

金荣花, 李维京, 张博, 等. 2012. 东亚副热带西风急流活动与长江中下游梅雨异常关系的研究 [J]. 大气科学, 36 (4): 722–732, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11157. Jin Ronghua, Li Weijing, Zhang Bo, et al. 2012. A study of the relationship between East Asia subtropical westerly jet and abnormal Meiyu in the middle-lower reaches of the Yangtze River [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (4): 722–732.

东亚副热带西风急流活动与长江中下游梅雨异常关系的研究

金荣花^{1, 2, 3} 李维京⁴ 张博³ 闫彩霞⁵

1 中国气象科学研究院, 北京 100081

2 南京信息工程大学, 南京 210044

3 国家气象中心, 北京 100081

4 国家气候中心, 北京 100081

5 成都信息工程学院, 成都 610225

摘 要 本文利用 1960~2009 年 NCEP/NCAR 再分析日平均资料和中国 714 站 20 时 (北京时) 日降水量资料, 分析了梅雨季节东亚副热带西风急流逐日演变特征与长江中下游异常丰梅和空梅的关系, 研究了东亚副热带西风急流活动影响梅雨异常的机理, 讨论了监测和分析东亚副热带西风急流对梅雨中期预报的意义。梅雨期合成分析显示, 异常丰梅年较空梅年急流强度偏强, 急流带狭窄, 质量与动量集中。逐日演变特征表现为, 丰 (空) 梅年急流围绕气候态位置经向平稳摆动 (振荡幅度大), 关键区 (30°N~37.5°N, 110°E~130°E) 纬向风强度偏强 (弱), 东亚至西太平洋 (80°E~160°E) 上空急流最大中心主频次在 125°E (145°E) 附近, 靠近 (远离) 我国东部地区并位于下风方。影响梅雨异常机理研究表明, 异常丰梅年, 200 hPa 我国东部地区上空急流轴线、散度零线和散度距平零线在 37.5°N 附近 “重合”, 急流轴以北为辐合, 以南为强辐散, 辐散中心区与辐散距平中心区 “重合” 在长江中下游地区上空, 高空强辐散流出, 对应低层强辐合流入, 配合从底层到高层深厚的强垂直上升运动, 为梅雨提供了良好动力环境场; 高低空急流耦合作用, 有利于低空西南风加强, 长江中下游以南地区为西南水汽通量距平, 为持续性降水提供了良好的水汽输送条件; 强高空副热带锋区配合典型陡直梅雨锋区, 有利于高空急流质量和动量维持, 也利于深对流发展。空梅年的情形则相反。从强度、位置及其变化等多方面综合监测和分析东亚副热带西风急流中期变化特征, 可以更好地把握和认识急流对梅雨异常的影响及其机理, 对于梅雨中期预报问题是有帮助的。

关键词 东亚副热带西风急流 逐日演变 梅雨异常 影响机理 中期预报

文章编号 1006-9895(2012)04-0722-11

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11076

A Study of the Relationship between East Asia Subtropical Westerly Jet and Abnormal Meiyu in the Middle-Lower Reaches of the Yangtze River

JIN Ronghua^{1, 2, 3}, LI Weijing⁴, ZHANG Bo³, and YAN Caixia⁵

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

3 National Meteorological Center, Beijing 100081

4 National Climate Center, Beijing 100081

5 Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

收稿日期 2011-09-06, 2011-12-13 收修定稿

资助项目 科技部国家科技支撑计划项目 2009BAC51B03, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY (QX) GYHY200906007, 中国气象局气象新技术推广项目重点项目 CMATG20092D02

作者简介 金荣花, 女, 1969 年出生, 硕士研究生, 正研级高工, 主要从事中期天气气候分析与研究。E-mail: jinrh@cma.gov.cn

Abstract By using the daily reanalysis data provided by National Centers for Environmental Prediction–National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) and daily precipitation data at 2000 BT (Beijing time) from 714 Chinese meteorological stations during period 1960–2009, the relationship between the East Asia subtropical westerly jet (EASWJ) and abnormal typical, atypical Meiyu in the middle-lower reaches of the Yangtze River is analyzed during the Meiyu season, the mechanism of the influences of EASWJ on Meiyu is studied, the significance of monitoring and analysis of the EASWJ to middle-range forecasting for Meiyu is discussed. The composite analysis during Meiyu seasons shows the EASWJ would be stronger, the jet band is narrow and the jet mass and momentum concentrate in the abnormally typical Meiyu year compared to those in the atypical Meiyu year. Daily evolution of the EASWJ is marked by following characters: In typical (atypical) Meiyu years, the jet swings steadily around its climatological position in meridional orientation (with large amplitude); the zonal wind is stronger (weaker) in the key region of (30°N–37.5°N, 110°E–130°E); the location of jet core is mainly around 125°E (145°E) from East Asia to the western Pacific, which is near to (away from) the east of China and locates on the leeward side. The study of influence mechanism on abnormal Meiyu shows that, in typical Meiyu years, 200-hPa axis line of the EASWJ, zero line of divergence, and zero line of divergence departure coincide at 37.5°N in the east of China, convergence is in the north of the jet axis and divergence is in the south of the jet axis, the region of divergence center coinciding with that of divergence departure center locates above the middle and lower reaches of the Yangtze River, the above items cooperating with strong divergence flowing out at upper levels, strong convergence at lower levels, and strong vertical ascending movement from lower to upper levels provide favorable dynamical condition for Meiyu; the jet coupling between lower and upper levels is helpful for the enhancement of southwest wind at lower levels, and thus the southwest vapor flux departure exists in the south of the middle-lower reaches of the Yangtze River, which provides favorable condition for water vapor transportation; strong subtropical frontal zone at upper levels cooperating with typical steep and straight Meiyu frontal zone is beneficial to maintaining of jet mass and momentum, which also provides favorable condition for the developing of deep convection. Opposite situations are observed in atypical Meiyu years. By considering middle-range character of the EASWJ by monitoring and analyzing its integrated aspects of intensity, position, and variation, it is helpful to clearly realize and explain the influence of EASWJ on Meiyu and its corresponding mechanisms, which also contributes to improvement in middle-range forecasting for Meiyu.

Key words East Asia subtropical westerly jet, daily evolution, abnormal Meiyu, influence mechanism, middle-range forecasting

1 引言

长江中下游梅雨(简称梅雨)是夏季中国著名雨季,平均每年发生在6月中旬至7月上旬,异常丰梅和空梅是长江中下游梅雨期降水异常偏多和偏少的两种极端情况,往往直接造成洪涝和干旱灾害。长江中下游地区是中国经济发达、人口密集地区,旱涝灾害给社会经济、人民生命财产以及社会稳定等所带来的影响更大、损失更重。气象学者始终关注和研究梅雨相关科学问题,东亚副热带西风急流(简称急流)与梅雨的关系及其影响机理就是其中关键科学问题之一。早在上个世纪中叶,我国气象科学家叶笃正等(1958)和陶诗言等(1958)已经指出,东亚副热带高空急流的向北突然推进与亚洲大气环流的季节转换、印度西南季风的爆发以及梅雨起讫有着密切联系,刘匡南和邬鸿勋(1956)分析得出,130°E经线上高空西风在40°N以南消失,是梅雨结束的日期。近些年,随着高空探测资料质量和数值模拟能力的提高,很多学者对东亚副热带西风急流与梅雨的关系进行了更为细致的研究。例

