆发和水汽向中国南方地区输送,不利于入梅;6月25日(图8f),索马里急流不显著,澳大利亚西部的越赤道气流增强,孟加拉湾地区转为南风距平,并经中南半岛转为西南风进入中国南方地区,西太平洋反气旋距平环流较弱,且中心位于菲律宾以东地区,造成水汽输送路径偏东。由此可见江南入梅偏晚年,入梅时的环流型与偏早年入梅时的环流型有明显的差异,即越赤道气流不同,菲律宾反气旋的位置也不同。

索马里越赤道气流具有季风性质且为夏季低层最强的越赤道急流,对东亚季风活动和气候都具有重要作用。在中国南海夏季风爆发前两候,索马里急流会有一次迅速地增强(高辉等,2006),多年平均的建立时间是5月第3候(代玮等,2014),急流年际尺度上的强弱对中国南海季风爆发迟早起重要作用(施宁,2001)。图9给出了江南区入梅异常年925 hPa高度场沿赤道的时间-经度剖面。入梅偏早年,5月上旬开始 60°E 附近为显著的南风距平,表明索马里越赤道气流爆发偏早,强度明显偏强,尤其是5月下旬,风速大于 1 m/s (图9a),有利于中国南海夏季风的爆发和入梅;而入梅偏晚年相反,5月上

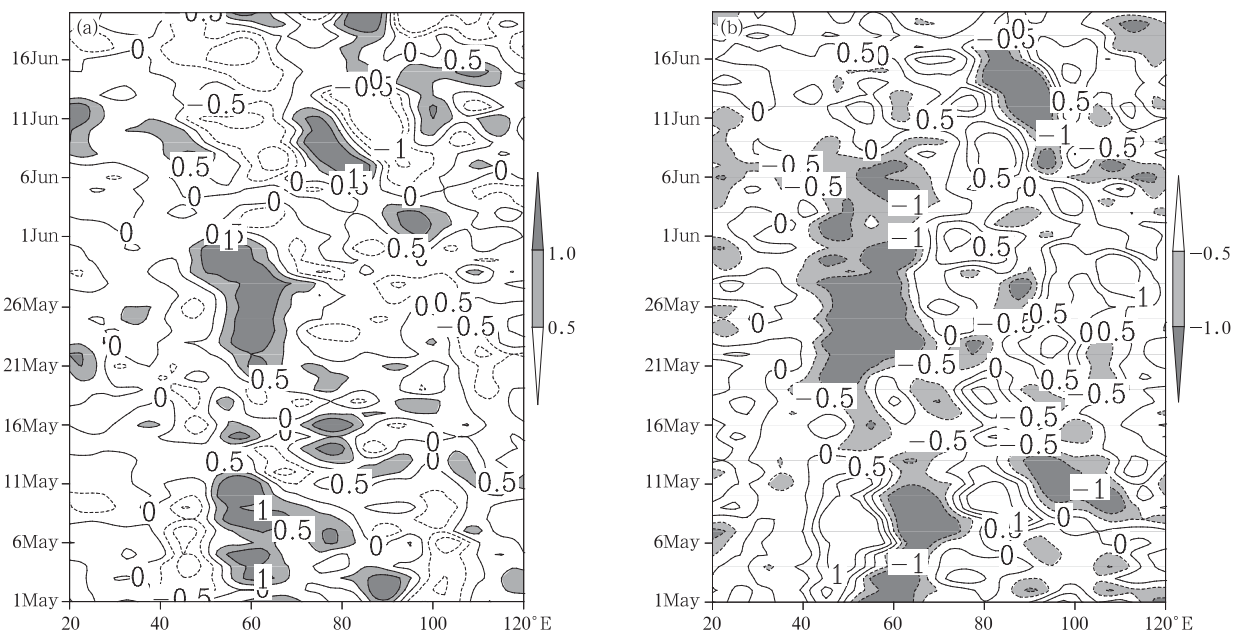


图9 江南区入梅异常年925 hPa越赤道经向风(单位:m/s)的时间-经度剖面
(a. 偏早年, b. 偏晚年)

Fig. 9 Time-longitude cross sections of meridional cross-equator wind at 925 hPa (unit: m/s) in (a) early Meiyu onset years and (b) late onset years to the south of the Yangtze River

旬—6月上旬, 60°E 附近为显著的负距平, 表明索马里越赤道气流爆发偏晚, 强度明显偏弱(图 9b), 不利于中国南海夏季风的爆发和入梅。李崇银等(2002)研究指出, 索马里越赤道气流的稳定建立是中国南海夏季风爆发的重要物理机制之一, 可导致赤道印度洋地区西风的持续加强和向东扩展, 并最终在中国南海地区形成西南气流。索马里越赤道气流建立偏早, 有利于中国南海夏季风爆发偏早和江南区入梅。

