

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.

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

杜银¹ 张耀存¹ 谢志清²

¹ 南京大学大气科学系, 南京 210093

² 江苏省气象科学研究所, 南京 210008

摘 要 利用 1951~2004 年美国国家环境预报中心 (NCAR/NCEP) 再分析候平均资料和同期中国 740 站日降水资料, 分析了东亚副热带西风急流轴位置的变化趋势及其对中国东部夏季降水分布的影响, 结果表明: (1) 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。(2) 在 1980 年以后华北地区降水量减少和降水强度减弱, 雨季开始时间推迟、雨季变短, 而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。(3) 1957~1964 年华北典型多雨时期, 西风急流呈纬向分布, 在华北地区有高低空急流耦合, 强辐合上升区正好位于华北, 并有充足的水汽条件供应, 使得华北降水偏多。而 1980~1987 年和 1997~2002 年华北地区为典型少雨时期, 1980~1987 年西风急流中心位置偏南和 1997~2002 年急流位置显著偏西, 在华北地区均无高低空急流耦合的环流形势, 水汽辐合区位于长江流域, 强辐合上升区位置在 30°N 以南区域, 有利于江南地区降水增加而华北地区少雨, 这表明西风急流位置变化导致环流调整对中国东部降水分布有显著影响。因而, 在讨论东亚副热带西风急流位置与中国东部地区降水异常的关系时, 不仅要考虑西风急流南北位置变化, 还需要综合分析西风急流的东西位置和形态的变化。

关键词 西风急流 降水分布 南涝北旱 华北雨季

文章编号 1006-9895 (2009) 03-0581-12

中图分类号 P461

文献标识码 A

Location Variation of the East Asia Subtropical Westerly Jet and Its Effect on the Summer Precipitation Anomaly over Eastern China

DU Yin¹, ZHANG Yaocun¹, and XIE Zhiqing²

¹ Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093

² Institute of Meteorological Sciences of Jiangsu Province, Nanjing 210008

Abstract The location change of the East Asia subtropical Westerly Jet (EAWJ) axis and its impacts on the spatial distribution of summer precipitation anomaly in eastern China are investigated by using the NCEP/NCAR reanalysis mean pentad data and observed daily rainfall data from 1951 to 2004. The main results are as follows: (1) The location change of the EAWJ is greatly abrupt in summer (July and August) during 1975–1980, since then the westerly

收稿日期 2007-11-26, 2008-04-28 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40675041, 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB400506

作者简介 杜银, 女, 1978 年出生, 博士, 主要从事气候变化和模拟研究。E-mail: yczhang@nju.edu.cn

jet core shifted southward and westward remarkably. (2) Both rainfall amount and rainfall intensity in North China have been decreasing in summer since 1980. At the same time, the length of the rain season shortens, because the beginning date of the rainy season is late and the ending date early, respectively. In contrast, the plum rains start date is early and the end date late. The rainfall increases more than before in the middle-lower reaches of the Yangtze River, so the precipitation distribution with flood in the south and drought in the north of China forms. (3) There is more precipitation in North China during 1957–1964, corresponding to the EAWJ longitudinal distribution. There is coupling between the upper-level jet and the low-level jet in North China. Meanwhile, the strong convergence and the sufficient water vapor supply appear in this region, which are related to the more precipitation occurrence. There are two periods of the less precipitation in North China, which are 1980–1987 and 1997–2002, respectively. The EAWJ core is abnormally southward and westward remarkably without coupling of the 200-hPa jet and 850-hPa jet during the periods of 1980–1987 and 1997–2002, respectively. Meanwhile, the stronger convergence and sufficient water vapor supply appear in the Yangtze River, which are related to more precipitation in the south and less precipitation in the north of China. This suggests that the change in the westerly jet location and intensity is associated with the precipitation distribution in eastern China. Therefore, not only the latitudinal location, but also the longitudinal location and intensity of the westerly jet center are important for the relationship between the EAWJ and the abnormal rainfall in eastern China.

Key words westerly jet, precipitation distribution, flood in the south and drought in the north, rainy season in North China

1 引言

东亚副热带西风急流是指东亚副热带地区对流层上部 200 hPa 附近狭窄的强西风带,其显著季节性北跳和南退是东亚大气环流季节转换的标志(叶笃正等, 1958)。东亚副热带西风急流作为影响中国乃至整个东亚地区天气气候的重要环流系统,对东亚大气环流的季节转换、亚洲夏季风的爆发、中国东部雨带由南向北推进都有重要影响(陶诗言等, 1958; 李崇银等, 2004; 廖清海等, 2004)。董敏等(1987, 1999)研究指出, 500 hPa 西风指数与中国长江流域夏季降水量明显相关, 长江流域 6 月降水与 $20^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 地区的西风指数呈正相关, 而与 $40^{\circ}\text{N}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 的西风指数呈负相关, 西风急流强度的年际变化不仅与同期热带加热场密切相关, 而且与热带加热场的前期状况也密切相关。近 20 年来东亚地区夏季 7、8 月份对流层上层大气温度有明显变冷趋势, 与此相对应, 东亚副热带西风急流向南偏移, 导致东亚夏季风减弱, 进而影响中国华北和长江流域的旱涝变化趋势(Yu et al., 2004; 宇如聪等, 2008)。特别是 1980 年以后, 伴随着东亚大气环流的调整, 副热带西风急流南移, 华北地区夏季降水明显减少, 而长江流域显著增加(严中伟等, 1990; 赵振国, 1999; 陆日宇, 2003; Xie et al.,

2005; 梁平德等, 2006), 导致中国东部南涝北旱的降水分布形势。气象学界认为降水分布形势的这种变化与东亚地区大气环流形势的调整有密切联系, 其中东亚副热带西风急流作为大气环流变化的重要影响因子尤为学者关注。然而, 以往对中国东部南涝北旱分布形势的形成机理研究主要集中在东亚西风急流的南北位置变化对华北、长江中下游地区降水分布的影响方面(Liang et al., 1994; Liang et al., 1998; Lau et al., 2000; 况雪源等, 2006)。事实上, 最近 20 年来东亚副热带西风急流的空间变化特征, 除了南北位置变化以外, 还存在显著的东西向形态和位置变化, 其对长江中下游地区降水空间分布的影响已为部分研究成果证实(况雪源, 2006; Zhang et al., 2006)。而东西向形态和位置变化对中国东部降水分布形势的影响研究尚不多见, 因此, 结合东亚副热带西风急流东西向变化特征, 分析中国东部夏季南涝北旱的降水分布形势变化, 对于认识大气环流调整对东亚地区降水变化趋势的影响具有重要意义。

为此, 本文将从夏季降水异常空间分布和高空环流特征的角度, 深入分析副热带西风急流位置和强度变化对中国东部地区夏季降水分布特征的影响, 加深对中国东部地区夏季南涝北旱降水分布形成机理的认识。

2 资料和方法

2.1 资料

(1) 美国国家环境预报中心 (NCAR/NCEP) 再分析候平均资料, 要素包括风速、气温、垂直速度、比湿, 时间为 1951~2004 年, 水平空间分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, 其中, 风速、气温垂直分辨率为 12 层, 垂直速度和比湿分别为 17 层和 8 层。