如,廖清海等(2004)、Zhang and Guo(2005)、况雪源和张耀存(2006)采用合成方法分析指出,当东亚副热带西风急流异常偏南,长江中下游梅雨降水偏多,而当东亚副热带西风急流位置偏北时,长江中下游梅雨降水偏少,河套、华北地区夏季降水偏多。杜银等(2008)研究高空西风急流东西向形态变化对梅雨期降水空间分布的影响指出,梅雨期,当东亚高空西风急流主体呈显著的东部型态时,高低空急流在急流入口区耦合形成较强的辐合上升运动,在充足的水汽供应下,有利于在长江下游地区形成集中的强降水区域。孙凤华等(2009)和Xuan et al.(2011)研究发现,东亚副热带急流位置从1970年代末开始逐渐偏南,与此相对应,华北地区夏季降水呈现逐渐减少、长江中下游地区夏季降水呈现逐渐增多的变化趋势。杜银等(2009)进一步分析得出,夏季7~8月东亚副热带西风急流位置和形态在1975~1980年间出现转折,1980年后西风急流中心逐渐向西移动的同时伴随有西风急流向南偏移,与此相对应,长江中下游地区入梅提前、梅雨期变长,降水量增加,从而形成南涝北旱的降

水分布形势。李崇银等(2004)研究东亚夏季风活动与东亚高空西风急流位置北跳关系指出,在6月中旬急流北跳之前,5月8日左右东亚高空急流还存在一次北跳,导致了南海夏季风的爆发,第二次东亚高空急流的北跳发生在6月7日左右,先于江淮流域梅雨起始时间10天左右,它是梅雨起始的前期征兆。由此可见,东亚副热带西风急流的北跳、位置与梅雨起讫、强度有着密切关系。但是,急流位置季节性偏差对应长江中下游梅雨的多寡,以及急流北跳与梅雨起讫的关系,是从气候角度分析达成的共识,对于气候诊断分析和预测很有帮助,而对于着眼于大气环流系统逐日演变及其动力过程分析的天气预报,指导意义十分有限。那么,就长江中下游典型雨季的异常丰梅和空梅事件而论,东亚副热带西风急流的中期逐日演变特征是否存在显著差异?这种差异通过何种机理影响梅雨异常?能否对3天以上10天甚至两周以内的梅雨中期天气预报有一些指示性意义?本文就上述问题,利用1960~2009年NCEP/NCAR再分析日平均资料和中国714站20时(北京时)日降水量资料,分析了梅雨季节东亚副热带西风急流逐日演变特征与长江中下游异常丰梅和空梅的关系,研究了东亚副热带西风急流活动影响梅雨异常的机理,讨论了东亚副热带西风急流监测和分析对梅雨中期预报的意义。

2 资料和方法

分析采用NCEP/NCAR全球再分析日平均资料,包括位势高度 h 、水平纬向风 u 、水平经向风 v 、垂直速度 ω 、温度 T 、比湿 q 和相对湿度 r 等7个要素,分布在17层等压面上,其中,垂直速度 ω 垂直方向到100 hPa,比湿 q 垂直方向到300 hPa,水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$,序列长度为1960~2009年。中国714站20时日降水量资料由国家气象信息中心提供,文中采用Cressman方法将降水量插值到 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格,序列长度为1960~2009年。长江中下游梅雨资料由国家气候中心提供,梅雨的评定方法由徐群等(2001)定义给出,包括每年入梅日、出梅日、梅雨期长度、梅雨量、梅雨强度指数等。依照世界气象组织定义的气候平均序列1971~2000年30年统计,气候平均入梅日期为6月17日,气候平均出梅日期为7月8日,气候平均梅雨期长度为21天。采用标准化梅雨强度指数大于1.0划分异常丰

梅年(或简称丰梅年),1960年以来的异常丰梅年有1969、1980、1983、1991、1996、1998和1999年,共7年,各年入梅日、出梅日、梅雨期长度参见表1,梅雨日累计样本220天。空梅年有1965、2000、2002、2009年,共4年,空梅年各年统计和诊断分析样本取气候平均梅雨期同期时段,累计样本84天。下文对丰梅年和空梅年的合成分析中,分别采用丰梅年和空梅年累计样本资料。

为分析梅雨季节东亚副热带西风急流活动特征,需要定义东亚副热带西风急流位置指数和强度指数。根据本文研究东亚副热带西风急流活动对梅雨影响的需要,计算了1960~2009年梅雨期降水量与200 hPa纬向风场相关系数(图略),发现东亚至西太平洋地区相关系数通过99%信度水平的区域集中在 $110^\circ\text{E} \sim 130^\circ\text{E}$ 范围内,在此区域内自北向南呈“负—正”分布,即东北华北地区为负相关系数区,江淮流域为正相关系数区, 37.5°N 的零相关系数等值线将北方“负”与南方“正”高相关区分隔开。在气候平均梅雨期200 hPa 1960~2009年50年平均纬向风场上,区域 $110^\circ\text{E} \sim 130^\circ\text{E}$ 内东亚副热带西风急流轴位置为 37.5°N ,与前面相关系数零线重合,大于20 m/s纬向风经向跨度为 $32^\circ\text{N} \sim 44^\circ\text{N}$ 。由此,定义急流强度指数为关键区域($30^\circ\text{N} \sim 37.5^\circ\text{N}$, $110^\circ\text{E} \sim 130^\circ\text{E}$)内纬向风平均值,急流强度指数偏强(弱),梅雨偏多(少);定义急流位置指数为区域($20^\circ\text{N} \sim 55^\circ\text{N}$, $110^\circ\text{E} \sim 130^\circ\text{E}$)内各经度上200 hPa纬向风最大值所在纬度的平均值,位置指数小(大),表示急流处于较低(高)纬度。根据该指数定义,计算了1960~2009年5~8月逐日东亚副热带西风急流强度指数和位置指数,供下文分析中使用。

3 东亚副热带西风急流活动与梅雨异常的关系

图1给出了合成分析的丰梅年和空梅年东亚区域($110^\circ\text{E} \sim 130^\circ\text{E}$)平均纬向风及其距平经向剖面,以及相对应的降水量距平。丰梅年,东亚副热带西风急流强度异常偏强,显著的西风正距平从对流层顶贯穿到底层,中心较常年同期偏强3 m/s;急流等值线密集,水平经向梯度大,反映急流附近动量和质量高度集中。空梅年,东亚副热带西风急流强度偏弱,显著的西风负距平从对流层顶贯穿到底层,急流中心区西风小于30 m/s,较常年同期偏弱