5 江南区梅雨入梅早、晚的前兆信号

大气环流异常除了内部的动力过程外, 还受到外强迫的作用, 海表温度异常是影响环流异常的关键因子, 也是短期气候预测重要的前兆信号(魏凤英等, 2005; 封国林等, 2012; 陈丽娟等, 2013)。图 10 为 1951—2015 年江南区入梅日与前冬、春季海表温度的相关系数分布。由图 10a 可见, 入梅日与前冬中太平洋海表温度成正相关, 与西太平洋及澳大利亚周边海表温度成负相关, 与北大西洋海表温度从北向南呈“+ - +”的相关分布, 上述相关分布类似中部型厄尔尼诺; 其中, 赤道中太平洋海表温度的正相关、澳大利亚西南部及东南部海表温度的负相关及澳大利亚以东 150°W 附近海表温度的正相关均通过 95% 的置信度 t 检验。入梅日与春季海表温度的相关分布大体上与冬季类似, 但除赤道中太平洋外, 其余通过置信度检验的区域有明显的改变, 其中与北大西洋从北至南“+ - +”的相关分布更显著, 而与澳大利亚周边海表温度的相关性减弱(图 10b)。由此可见, 江南区入梅日主要与冬季的中太平洋和澳大利亚东南部海表温度及春季北大西洋海表温度三极子关系较密切。

选取 Nino4 指数、北大西洋海表温度三极子指数和澳大利亚东部海表温度偶极子指数(ASI, 50° — 40°S , 150° — 170°E 区域平均海表温度减去 46° — 36°S , 200° — 220°E 区域平均海表温度), 分析逐月 3 个海表温度指数与江南入梅日的关系。图 11 给出了上一年 1 月至当年 12 月逐月的 3 个海表温度指数与入梅日相关系数演变情况。其中上一年 4 月至当年 12 月的 Nino4 指数与入梅日维持了弱的正相关; 上一年 1 月至当年 12 月的澳大利亚东部海表温度偶极子指数与江南入梅日维持了负相关, 其中上一年 11 月至当年 2 月的关系通过了 99% 的置信度 t 检验, 尤其是上一年 12 月的相关系数高达 -0.42 ; 而上一年 9 月至当年 12 月的北大西洋海表温度三极子指数与入梅日维持了负相关, 其中, 当年 3 月的关系通过了 99% 的置信度 t 检验。

由此可见, 冬季澳大利亚东部海表温度偶极子和春季北大西洋海表温度三极子对入梅早、晚的影响较显著, 选取入梅当年 3 月的北大西洋海表温度三极子指数和上一年 12 月澳大利亚东部海表温度偶极子指数与入梅年 6 月东亚大气环流进行回归分析。从 3 月的北大西洋海表温度三极子指数回归的 6 月 200 hPa 纬向风场(图 12a)可见, 中国黄河流域至日本岛为显著的正值区, 表明 3 月北大西洋海表温度三极子正位相时, 6 月西风急流偏强偏北, 有利于江南入梅偏早和梅雨的维持; 从上一年 12 月的澳大利亚东部海表温度偶极子指数回归的 6 月 500 hPa 高度场(图 12b)可见, 20°N 以南为显著的负值区, 而西太平洋西部 22° — 30°N 区域为正值区, 且 12 月澳大利亚东部海表温度偶极子指数与副高第 1 次北跳的相关系数高达 0.39, 表明 12 月的澳大利亚东部海表温度偶极子指数为正值时, 副高第

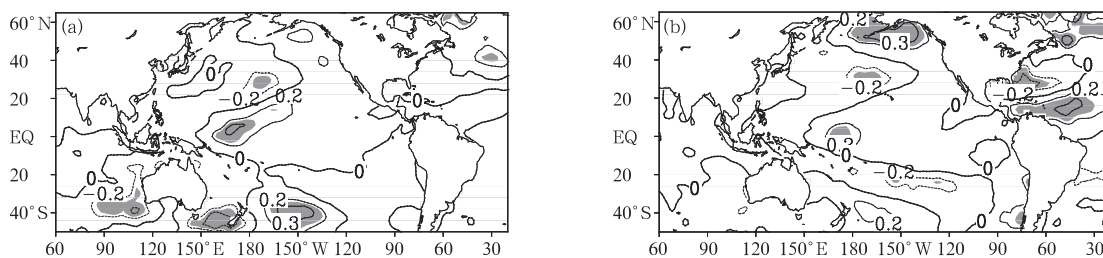


图 10 1951—2015 年江南区梅雨入梅日与冬季(a)和春季(b)海表温度的相关系数分布
(阴影区表示通过 95% 的置信度 t 检验)

Fig. 10 Correlation coefficients of the Meiyu onset date to the south of the Yangtze River
with (a) winter SST and (b) spring SST during 1951–2015
(Shaded areas indicate significance at/above the 95% confidence level)