(2) 中国气象局气象信息中心气象资料室提供的 1951~2004 年全国 740 个台站逐日降水资料。华北地区选取 17 个代表站 (承德、北京、天津、石家庄、德州、邢台、安阳、烟台、青岛、潍坊、济南、临沂、菏泽、郑州、长治、太原、临汾), 取华北主汛期 7~8 月的降水量代表华北地区夏季平均降水量。长江中下游地区选取 17 个代表站 (南京、合肥、上海、杭州、安庆、屯溪、九江、汉口、钟祥、岳阳、宜昌、常德、宁波、衢县、贵溪、南昌、长沙), 以长江中下游梅汛期 6~7 月的降水量来表征该地区夏季平均降水量。

2.2 方法

(1) 累积频率分布方法:

$$r_i = \frac{R_i}{R}, \quad i = 1, 2, \dots, 73, \quad (1)$$

$$F_j = \sum_{k=1}^{k=j} x_k, \quad j = 1, 2, \dots, 73, \quad (2)$$

式中, R_i 为第 i 候平均降水量, R 为年平均降水量, $x_j (j=1, 2, \dots, 73)$ 是由 $r_i (i=1, 2, \dots, 73)$ 从小到大排列构成候降水序列, F_j 为累积频率。利用累积频率分布的方法, 以累积频率达到 0.86 时的降水量值为阈值。定义满足候降水量达到或超过降水阈值时的第一候为入梅候/雨季开始候, 而最后一个候为出梅候/雨季结束候。

(2) Mann-Kendall 非参数检验方法 (魏凤英, 1999) (简称 MK 法), 用来分析降水序列的演变趋势。

(3) 气候趋势系数 (施能等, 1995):

定义为 n 年的降水序列与自然数列 1, 2, 3, ..., n 的相关系数 r_{xt} :

$$r_{xt} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (i - \bar{t})^2}}, \quad (3)$$

其中, n 为年数, x_i 是第 i 年降水量, $\bar{x}$ 为多年平均降水量, $\bar{t} = (n+1)/2$, r_{xt} 为正 (负) 时, 表示降水量在所计算的时段, 有线性增 (减) 的趋势。

3 副热带高空西风急流和华北、长江中下游降水的年际变化

3.1 东亚副热带高空西风急流位置变化趋势

从北半球欧亚副热带高空西风急流位置的气候平均态来看, 夏季 7~8 月欧亚大陆上空副热带西风急流有两个中心, 分别位于 ($35^\circ\text{N} \sim 45^\circ\text{N}$, $40^\circ\text{E} \sim 60^\circ\text{E}$) 伊朗高原附近和 ($5^\circ\text{N} \sim 45^\circ\text{N}$, $70^\circ\text{E} \sim 100^\circ\text{E}$) 青藏高原北缘上空 (见图 1a、b), 其中东亚副热带西风急流位置和形态在 1951~1979 年、1980~2004 年两个时段存在显著差异 (图 1a、b 中小方框内区域), 1951~1979 年间急流次大风速 ($u \geq 25 \text{ m/s}$) 覆盖的椭圆形区域呈明显的纬向分布特征, 与所在纬度平行, 而 1980~2004 年间, 东亚副热带西风急流呈西北-东南走向, 急流中心覆盖面积 ($u \geq 30 \text{ m/s}$) 明显扩大, 而且急流轴线略微向南偏移。图 1c、d 给出了 1951~2004 年同期东亚副热带西风急流位置和强度的年际变化, 从图中可以看到, 1951~1980 年间急流东西位置稳定在 $80^\circ\text{E} \sim 100^\circ\text{E}$ 之间, 急流中心区 ($u \geq 30 \text{ m/s}$) 和次大风速区 ($u \geq 25 \text{ m/s}$) 东侧均有向东移动趋势, 急流覆盖范围偏小 (图 1c); 而 1980 年后西风急流中心 ($u \geq 30 \text{ m/s}$) 和次大风速 ($u \geq 25 \text{ m/s}$) 显著向西移动。从东亚副热带西风急流南北位置的年际变化 (图 1d) 来看, 1980 年后东亚副热带西风急流位置与 1951~1979 年相比略为向南移动, 尤其是从 25 m/s 等风速线的分布来看更为显著。

为了进一步分析急流中心位置变化趋势, 选取 200 hPa 高度上 ($30^\circ\text{N} \sim 60^\circ\text{N}$, $80^\circ\text{E} \sim 130^\circ\text{E}$) 范围内最大西风中心所在的经度、纬度来表征急流中心位置, 并利用线性倾向估计法 (施能等, 1995) 对急流中心经纬度位置的气候变化趋势进行定量判别 (图 1e、f)。从急流中心经度趋势变化 (图 1e) 来看, 1951~1984 年间有显著向东伸展的趋势, 其气候趋势系数为 0.39, 气候倾向率为 $1.39^\circ/10 \text{ a}$, 通过 0.05 信度的显著性检验。在 1985~2004 年间, 急流中心向西移动, 其气候趋势系数为 0.4, 气候倾向率为 $-2.28^\circ/10 \text{ a}$ 。与此同时, 急流中心在 1951~1970 年间明显南移 (图 1f), 气候倾向率为