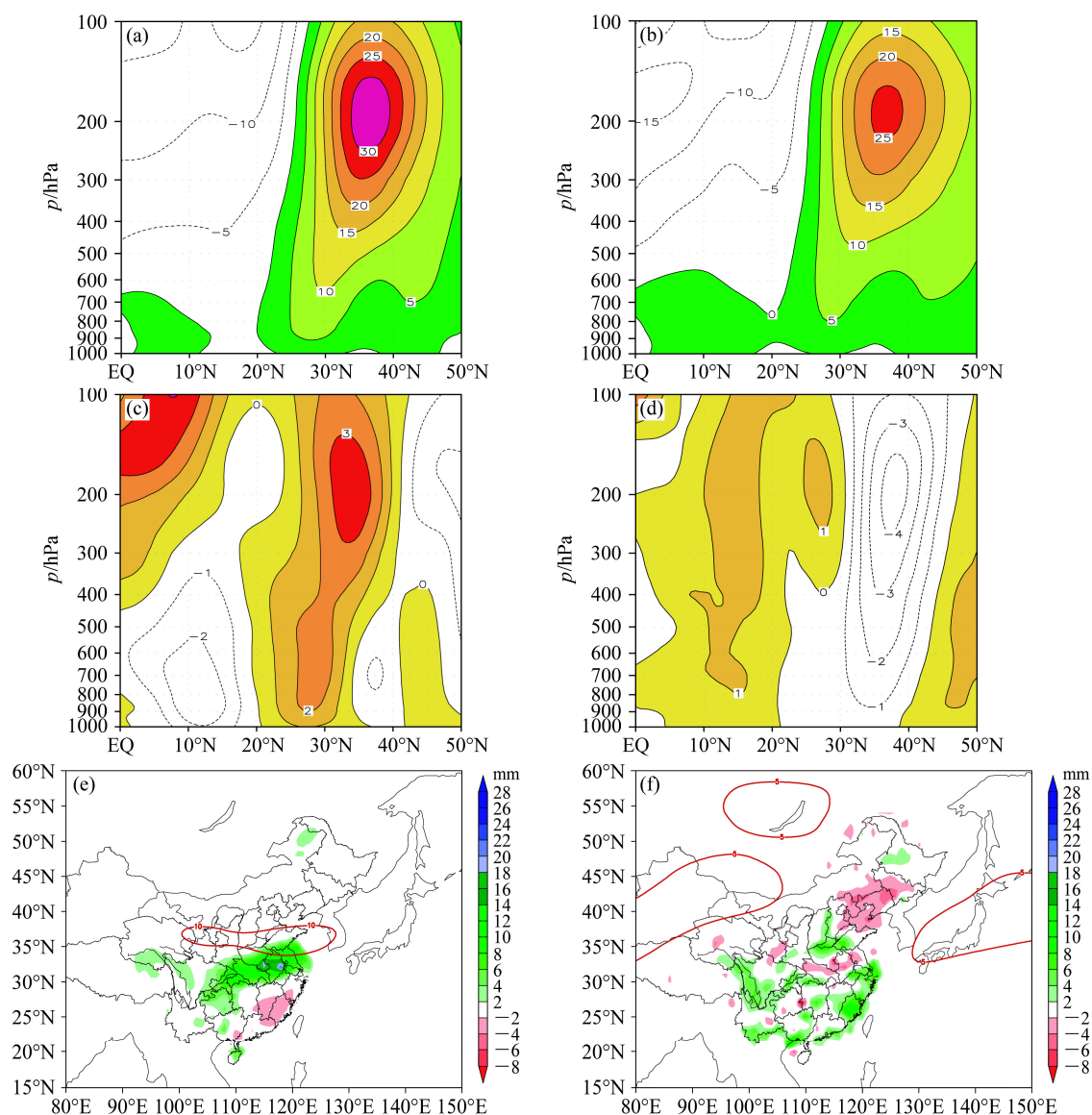


图1 合成分析 (a、b) 东亚区域 (110°E~130°E) 平均纬向风和 (c、d) 平均纬向风距平经向剖面 (单位: m/s) 以及 (e、f) 200-hPa 西风距平 (红色等值线, 单位: m/s) 和降水量距平 (阴影, 单位: mm): (a、c、e) 丰梅年; (b、d、f) 空梅年

Fig.1 Composite analysis of (a, b) mean zonal wind and (c, d) corresponding departure in East Asia (110°E–130°E) (units: m/s), and (e, f) 200-hPa westerly departure (red contour, units: m/s) and precipitation departure (shadow, units: mm): (a, c, e) Typical Meiyu years; (b, d, f) atypical Meiyu years

4 m/s。分析显示, 丰梅年和空梅年东亚副热带西风急流差异显著, 但是这种差异是合成分析的平均态差异, 如果探寻对天气预报有指示意义的东亚副热带西风急流活动特征, 还需要从逐日演变角度, 将东亚副热带急流活动细化为急流经向移动、急流北跳、急流强度、急流中心位置等四个方面逐一讨论分析。

根据各年逐日急流位置资料, 分别计算了7个丰梅年和4个空梅年各年梅雨期急流位置指数平均距平和标准差 (图2a), 距平值反映了急流位置偏

离气候态的大小, 标准差反映了急流围绕平均位置的振荡幅度。7个丰梅年急流位置指数距平分布在 $-2.52 \sim 0.87$ 之间, 平均为 -0.45 , 其中4年为负, 1年为零, 2年为正, 除1969年距平绝对值较大外, 其它年距平绝对值很小; 标准差在 $1.82 \sim 3.12$ 之间, 平均为 2.21 。空梅年, 急流轴位置指数距平在 $0.19 \sim 3.73$ 之间, 为一致的正距平, 平均为 1.62 ; 标准差在 $2.05 \sim 6.33$ 之间, 平均为 4.59 , 明显大于丰梅年。说明丰梅年急流位置接近常年同期, 急流经向摆动平稳, 空梅年位置偏北, 经向移动幅度较大,

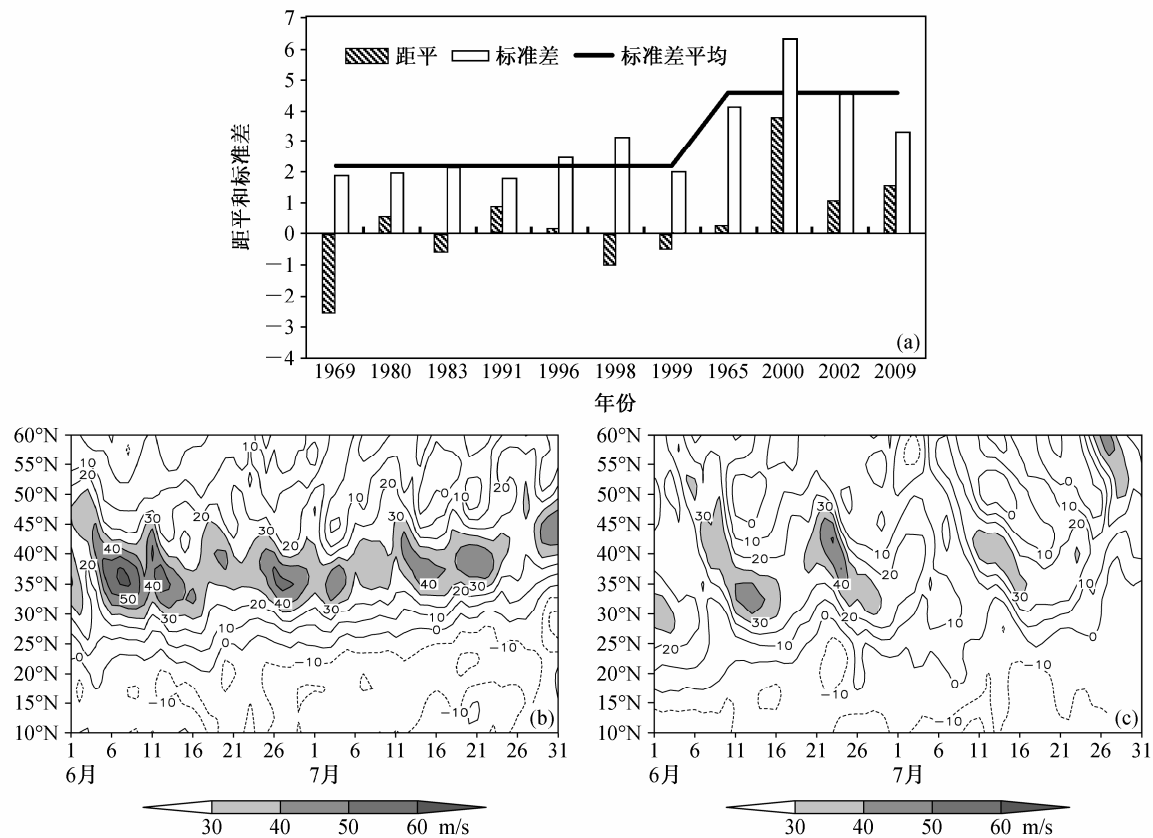


图2 (a) 7个丰梅年和4个空梅年各年梅雨期急流位置指数平均距平 (单位: °N) 和标准差; (b) 丰梅年1983年和 (c) 空梅年2002年6~7月200 hPa 110°E~130°E平均纬向风 (单位: m/s) 逐日演变