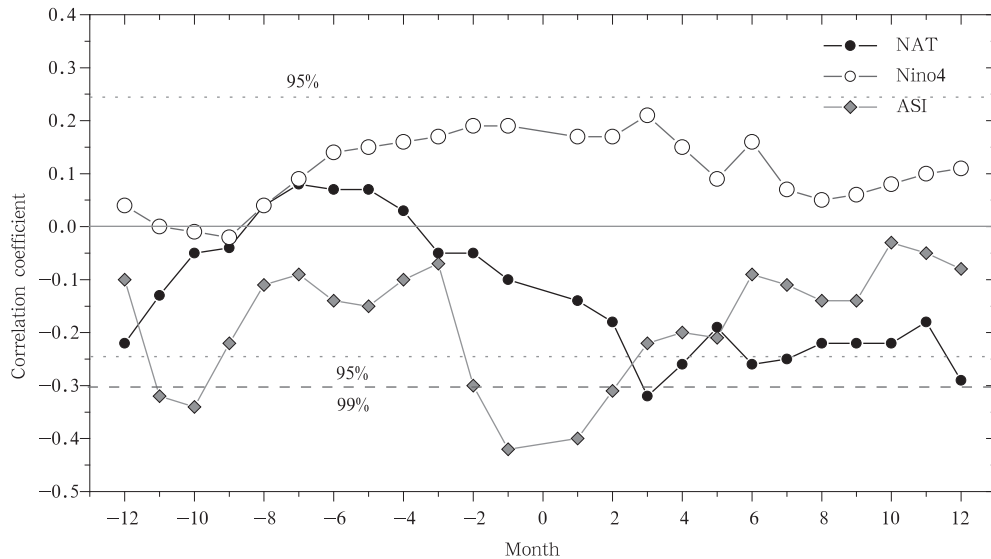
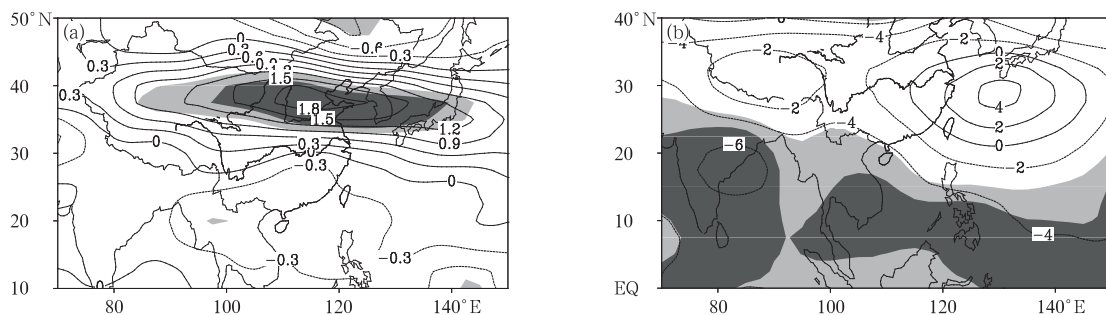


图 11 1951—2015 年江南区入梅日与关键区域海表温度指数的时滞相关
(点(虚)线表示通过 95%(99%)的置信度 t 检验)

Fig. 11 Time-lag correlations of the SST index in critical area with the Meiyu onset date to the south of the Yangtze River between 1951 and 2015
(The dot (dashed) line indicates significance at the 95% (99%) confidence level)



一直是短期气候预测的重点和难点。基于中国气象局 2014 年发布的中国《梅雨监测业务规定》及其相关资料,重点研究了江南入梅早、晚年的同期(5—6 月)大尺度大气环流和前期海表温度的异常特征,主要结论如下:

(1) 从多年平均的情况来看,中国雨季最早从华南开始(伍红雨等,2015),4 月第 2 候华南进入前

汛期,持续 1 个多月之后,在 5 月第 3 候索马里越赤道气流建立,5 月第 5 候中国南海夏季风爆发,此后高层环流也开始快速调整,6 月第 1 候副热带西风急流北抬,6 月第 2 候副高第 1 次北跳,与此同时中国江南梅雨开始,长江流域滞后 1 候左右入梅(图 13a);以上是从气候态的角度给出了中国梅雨开始前的环流调整,而实际上东亚大气环流具有较强的