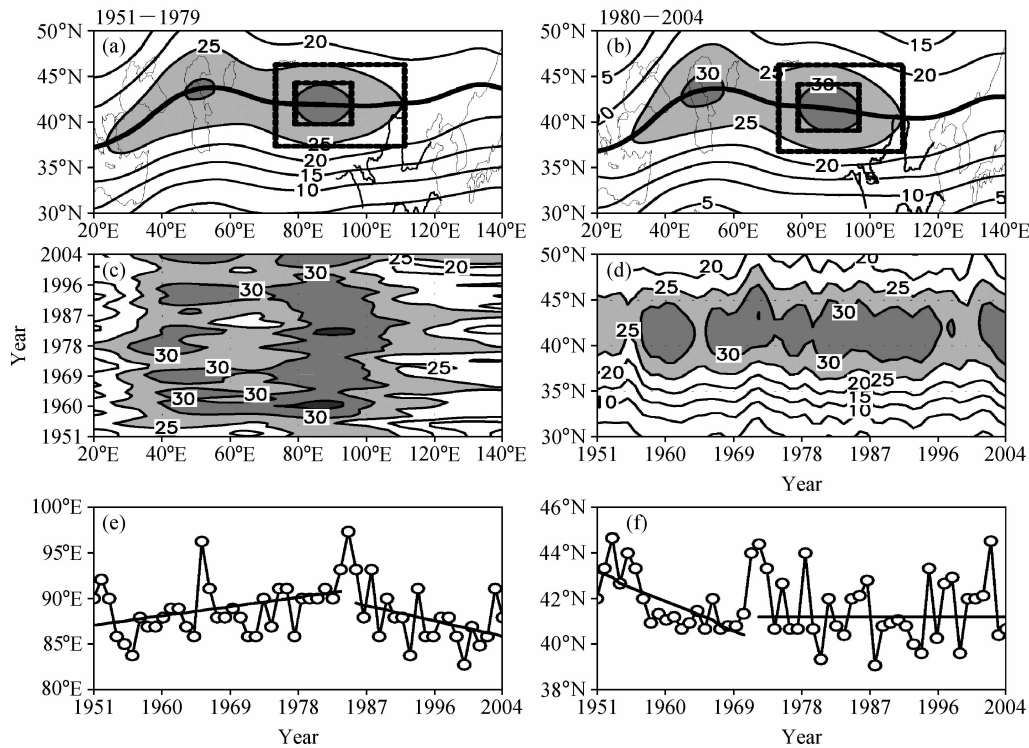


图1 夏季7~8月东亚副热带高空西风急流的(a、b)年代际和(c、d)年际变化(单位: m/s)以及急流中心(e)经度、(f)纬度。阴影: $u \geq 25$ m/s; (a、b)粗线: 急流轴, 方框: 急流区; (c) $38^{\circ}\text{N} \sim 43^{\circ}\text{N}$ 平均; (d) $80^{\circ}\text{E} \sim 95^{\circ}\text{E}$ 平均

Fig. 1 (a, b) Interdecadal and (c, d) interannual variations of the East Asia subtropical Westerly Jet (EAWJ) in Jul and Aug and its core (e) longitude and (f) latitude. Shading: $u \geq 25$ m/s; (a, b) thick solid line: mean westerly jet axis, rectangle: EAWJ; (c) $38^{\circ}\text{N} \sim 43^{\circ}\text{N}$ average; (d) $80^{\circ}\text{E} \sim 95^{\circ}\text{E}$ average

$-1.08^{\circ}/10 \text{ a}$, 气候趋势系数为 0.71, 通过 0.05 的信度检验。急流中心经过 70 年代初期短暂的明显向北移动后(约 3°N), 1980 年后再一次整体向南撤退, 并且所在纬度位置相对于 1951~1970 年间的位置略微偏南。对比急流位置空间变化可以看到, 急流中心位置向西移动的趋势开始于 80 年代中期并一直持续至今, 与同时段东亚夏季风减弱趋势相一致, 而从 70 年代末开始急流中心向南偏移, 尤其是 80 年代末到 90 年代初最为显著。

综合对比急流位置、形态的东西向和南北向变化特征, 可以看出东亚副热带西风急流位置和形态在 1975~1980 年间为一个转折期, 在其前面的 20 年间急流位置偏北, 急流中心有向东伸展的趋势, 急流中心维持在 $80^{\circ}\text{E} \sim 100^{\circ}\text{E}$ 之间, 强度较弱; 而在 1980 年前后急流强度增强, 自此以后急流中心逐渐向西移动的同时伴随有西风急流中心向南偏移。

3.2 华北和长江中下游夏季降水的年际变化特征

图 2a、b 为 1951~2004 年华北和长江中下游

夏季降水距平百分率的年际变化。从图 2a 可以看出 1951~2004 年华北降水距平百分率有显著下降的趋势, 气候趋势系数为 0.37, 气候倾向率为 $-0.055/10 \text{ a}$, 通过 0.05 的信度检验; 从 Mann-Kendall 法统计量 UF 曲线 (UF 为标准正态分布, 它是按时间序列计算出的统计量序列) 变化 (图 2c) 来看, 1978 年以后华北降水有下降趋势, 其中 1984 年以后下降趋势显著 (通过 0.05 信度检验), 从统计量 UB 曲线 (UB 为 UF 的反序列) 变化来看不同时期的变化趋势, 1951~1976 年降水有增加的趋势, UF 和 UB 曲线靠近 0 线的交点为 1977 年, 因此, 在 1977 年前后华北降水发生了突变, 这与急流向西移动的转折时期基本一致。相反, 1951~2004 年长江中下游 6~7 月降水距平百分率有显著上升的趋势, 气候趋势系数为 0.38, 气候倾向率为 $0.063/10 \text{ a}$, 通过 0.05 的信度检验; 从 MK 法统计量 UF 曲线变化 (图 2d) 来看, 1955~1976 年有下降趋势, 1979~2004 年有上升趋势, 1980 年

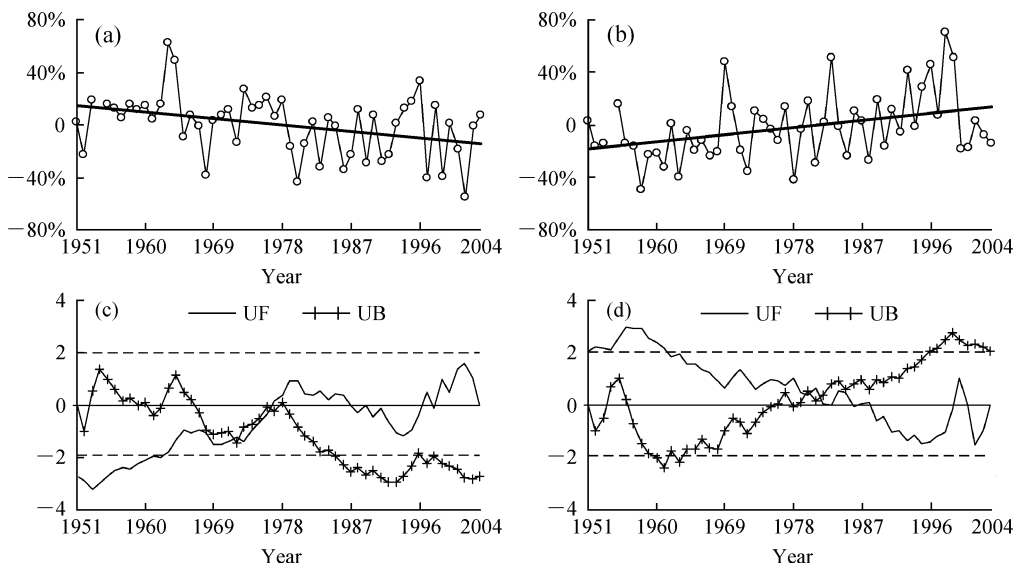


图2 (a、c) 华北地区和 (b、d) 长江中下游地区夏季降水距平百分率的年际变化 (a、b) 及 Mann-Kendall 统计量曲线 (c、d)。(a、b) 粗线为线性趋势; (c、d) 虚线为 $\alpha=0.05$ 显著性水平临界值

Fig. 2 (a, b) Interannual variation of summer precipitation anomaly percentage and (c, d) its Mann-Kendall (MK) test in (a, c) North China and (b, d) the middle-lower reaches of the Yangtze River. Thick lines in (a, b) denote the linear trends; dashed lines in (c, d) are the thresholds of statistical significance at the 5% level

