

夏季热带东风急流的结构、变化及其 与亚非季风降水的关系

陈桦^{1, 3} 丁一汇² 何金海³

1 江苏省常州市气象局, 常州 213001

2 国家气候中心, 北京 100081

3 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

摘 要 使用 NCEP/NCAR 再分析资料研究热带东风急流 (TEJ) 的长期变化及其与亚非降水分布的关系。用 150~100 hPa 纬向风代表 TEJ, 并定义了一个指数 (TEJI) 来度量急流的变率。分析发现, TEJ 主要覆盖了热带地区从日界线向西延伸到非洲西海岸的大片地区, 其核心位于 150~100 hPa 印度半岛南部 10°N~15°N, 中心风速超过 30 m/s。急流中线大致位于 70°E, 以东是急流的入口区, 以西是出口区。在入口区急流轴线有两个分支, 南支位于 0°~10°N, 呈西北-东南走向, 北支位于 10°N~20°N, 呈西南-东北走向。TEJ 存在 40~60 天和 20~30 天的季节内振荡周期, 以及 2~4 年和 7~10 年的周期变化。出现暖事件时 TEJ 减弱, 出现冷事件时 TEJ 加强。TEJ 存在明显的年代际变化, 1978 年是其气候突变点, 突变前为强 TEJ 时期, 突变后 TEJ 显著减弱。亚洲和中非的主要降水带、对流区、高层辐散及大尺度上升运动都出现在东风急流入口区的右侧及出口区的左侧, 但出口区西非的情况略显复杂。在急流的入口区和出口区存在两个近于相反的垂直环流, 它们与降水分布密切相关。在急流的入口区, 强 TEJ 年其垂直环流更强, 其右侧的降水也更大; 但在急流的出口区, 强、弱 TEJ 年的垂直环流没有明显差异, 其左侧的降水也没有明显差异。

关键词 热带东风急流 季风降水 垂直环流

文章编号 1006-9895 (2007) 05-0926-11

中图分类号 P425

文献标识码 A

The Structure and Variation of Tropical Easterly Jet and its Relationship with the Monsoon Rainfall in Asia and Africa

CHEN Hua^{1, 3}, DING Yi-Hui², and HE Jin-Hai³

1 Changzhou Meteorological Bureau, Changzhou 213001

2 National Climate Center, Beijing 100081

3 College of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract The long-term variation of the Tropical Easterly Jet (TEJ) and its relationship with the distribution of rainfall in Asian and African monsoon regions are studied using the National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) reanalysis data from 1958 to 2002. TEJ is denoted by 150~100 hPa zonal wind, and an index (TEJI) is defined to measure the variability of TEJ. It is shown that TEJ covers large tropical areas extending from the date line to the west coastal regions in Africa. Its core is located in 10°N~15°N in southern Indian peninsula with the maximal speed larger than 30 m/s, and the mid-line lies around 70°E, its east being the entrance region and its west the exit region. There are two branches of the TEJ axis in the entrance

收稿日期 2006-03-21, 2006-05-19 收修定稿

资助项目 “九五”国家攀登 A 项目“南海季风试验研究 (SCSMEX)”, KLME060201, 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB403607

作者简介 陈桦, 女, 1982 年出生, 硕士, 主要从事季风方面的研究工作。E-mail: vivienchenhua@hotmail.com

region, the southern one in $0^{\circ} - 10^{\circ} \text{N}$ lying northwest - southeast and the northern one in $10^{\circ} \text{N} - 20^{\circ} \text{N}$ lying northeast - southwest. Westerly prevails in the mid-latitudes, while easterly is limited in the lower-latitude areas with its maximal intensity in the layer of $150 - 100 \text{ hPa}$. The zonal wind shear between the upper and lower troposphere is very significant in the Asian - African monsoon regions, but easterly occupies almost the entire troposphere in the tropical oceans.

TEJ has intraseasonal oscillation (ISO) with periods of both $40 - 60$ days and $20 - 30$ days, but the latter is not significant. The disturbance starts to travel eastward and westward from the dateline along $7.5^{\circ} \text{N} - 12.5^{\circ} \text{N}$, and it starts to travel northward from the equator along 70°E . TEJ has interannual variation with periods of $2 - 4$ years and $7 - 10$ years. Generally it is negatively correlated with ENSO: TEJ weakens in warm events and strengthens in cold events. Compared to La Niña years, easterly is weaker in El Niño years. TEJ has obvious interdecadal variation, and 1978 is its climate jump year. It is a strong TEJ period before 1978, and TEJ weakens significantly after the climate jump.

In Asia and central Africa, the primary rainfall, convection, upper divergence and ascending motion appear on the right side of the entrance region and the left side of the exit region of TEJ. However this is not the case in West Africa. There are two opposite vertical circulations in the entrance region and the exit region, which is closely associated with the distribution of rainfall. In the entrance region, the vertical circulation and rainfall in strong TEJ years are stronger than those in weak TEJ years; however, their differences between strong and weak TEJ years are not obvious in the exit region, which may be explained as follows: since the contour is sparser in the exit region than in the entrance region, the decreasing speed of easterly is smaller, then the geostrophic deviation is smaller, and the vertical circulation is weaker. Therefore, it is easily influenced by the vertical circulations produced by other factors, and the differences between strong and weak TEJ years are not obvious in the exit region.

Key words tropical easterly jet, monsoon rainfall, vertical circulation

1 引言

热带东风急流 (TEJ) 是亚洲夏季风系统最重要的组成部分之一, 也是北半球夏季主要的高空环流特征^[1]. TEJ 最早是由 Koteswaram^[2] 在分析 1955 年夏季南亚和邻近北非对流层上层环流时发现的, 他认为 TEJ 的核心层次位于 $150 \sim 100 \text{ hPa}$. 之后, 很多学者对 TEJ 的结构、变化及其与季风区降水的关系进行了研究.

一些研究^[3~5] 指出 TEJ 存在明显的年际变化. Kanamitsu 和 Krishnamurti^[3] 比较了印度干旱年和正常年夏季 TEJ 的强度, 发现其在干旱年夏季较弱; Tanaka^[4] 认为东风急流强度的年际变化与中纬度环流有很强关系; Arkin^[5] 指出南方涛动与 TEJ 的年际变化有关.

TEJ 与降水区的分布有密切关系, Koteswaram^[2] 和曾昭美等^[6] 指出多雨区主要出现在急流入口区的北侧和出口区的南侧. 但 Nicholson 和 Grist^[7] 认为虽然在亚洲及中非情况如此, 但在西非的情况比较复杂: 虽然西非位于出口区, 但其对流活动及降水主要发生在 TEJ 轴线以北, 他们认为

在西非 TEJ 是其北部对流向赤道流出后, 在科里奥利力的作用下向右偏而形成的.

尽管对 TEJ 已有不少研究, 但是仍有许多问题没有解决, 例如 TEJ 的季节内变化及年代际变化至今仍不清楚, 而在年际变化方面, 过去的研究多是讨论个别年份的不同, 没有从气候角度或从与 ENSO 事件的关联方面来探讨这个问题. 另外, 关于东风急流的垂直环流及其与天气的关系还不是很清楚. 本文的主要目的就是试图解决这些问题.