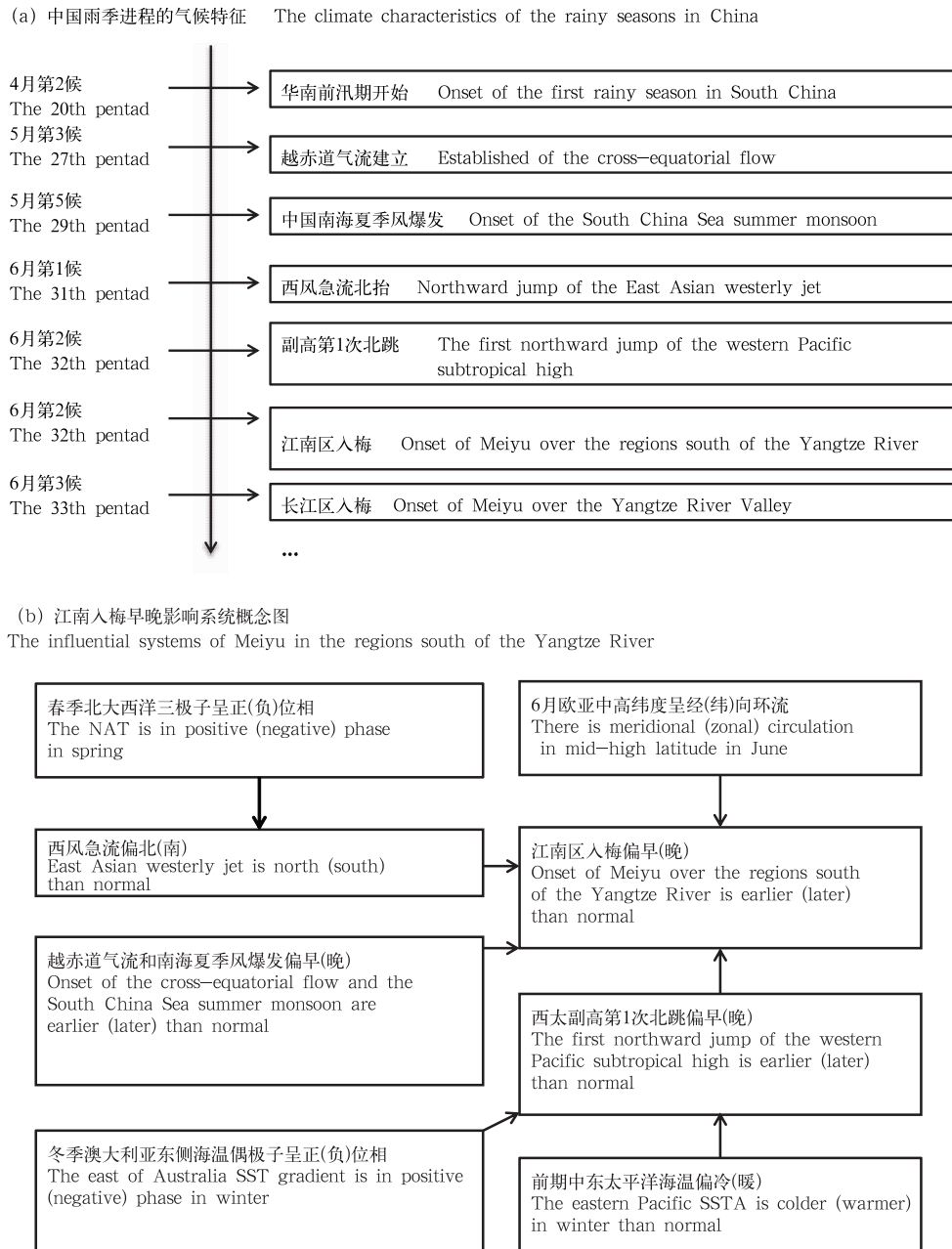


图 13 中国雨季进程的气候特征(a)和江南入梅早晚影响系统概念(b)
Fig. 13 The climatic characteristics of the Chinese rainy season (a) and The impact system concept map of early and late Meiyu onset of regions south of the Yangtze River (b)

年际变化,导致入梅早晚也存在较大的年际差异。

(2) 江南区入梅早、晚年对流层高层到低层的大尺度大气环流具有明显的差异(图 13b),入梅偏早年,南亚高压和东亚副热带西风急流的建立较早,强度较强,南亚高压北移到青藏高原上空也偏早,西风急流北跳偏早;中高纬度经向环流较强,有利于冷空气南下,而副高第 1 次北跳偏早,越赤道气流建立较早,中国南海夏季风爆发偏早,有利于水汽向中国南方地区输送,冷空气与暖湿水汽较早在江南对峙,导致江南区入梅偏早;入梅偏晚年上述环流系统演变特征则基本相反。

(3) 冬春季海表温度异常是影响入梅早晚的重要外强迫因子,也是重要的前期预测信号:当冬季中东太平洋海表温度为负距平、澳大利亚东部海表温度偶极子为正位相、春季北大西洋海表温度三极子为正位相时,江南区入梅偏早;其中入梅上一年 12 月澳大利亚东部海表温度偶极子和当年 3 月北大西洋海表温度三极子与入梅关系最为密切,当 12 月澳大利亚东部海表温度偶极子为正位相时,副高第 1 次北跳偏早,而 3 月北大西洋海表温度三极子为正位相时,6 月西风急流偏强、偏北,有利于入梅偏早(图 13b)。

以上这些结论为江南入梅的短期气候预测提供了参考依据,但是仍有一些问题需要继续开展研究:文中提到的副高第 1 次北跳时间与江南区入梅时间的年际关系在 20 世纪 80 年代存在年代际转变,这种转变的内在原因是什么?同时,从现在的分析结果来看,前冬澳大利亚东部海表温度偶极子可以影响后期初夏副高北跳早晚,这可能是前者通过影响澳大利亚高压的强弱和位置进而影响到西太副高北跳的早晚;而春季北大西洋三极子可以影响初夏副热带西风急流的位置,进而影响入梅的早晚。上述影响的内在物理过程还有待于做进一步的诊断分析和数值试验来验证。此外,研究表明中国长江中下游梅雨异常与全球范围内大尺度环流相联系,入梅的早晚和梅雨量的多寡,不仅与东亚环流异常有关,还与春季北大西洋涛动(NAO)、南半球春夏季环流的异常密切相关。例如,Tian 等(2012)研究发现,5 月北大西洋涛动与长江中下游夏季极端降水频次呈现显著的负相关;范可(2006)研究指出,春季南极涛

动正异常、南半球副热带高压在春夏季持续加强有利于长江中下游夏季降水偏多。但南北半球相互作用及其对东亚夏季气候、尤其是梅雨的影响机理是一个复杂的问题,尚有待进一步深入研究。