Fig.2 (a) Departure of jet position index average and its standard deviation in seven (four) typical (atypical) Meiyu years (units: °N); daily evolution mean zonal wind averaged from 110° E to 130° E at 200 hPa during Jun~Jul in (b) the typical Meiyu year of 1983 and (c) the atypical Meiyu year of 2002

从图2b、c丰梅年1983年和空梅年2002年110°E~130°E平均纬向风逐日变化就很直观地看出丰、空梅年急流位置演变差异。

梅雨期前后急流发生北跳, 本文将入梅前和入梅后的北跳分别称为前北跳和后北跳。前北跳是指东亚急流位置向北稳定达到35°N及其以北, 后北跳为东亚急流位置稳定达到40°N及其以北, 稳定表示从开端日算起, 滑动10天内必须有6天以上满足北跳位置条件。从1960~2009年50年平均急流位置指数分析, 6月7日为气候态前北跳, 7月8日为气候态后北跳, 气候态前北跳较入梅日提前10天, 气候态后北跳与出梅同步。表1给出7个丰梅年和4个空梅年各年入梅日、前北跳日、出梅日和后北跳日, 从7个丰梅年前北跳情况来看, 除1969年迟于入梅日4天, 其它各年前北跳日先于入梅日, 反映了急流前北跳所伴随的大气环流季节转换, 为梅雨的发生提供了必要季节性背景条件。然而, 前北跳先于入梅日的超前天数各年间差异较大, 最短为1996年超前

1天, 最长为1983年超前31天。从7个丰梅年后北跳情况来看, 后北跳日与出梅日几乎同步, 只有1999

表1 7个丰梅年和4个空梅年各年入梅日、前北跳日、出梅日和后北跳日

Table 1 Dates of onset, previous northward jump, ending, and latter northward jump of Meiyu in seven typical and four atypical Meiyu years

梅雨类型	年份	梅雨期 长度/d	入梅日	前北跳日	出梅日	后北跳日
丰梅年	1969	28	6月23日	6月27日	7月21日	7月21日
	1980	43	6月9日	6月5日	7月22日	7月20日
	1983	30	6月19日	5月20日	7月19日	7月19日
	1991	31	6月2日	5月21日	7月13日	7月15日
	1996	50	6月2日	6月1日	7月22日	7月23日
	1998	29	6月24日	6月11日	8月3日	7月27日
	1999	9	6月23日	5月30日	7月2日	7月21日
空梅年	1965					7月7日
	2000			5月27日		6月23日
	2002					7月3日
	2009					7月3日

年相差较大, 滞后19天, 说明东亚副热带西风急流的后北跳与出梅有很好的对应关系。7个丰梅年后北跳日均较气候态异常偏晚, 发生在7月下半月, 说明后北跳偏晚可能是丰梅年出梅偏晚的成因之一。空梅年, 1965年、2002年和2009年东亚副热带急流一次性北跳至 40°N 以北地区, 只有2000年在5月27日发生前北跳, 但前北跳后没有建立急流准稳定形势, 这可能是空梅的原因之一; 4个空梅年后北跳日均较气候态明显偏早。

在急流强度变化方面, 同样统计分析了7个丰梅年和4个空梅年各年梅雨期急流强度指数距平和标准差 (图3), 7个丰梅年表现为一致的显著正距平, 急流强度距平在 $1.06\sim 9.02\text{ m/s}$ 之间, 平均为 4.70 m/s , 标准差在 $4.01\sim 7.97$ 之间, 平均为 6.06 ; 空梅年一般为负距平, 急流强度指数在 $-6.29\sim 1.06\text{ m/s}$ 之间, 平均为 -2.22 m/s , 标准差在 $6.46\sim 8.11$ 之间, 平均为 7.17 。反映了急流强度指数大 (小), 梅雨强 (弱), 而且急流强度的逐日变率较大。

气候态上, 梅雨期东亚至西太平洋上空 200 hPa 纬向风存在两个定常中心区 (图略), 一个位于中国

西北地区 ($80^{\circ}\text{E}\sim 110^{\circ}\text{E}$) 上空, 另一个在西太平洋 ($130^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{E}$) 上空, 两个定常中心之间 120°E 是急流带的断裂处。以 120°E 为分割线, 将急流中心位置在 120°E 以东的定义为东部型, 在 120°E 以西的定义为西部型。对气候平均梅雨期时段内1960~2009年 200 hPa 东亚副热带西风急流的最大中心位置在区域 ($80^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{E}$) 范围内进行了逐日统计分析, 结果显示东部型占57%, 西部型占43%; 7个丰梅年东部型占62%, 西部型占38%; 4个空梅年东部型占79%, 西部型占21%。上述结果表明, 丰、空梅年东亚副热带西风急流中心位置均是东部型占优势, 尤其空梅年东部型出现频率更高, 也就是说东部型为主不仅是丰梅年的主要特征, 也是空梅年的典型特征, 那么, 在东部型背景下还存在哪些更细微的差异, 导致降水异常相反的情况?

为此, 对7个丰梅年和4个空梅年累计样本, 统计了急流最大中心经度位置频次分布 (图4), 由于统计区两端点 80°E 和 160°E 有区域外强中心截断和累积, 两端点统计值很大, 是非真值, 不予以分析。由图4可见, 丰梅年最大中心主频次在 125°E , 空梅年主频次在 142.5°E 至 147.5°E 区域, 即丰、空梅年在东部型背景下急流最大中心出现的经度位置存在差异, 空梅年中心位置较丰梅年中心位置更远离中国大陆并位于下风方。

4 影响机理

梅雨属于大型降水天气过程, 空间尺度可以绵延数千公里, 大型降水形成的宏观物理过程包括两个条件: 水汽条件和垂直上升运动。下面对丰梅年和空梅年东亚副热带急流不同特征下的垂直运动、水汽条件以及锋区结构进行动力、热力诊断分析, 揭示副热带西风急流活动影响梅雨异常的机理。

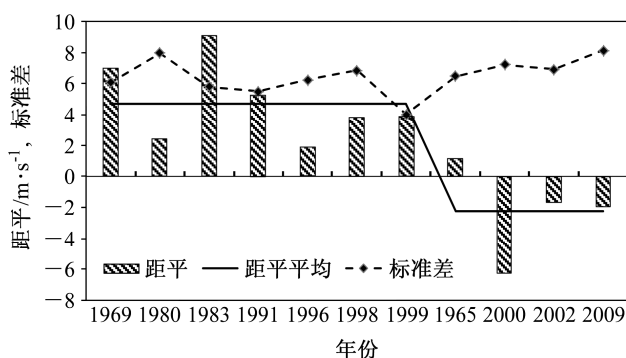


图3 7个丰梅年和4个空梅年各年梅雨期急流强度指数距平(单位: m/s)、标准差

Fig.3 Departure of jet intensity index (units: m/s) and its standard deviation in seven (four) typical (atypical) Meiyu years