此外, 虽然许多研究指出 TEJ 的核心位于 $150 \sim 100 \text{ hPa}$, 但是在分析 TEJ 的变化及其与其他系统的关系时, 过去的研究都是用单个层次 100 hPa 或者 150 hPa 来代表 TEJ, 甚至有因为过去高层资料稀疏而用 200 hPa 来代表 TEJ. 这样计算的 TEJ 强度是不够准确的, 可能不能真实反映 TEJ 的情况, 因此本文将用 $150 \sim 100 \text{ hPa}$ 两层平均代表 TEJ, 并用 45 年气候资料来研究 TEJ 的变化及其与亚非季风区对流和降水的关系.

本文共分七部分: 第 2 节是资料; 第 3 节简略说明 TEJ 的结构; 第 4 节分析 TEJ 的季节内变化、年际变化和年代际变化; 第 5 节讨论 TEJ 与亚非季

风区对流和降水的关系,并探讨与东风急流相联系的垂直环流;第6节比较两种再分析资料的不同;第7节是结论。

2 资料

本文使用 NCEP/NCAR 再分析资料^[8]以及欧洲中期天气预报中心的 ERA-40 再分析资料^[9]。两种资料都是从 1958 年到 2002 年月平均资料集,格距为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。过去的研究^[10~13]指出,这两种资料存在一定差异,用它们分析同一气象要素时可能会得到不同的结果。

降水是用 CMAP 资料^[14],北极涛动(AO)、太平洋年代际振荡(PDO)和 Niño3.4 海温指数取自 NOAA/CPC。西北太平洋台风发生的位置、强度及频率的数据来自于联合台风警报中心(JTWC)。

文中的主要分析是用 NCEP/NCAR 再分析资料作的,第6节将讨论两种资料的差异。

3 热带东风急流的结构

过去的研究指出东风急流的核心位于 150~100 hPa^[2],因此本文以下的研究均是用 150~

100 hPa 两层平均来代表急流层。从气候平均 150~100 hPa 风场来看(图1),TEJ 主要覆盖了热带地区从日界线向西延伸到非洲西海岸的大片地区,核心位于印度半岛南部 $10^\circ\text{N} \sim 15^\circ\text{N}$,中心风速超过 30 m/s,其两侧是广阔的中纬度西风带。急流的中线大致位于 70°E ,以东是急流的入口区,以西是出口区。由图1可见在入口区急流轴线有两个分支,南支位于 $0^\circ \sim 10^\circ\text{N}$,呈西北-东南走向,北支位于 $10^\circ\text{N} \sim 20^\circ\text{N}$,呈西南-东北走向。急流在入口区分成两支的现象已为过去的研究所指出^[15]。

为了更清楚地讨论 TEJ 的结构,分别作急流层纬向风沿 $10^\circ\text{N} \sim 15^\circ\text{N}$ 、 20°E 、 70°E 、 120°E 的垂直剖面图。由图2a可见东风急流的核心位于南亚上空 150~100 hPa,低层西风最大也位于南亚 925~850 hPa,亚非季风区东西风切变十分明显,亚洲地区东风可向下一直延伸到 400 hPa,非洲的东风甚至能一直延伸到 700 hPa,而在热带海洋上对流层整层几乎全部为东风。由经向剖面图(图2b~d)可见,中纬度为广阔的西风带,东风局限在低纬度地区,东风最强位于印度上空 150~100 hPa,在北半球低纬地区存在纬向风切变,其强度和范围

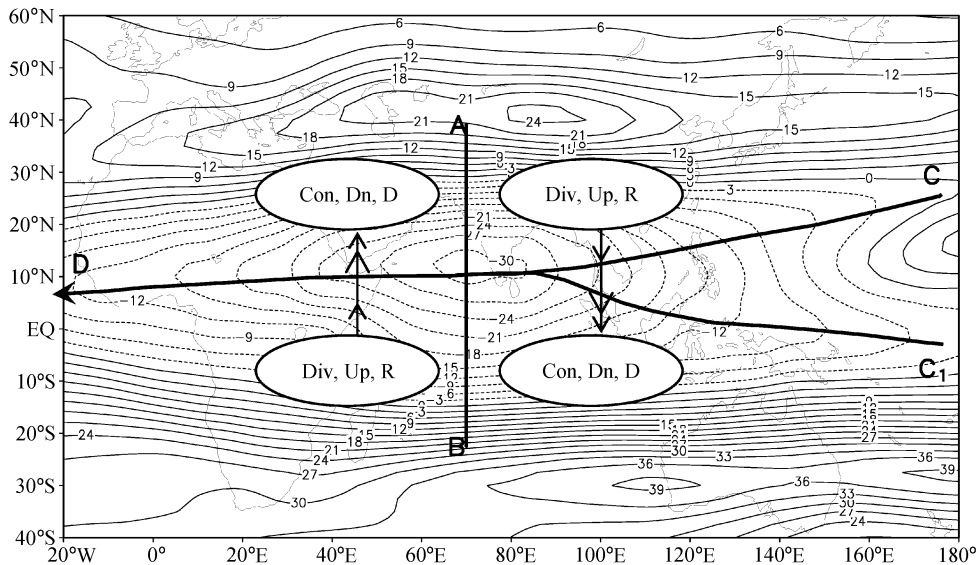


图1 1958~2002年气候平均夏季(JJA)150~100 hPa纬向风(等值线,单位:m/s)以及东风急流的入口区和出口区由于非地转风分量引起的辐合辐散与垂直运动的分布。线段CD、C₁D是TEJ的轴线,AB是急流入口区和出口区的分界线;四个椭圆表示辐合辐散区(Div:辐散,Con:辐合,Up:上升运动,Dn:下沉运动,R:降水,D:干旱)

Fig. 1 JJA (Jun - Aug) climatological mean (1958 - 2002) zonal wind (isolines, units: m/s) averaged for 150 hPa and 100 hPa and the distribution of convergence, divergence and vertical motions induced by ageostrophic wind in the entrance and exit regions of the tropical easterly jet (TEJ). CD and C₁D are TEJ axes, and AB is the demarcation line of the entrance and exit regions. The four ellipses are the convergence and divergence areas (Div: divergence, Con: convergence, Up: upward motion, Dn: downward motion, R: rainfall, D: dryness)