为长江中下游 6~7 月降水的突变点。对比华北地区夏季 7~8 月降水量距平百分率和长江中下游 6~7 月降水量距平百分率的变化曲线, 可以看到二者呈反位相变化, 相关系数为 -0.24 , 在 1976~1980 年间先后发生突变, 1980 年以后, 长江中下游和华北夏季降水“南涝北旱”的分布特征明显。从历年夏季降水距平百分率的量值来看, 华北地区在 1957~1964 年为显著多雨时期, 而在 1980~1987 年、1997~2002 年则为相对少雨期; 长江中下游地区在 1956~1963 年间为少雨期, 在 1992~1999 年为多雨期。此外, 从图 2c 可以看出, 华北降水在 60 年代中后期出现转折, 急流南北位置在 1970 年出现转折 (图 1f), 而长江中下游降水在 70 年代中后期出现转折, 与急流东西位置在 80 年代初期出现转折的时间一致。因此, 60 年代末期急流中心南北位置转折是华北降水由偏多转向减少趋势的强信号, 而急流中心的東西位置变化时期正好是长江中下游降水由偏少转向显著增加的转折期。

中国东部的雨带是随季节变化而由南向北逐步推进的过程, 从气候上来看, 6 月中下旬长江中下游梅雨开始, 平均持续 20 天左右, 梅雨结束后, 雨带将继续推进到华北, 于 7 月中旬华北雨季开始。为了进一步了解中国东部地区雨季的年际变化特点

及雨季开始和结束的变化规律, 本文根据华北地区和长江中下游地区候平均降水量与年平均降水量比值的累计频率达到 0.86 时, 分别确定华北雨季和长江中下游梅雨起讫, 并绘出华北雨季和长江中下游梅雨起讫的时间演变图及其频数分布 (图 3)。在 1951~1979 年间, 华北雨季开始和结束时间平均值分别为 38.5 候和 45.8 候, 雨季平均长度为 8 候, 而 1980~2004 年则分别为 39.1 候和 44.2 候, 雨季平均长度为 6 候, 雨季平均长度缩短了 2 候。同时, 从 1980 年之前和之后华北雨季起讫的频数百分率对比可见, 1980 年后华北雨季开始时间推迟而结束时间提前, 使得华北雨季持续时间缩短。1951~1979 年长江中下游梅雨起讫平均时间分别为 34.9 和 36.6 候, 梅雨期平均长度为 3 候, 1980~2004 年长江中下游梅雨起讫平均时间则为 33.9 和 37 候, 梅雨期平均长度为 4 候。由此可见, 1980 年前梅雨开始晚, 梅雨期较短, 其后梅雨开始日期提前而结束日期变化不大, 梅雨期长度增加了 1 候, 表明 80 年代初到 90 年代末梅雨期有延长的趋势。因而, 长江中下游梅雨期延长和华北雨季缩短更有利于形成“南涝北旱”的降水分布形势。

3.3 急流中心位置年际变化

3.2 节的分析结果表明, 华北雨季在 1980 年前

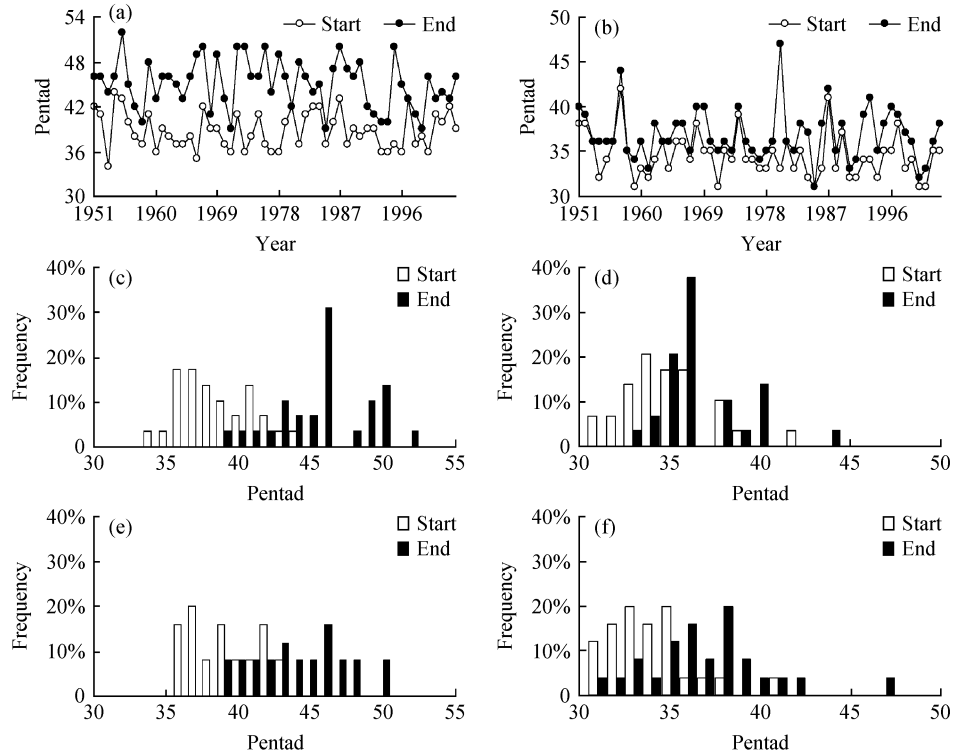


图3 (a、c、e) 华北雨季和 (b、d、f) 长江中下游梅雨起讫的年际变化 (a、b) 及其频数百分率 (c~f): (c、d) 1951~1979 年; (e、f) 1980~2004 年

Fig. 3 (a, b) Interannual variations of start and end of (a, c, e) rainy season in North China and (b, d, f) Meiuyu in the middle-lower reaches of the Yangtze River and (c-f) their frequency percentages; (c, d) 1951-1979; (e, f) 1980-2004

开始早、结束晚,雨季延长,而后则开始晚、结束早,雨季变短;长江中下游梅雨变化趋势则与此相反,在1980年前开始晚、结束早,梅雨期短,而其后梅雨提前且梅雨期变长,从而易形成南涝北旱的降水分布形势。为了进一步了解华北雨季和长江中下游梅雨期长短与高空西风急流在中高纬度维持时间的关系,分别选取同期急流气候平均态位置〔即(30°N~50°N, 80°E~100°E)和(30°N~50°N, 120°E~140°E)〕为关键区,分析急流在中高纬度维持时间的年际变化。定义在区域(80°E~100°E)内西风急流中心所在的纬度大于等于40°N,且急流中心风速 $u \geq 30$ m/s,并有连续两候及以上,称第一候为急流对应华北雨季开始候,而急流中心开始向南撤退的候为对应华北雨季结束候。同理,在区域(120°E~140°E)内急流北跳到35°N~40°N之间并维持,称第一候为急流北跳候,对应着长江中下游入梅候,急流继续北跳到40°N以北,此候对应梅雨结束候,并将相应的结果绘制成图(图4)。由图4a可知,急流北跳南撤时间有着明显的

年际变化特征,在1980年前急流北跳早、南撤晚,急流维持时间长,而其后北跳晚、南撤早,急流维持时间缩短;急流北跳南撤时间与华北雨季开始结束时间序列的相关系数分别是0.59和0.48,均通过0.01的信度检验。由此可见,急流北跳早(晚),华北雨季开始也早(晚),急流南退早(晚),华北雨季结束也早(晚);急流北跳南退时间要比华北雨季起讫提前1~2候。东亚(120°E~140°E)高空西风急流中心位置北跳及再次北跳在1980年前是入梅晚出梅早,梅雨期偏短;而后则梅雨期偏长。长江中下游梅雨起讫时间序列与同期急流中心南北位置的相关系数分别为0.46和0.55(通过了0.01的信度检验)。