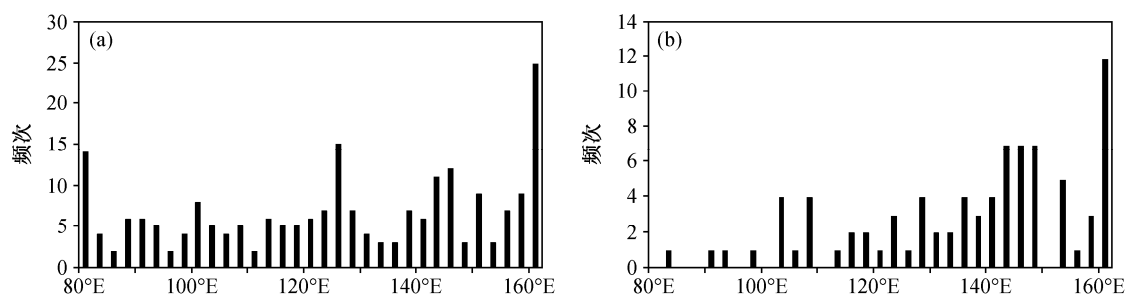


图4 丰梅年 (a) 和空梅年 (b) 累计样本急流最大中心经度位置频次分布

Fig.4 Frequency of the biggest jet core longitudes in (a) seven typical and (b) four atypical Meiyu years

4.1 动力条件

Cressman (1981) 用高空急流带气块纬向风的时间变化方程分析得出, 在急流入口区南侧产生高空辐散, 北侧产生高空辐合。进而北侧出现下沉运动, 南侧出现上升运动。低层大气会随之发生质量调整, 产生与高层相反的辐散辐合区和北风, 从而形成垂直环流。依据该理论, 高空急流通过其自身的动力机制以及次级环流作用改变环境场的辐合辐散和垂直上升运动, 进而影响大范围的降水天气。从 200 hPa 等压面的纬向风和散度合成分析来

看 (图 5a-d), 丰梅年, 我国东部地区上空东亚副热带西风急流强度偏强, 急流轴位置在 37.5°N , 急流轴线、平均散度零线和散度距平零线基本重合, 急流轴以北为辐合, 以南为强辐散, 辐散中心区与辐散距平中心区重合在长江中下游地区上空, 散度中心值为 $4.18 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 。这种“重合”空间分布特征, 显然与丰梅年东亚副热带西风急流强度偏强、经向活动围绕气候态位置平稳摆动以及急流最大中心主频次在 125°E 附近密切相关, 使得长江中下游地区上空维持强高空流出, 对应低层辐合距平, 配合

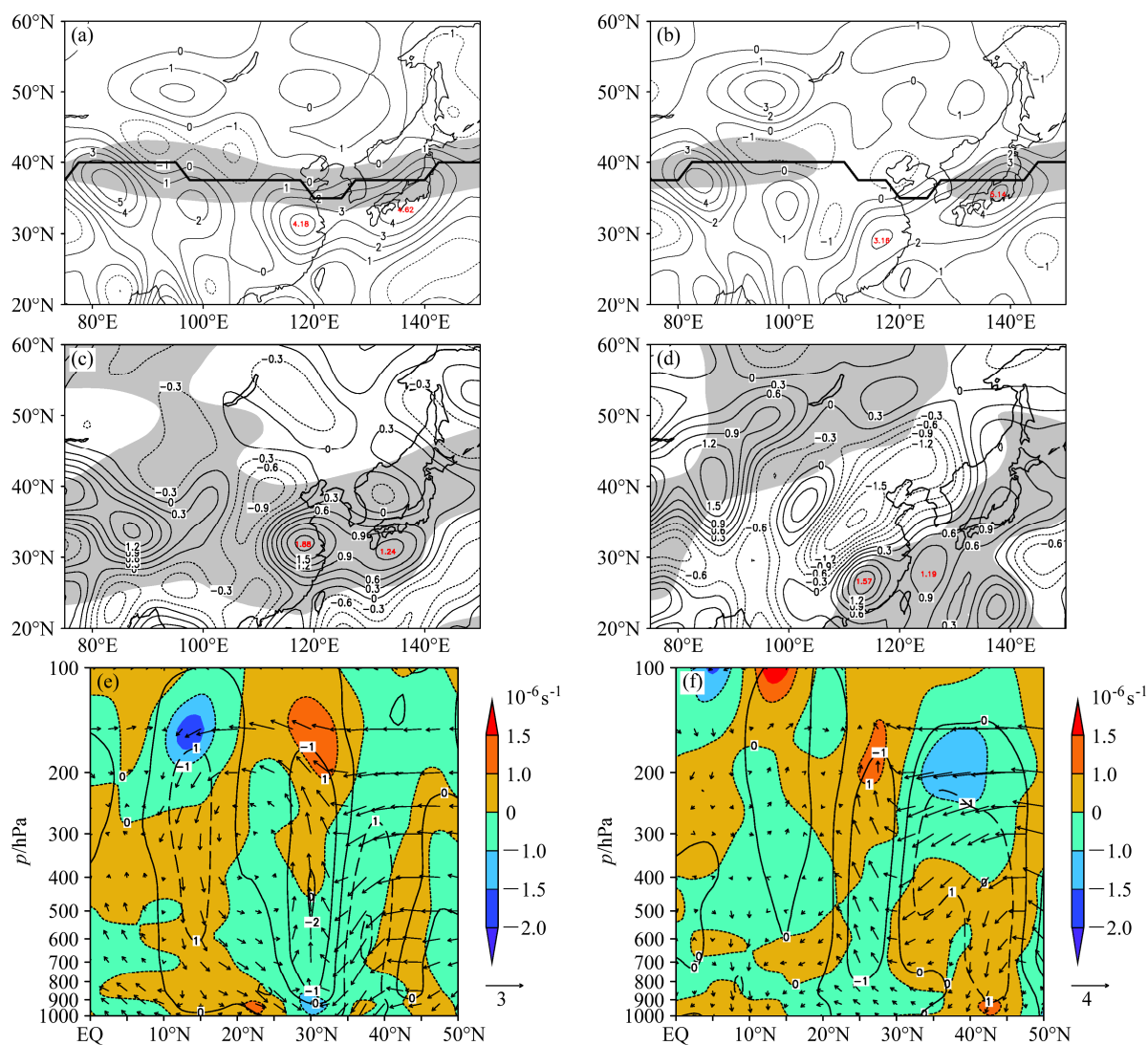


图5 合成分析 (a、b) 200 hPa 散度 (细实、虚线: 辐散、辐合) 和纬向风 (阴影: 纬向风大于 30 m/s, 粗实线: 纬向风轴线) 及其 (c、d) 距平 (阴影: 纬向风正距平; 细实、虚线: 散度正、负距平) 以及 (e、f) 沿 $110^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 垂直环流距平 (箭头)、垂直运动距平 [实、虚线: 上升、下沉 (单位: 10^{-2} Pa/s)] 和散度距平 [阴影 (单位: 10^{-6} s^{-1})] 的垂直剖面: (a、c、e) 丰梅年; (b、d、f) 空梅年

Fig.5 Composite analysis of (a, b) divergence and zonal wind at 200 hPa (shadow: zonal wind speed above 30 m/s; thin solid lines: divergence; thin dashed lines: convergence; thick solid line: axis of zonal wind) and (c, d) their departure (shadow: positive departure of zonal wind; solid lines: positive departure of divergence; dashed lines: negative departure of divergence), and (e, f) departure of vertical circulation (arrows), departure of vertical motion (units: 10^{-2} Pa/s ; solid lines: ascending; dashed lines: sinking), departure of divergence (shadow) along $110^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$: (a, c, e) Typical Meiyu years; (b, d, f) atypical Meiyu years