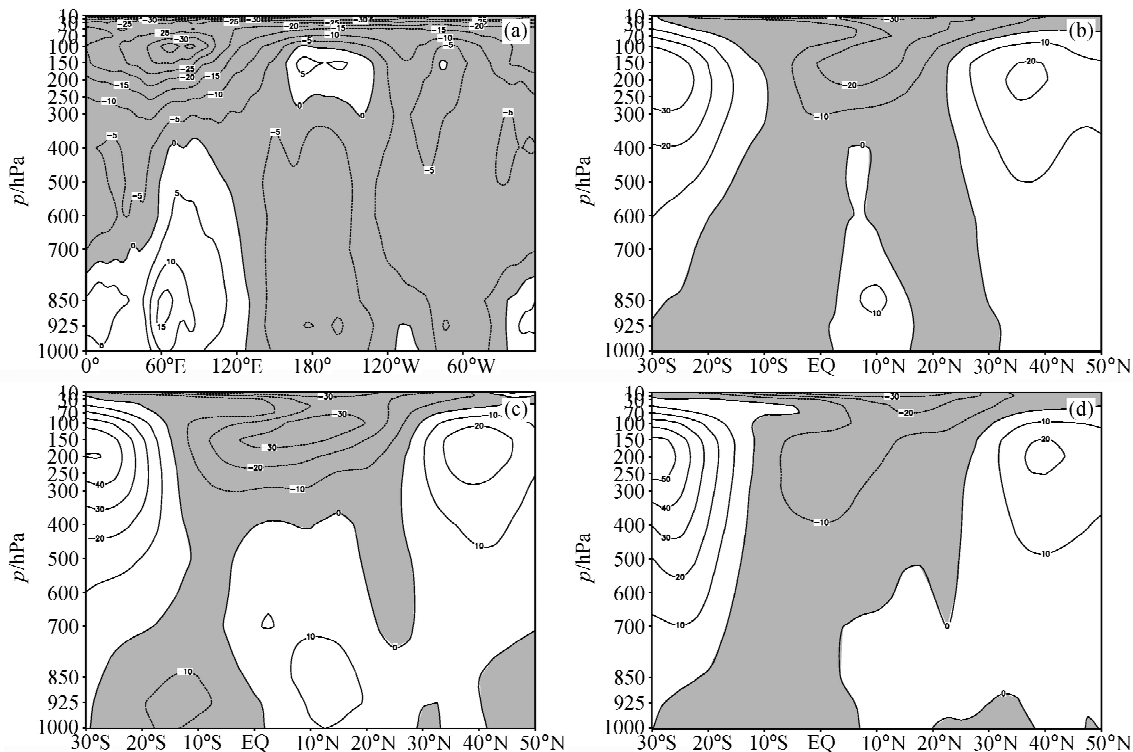


图2 1958~2002年气候平均夏季(JJA)纬向风沿经纬向的垂直剖面图(单位: m/s, 阴影为东风): (a) 10°N~15°N; (b) 20°E; (c) 70°E; (d) 120°E

Fig. 2 Vertical sections of the JJA climatological mean (1958–2002) zonal wind (units: m/s, the easterlies are shaded) along (a) 10°N–15°N, (b) 20°E, (c) 70°E, (d) 120°E

在非洲、印度和东亚的经度上略有不同。

4 热带东风急流的季节内、年际及年代际变化

为了描述 TEJ 核心的变化特征, 我们计算 TEJ 最大值的位置和频率。从 1958 年到 2002 年 45 个夏季, 有 26 个夏季 TEJ 最大值出现在 12.5°N, 有 18 个夏季仅仅向南移到 10°N, 只有 1 个夏季向南移到 7.5°N, TEJ 核心总是在 60°E~82.5°E 内。TEJ 最大值很小的移动, 特别是在经向上很小的移动, 使我们可以建立一个指数 (TEJI) 来度量急流的变率。这个指数定义为夏季 (JJA) 150~100 hPa 纬向风在 (7.5°N~12.5°N, 60°E~82.5°E) 的平均, 该区域覆盖了所有 TEJ 最大值。图 3 是 TEJI 以及亚洲夏季风指数 DHI^[13] 和 WYI^[16] 的标准化时间序列, 其中 $DHI = U'_{850} - U'_{(150+100)}$, $WYI = U'_{850} - U'_{200}$, U'_{850} 、 U'_{200} 分别表示 850、200 hPa 纬向风速距平 (相对气候平均), $U'_{(150+100)}$ 表示 150 hPa 和 100 hPa 平均的纬向风速距平。45 年中有 9 年

TEJI 比气候值高 1 个标准偏差, 定义为 TEJ 强年 (1958、1959、1960、1961、1968、1970、1971、1977 和 1978 年); 有 9 年 TEJI 比气候值低 1 个标准偏差, 定义为 TEJ 弱年 (1972、1983、1989、1990、1992、1993、1995、1997 和 2002 年)。图 3 中可见 TEJ 强年全部在 1978 年之前, 弱年除了 1972 年外全部在 1978 年之后, TEJ 明显减弱。TEJI 与 DHI 的相关系数高达 0.96, 表明亚洲夏季风的减弱实际上就是热带东风急流的减弱, TEJ 的变化基本上可反映亚洲夏季风系统的变化。TEJI 与 DHI 的相关 (0.96) 明显高于与 WYI 的相关 (0.59), 这进一步表明 200 hPa 的东风不能真正反映 TEJ 的变化。

4.1 气候季节内变化

对气候平均 6~9 月逐日的 TEJI 进行小波分析 (图略), 发现存在 40~60 天和 20~30 天的周期, 表明 TEJ 有明显的季节内振荡, 但 20~30 天周期没有通过 95% 显著性检验。分别对急流层纬向风进行 40~60 天滤波和 20~30 天滤波, 再讨论其纬向传播和经向传播 (图 4)。40~60 天模的传

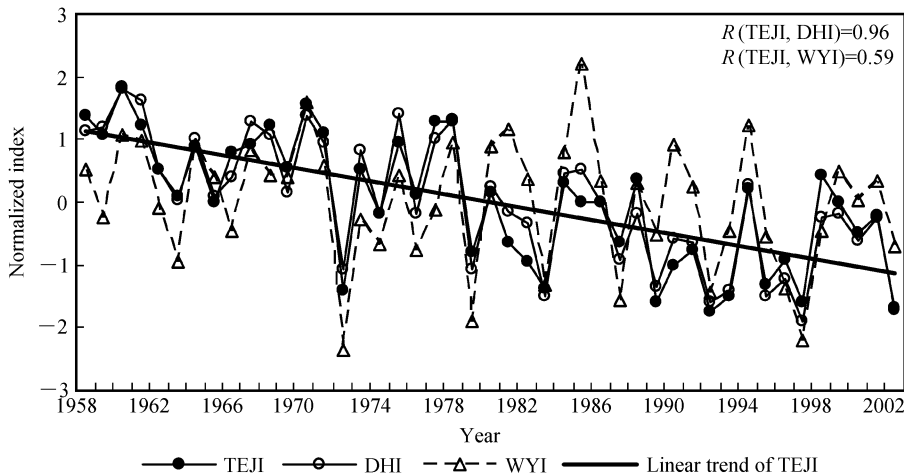


图 3 标准化指数 TEJI、DHI 和 WYI 的时间序列。粗直线是 TEJI 的线性趋势线

Fig. 3 Time series of the normalized indices TEJI, DHI and WYI. The bold solid line is the linear trend of TEJI