参考文献

- 鲍名. 2009. 从中期天气过程看近几年长江中下游梅雨偏少的原因. 大气科学, 33(4): 708-718. Bao M. 2009. Causes of deficit Meiyu over the middle and lower reaches of the Yangtze river in the last several years viewed from medium range weather process. Chinese J Atmos Sci, 33(4): 708-718 (in Chinese)
- 陈丽娟, 袁媛, 杨明珠等. 2013. 海温异常对东亚夏季风影响机理的研究进展. 应用气象学报, 24(5): 521-532. Chen L J, Yuan Y, Yang M Z, et al. 2013. A review of physical mechanisms of the global SSTA impact on EASM. J Appl Meteor Sci, 24(5): 521-532 (in Chinese)
- 代玮, 肖子牛. 2014. 索马里急流多时间尺度的变化特征及其与中国降水的联系. 热带气象学报, 30(2): 368-376. Dai W, Xiao Z N. 2014. Multi-time scale variation characteristics of Somali jet and its contact with precipitation in China. J Trop Meteor, 30(2): 368-376 (in Chinese)
- 丁一汇, 柳俊杰, 孙颖等. 2007. 东亚梅雨系统的天气-气候学研究. 大气科学, 31(6): 1082-1101. Ding Y H, Liu J J, Sun Y, et al. 2007. A study of the synoptic-climatology of the Meiyu system in East Asia. Chinese J Atmos Sci, 31(6): 1082-1101 (in Chinese)
- 范可. 2006. 南半球环流异常与长江中下游夏季旱涝的关系. 地球物理学报, 49(3): 672-679. Fan K. 2006. Atmospheric circulation anomalies in the Southern Hemisphere and summer rainfall over Yangtze River Valley. Chinese J Geophys, 49(3): 672-679 (in Chinese)
- 封国林, 杨涵涌, 张世轩等. 2012. 2011 年春末夏初长江中下游地区旱涝急转成因初探. 大气科学, 36(5): 1009-1026. Feng G L, Yang H W, Zhang S X, et al. 2012. A preliminary research on the reason of a sharp turn from drought to flood in the middle and lower reaches of the Yangtze River in late spring and early summer of 2011. Chinese J Atmos Sci, 36(5): 1009-1026 (in Chinese)
- 葛全胜, 郭熙凤, 郑景云等. 2007. 1736 年以来长江中下游梅雨变化. 科学通报, 52(23): 2792-2797. Ge Q S, Guo X F, Zheng J Y, et al. 2008. Meiyu in the middle and lower reaches of the Yangtze River since 1736. Chinese Sci Bull, 53(1): 107-114
- 胡娅敏, 丁一汇, 廖菲. 2008. 江淮地区梅雨的新定义及其气候特征. 大气科学, 32(1): 101-112. Hu Y M, Ding Y H, Liao F. 2008. A study of updated definition and climatological characters of Meiyu season in the Yangtze-Huaihe region. Chinese J Atmos Sci, 32(1): 101-112 (in Chinese)