从底层到高层深厚的垂直上升运动距平, 构成了有利于长江中下游地区降水偏多的动力环境场 (图 5e)。空梅年, 在我国东部地区上空东亚副热带西风急流强度偏弱, 风速小于 30 m/s , 急流风速轴的平均位置从 110°E 的 40°N 向南落到 120°E 的 35°N , 急流轴线与散度零线、散度距平零线依次向南错开, 辐散主中心在日本岛上空, 辐散次中心在长江中下游地区上空, 强度为 $3.16 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, 辐散距平中心在江南地区上空, 这种“错峰”空间分布特征与空梅年东亚副热带急流强度偏弱、位置不稳定、主中心偏东的关系密切。长江中下游地区高空辐散负距平形势, 不利于低层建立辐合距平, 也抑制了垂直上升运动的发展, 不利于在长江中下游地区降水偏多 (图 5f)。

4.2 水汽输送

Uccellini and Johnson (1979) 从质量和动量相互调整的观点来推论高低空急流是相互耦合, 而不是分离的两种现象。低空急流对于水汽输送起重要作用。图 6a-d 给出了合成分析的丰梅年和空梅年整层

水汽输送距平和我国东部地区 $110^\circ\text{E} \sim 120^\circ\text{E}$ 比湿及垂直环流剖面, 丰梅年, 强而稳定的东亚副热带西风急流, 通过高低空耦合作用, 使得低层西南风加强, 长江中下游以南地区形成一支向北输送的西南水汽通量距平, 季风涌沿着西南水汽通量距平将充足的水汽输送到我国长江中下游地区上空, 有利于该地区上空维持比湿正距平, 配合强盛的上升运动, 水汽可以达到高层, 为梅雨暴雨和深对流发生、发展提供了充足的水汽输送条件。相反, 空梅年, 东亚副热带西风急流强度偏弱, 位置不稳定, 高低空耦合而促使低层西南风加强的作用不显著, 甚至较常年同期偏弱, 表现在我国东部地区整层水汽输送为一致的东北水汽通量距平, 长江中下游地区上空为比湿负距平, 易导致长江中下游地区空梅。

4.3 位温结构

从合成分析的丰、空梅年的位温和温度以及纬向风的垂直剖面图 (图 7a、b) 可以看到, 副热带锋区位于 300 hPa 附近, 副热带高空急流位于其上方, 根据纬向风热成风关系, 丰 (空) 梅年, 副热

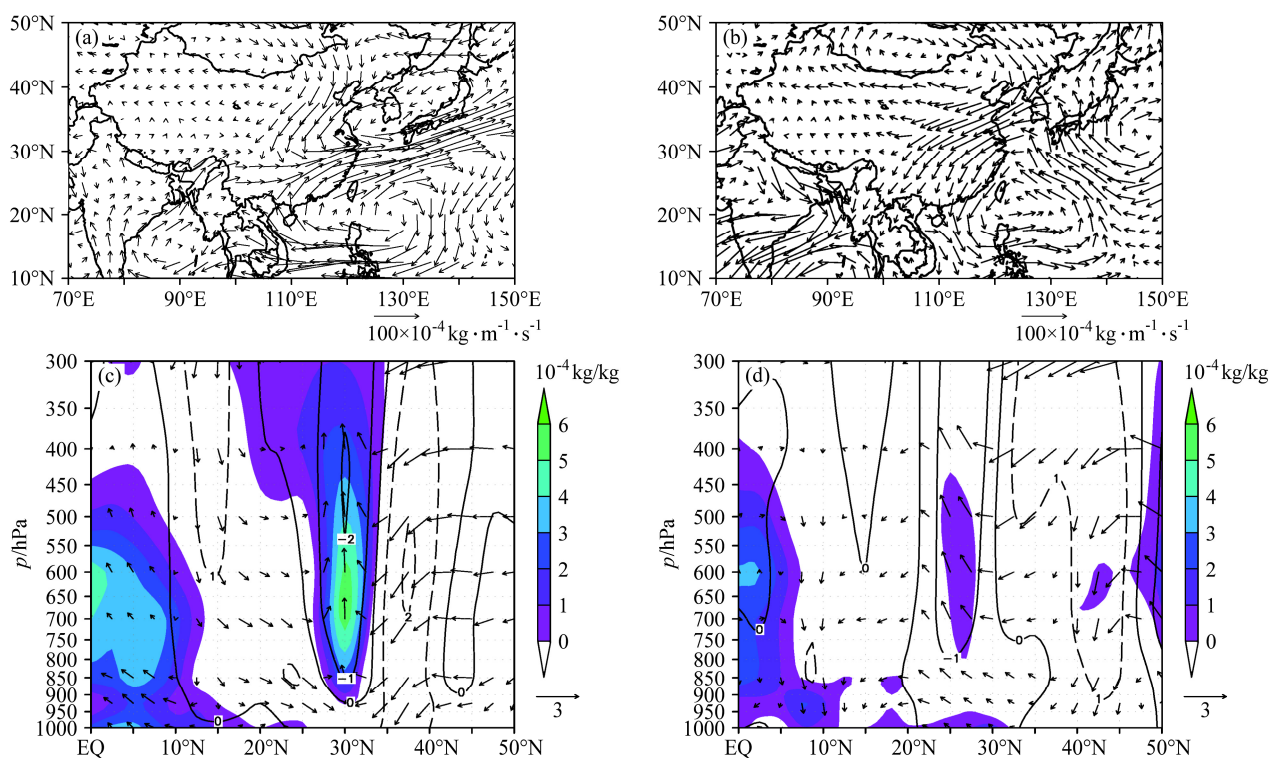


图 6 合成分析 (a, b) 整层水汽输送距平 (单位: $10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 和 (c, d) 沿 $110^\circ\text{E} \sim 120^\circ\text{E}$ 比湿距平 (单位: 10^{-4} kg/kg ; 阴影区: 大于 0)、垂直速度距平 (单位: 10^{-2} Pa/s ; 实线: 负值; 虚线: 正值)、垂直环流距平 (箭头) 剖面

Fig.6 Composite analysis of (a, b) departure of vertical integrated water vapor transportation and (c, d) departure of specific humidity (shadow: the value is above 0), departure of vertical speed (units: 10^{-2} Pa/s ; solid lines: negative values; dashed lines: positive values), and departure of vertical circulation (arrows) along $110^\circ\text{E} \sim 120^\circ\text{E}$: (a, c, e) Typical Meiyu years; (b, d, f) atypical Meiyu years