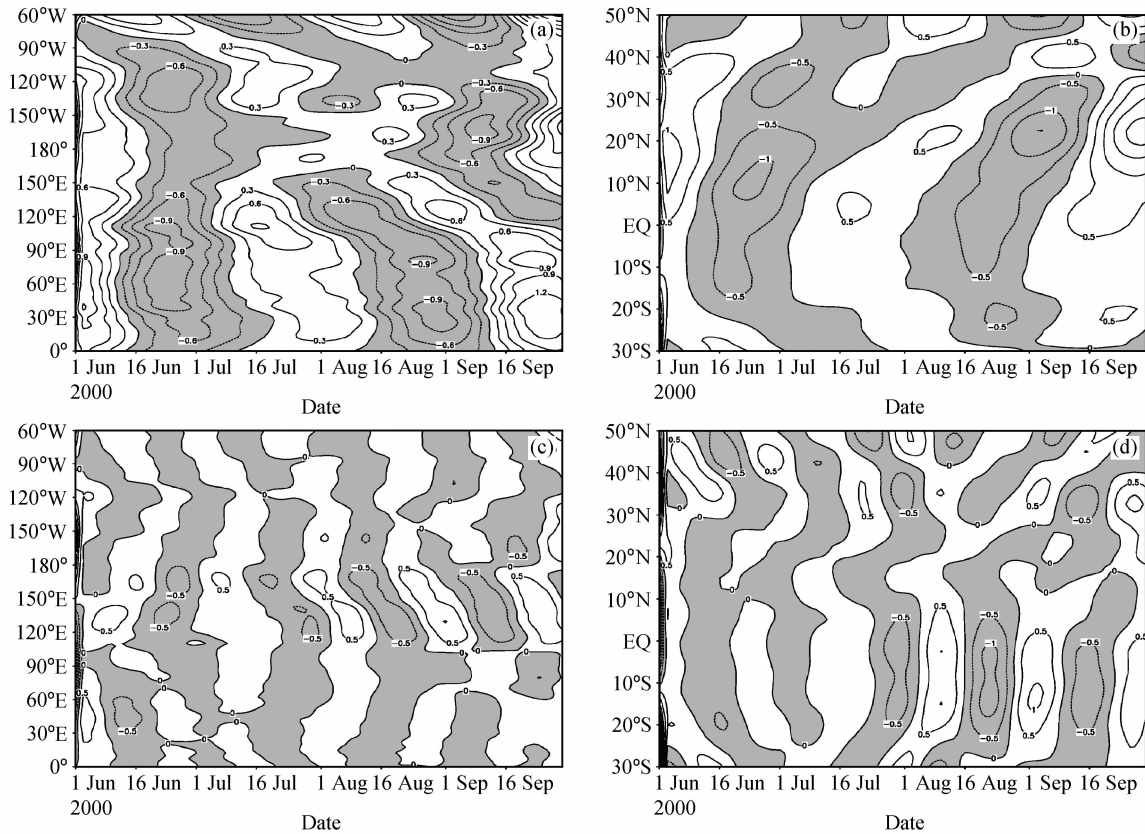


图 4 40~60 天 (a、b) 和 20~30 天 (c、d) 滤波后急流层 150~100 hPa 纬向风的经纬向传播: (a、c) 沿 7.5°N~12.5°N 的纬向传播; (b、d) 沿 70°E 的经向传播

Fig. 4 The zonal and meridional propagations of the zonal wind averaged for 150 hPa and 100 hPa after (a, b) 40 - 60-day and (c, d) 20 - 30-day filtering; (a, c) The zonal propagation along 7.5°N - 12.5°N; (b, d) the meridional propagation along 70°E

播是 2 波型, 沿 7.5°N~12.5°N, 扰动从日界线附近开始向东和向西传播; 在南亚季风区 (沿 70°E), 扰动从赤道开始向北传播。20~30 天模的传播是 4

波型, 其纬向传播和经向传播都不是特别明显, 说明 20~30 天模不是每一年都存在, 其气候季节内变化不明显。

4.2 年际变化

对逐年夏季的 TEJI 进行小波分析 (图略), 发现 TEJI 存在明显的年际变化, 有 2~4 年和 7~10 年的周期。

年际变化的主要周期反映的是 ENSO 循环, 下面我们讨论东风急流与 ENSO 之间的关系。TEJI 和 Niño3.4 海温指数 (45 年) 的相关系数为 -0.41, 通过了 99% 显著性检验, 这表明当赤道中东太平洋海表温度增加, 即出现暖事件时, TEJ 减弱; 相反, 出现冷事件时, TEJ 加强。从 El Niño 年减去 La Niña 年 (El Niño 年和 La Niña 年根据文献[17]定义) 急流层纬向风的差值图 (图略) 可见, 相对于 La Niña 年, El Niño 年的东风急流更弱。

4.3 年代际变化

1976/1977 年北太平洋海表温度及大尺度冬季环流观测到明显的气候跃变^[18], 以下将考察这种气候跃变在热带东风急流方面是否也有响应。为此, 我们使用 Mann-Kendall 方法 (简称 M-K) 检测 TEJI 的突变点 (图 5a), 发现 1958 年到 2002 年间 TEJI 的突变点是 1978 年, 且通过了 95% 显著性检验。由图 5b 可见, 突变后东风急流显著减弱, 存在明显的年代际变化。

由急流层沿其核心纬度的时间剖面 (图 6a) 可见, 急流层具有明显的年代际变化, 非洲、南亚的东风在 20 世纪 70 年代末之后减弱, 东亚的东风在 20 世纪 80 年代中期之后减弱, 这与前人研究^[17, 19, 20]的年代际变化时间基本上是一致的。如