4 急流位置、形态变化影响“南涝北旱”降水异常分布的机理

根据上面分析结果表明,东亚副热带西风急流位置、形态在1975~1980年间为一个转折期,在其前面的20年间急流偏北,覆盖范围较小,东西

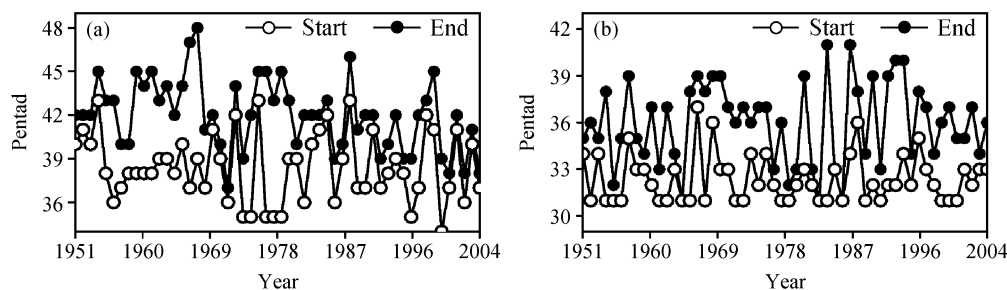


图4 东亚副热带西风急流中心位置年际变化: (a) 华北, (b) 长江中下游

Fig. 4 Interannual variations of the EAWJ core locations; (a) North China; (b) the middle-lower reaches of the Yangtze River

位置稳定;而在1980年以后急流中心逐渐向西移动的同时伴随着西风急流中心位置的向南移跳跃。与此对应的中国东部地区降水形势则为:华北在1957~1964年为显著多雨时期,而在1980~1987年、1997~2002年则为相对少雨期。因此,本文将利用同期高低空急流耦合、中低层水汽通道对比来分析高空西风急流对形成南涝北旱降水分布形势的影响。

4.1 华北地区夏季降水异常时期西风急流位置、形态特征对比

根据3.2节的分析结果,华北地区在1957~1964年为显著多雨时期,而在1980~1987年、1997~2002年则为相对少雨时期。图5给出了华北地区夏季降水异常(多雨和少雨)时期全国降水距平百分率和同期西风急流空间分布。1957~1964年,华北地区夏季平均降水量较常年同期偏多2成以上,长江流域及以南地区较常年偏少,尤其是长江中下游地区更为显著,中国西北大部分地区主要以偏少为主(图5a)。1980~1987年,华北地区夏季平均降水较常年同期偏少1~2成,而长江流域特别是中下游较常年偏多(图5c)。1997~2002年,以长江为界的中国北方大部分区域降水偏少,其中华北地区夏季平均降水量较常年偏少2~3成,长江以南地区较常年同期偏多3~5成,尤其是华南中北部地区更为明显(图5e)。对比1980~1987年和1997~2002年降水距平百分率的空间分布,自80年代以来,中国北方地区夏季降水量减少趋势明显,降水偏少的区域向南扩展,容易引发大范围严重少雨事件,同时南方同期降水量将显著增加,易发生洪涝,加重了东部南涝北旱的降水分布形势。对比1957~1964年多雨期和1980~1987年少雨期东亚副热带西风急流的位置可以发现,1957

~1964年间东亚副热带西风急流偏西(位于 100°E 以西),西风急流中心区东侧位于河套地区以西 10°E 的地区,急流外围则在河套北部,急流主体呈东西走向,位置偏北,华北处在急流出口南侧。而1980~1987年西风急流形态呈西北-东南走向,急流分裂成两段,东段西风急流中心位置明显向东伸(东侧位于 110°E),急流轴线南撤到 40°N 附近的河套地区,25 m/s等风速线覆盖了华北大部分地区。从纬向风距平值的空间分布可见,在中纬地区西风较常年偏强,偏强3 m/s以上。而华北地区另一段相对少雨期1997~2002年的急流东西位置和形态与前者有显著差异(图5f),急流范围和强度明显减小,急流中心区域呈南北向分布,中心位置西移到 90°E 以西,急流中心区域和外围次大风速区域均远离华北地区,急流中心轴线北进至 42°N 附近,急流向西移动的幅度比北进显著。综上所述,当急流主体显著向东伸,急流中心轴线南撤至河套北部边缘时,华北地区被急流覆盖,对应着华北地区少雨期;当急流减弱西移并远离华北地区时,也对应华北地区少雨期。因此,急流位置与华北地区降水多寡的对应关系不仅仅要考虑急流中心的南北向移动,还需要综合分析急流位置和形态的纬向变化特征,急流位置显著西移也可能形成华北地区少雨的高层环流形势。

4.2 高低空急流耦合

在1957~1964年华北地区多雨期间,200 hPa高空西风急流呈纬向分布,急流东侧位于 100°E 附近。在850 hPa等压面上有一支强的西南低空急流,低空急流一直延伸到 46°N 附近。强的气流辐合区主要集中在华北地区,长江流域为辐散区。在1980~1987年华北地区少雨期间,急流偏南,急流主体东伸到达河套西北侧。从850 hPa风场分布来