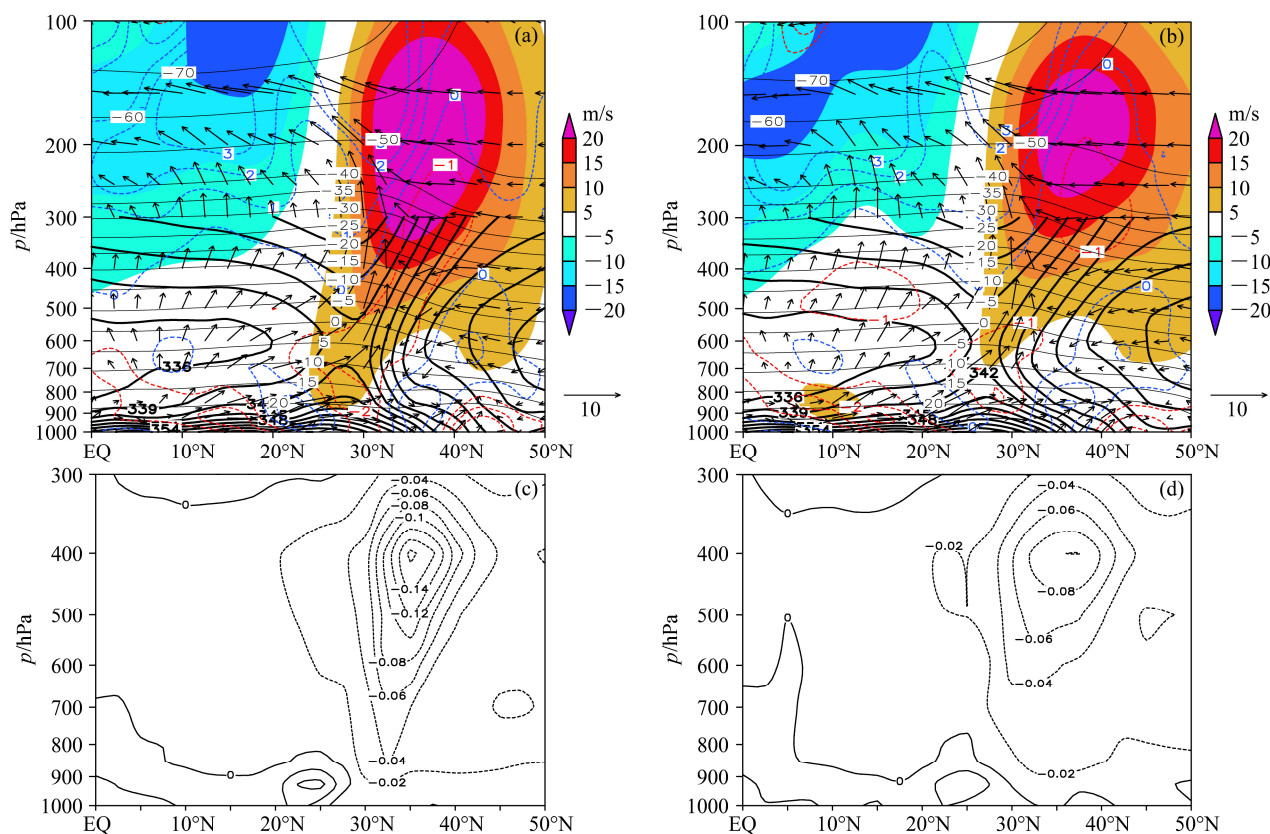


图7 合成分析 (a、b) 沿 110°E~120°E 平均假相当位温 (粗实线, 单位: K)、温度 (细实线, 单位: °C)、垂直环流 (箭矢)、散度 [红、蓝虚线: 辐合、辐散 (单位: $10^{-6}s^{-1}$)] 以及纬向风 (阴影) 和 (c、d) MPV2 (单位: PVU) 的剖面: (a、c) 丰梅年; (b、d) 空梅年

Fig. 7 Composite analysis of (a, b) pseudo-equivalent potential temperature (thick solid line, K), temperature (thin solid line, °C), vertical circulation (arrow), divergence (units: $10^{-6}s^{-1}$; red dashed line: convergence; blue dashed line: divergence), zonal wind (shadow), and (e, f) MPV2 (units: PVU) averaged along 110°E~120°E: (a, c) Typical Meiyu years; (b, d) atypical Meiyu years

带西风急流偏强 (弱), 副热带锋区上纬向风的垂直梯度大 (小), 相应地副热带锋区的温度和位温水平梯度大 (小), 锋区强度大 (小), 高空副热带锋区的次级环流的上升运动与低空梅雨锋上升运动叠加, 使得长江中下游上空的上升运动区强盛 (偏弱) 而 (不) 深厚, $8 \times 10^{-2} \text{ Pa/s}$ 的上升运动区从 700 hPa 向上可达 (仅在) 300 hPa 以上 (下), 有 (不) 利于深对流发展。

另一方面, 丰 (空) 梅年, 副热带西风急流动量、质量集中, 副热带锋区的温度和位温水平梯度大 (小), 表现为高空副热带锋区等熵面密集 (稀疏) 且坡度大 (小)。丰梅年, 339 K 等假相当位温线几乎呈垂直状, 从近低层深入到高空急流中心位置, 等熵面陡直, 根据位涡守恒原理, 气块沿陡直的等熵面移动, 气旋性涡度增大, 有利于垂直上升运动发展和加强, 垂直上升运动的发展使得动量和质量在高空急流右侧集中, 有利于高空急流的维持和加

强, 另一方面暖湿空气沿着垂直锋区辐合上升, 有利于发展深对流, 出现强降水。空梅年, 339 K 等假相当位温线向南凸出, 从地面到高层呈半圆弧状伸入到高空急流中心, 等熵面的坡度不及丰梅年大, 气块沿等熵面移动气旋性涡度增大幅度不及丰梅年, 低空偏西南风不强, 低空西南风携带的水汽沿着倾斜的锋区爬升, 一方面辐合上升运动弱于丰梅年, 另一方面, 700~500 hPa 之间北方的干冷空气使假相当位温线向南凸起, 形成干盖, 抑制深对流发展, 两方面的原因使得空梅年的降水形势不及丰梅年有利。

高空副热带西风急流动量和质量集中, 对大气环流垂直运动的影响, 可以从湿位涡的倾斜项 MPV2 的分析表现得更直接,

$$\text{MPV2} = -g\mathbf{k} \times \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial p} \cdot \nabla_p \theta_e,$$

式中各项为气象常用英文符号。MPV2 是与风垂直

切变、斜压性以及不稳定性有关的物理量。当它的绝对值急剧增大时, 预示负中心南部有垂直涡度的增长, 上升运动加剧, 对应降水增强。从合成分析的丰梅年 MPV2 垂直剖面图 (图 7c) 可以看到, MPV2 负值中心位于 35°N 附近上空, 400 hPa 附近的负值中心强度超过 -0.16 PVU [湿位涡单位 ($1\text{PVU}=1.0\times 10^{-6}\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}\cdot\text{kg}^{-1}$)], 并伴随高度的降低而向南伸展, 这正是强高空急流在垂直方向上所伴随的强垂直切变、较大位温水平梯度以及不稳定性特征在 MPV2 垂直剖面的反映, 这种特征使得长江中下游上空的上升运动旺盛且深厚, 则有利于深对流的发展。空梅年, 高空 MPV2 负值中心强度明显小于丰梅年, 长江中下游上空上升运动较弱, 不利于深对流发展。

5 结论与讨论

由以上分析可知, 异常丰梅年与空梅年东亚副热带西风急流 (EASWJ) 活动差异显著。合成分析显示, 丰梅年相对于空梅年强度偏强, 急流带狭窄, 质量与动量集中。从逐日演变特征来看, 丰梅年, 东亚副热带西风急流前北跳一般先于入梅日, 后北跳与出梅几乎同步; 入梅后, 东亚副热带西风急流位置围绕气候态经向平稳摆动, 关键区 ($30^{\circ}\text{N}\sim 37.5^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 130^{\circ}\text{E}$) 纬向风强度偏强, 最大中心主频次在 125°E 附近, 靠近中国大陆并位于下风方。空梅年, 东亚副热带西风急流一般不发生前北跳, 一次性北跳至 40°N 以北地区, 或者发生后

北跳, 但没有建立准稳定形势, 急流位置偏北, 经向移动幅度较大, 急流强度偏弱, 中心主要出现在日本岛及西太平洋上空, 远离中国大陆。影响梅雨异常的机理研究表明, 异常丰梅年, 200 hPa 我国东部地区上空急流轴线、散度零线和散度距平零线在 37.5°N “重合”, 急流轴以北为辐合, 以南为强辐散, 辐散中心区与辐散距平中心区 “重合” 在长江中下游地区上空, 高空强辐散流出, 对应低层有强辐合流入以及自底层到高层深厚的垂直上升运动, 为梅雨提供了良好的动力环境场; 高低空急流耦合作用, 有利于低空西南风加强, 长江中下游以南地区为西南水汽通量距平, 为持续性降水提供了良好的水汽输送条件。高空锋区和典型陡直梅雨锋区, 有利于高空急流质量和动量的维持, 也有利于深对流发展。本文所揭示的长江中下游异常丰梅年和空梅年东亚副热带西风急流活动及其对应的三维空间结构的显著差异 (图 8), 应该对梅雨分析和中期天气预报具有一定的预报参考价值。