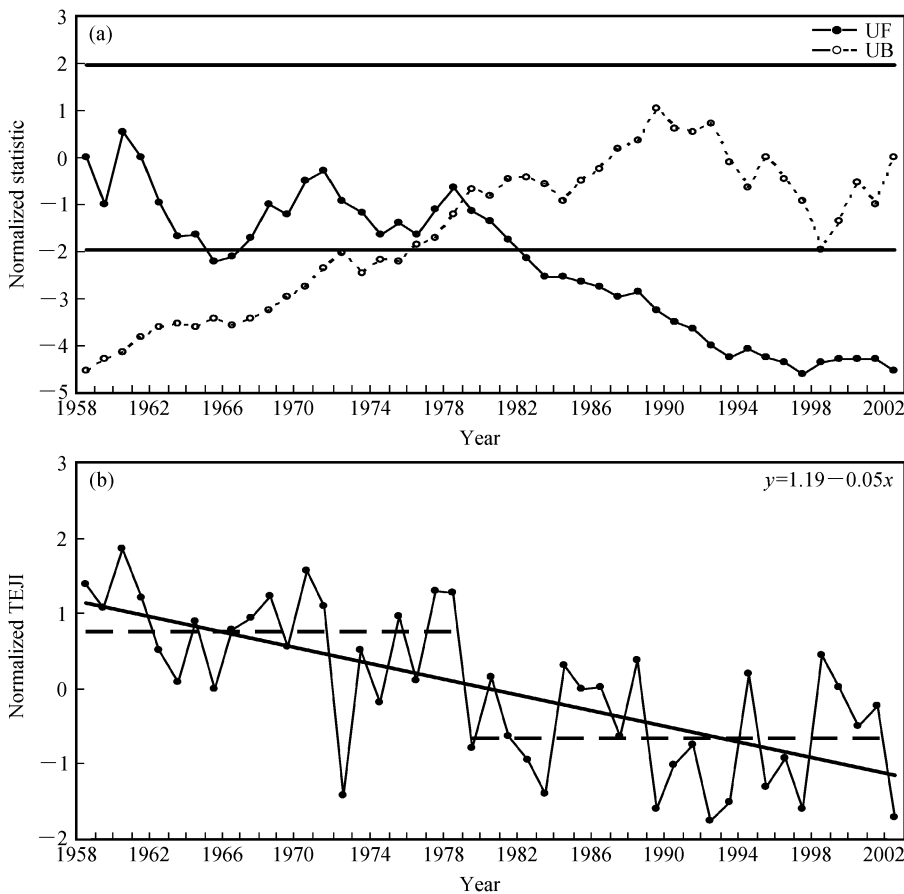


图 5 (a) 指数 TEJI 的 M-K 检验, UF 是按顺序时间序列计算的统计量序列, UB 是按逆序时间序列计算的统计量序列, 粗直线: $\alpha=0.05$ 显著性水平临界值; (b) 标准化 TEJI 的时间序列, 粗实线: 线性趋势, 线性回归方程位于图的右上角, 粗虚线: TEJI 突变前后的平均值

Fig. 5 (a) Mann-Kendall test of index TEJI. UF is the statistical series calculated by the sequential time series, UB is the statistical series calculated by the reversed time series; the bold line: $\alpha=0.05$ significance level. (b) Time series of the normalized index TEJI. The bold solid line is the linear trend of TEJI, and its linear equation is in the right corner. The bold dashed lines are the averages of TEJI before and after climate jump

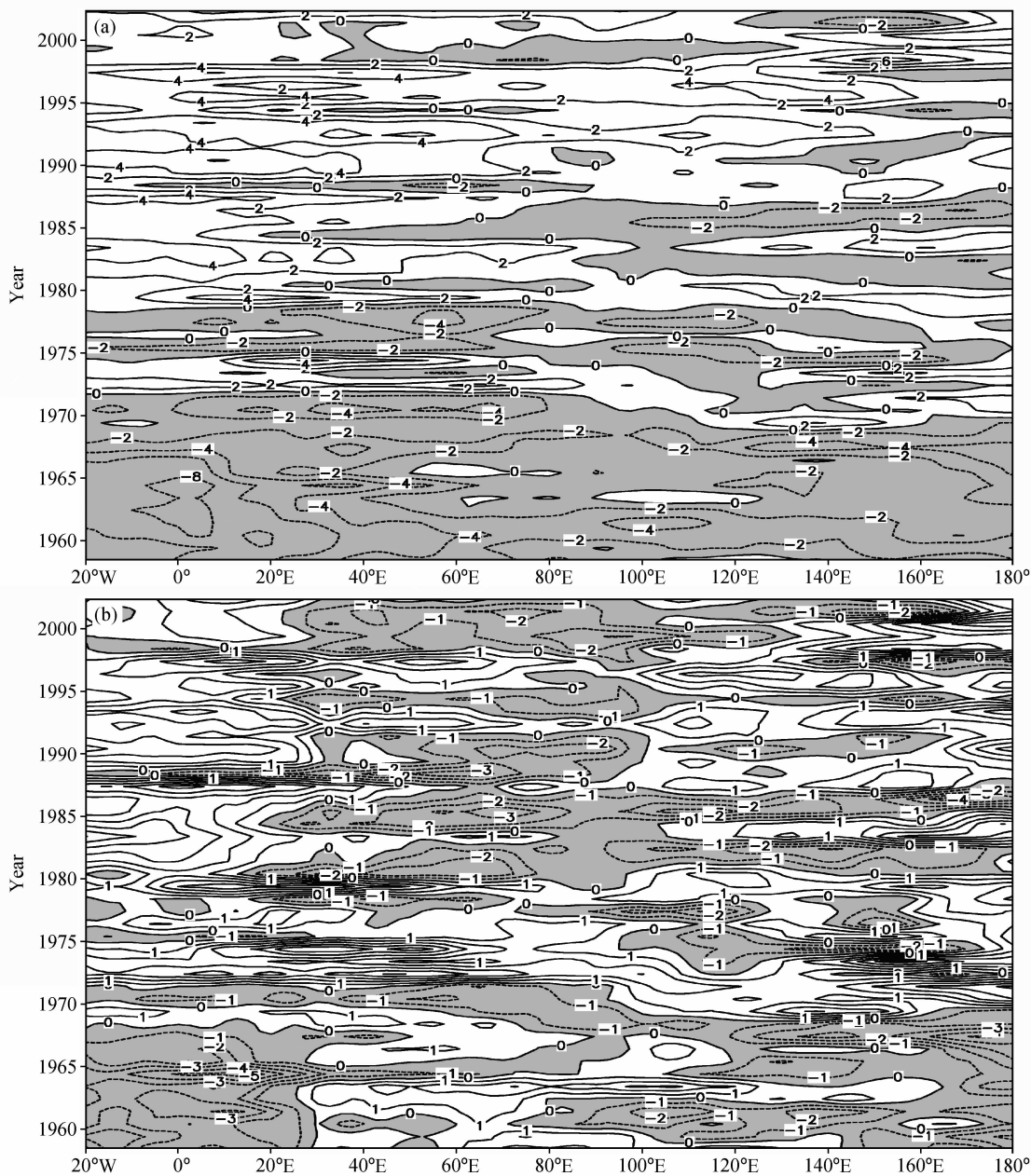


图6 夏季(JJA)平均150~100 hPa (a)和200 hPa (b) 纬向风沿 $10^{\circ}\text{N}\sim 15^{\circ}\text{N}$ 的时间-经度剖面图(单位: m/s, 阴影为东风)

Fig. 6 Cross sections of the zonal wind (m/s) averaged for 150 hPa and 100 hPa (a) and at 200 hPa (b) in JJA along $10^{\circ}\text{N}\sim 15^{\circ}\text{N}$. The easterlies are shaded

果用200 hPa纬向风代替急流层(图6b),则看不出东风急流在亚洲,尤其是南亚地区明显减弱。这进一步表明东风急流层定义在150~100 hPa的合理性,200 hPa的东风不能真正反映东风急流的变化。

TEJ与北太平洋气候突变时间大致相同,PDO冷位相期为TEJ强年,PDO暖位相期为TEJ弱年,其负相关(相关系数为-0.52)通过了95%显

著性检验。但是TEJI与暖期PDO相关(-0.61)要高于与冷期PDO相关(0.13),这可能是因为El Niño信号要远远强于La Niña信号造成的。

通过分析冬季AO的时间序列,发现AO在20世纪70年代末也存在气候突变,与东风急流突变时间大致相同,突变后AO趋向于正位相。TEJI与AO的相关(-0.55)通过了95%显著性检验,AO负位相期为TEJ强年,AO正位相期为TEJ弱