- 况雪源, 张耀存. 2006. 东亚副热带西风急流位置异常对长江中下游夏季降水的影响. 高原气象, 25(3): 382-389. Kuang X Y, Zhang Y C. 2006. Impact of the position abnormalities of East Asian subtropical westerly jet on summer precipitation in middle-lower reaches of Yangtze River. Plateau Meteor, 25(3): 382-389 (in Chinese)
- 李崇银, 吴静波. 2002. 索马里跨赤道气流对南海夏季风爆发的重要作用. 大气科学, 26(2): 185-192. Li C Y, Wu J B. 2002. Important role of the somalian cross-equator flow in the onset of the South China Sea summer monsoon. Chinese J Atmos Sci, 26(2): 185-192 (in Chinese)
- 李维京. 1999. 1998 年大气环流异常及其对中国气候异常的影响. 气象, 25(4): 20-25, 57. Li W J. 1999. General atmospheric circulation anomaly in 1998 and their impact on climate anomaly in China. Meteor Mon, 25(4): 20-25, 57 (in Chinese)
- 李小泉. 1981. 从整体上研究梅雨期的划分. 气象, 7(6): 9-10. Li X Q. 1981. Study on division of Meiyu from regional viewpoint. Meteor Mon, 7(6): 9-10 (in Chinese)
- 李勇, 金荣花, 周宁芳等. 2017. 江淮梅雨季节强降雨过程特征分析. 气象学报, 75(5): 717-728. Li Y, Jin R H, Zhou N F, et al. 2017. An analysis on characteristics of heavy rainfall processes during the Meiyu season in Jianghuai region. Acta Meteor Sinica, 75(5): 717-728 (in Chinese)
- 梁萍, 丁一汇, 何金海等. 2010. 江淮区域梅雨的划分指标研究. 大气科学, 34(2): 418-428. Liang P, Ding Y H, He J H, et al. 2010. A Study of determination index of regional Meiyu over the Yangtze-Huaihe basin. Chinese J Atmos Sci, 34(2): 418-428 (in Chinese)
- 林春育. 1979. 长江中下游的梅雨和预报. 气象, 5(5): 2-8. Lin C Y. 1979. The Meiyu and its forecasting in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Meteor Mon, 5(5): 2-8 (in Chinese)
- 刘舸, 张庆云, 孙淑清. 2008. 澳大利亚东侧环流及海温异常与长江中下游夏季旱涝的关系. 大气科学, 32(2): 231-241. Liu G, Zhang Q Y, Sun S Q. 2008. The Relationship between circulation and SST anomaly East of Australia and the summer rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Chinese J Atmos Sci, 32(2): 231-241 (in Chinese)
- 刘屹岷, 洪洁莉, 刘超等. 2013. 淮河梅雨洪涝与西太平洋副热带高压季节推进异常. 大气科学, 37(2): 439-450. Liu Y M, Hong J L, Liu C, et al. 2013. Meiyu flooding of Huaihe River Valley and anomaly of seasonal variation of subtropical anticyclone over the Western Pacific. Chinese J Atmos Sci, 37(2): 439-450 (in Chinese)
- 刘芸芸, 丁一汇. 2008. 印度夏季风的爆发与中国长江流域梅雨的遥相关分析. 中国科学 D 辑: 地球科学, 38(6): 763-775. Liu Y Y, Ding Y H. 2008. Teleconnection between the Indian summer monsoon onset and the Meiyu over the Yangtze River Valley. Science in China Series D: Earth Sciences, 51(7): 1021-1035
- 牛若芸, 金荣花. 2009. 2008 年梅雨异常大尺度环流成因分析. 高原气象, 28(6): 1326-1334. Niu R Y, Jin R H. 2009. Causes analysis of large scale circulation of abnormal characteristic in Meiyu period of 2008. Plateau Meteor, 28(6): 1326-1334 (in Chinese)
- 闵灿, 钱永甫. 2008. 江淮梅雨分区特征的比较研究. 应用气象学报, 19(1): 19-27. Min S, Qian Y F. 2008. Comparative investigation on Meiyu parameters in different subregions of the Changjiang-Huaihe Valley. J Appl Meteor Sci, 19(1): 19-27 (in Chinese)
- 上海气象局预报组. 1980. 梅雨中期预报方法的研究. 大气科学, 4(1): 1-11. Forecasting Group, Shanghai Meteorological Bureau. 1980. A study on the methods of mid-range forecast for "plum rains". Chinese J Atmos Sci, 4(1): 1-11 (in Chinese)
- 施能, 朱乾根, 吴彬贵. 1996. 近 40 年东亚夏季风及我国夏季大尺度天气气候异常. 大气科学, 20(5): 575-583. Shi N, Zhu Q G, Wu B G. 1996. The East Asian summer monsoon in relation to summer large scale weather-climate anomaly in China for last 40 years. Chinese J Atmos Sci, 20(5): 575-583 (in Chinese)
- 施宁, 施丹平, 严明良. 2001. 夏季越赤道气流对南海季风及华东旱涝的影响. 热带气象学报, 17(4): 405-414. Shi N, Shi D P, Yan M L. 2001. The effects of cross-equatorial current on South China Sea monsoon onset and drought/flood in East China. J Trop Meteor, 17(4): 405-414 (in Chinese)
- 陶诗言, 赵煜佳, 陈晓敏. 1958. 东亚的梅雨期与亚洲上空大气环流季节变化的关系. 气象学报, 29(2): 119-134. Tao S Y, Zhao Y J, Chen X M. 1958. The relationship between May-Yü in far east and the behaviour of circulation over Asia. Acta Meteor Sinica, 29(2): 119-134 (in Chinese)
- 陶诗言, 朱文妹, 赵卫. 1988. 论梅雨的年际变异. 大气科学, 12(S1): 13-21. Tao S Y, Zhu W M, Zhao W. 1988. Interannual variability of Meiyu rainfalls. Chinese J Atmos Sci, 12(S1): 13-21 (in Chinese)
- 陶诗言, 卫捷. 2006. 再论夏季西太平洋副热带高压的西伸北跳. 应用气象学报, 17(5): 513-525. Tao S Y, Wei J. 2006. The westward, northward advance of the subtropical high over the West Pacific in summer. J Appl Meteor Sci, 17(5): 513-525 (in Chinese)
- 王黎娟, 郭帅宏, 何金海等. 2013. 4~5 月南亚高压建立早晚年份环流差异及其可能成因. 大气科学, 37(6): 1165-1178. Wang L J, Guo S H, He J H, et al. 2013. Circulation differences and possible mechanism underlying the South Asia high establishment from April to May in the early or delayed establishment years. Chinese J Atmos Sci, 37(6): 1165-1178 (in Chinese)
- 魏凤英, 张京江. 2004. 1885~2000 年长江中下游梅雨特征量的统计分析. 应用气象学报, 15(3): 313-321. Wei F Y, Zhang J J.