经向活动相对稳定、强度偏强是丰梅年东亚副热带西风急流活动的一致表现, 也是与空梅年的关键差异, 表明东亚副热带西风急流强而稳定对梅雨期降水异常偏多至关重要, 也验证了作为稳定的行星尺度天气系统, 有利于直接产生暴雨的次天气尺度、天气尺度系统在同一地区重复出现或维持, 而造成该地区季节性降水异常偏多。以往从季节平均角度研究指出, 东亚副热带急流位置偏南 (北), 梅雨期降水偏多 (少), 这仅仅反映了急流位置在一

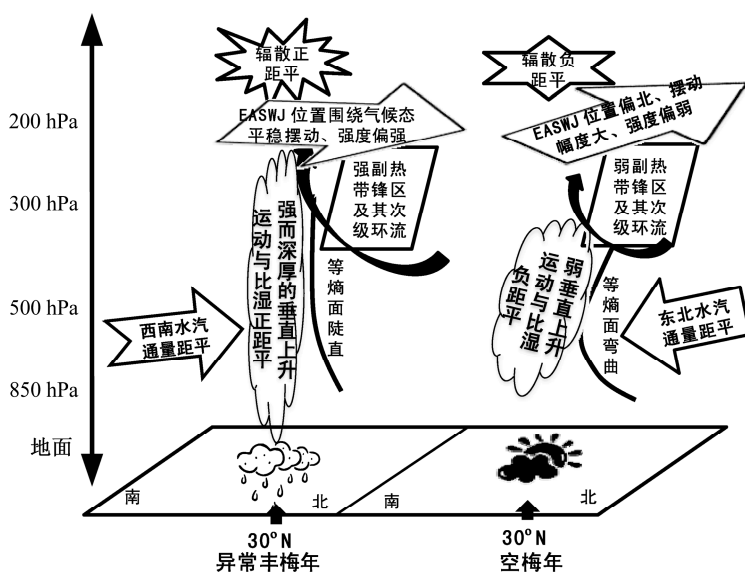


图 8 异常丰梅年与空梅年的三维空间结构特征对比概念图

Fig.8 Concept map of comparison between typical Meiyu and atypical Meiyu three-dimensional space structure characteristics

定时期内的平均状态与降水多寡的相关关系,而没有考虑急流经向活动、强度特征以及急流最大中心位置对梅雨降水影响的因素,显然应用于梅雨中期预报与短期气候预测业务存在一定的片面性,效果也不尽如人意。通过本文研究工作发现,从强度、位置及其变化等多方面综合考虑急流演变特征,可以更好地把握和认识急流对梅雨影响及其机理。在实际业务应用中,利用实时获取的前期实况资料和未来 15 天中期数值预报模式产品资料,逐日监测和分析东亚副热带西风急流北跳、强度、位置及其演变的中期逐日变化特征,对于梅雨分析和中期预报应该是有帮助的。

致谢 感谢国家气象中心曹勇和兰州大学大气科学学院李艳博士在降水量资料计算和文章整理方面给予的帮助!

参考文献 (References)

- Cressman G P. 1981. Circulations of the West Pacific jet stream [J]. *Monthly Weather Review*, 109 (12): 2450–2463.
- 杜银, 张耀存, 谢志清. 2008. 高空西风急流东西向形态变化对梅雨期降水空间分布的影响 [J]. *气象学报*, 66 (4): 566–576. Du Yin, Zhang Yaocun, Xie Zhiqing. 2008. Impacts of longitude location changes of East Asian westerly jet core on the precipitation distribution during Meiyu period in middle-lower reaches of Yangtze River valley [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 66 (4): 566–576.
- 杜银, 张耀存, 谢志清. 2009. 东亚副热带西风急流位置变化及其对中国东部夏季降水异常分布的影响 [J]. *大气科学*, 33 (3): 581–592. Du Yin, Zhang Yaocun, Xie Zhiqing. 2009. Location variation of the East Asia subtropical westerly jet and its effect on the summer precipitation anomaly over eastern China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 33 (3): 581–592.
- 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 [J]. *高原气象*, 25 (3): 382–389. Kuang Xueyuan, Zhang Yaocun. 2006. Impact of the position abnormalities of East Asian subtropical westerly jet on summer precipitation in middle-lower reaches of Yangtze River [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 25 (3): 382–389.
- 李崇银, 王作台, 林士哲, 等. 2004. 东亚夏季风活动与东亚高空西风急流位置北跳关系的研究 [J]. *大气科学*, 28 (5): 641–658. Li Chongyin, Wang Zuotai, Lin Shizhe, et al. 2004. The relationship between East Asian summer monsoon activity and northward jump of the upper westerly jet location [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 28 (5): 641–658.
- 廖清海, 高守亭, 王会军, 等. 2004. 北半球夏季副热带西风急流变异及其对东亚夏季风气候异常的影响 [J]. *地球物理学报*, 47 (1): 10–18. Liao Qinghai, Gao Shouting, Wang Huijun, et al. 2004. Anomalies of the extratropical westerly jet in the North Hemisphere and their impacts on East Asian summer monsoon climate anomalies [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 47 (1): 10–18.
- 刘匡南, 邬鸿勋. 1956. 近五年东亚夏季自然天气季节的划分及夏季特征的初步探讨 [J]. *气象学报*, 27 (3): 219–242. Liu Kuangnan, Wu hongshun. 1956. A preliminary study on the determination of natural synoptic summer season over Asiatic natural synoptic region and the prevailing weather process in this season [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 27 (3): 219–242.
- 孙风华, 张耀存, 郭兰丽. 2009. 中国东部夏季降水与同期东亚副热带急流年代际异常的关系 [J]. *高原气象*, 28 (6): 1308–1315. Sun Fenghua, Zhang Yaocun, Guo Lanli. 2009. Relationship between the East Asia subtropical westerly jet anomaly and summer precipitation over eastern China [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 28 (6): 1308–1315.
- 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 [J]. *气象学报*, 29 (2): 119–134. Tao Shiyuan, Zhao Yujia, Chen Xiaomin. 1958. The relationship between May-yü in Far East and the behaviour of circulation over Asia [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 29 (2): 119–134.
- Uccellini L W, Johnson D R. 1979. The coupling of upper and lower tropospheric jet streaks and implications for the development of severe convective storms [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 107 (6): 682–703.
- 徐群, 杨义文, 杨秋明. 2001. 近 116 年长江中下游的梅雨 (一). 暴雨·灾害 [C]. 北京: 气象出版社, 44–53. Xu Qun, Yang Yiwen, Yang Qiuming. 2001. The Mei-yu in the Middle–Lower Reaches of Yangtze River for Recent 116 Years (Part I). *Storm • Disaster* (in Chinese) [C]. Beijing: China Meteorological Press, 44–53.
- Xuan S L, Zhang Q Y, Sun S Q. 2011. Anomalous midsummer rainfall in Yangtze River-Huaihe River valleys and its association with the East Asia westerly jet [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 28 (2): 387–397.
- 叶笃正, 陶诗言, 李麦村. 1958. 在 6 月和 10 月大气环流的突变现象 [J]. *气象学报*, 29 (4): 250–263. Ye Duzheng, Tao Shiyuan, Li Maicun. 1958. The abrupt change of atmosphere circulation over the Northern Hemisphere during June and October [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 29 (4): 249–263.
- Zhang Yaocun, Guo Lanli. 2005. Relationship between the simulated East Asian westerly jet biases and seasonal evolution of rainbelt over eastern China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 50 (14): 1503–1508.