年。二者在突变后的相关（-0.58）要高于突变前的相关（-0.36），表明 AO 对 TEJ 的影响在增强。

5 热带东风急流与亚非季风降水、对流的关系

5.1 热带东风急流与台风的关系

根据西北太平洋台风发生频率的资料，计算它与 TEJI 的关系，相关系数达 -0.44，通过了 99%

显著性检验。这表明 TEJ 强年台风发生频率低，TEJ 弱年台风发生频率高。Palmén^[21]很早就指出弱的风速垂直切变是台风生成的重要条件之一。如果切变很大，则对流层上下空气相对运动就大，这使得在对流层中由积雨云释放的凝结潜热迅速离开扰动区上空向四周平流出去，这时热量便不能在对流层中上层集中；如果切变小，则对流层上下空气相对运动很小，由凝结释放的热量始终加热同一空

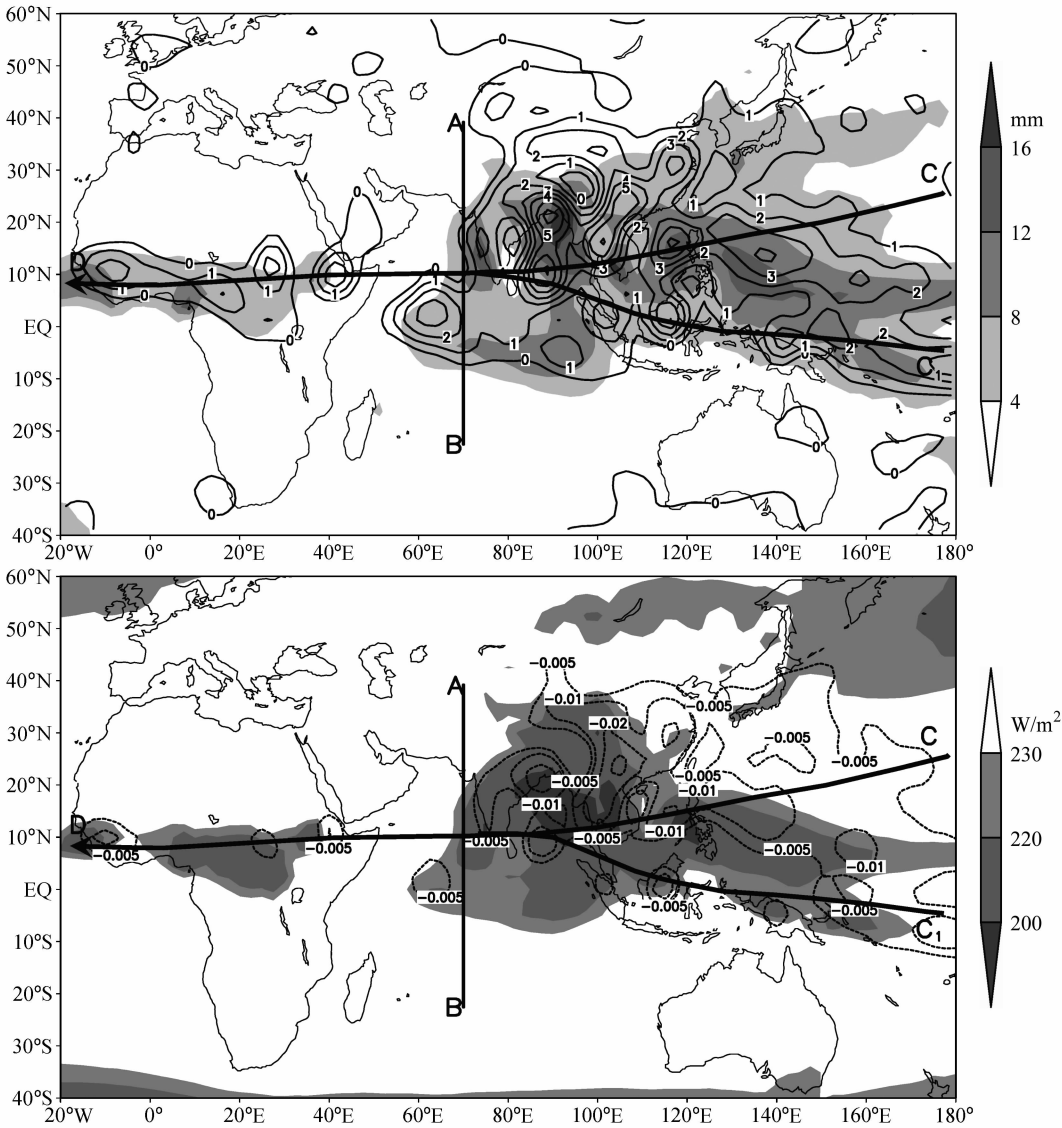


图 7 1958~2002 年气候平均夏季 (JJA) 降水、对流及急流层的散度 (单位: 10^{-6}s^{-1}) 和垂直速度 (单位: Pa/s): (a) 降水和散度的分布, 阴影表示降水 $>4\text{ mm}$ 的区域; (b) 对流和垂直速度的分布, 阴影表示 $\text{OLR}<230\text{ W/m}^2$ 的区域。CD 和 C_1D 是 TEJ 的轴线, AB 是急流入口区和出口区的分界线

Fig. 7 JJA climatological mean (1958–2002) precipitation, convection, vertical velocity (Pa/s) and upper-level divergence (10^{-6}s^{-1}): (a) The distribution of precipitation (the areas with rainfall $>4\text{ mm}$ are shaded) and upper-level divergence; (b) the distribution of convection (the areas with $\text{OLR}<230\text{ W/m}^2$ are shaded) and vertical velocity. AB is the demarcation line of the entrance and exit regions, CD and C_1D are TEJ axes

气柱而可以很快地形成暖心^[22]。TEJ 强年, 风速垂直切变大, 不利于台风生成, 因此台风发生频率低; 相反, TEJ 弱年, 风速垂直切变小, 因此台风发生频率高。

5.2 热带东风急流与降水、对流的关系

关于亚非季风区夏季降水与 TEJ 的关系, Koteswaram^[2]曾经给出一张个别年份的图, 曾昭美等^[6]也曾用 1966~1975 年 10 年平均资料进行研究, 说明两者存在一定联系。下面, 我们将用更长的气候资料 (45 年), 不仅讨论 TEJ 与降水的关系, 而且研究其与对流、高层散度和垂直速度等方面的配置, 并试图探讨这种分布型式与东风急流垂直环流的联系。

图 7 是气候平均降水、对流及急流层的散度和垂直速度, 其中 AB 是急流入口区和出口区的分界线, CD 和 C_1D 是急流轴线。由图可见, 降水、对流、散度和垂直速度的分布型式在 TEJ 的不同象限内是不同的: 主要降水带、对流区、高层辐散及大尺度上升运动都出现在急流入口区的右侧及出口区的左侧。这个结果与前人的研究^[2, 6]是一致的, 这表明降水主要位于南亚季风区和东亚季风区。但在急流出口区, 西非的情况略显复杂, 其降水、对流、高层辐散及上升运动位于 TEJ 轴线的右侧而非左侧。Nicholson 和 Grist^[7]也讨论到了这一点, 他们认为西非的 TEJ 不是由青藏高原和印度洋之间的经向温度梯度形成的, 而是其北部对流向赤道流出后, 在科里奥利力的作用下向右偏形成的。