2004. Climatic variation of Meiyu in the middle-lower reaches of Changjiang River during 1885~2000. *J Appl Meteor Sci*, 15(3): 313-321 (in Chinese)
- 魏凤英, 宋巧云. 2005. 全球海表温度年代际尺度的空间分布及其对长江中下游梅雨的影响. *气象学报*, 63(4): 477-484. Wei F Y, Song Q Y. 2005. Spatial distribution of the global sea surface temperature with interdecadal scale and their potential influence on Meiyu in middle and lower reaches of Yangtze River. *Acta Meteor Sinica*, 63(4): 477-484 (in Chinese)
- 伍红雨, 杨崧, 蒋兴文. 2015. 华南前汛期开始日期异常与大气环流和海温变化的关系. *气象学报*, 73(2): 319-330. Wu H Y, Yang S, Jiang X W. 2015. Anomalous onset date of the first rainy season in South China and its relationship with the variation of the atmospheric circulation and SST. *Acta Meteor Sinica*, 73(2): 319-330 (in Chinese)
- 吴志伟, 江志红, 何金海. 2006. 近 50 年华南前汛期降水、江淮梅雨和华北雨季旱涝特征对比分析. *大气科学*, 30(3): 391-401. Wu Z W, Jiang Z H, He J H. 2006. The comparison analysis of flood and drought features among the first flood period in South China, Meiyu period in the Yangtze River and the Huaihe River valleys and rainy season in North China in the last 50 years. *Chinese J Atmos Sci*, 30(3): 391-401 (in Chinese)
- 徐海明, 何金海, 周兵. 2001a. 江淮入梅前后大气环流的演变特征和西太平洋副高北跳西伸的可能机制. *应用气象学报*, 12(2): 150-158. Xu H M, He J H, Zhou B. 2001. The features of atmospheric circulation during Meiyu onset and possible mechanisms for westward extension (northward shift) of Pacific subtropical high. *J Appl Meteor Sci*, 12(2): 150-158 (in Chinese)
- 徐海明, 何金海, 董敏. 2001b. 江淮入梅的年际变化及其与北大西洋涛动和海温异常的联系. *气象学报*, 59(6): 694-706. Xu H M, He J H, Dong M. 2001. Interannual variability of the Meiyu onset and its association with North Atlantic oscillation and SSTA over North Atlantic. *Acta Meteor Sinica*, 59(6): 694-706 (in Chinese)
- 徐群. 1965. 近八十年长江中、下游的梅雨. *气象学报*, 35(4): 507-518. Xu Q. 1965. The Meiyu in the middle and lower reaches of the Yangtze River in recent 80 years. *Acta Meteor Sinica*, 35(4): 507-518 (in Chinese)
- 杨莲梅, 张庆云. 2007. 夏季东亚西风急流 Rossby 波扰动异常与中国降水. *大气科学*, 31(4): 586-595. Yang L M, Zhang Q Y. 2007. Anomalous perturbation kinetic energy of Rossby wave along East Asian westerly jet and its association with summer rainfall in China. *Chinese J Atmos Sci*, 31(4): 586-595 (in Chinese)
- 杨义文, 徐群, 杨秋明. 2001. 近 116 年长江中下游的梅雨(二)//刘志澄. 暴雨·灾害(五). 北京: 气象出版社, 54-65. Yang Y W, Xu Q, Yang Q M. 2001. The Meiyu in middle-lower reaches of Yangtze River during 116 recent years (II)//Liu Z C. Rainstorm and Disaster. Beijing: Meteorology Press, 54-65 (in Chinese)
- 叶笃正, 陶诗言, 李麦村. 1958. 在六月和十月大气环流的突变现象. *气象学报*, 16(4): 249-263. Ye D Z, Tao S Y, Li M C. 1958. The abrupt change of circulation over the northern hemisphere during June and October. *Acta Meteor Sinica*, 16(4): 249-263 (in Chinese)
- 张庆云, 陶诗言. 1999. 夏季西太平洋副热带高压北跳及异常的研究. *气象学报*, 57(5): 539-548. Zhang Q Y, Tao S Y. 1999. The study of the sudden northward jump of the subtropical high over the western Pacific. *Acta Meteor Sinica*, 57(5): 539-548 (in Chinese)
- 张庆云, 陶诗言, 陈烈庭. 2003. 东亚夏季风指数的年际变化与东亚大气环流. *气象学报*, 61(5): 559-568. Zhang Q Y, Tao S Y, Chen L T. 2003. The inter-annual variability of East Asian summer monsoon indices and its association with the pattern of general circulation over East Asia. *Acta Meteor Sinica*, 61(5): 559-568 (in Chinese)
- 赵俊虎, 封国林, 杨杰等. 2012. 夏季西太平洋副热带高压的不同类型与中国汛期大尺度旱涝的分布. *气象学报*, 70(5): 1021-1031. Zhao J H, Feng G L, Yang J, et al. 2012. Analysis of the distribution of the large-scale drought/flood of summer in China under different types of the western Pacific subtropical high. *Acta Meteor Sinica*, 70(5): 1021-1031 (in Chinese)
- 赵俊虎, 支蓉, 申茜等. 2014. 2012 年我国夏季降水预测与异常成因分析. *大气科学*, 38(2): 237-250. Zhao J H, Zhi R, Shen Q, et al. 2014. Prediction of the distribution of the 2012 summer rainfall in China and analysis of the cause for anomaly. *Chinese J Atmos Sci*, 38(2): 237-250 (in Chinese)
- 周兵, 文继芬. 2007. 1998 年夏季我国东部降水与大气环流异常及其低频特征. *应用气象学报*, 18(2): 129-136. Zhou B, Wen J F. 2007. Abnormality of summertime precipitation of eastern China and general circulation with LFO in 1998. *J Appl Meteor Sci*, 18(2): 129-136 (in Chinese)
- 周波涛. 2011. 冬季澳大利亚东侧海温与长江流域夏季降水的联系及可能物理机制. *科学通报*, 56(16): 1301-1307. Zhou B T. 2011. Linkage between winter sea surface temperature east of Australia and summer precipitation in the Yangtze River valley and a possible physical mechanism. *Chinese Sci Bull*, 56(17): 1821-1827
- 周后福. 2005. 梅雨期划分方法的再提出. *成都信息工程学院学报*, 20(4): 483-487. Zhou H F. 2005. Representation of demarcation method of Meiyu period. *J Chengdu Univ Inf Technol*, 20(4): 483-487 (in Chinese)
- 竺可桢. 1934. 东南季风与中国之雨量. *地理学报*, 1(1): 1-27. Chu C. 1934. The enigma of southeast monsoon in China. *Acta Geograph Sin*, 1(1): 1-27 (in Chinese)