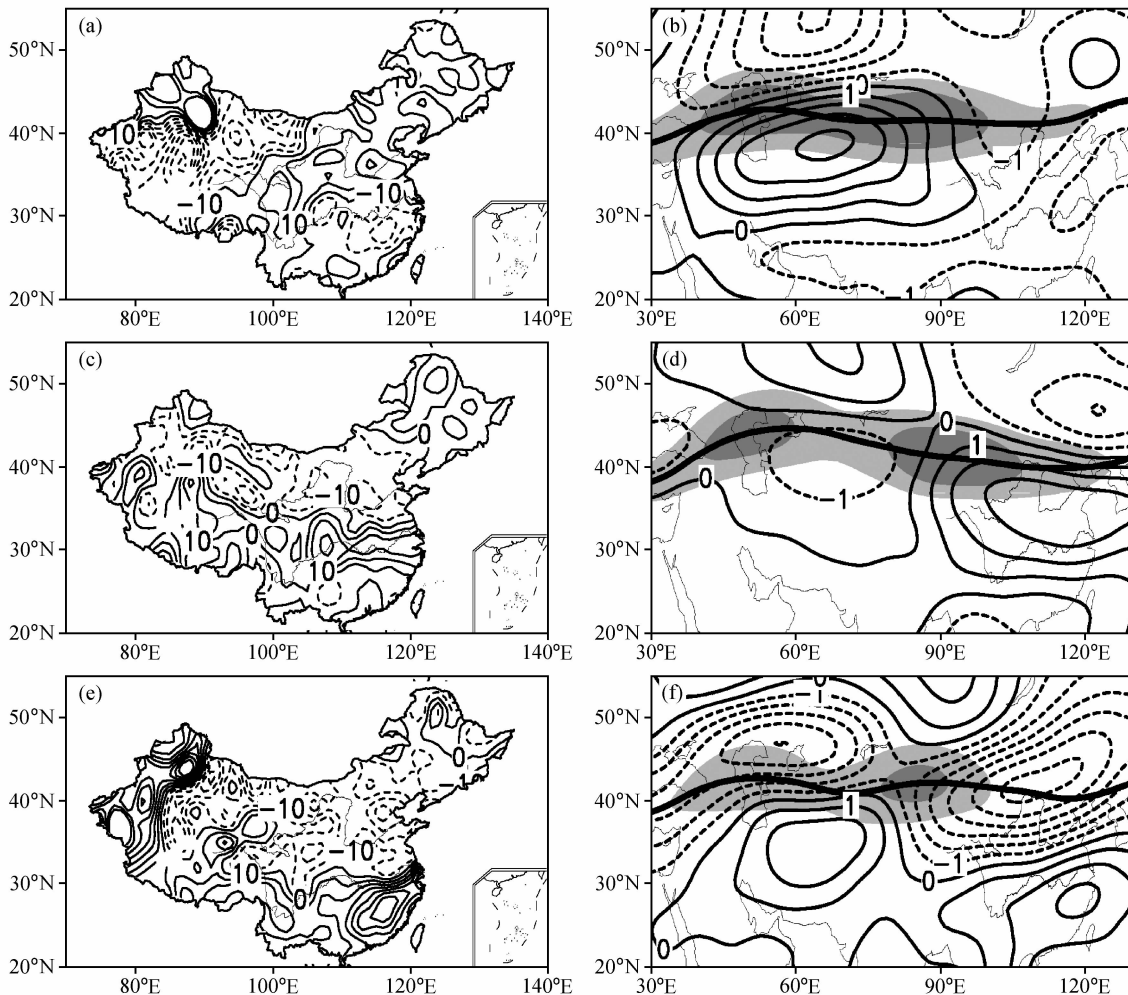


图5 华北降水 (a、b) 偏多和 (c~f) 偏少时期合成的 (a、c、e) 降水距平百分率 (%) 和 (b、d、f) 200 hPa 纬向风距平 (单位: m/s): (a、b) 1957~1964 年; (c、d) 1980~1987; (e、f) 1997~2002。阴影为 $u \geq 25$ m/s; 粗线为急流轴

Fig. 5 Composite distributions of (a, c, e) the precipitation anomaly percentage (%) and (b, d, f) 200-hPa zonal wind anomaly (m/s) during the (a, b) wet and (c~f) dry periods in North China: (a, b) 1957-1964; (c, d) 1980-1987; (e, f) 1997-2002. Shading: $u \geq 25$ m/s; thick solid line: the jet axis

看, 辐合区与长江走势一致, 形成了一条沿长江分布的低空风场辐合带, 而华北地区无低空风场辐合区, 相反却是辐散区, 无高低空急流耦合, 不利于华北地区产生降水 (图 6c)。对比 1997~2002 年与 1980~1987 年的华北地区两个典型少雨时期的环流形势可见, 其环流形势差异显著, 1997~2002 年间, 高空急流整体减弱偏北 (在 40°N 以北), 急流主体和外围已经西移到 100°E 以西地区, 远离华北地区。同样, 也无高低空急流耦合, 在 850 hPa 风场上华北地区仍为辐散区, 而长江流域及以南区域为风场辐合。因此, 当高空急流偏强时, 高低空急流耦合和高空急流南北位置是主导华北地区降水异

常的重要动力因子; 而在急流偏弱时, 急流显著西移和无高低空急流耦合是造成华北地区少雨的重要环流因素。综合来看, 1957~1964 年华北地区为显著多雨时期, 而 1980~1987 年和 1997~2002 年华北地区均处于显著少雨时期, 夏季中国东部北涝南旱和南涝北旱降水分布形势与高空西风急流强度和位置及高低空急流耦合有着密切联系。从水汽输送来看 (图 6b、d、f), 华北地区多雨时, 华北地区水汽含量大, 并且不断有水汽从中国东部和南边海洋上空输送到此区, 则华北地区有充足的水汽条件, 华北地区降水偏多。而华北地区少雨时, 从周围地区输送到华北地区的水汽通量较小, 从周围输

