

夏季东亚高空急流与天气尺度波动的气候特征之间的联系

吴伟杰^{1,2} 何金海¹ Hyo-Sang CHUNG³
Chun-Ho CHO³ 陆日宇²

1 南京信息工程大学大气科学系, 南京 210044

2 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

3 Meteorological Research Institute, Korea Meteorological Administration, Seoul 156—720

摘要 利用 NCEP/NCAR 逐日资料 (1979~2003 年), 分析了东亚夏季高空急流和天气尺度波动气候特征之间的联系。通过分析急流与天气尺度波动活动量 Q (用于描述某一时间段内天气尺度波动活动强弱程度)、热量涡动输送 ($\overline{v'T'}$) 的关系, 发现: 在气候平均意义下, 天气尺度波动活动量在 6、8 月较大, 这意味着在这两个月中, 天气尺度波动较为剧烈。这和急流的强度变化是相对应的, 即强的天气尺度波动活动量对应着强的急流, 弱的天气尺度波动活动量对应着弱的急流。热量涡动输送也表现出与天气尺度波动活动量类似的特征。年际变化上, 夏季平均和 6、7、8 各月平均的热量涡动输送和急流强度都存在显著的正相关。对强、弱急流年份条件下热量涡动输送合成分析的结果表明: 热量涡动输送偏南时, 对应着强的急流; 热量涡动输送偏北时, 对应着弱的急流。以上的研究结果说明, 在气候平均意义和年际变化上夏季东亚高空急流和天气尺度波动之间有着密切的联系。

关键词 东亚高空急流 天气尺度波动 热量涡动输送

文章编号 1006-9585 (2006) 04-0525-10 **中图分类号** P466 **文献标识码** A

The Relationship between the East Asian Up-tropospheric Jet Stream in Summer and Climatic Characteristics of Synoptic-scale Disturbance

WU Wei-Jie^{1,2}, HE Jin-Hai¹, Hyo-Sang CHUNG³, Chun-Ho CHO³, and LU Ri-Yu²

1 Department of Atmosphere Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Meteorological Research Institute, Korea Meteorological Administration, Seoul 156—720

Abstract Using the NCEP/NCAR daily data (1979—2003), the relationship between the East Asian up-tropospheric jet stream in summer and climatic characteristics of synoptic-scale disturbance is analyzed. We examined the relationship between the jet stream and activity of synoptic-scale disturbance Q , which depicts intensity of synoptic-scale disturbance in a period of time, and the relationship between the jet stream and transient eddy heat flux. The results show that in the climatological sense, activity of synoptic-scale disturbance is much stronger in June and August, which is corresponding with the variation of jet stream. Stronger activity of synoptic-scale disturbance is asso-

收稿日期 2005-01-28 收到, 2006-02-15 收到修定稿

资助项目 韩国气象研究所 2004 年度主要研究项目 “Korea Enhanced Observing Period, KEOP”

作者简介 吴伟杰, 男, 1980 年出生, 硕士生, 从事气候变化研究。E-mail: wuweijie@sina.com

ciated with stronger jet stream, and vice versa. The transient eddy heat flux show similar features of activity of synoptic-scale disturbance. On the interannual time scale, there exists significant positive correlation between the transient heat flux and the strength of jet stream in summer (JJA mean), June, July, August, respectively. Composite analysis shows that corresponding to southward displacement of transient eddy heat flux, the strength of jet stream is stronger and vice versa. All results show that climatologically and on the interannual time scale, the East Asian up-tropospheric jet stream in summer and climatic characteristics of synoptic-scale disturbance are closely connected.