- 竺夏英, 何金海, 吴志伟. 2008. 长江中下游入梅指数及早晚梅年的海气背景特征. 大气科学, 32(1): 113-122. Zhu X Y, He J H, Wu Z W. 2008. Regional Meiyu onset index over the middle and lower reaches of the Yangtze River and the associated ocean-atmospheric features for the early/late Meiyu onset years. Chinese J Atmos Sci, 32(1): 113-122 (in Chinese)
- Ding Y H. 1992. Summer monsoon rainfalls in China. J Meteor Soc Japan, 70(1B): 373-396
- Feng G L, Sun S P, Zhao J H, et al. 2013. Analysis of stable components for extended-range (10–30 days) weather forecast: A case study of continuous overcast-rainy process in early 2009 over the mid-lower reaches of the Yangtze River. Sci China Earth Sci, 56(9): 1576-1587
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bull Amer Meteor Soc, 77(3): 437-472
- Li W H, Li L F, Ting M F, et al. 2012. Intensification of Northern Hemisphere subtropical highs in a warming climate. Nat Geosci, 5(11): 830-834
- Reynolds R W, Rayner N A, Smith T M, et al. 2002. An improved in situ and satellite SST analysis for climate. J Climate, 15(13): 1609-1625
- Tao S Y, Chen L X. 1987. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China//Chang C P, Krishnamurti T N. Monsoon Meteorology. Oxford, UK: Oxford University Press, 60-92
- Tian B Q, Fan K. 2012. Relationship between the late spring NAO and summer extreme precipitation frequency in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Atmos Oceanic Sci Lett, 5(6): 445-460
- Ye T S, Zhi R, Zhao J H, et al. 2014. The two annual northward jumps of the West Pacific subtropical high and their relationship with summer rainfall in eastern China under global warming. Chin Phys B, 23(6): 069203
- Zhao J H, Feng G L. 2014. Reconstruction of conceptual prediction model for the three rainfall patterns in the summer of eastern China under global warming. Sci China Earth Sci, 57(12): 3047-3061

欢迎订阅 2019 年度《气象学报》

《气象学报》中文版创刊于 1925 年,是由中国气象局主管,中国气象学会主办的全国性大气科学学术期刊,主要刊载有关大气科学及其交叉科学研究的具有创新性的论文;国内外大气科学发展动态的综合评述;新观点、新理论、新技术、新方法的介绍;研究工作简报及重要学术活动报道;优秀大气科学专著的评介以及有关本刊论文的学术讨论等。

《气象学报》中文版 2003 年和 2005 年连续两次荣获中华人民共和国新闻出版总署颁发的第二届、第三届“国家期刊奖百种重点学术期刊”奖;2013、2015、2017 年入选国家新闻出版广电总局“百强报刊”;2007—2011 年和 2015—2017 年获得中国科学技术协会精品科技期刊工程项目的资助,2008、2011、2014、2017 年被评为“中国精品科技期刊”;2003—2007、2009、2016 年被中国科学技术信息研究所评为“百种中国杰出学术期刊”;2012、2013、2014、2015 年获评“中国最具国际影响力学术期刊”;2016、2017 年获评“中国国际影响力优秀学术期刊”。

《气象学报》为大气科学研究提供了学术交流平台,一直致力于推动中国大气科学基础研究和理论研究的发展,服务于中国气象现代化建设事业。作者和读者对象主要为从事气象、海洋、地理、环境、地球物理、天文、空间及生态等学科的科研人员、高校师生。

《气象学报》中文版为双月刊,国内外发行。

2019 年全年共 6 期,定价 240 元/年。

邮发代号: 2-368(国内) BM329(国际)

通讯地址: 北京市中关村南大街 46 号 中国气象学会《气象学报》编辑部

邮政编码: 100081

联系电话: 010-68406942, 68408571(传真)

邮箱: cmsqxb@263.net; qxb@cms1924.org

期刊主页: http://www.cmsjournal.net/qxb_cn

开户银行: 北京建行白石桥支行

户名: 中国气象学会

帐号: 11001028600059261046