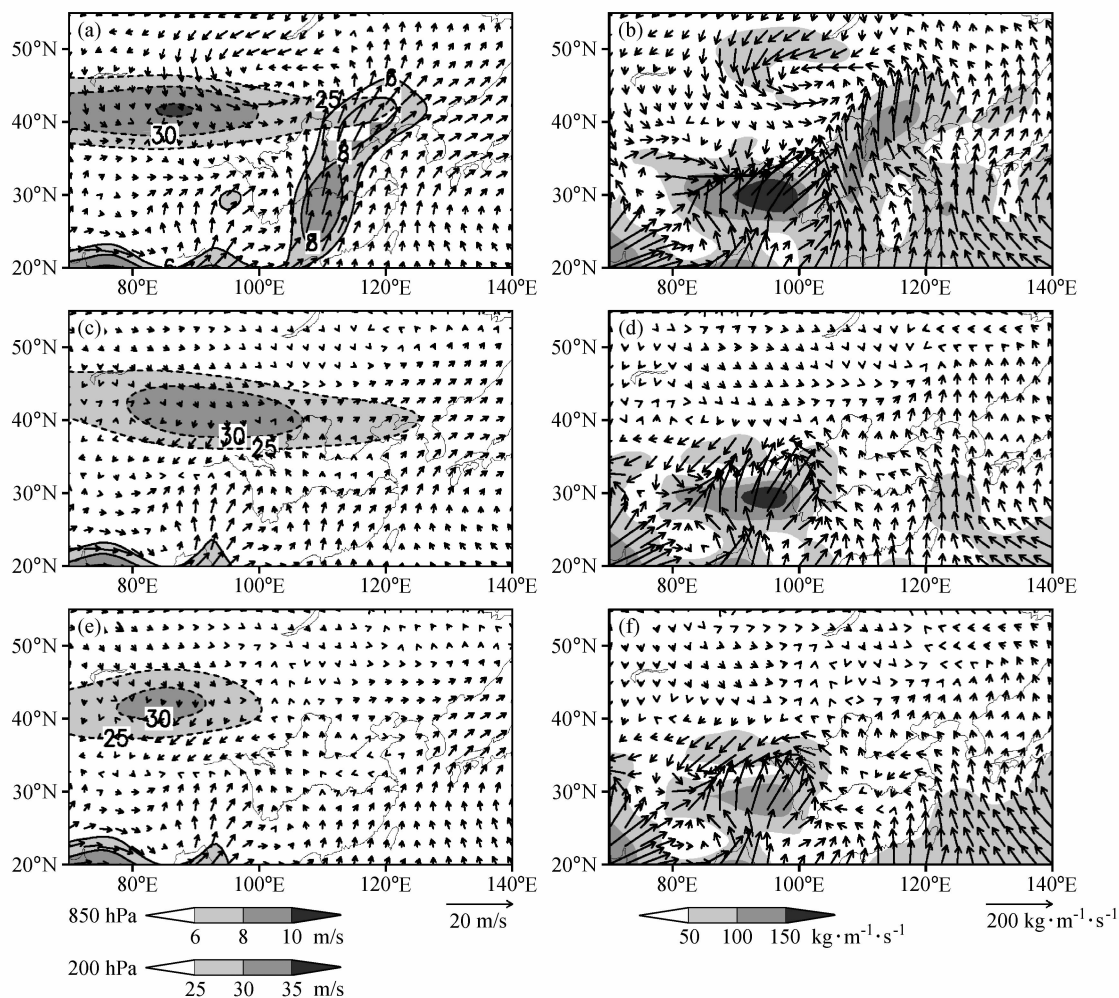


图6 同图5, 但为(a、c、e) 850 hPa合成风和(b、d、f) 整层水汽通量。(a、c、e) 虚线(实线)包围的阴影表示200 hPa(850 hPa)急流区;(b、d、f) 阴影为水汽通量 $\geq 50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for (a, c, e) 850-hPa composite wind and (b, d, f) water vapor flux. The shaded areas with dashed (solid) lines are 200-hPa upper level (850-hPa low level) jet in (a, c, e); the areas with water vapor fluxes larger than $50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ are shaded in (b, d, f)

送过来的水汽主要是集中在长江流域及以南地区, 于是, 华北地区无充足的水汽条件供应, 华北地区降水偏少。

4.3 平均经向环流特征

图7给出了华北地区1957~1964年多雨期和1980~1987、1997~2002年少雨时期平均经向风剖面 and 相应的垂直环流剖面。从1957~1964年经向风的分布来看, 低层南风高值区位于 $38^{\circ}\text{N} \sim 43^{\circ}\text{N}$, 高层南风高值区位置比低层略偏北, 南风强度较强, 其风速均在 4 m/s 以上。对比分析1980~1987年和1997~2002年经向风的分布可知, 低层南风的高值区前者比后者偏北显著, 即1980~1987年位于 30°N 附近, 1997~2002年位于 30°N 以南

地区。在 300 hPa 以上的高层, 35°N 以北地区1980~1987年南风风速比1997~2002年偏强显著。高层北风的高值区1980~1987年和1997~2002年分别位于 30°N 附近和 25°N 以南。由此可见, 多雨时期在华北地区从低层到高层均为强的经向风辐合, 而两个少雨时期在华北地区从低层到高层均为经向风辐合上升运动偏弱或辐散运动偏强, 强的经向风辐合上升区位置偏南。1957~1964年在 $35^{\circ}\text{N} \sim 41^{\circ}\text{N}$ 从低层 800 hPa 到高层对流层顶均有较强的上升运动, 辐合气流偏强, 对流旺盛。对比分析华北地区两个少雨时期垂直环流可知, 其垂直环流存在显著的差异。1980~1987年气流强辐合上升区位于 30°N 附近, 对流旺盛, 从 700 hPa 到

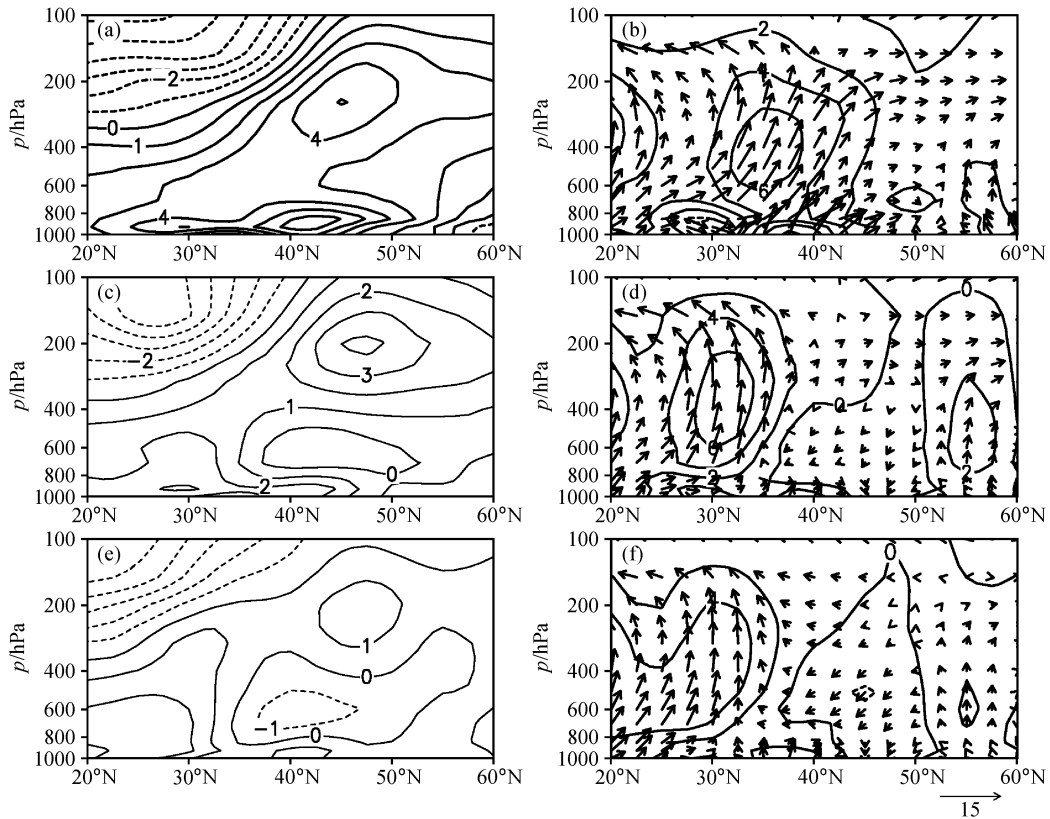


图7 同图5, 但为 $110^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$ (a, c, e) 平均经向风 (单位: m/s) 和 (b, d, f) 垂直环流。(b, d, f) 等值线为垂直速度 (单位: 10^{-2}m/s)

Fig. 7 Same as Fig. 5, but for (a, c, e) the meridional wind (m/s) averaged over $110^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$ and (b, d, f) the vertical circulation (arrows). Isolines are vertical velocities (10^{-2}m/s) in (b, d, f)

150 hPa 之间对流层均有显著辐合上升运动, 强度偏强。而在 35°N 以北地区无明显辐合运动, 上升运动微弱, 这种垂直环流形势与同期中国东部降水距平百分率空间分布具有一致性。1997~2002 年强辐合上升区主要位于 30°N 以南地区, 从低层到高层也均有明显的辐合上升运动, 其强度偏强, 而在 35°N 以北无明显辐合上升运动, 这样的垂直环流分布与同期中国东部降水距平百分率的南北位置分布相一致 (图 5e、f)。

5 结论

本文利用 54 年 (NCAR/NCEP) 再分析资料和同期日降水观测资料, 分析东亚副热带西风急流轴位置的变化趋势及其对中国东部夏季降水分布形势的影响, 得到了以下结论:

(1) 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, 在其前 20 年间急流位置偏北, 且维持在 $80^{\circ}\text{E}\sim 100^{\circ}\text{E}$ 之间, 覆盖