根据对西风急流垂直环流的研究^[23, 24], 我们将类似地探讨东风急流的垂直环流。由于急流带前进速度比风速要小得多, 因而当空气穿过急流带时, 在入口区速度就会增大, 在出口区速度就会减小。不计粘性项, du/dt 的运动方程为

$$du/dt = f(v - v_g) = v_{ag}, \quad (1)$$

式中, v_g 是地转风的经向分量。考虑到东风风速为负值, 在急流的入口区, $du/dt < 0$, 因而 $(v - v_g) < 0$, 或 $v_{ag} < 0$, 如图 1 所示, 这表明所有在入口区运动的气块会得到向左偏 (看向下游) 的非地转分量 (北风), 结果在急流北侧产生高层辐散, 南侧产生高层辐合, 进而北侧出现上升气流, 南侧出现下沉气流, 低层大气也随之发生质量调整, 产生与高层相反的辐散辐合区, 从而形成垂直环流。类似的, 在急流的出口区, $du/dt > 0$, 因而 $(v - v_g) > 0$, 或

$v_{ag} > 0$, 这表明所有在出口区运动的气块会得到向右偏 (看向下游) 的非地转分量 (南风), 结果在急流南侧产生高层辐散, 北侧产生高层辐合, 进而南侧出现上升气流, 北侧出现下沉气流, 也产生一个垂直环流。

图 8 是用气候资料计算的急流入口区和出口区的垂直环流, 图中流线是水平风的辐散分量和垂直运动的合成。图 8 显示的垂直环流与上面讨论的垂直环流型式一致, 但出口区的情况略复杂一些。在急流的出口区, 由于等值线比入口区更稀疏 (参见图 1), 因而东风的减速较弱, 由式 (1) 可知, 地转偏差较小, 次级环流相对更弱一些。这种由质量调整导致的急流次级环流很容易受其他因素产生的垂直环流的影响, 所以其与降水分布的关系不如入口区明显。

我们对强、弱 TEJ 年东风急流的垂直环流和降水的差异也进行了探讨 (图略), 发现: 在急流的入口区, 强 TEJ 年其垂直环流更强, 其右侧的降水

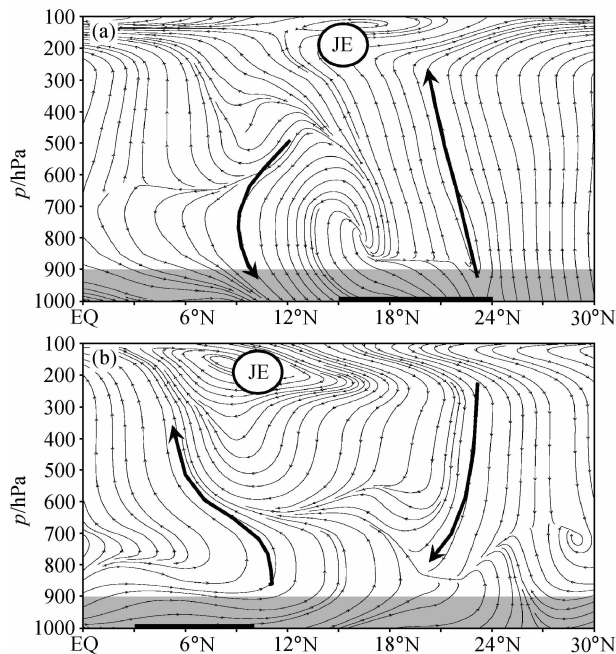


图 8 1958~2002 年气候平均夏季 (JJA) 急流的入口区 (80°E) (a) 和出口区 (60°E) (b) 的垂直环流。JE 是高空东风急流轴线的位置; 900 hPa 以下的流线可能在地形以下, 可能是虚假的, 用阴影表示; 横坐标上的黑线表示降水位置

Fig. 8 Vertical circulations in (a) the entrance region (80°E) and (b) the exit region (60°E) of climatological mean (1958 - 2002) TEJ. JE is the position of the TEJ axis. The areas below 900 hPa may be topography, denoted by light shades. The position of precipitation is denoted by the bold line in the abscissa

也更大；但在急流的出口区，强、弱 TEJ 年的垂直环流没有明显差异，其左侧的降水也没有明显差异。对于出口区，也可以用刚才的讨论来解释：急流出口区的垂直环流比较弱，这种由质量调整导致的急流次级环流很容易受其他因素产生的垂直环流的影响，所以在出口区强弱 TEJ 年差异不大。

6 两种再分析资料的比较

在研究 TEJ 的结构、变化及其与亚非季风区对流和降水的关系时，用 ERA-40 再分析资料与用 NCEP/NCAR 再分析资料得到的结论基本上一致，但也存在以下一些不同：

(1) 用 ERA 资料检验 TEJI 的气候突变，得到 1976~1981 年是发生气候突变的时期，在这段时期内突变趋势不明显，1981 年之后 TEJI 下降。这与用 NCEP 资料计算得到的单一突变年不同。

(2) 用 ERA 资料计算的沿核心纬度急流层纬向风的时间剖面图上，南亚的东风减弱是从 20 世纪 80 年代中后期开始而非 70 年代末，东亚和非洲的东风变化与用 NCEP 得到的结论相同。

(3) 由两种资料在急流层上的速度势和辐散风的差值图（图 9）可见，在热带非洲及亚洲区域，NCEP 资料明显比 ERA 资料计算的速度势更大，且辐散风更强。

7 结论

考虑到热带东风急流的核心位于 150~100 hPa，

本文用 150~100 hPa 两层平均的纬向风来代表 TEJ，并定义了一个指数来度量急流的变率。通过分析 TEJ 的结构、变化及其与亚非季风区降水和对流的关系，得到以下主要结论：

(1) TEJ 主要覆盖了热带地区从日界线向西延伸到非洲西海岸的大片地区，其核心位于印度半岛南部 10°N~15°N，中心风速超过 30 m/s。急流中线大致位于 70°E，以东是急流的入口区，以西是出口区。在入口区急流轴线有两个分支，南支位于 0°~10°N，呈西北-东南走向，北支位于 10°N~20°N，呈西南-东北走向。中纬度为广阔的西风带，东风局限在低纬度地区，最强位于 150~100 hPa。亚非季风区对流层高低层东西风切变十分明显，而在热带海洋上几乎整层为东风。

(2) TEJI 存在 40~60 天和 20~30 天的季节内振荡周期，但 20~30 天周期不显著。沿 7.5°N~12.5°N，扰动是从日界线附近开始向东和向西传播的；沿 70°E，扰动是从赤道开始向北传播的。TEJI 存在 2~4 年和 7~10 年的周期变化，出现暖事件时 TEJ 减弱，出现冷事件时 TEJ 加强。相对于 La Niña 年，El Niño 年的东风急流更弱。TEJ 存在明显的年代际变化，用 M-K 方法检测到 TEJI 在 1978 年发生突变，突变前为强 TEJ 时期，突变后 TEJ 显著减弱。