范围较小; 而在 1980 年前后急流增强, 自此以后, 急流中心逐渐向西移动的同时伴随有西风急流中心向南偏移。

(2) 华北地区夏季降水量呈明显年代际变化特征。1951~2004 年华北夏季降水有显著减小的趋势, 特别是 1980 年以来, 华北雨季降水量和降水强度明显减弱, 雨季开始推迟、雨季长度变短。而长江中下游地区则相反, 梅雨降水量和降水强度增加, 入梅提前, 梅雨期延长。这表明 1980 年以来夏季中国东部形成南涝北旱的降水分布形势。

(3) 华北典型少雨时期 (1980~1987 年、1997~2002 年) 的高空环流形势表明: 东亚副热带西风急流位置与华北夏季降水多寡的对应关系不仅仅体现在急流中心的南北向移动 (1980~1987 年), 而且急流位置显著西移同样能形成华北地区少雨的高层环流形势 (1997~2002 年)。因而, 在讨论急流位置与华北地区夏季降水异常的关系时, 不仅要考虑急流南北变化, 还需要分析急流的東西位置和形

态的变化。

(4) 1957~1964 年华北地区为典型多雨时期, 西风急流呈纬向分布, 在华北地区有高低空急流耦合, 强的辐合上升运动区刚好处于华北地区, 并有充足的水汽条件供应, 使得华北地区降水增加而长江流域及以南少雨。而 1980~1987 年和 1997~2002 年华北地区为典型少雨时期, 1980~1987 年急流中心位置偏南和 1997~2002 年急流位置显著偏西, 在华北地区均无高低空急流耦合的环流形势, 水汽辐合区位于长江流域, 强辐合上升区位置在 30°N 以南区域, 有利于江南地区降水增加而华北地区少雨。这表明中国东部北涝南旱或南涝北旱的降水分布形势与高空西风急流强度和位置、高低空急流耦合、中低层水汽输送及垂直环流有着密切联系。

本文在对夏季 7~8 月东亚副热带西风急流位置变化特征分析的基础上证实了东亚副热带西风急流位置在 1970 年代末出现转折, 急流中心逐渐向西移动同时伴有向南移趋势, 并讨论了急流位置和形态变化对华北地区降水异常的影响及其机理。但上述工作尚未涉及到急流位置变化的原因及影响因素, 拟在以后的工作中做进一步研究。

参考文献 (References)

董敏, 朱文妹, 魏凤英. 1987. 欧亚地区 500 hPa 纬向风特征及其与中国天气的关系 [J]. 气象科学研究所院刊, 2 (2): 166-173.
Dong Min, Zhu Wenmei, Wei Fengying. 1987. The characteristics of 500 hPa zonal wind in the Asian region and their relation with the weather [J]. Journal Chinese Academy of Meteorological Sciences (in Chinese), 2 (2): 166-173.
董敏, 余健锐, 高守亭. 1999. 东亚西风急流变化与热带对流加热关系的研究 [J]. 大气科学, 23 (1): 62-70. Dong Min, Yu Jianrui, Gao Shouting. 1999. A study on the variations of the westerly jet over East Asia and its relation with the tropical convective heating [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23 (1): 62-70.
况雪源. 2006. 东亚副热带西风急流季节、年际变化特征及其热力机制和气候效应研究 [D]. 南京大学博士学位论文, 159pp. Kuang Xueyuan. 2006. Study on the seasonal and interannual variations of the East Asian subtropical westerly jet and its thermal mechanism and climate effects [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese). Nanjing: Nanjing University, 159pp.
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. The impacts of position abnormalities of the East Asia subtropical westerly jet on summer precipitation in the middle-lower reaches of the Yangtze River [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 25 (3): 382-389.
Lau K-M, Kim K-M, Yang S. 2000. Dynamical and boundary forcing characteristics of regional components of the Asian summer monsoon [J]. J. Climate, 13 (14): 2461-2482.
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 Jough-Tai, Lin Shi-Zhei, 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.
Liang Pingde, Liu Aixia. 1994. Winter Asia jetstream and seasonal precipitation in East China [J]. Adv. Atmos. Sci., 11 (3): 311-318.
梁平德, 段丽瑶, 周鸣盛, 等. 2006. 华北盛夏旱涝的环流型特征及其在初夏的预兆 [J]. 气象学报, 64 (3): 385-391. Liang Pingde, Duan Liyao, Zhou Mingsheng, et al. 2006. Circulation patterns for midsummer drought/flood in North China and their early summer precursors [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 64 (3): 385-391.
Liang X Z, Wang W C. 1998. Associations between China monsoon rainfall and tropospheric jets [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 124: 2597-2623.
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气候异常影响 [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.
陆日宇. 2003. 华北汛期降水量年代际和年际变化之间的线性关系 [J]. 科学通报, 48 (7): 718-722. Lu Riyu. 2003. The line-relation of interdecadal and interannual variations of rainfall in North China [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 48 (7): 718-722.
施能, 陈家其, 屠其璞. 1995. 中国近 100 年来 4 个年代际的气候变化特征 [J]. 气象学报, 53 (4): 431-439. Shi Neng, Chen Jiaqi, Tu Qipu. 1995. 4-phase climate change features in the last 100 years over China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 53 (4): 432-439.
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 Shiyang, 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.
魏凤英. 1999. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 269pp. Wei Fengying. 1999. The Modern Climatic Statis-

- tical Diagnosis and Prediction Technology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 269pp.
- Xie Zhiqing, Du Yin, Jiang Aijun, et al. 2005. Climatic trends of different intensity heavy precipitation events concentration in China [J]. *J. Geographical Sci.*, 15 (4): 459–466.
- 严中伟, 季劲均, 叶笃正. 1990. 60年代北半球夏季气候跃变 I. 降水和温度变化 [J]. *中国科学 (B辑)*, 33: 97–103. Yan Zhongwei, Ji Jinjun, Ye Duzheng. 1990. Northern hemispheric climate jump in the 1960s. I. Precipitation and surface air temperature variations [J]. *Science in China (Ser. B) (in Chinese)*, 33: 97–103.
- 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 Shiyang, Li Maichun. 1958. The catastrophe of general circulation in June and October [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 29 (4): 250–263.
- Yu Rucong, Wang Bin, Zhou Tianjun. 2004. Tropospheric cooling and summer monsoon weakening trend over East Asia [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 31: L22212, doi: 10.1029/2004GL021270.
- 宇如聪, 周天军, 李建, 等. 2008. 中国东部气候年代际变化三维特征的研究进展 [J]. *大气科学*, 32 (4): 893–905. Yu Rucong, Zhou Tianjun, Li Jian, et al. 2008. Progress in the studies of three-dimensional structure of interdecadal climate change over eastern China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (4): 893–905.
- Zhang Yaocun, Kuang Xueyuan, Guo Weidong, et al. 2006. Seasonal evolution of the upper-tropospheric westerly jet core over East Asia [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33: L11708, doi: 10.1029/2006GL026377.
- 赵振国. 1999. 中国夏季旱涝及环境场 [M]. 北京: 气象出版社, 10–15. Zhao Zhenguo. 1999. Summer Drought and Flood in China and Environmental Field (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 10–15.