(3) TEJ 强年西北太平洋台风发生频率低；TEJ 弱年台风发生频率高。

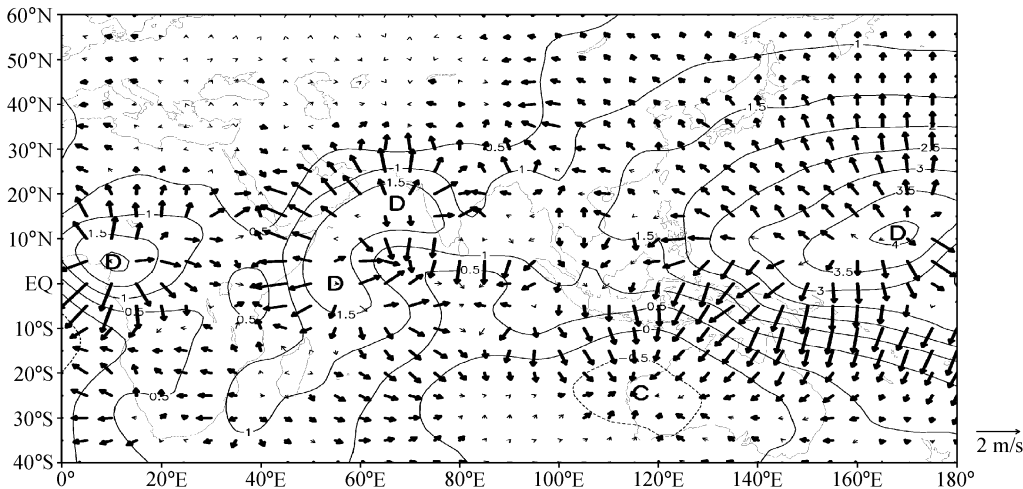


图 9 NCEP/NCAR 再分析资料与 ERA-40 再分析资料关于急流层速度势（单位： m^2/s ）和辐散风的差异。粗矢量箭头表示达到 95% 显著性检验的辐散风

Fig. 9 The difference of velocity potential (m^2/s) and divergent wind between NCEP/NCAR and ERA-40 reanalysis data. The divergent wind reaching 95% significant level is denoted by bold vector arrows

(4) 在亚洲和中非, 主要降水带、对流区、高层辐散及大尺度上升运动都出现在东风急流入口区的右侧及出口区的左侧, 但出口区西非的情况略显复杂。在急流的入口区和出口区存在两个近于相反的垂直环流, 它们与降水分布密切相关。在急流的入口区, 强 TEJ 年其垂直环流更强, 其右侧的降水也更大; 但在急流的出口区, 强、弱 TEJ 年的垂直环流没有明显差异, 其左侧的降水也没有明显差异。

致谢: 感谢由美国国家海洋和大气局 (NOAA) 的气候诊断中心 (CDC) 提供的 NCEP/NCAR 再分析资料, 以及由欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 提供的 ERA-40 再分析资料。另外感谢温敏, 吴志伟, 王遵娅, 王慧等人对本文的帮助以及李旦对本文作的最后校正及对英文部分的修改。

参考文献 (References)

- [1] Ding Y H. Synoptic processes in monsoons. The Global Monsoon System: Research and Forecast, WMO/TD NO. 1266, 2005, 492~511
- [2] Koteswaram P. The easterly jet stream in the tropics. *Tellus*, 1958, **10**: 43~57
- [3] Kanamitsu M, Krishnamurti T N. Northern summer tropical circulations during drought and normal rainfall months. *Mon. Wea. Rev.*, 1978, **106**: 331~347
- [4] Tanaka M. Interannual fluctuations of the tropical easterly jet and the summer monsoon in the Asian region. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1982, **60**: 865~875
- [5] Arkin P A. The relationship between interannual variability in the 200mb tropical wind field and Southern Oscillation. *Mon. Wea. Rev.*, 1982, **110**: 1393~1404
- [6] 曾昭美, 郭其蕴. 亚非季风区夏季降水与热带东风急流的关系. *大气科学*, 1982, **6**: 283~292
Zeng Zhaomei, Guo Qiyun. The relationship between the summer precipitation over Asia-Africa monsoon regions and the tropical easterly jetstream. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1982, **6**: 283~292
- [7] Nicholson S E, Grist J P. The seasonal evolution of the atmospheric circulation over West Africa and equatorial Africa. *J. Climate*, 2003, **16**: 1013~1030
- [8] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77**: 437~471
- [9] Simmons A J, Gibson J K, Eds. The ERA-40 Project Plan. ERA-40 Project Report Series 1, ECMWF, 2000. 62pp
- [10] Annamalai H, Slingo J M, Sperber K R, et al. The mean evolution and variability of the Asian summer monsoon: Comparison of ECMWF and NCEP-NCAR reanalyses. *Mon. Wea. Rev.*, 1999, **127**: 1157~1186
- [11] Newman M, Sardeshmukh P D, Bergman J W. An assessment of the NCEP, NASA, and ECMWF reanalyses over the tropical west Pacific warm pool. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2000, **81**: 41~48
- [12] Sturaro G. A closer look at the climatological discontinuities present in the NCEP/NCAR reanalysis temperature due to the introduction of satellite data. *Climate Dyn.*, 2003, **21**: 309~316
- [13] 陈桦, 丁一汇, 何金海. 亚洲夏季风指数的重新评估与季风的长期变化. *气象学报*, 2006, **6**: 770~778
Chen Hua, Ding Yihui, He Jinhai. Reappraisal of the Asian summer monsoon indices and the long-term variation of monsoon. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2006, **6**: 770~778
- [14] Xie P P, Arkin P A. Analyses of global monthly precipitation using gauge observations, satellite estimates, and numerical model predictions. *J. Climate*, 1996, **9**: 840~858
- [15] Lu J X, Ding Y H. Climatic study on the summer tropical easterly jet at 200 hPa. *Adv. Atmos. Sci.*, 1989, **6**: 215~226
- [16] Webster P J, Yang S. Monsoon and ENSO: Selectively interactive systems. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1992, **118**: 877~926
- [17] Chase T N, Knaff J A, Pielke Sr. R A, et al. Changes in global monsoon circulations since 1950. *Natural Hazards*, 2003, **29**: 229~254
- [18] Trenberth K E, Hurrell J W. Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific. *Climate Dyn.*, 1994, **9**: 303~319
- [19] Wang H J. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's. *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18**: 376~386
- [20] 李新周, 马柱国, 刘晓东. 中国北方干旱化年代际特征与大气环流的关系. *大气科学*, 2006, **2**: 277~284
Li Xinzhou, Ma Zhuguo, Liu Xiaodong. Inter-decadal characteristics of aridification over northern China associated with the variation of atmospheric circulation during the past 50 years. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **2**: 277~284
- [21] Palmén E. On the formation and structure of tropical cyclones. *Geophysica*, 1948, **3**: 26~38
- [22] 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论. 北京: 科学出版社, 1979. 1~10
Chen Lianshou, Ding Yihui. *Introduction of the Western Pacific Typhoon* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1979. 1~10
- [23] Cressman G P. Circulations of the West Pacific jet stream. *Mon. Wea. Rev.*, 1981, **109**: 2450~2463
- [24] 丁一汇. 高等天气学. 北京: 气象出版社, 2005. 138~149
Ding Yihui. *Advanced Synoptic Meteorology* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2005. 138~149