Key words East Asian up-tropospheric jet stream, synoptic-scale disturbance, transient eddy heat flux

1 引言

高空西风急流是中纬度大气对流层上层的一个显著特征,在不同的时间尺度上对亚洲天气和气候都有着重要的影响。已有的研究表明,急流和许多天气尺度现象都有密切的联系,诸如寒潮、气旋、锋面、阻高和风暴轴等^[1~6]。特别在我国,东亚高空急流位置的南北移动和强度变化与梅雨带之间存在密切的联系。陶诗言等^[7]指出东亚梅雨的开始、结束和 6、7 月急流的两次北跳过程密切相关。此外,叶笃正等^[8]指出,急流的北跃和南移的过程和 6、10 月亚洲的季节转变有着很紧密的联系。

年际变化上,过去研究的重点基本都集中在冬季的高空急流。近来的研究^[9]表明冬季东亚高空急流和亚洲—太平洋—美洲气候之间存在联系:急流强时,亚洲冬季风加强,且亚洲盛行冷而干燥的天气;美洲西部出现暖而干燥的环境,其东部为冷而更加干燥的环境。和 ENSO 的影响相比,东亚高空急流以及东亚和副热带北太平洋的强气侯信号联系更为显著。

急流和热带地区加热活动之间有密切联系^[10]。董敏等^[11]在对夏季急流的研究中发现,西风急流的形成、维持及强度和位置的变化与热带地区的对流活动所产生的加热作用有密切的关系,急流中心随热带对流加热场的季节变化发生移动。高空急流变化作为一种中纬度的扰动,是东亚季风系统中的一个重要成员。通过对东亚季风系统经向联系的研究, Lu^[12]指出:急流强度、位置的经向偏移和东亚夏季雨带异常活动有密切的联系,急流作为一个桥梁可能可以将菲律宾海上空的对流活动和东亚夏季气候异常联系起来。

长时间来看,急流可以看作是纬向平均流。

而关于波和纬向平均流的相互作用在过去已经有很多的研究。Eliassen 和 Palm 首先提出了 E-P 通量的概念,为波流相互作用的研究提供了一样有力的工具。Trenberth^[13]进一步推导出了可描述瞬变波动对平均流强迫作用的局地 E-P 通量。Gao 等^[14]给出了一个含有层结效应、并用资料可以直接作出诊断的广义 E-P 通量。

虽然急流对亚洲天气以及对气候的影响已经有许多研究,对气候的影响也有了一些研究,但对于气候意义下,夏季急流和天气尺度波动之间的研究基本没有。也就是说,急流和某一段较长时间里的天气尺度波动特征之间的关系还不清楚。过去对于天气尺度的急流研究多局限在个例研究,而且急流和气候之间的研究并不涉及天气尺度波动。天气尺度波动在热带以外地区是比较强的,特别在急流附近,由于急流不稳定的关系,天气尺度的波动可能更加活跃,因此其作用往往是不可忽略的。本文首先定义了一个天气尺度波动活动量,用于描述某一较长时间段里天气尺度活动的强弱程度,并利用天气尺度波动活动量和热量涡动输送,对天气尺度波动的气候特征和急流的关系进行探讨。

2 使用资料和方法

采用 NCEP/NCAR 再分析数据中等压面上逐日位势高度场、水平速度场、温度场资料,垂直方向共计 17 层等压面,它们分别是 1000、925、850、700、600、500、400、300、250、200、150、100、70、50、30、20、10 hPa;水平方向上,网格间距为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$;时间从 1979~2003 年,每年选取的时段是 6 月 1 日~8 月 31 日,代表夏季。

为了描述天气尺度波动的气候变化特征,以

及这种变化和急流的联系，我们引入活动量的概念，其表达式如下：

$$Q(x,y,t) = \sum_{T=t-t_0}^{t+t_0} |S(x,y,T)|,$$

这个量可以看成是某一时间段内天气尺度波动的强弱程度，其中 $S(x,y,T)$ 代表 500 hPa 位势高度场的高频波（2.5~6 d）部分（滤波器参见文献 [15]），式中 T 、 x 和 y 分别代表时间、经度和纬度。本文 t_0 取 2，即 Q 表征 5 d 内天气尺度波动的强弱程度。之所以取 5 d，是因为一方面可以最大程度上保存天气尺度波动强度的气候变化特征，另一方面可以基本消除天气尺度变化所带来的影响。

3 多年平均意义下急流和天气尺度波动的气候特征间的关系

首先，采用 1979~2003 年共 25 年的 200 hPa 纬向风场逐日资料，通过平均得到气候态下急流的基本状况。图 1 给出了气候平均意义下急流随时间的变化，可以看出，气候状态下的急流强度在 6 月最强，中心强度可达 $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上；到了

7 月有所减弱，且整个 7 月急流强度变化比较明显；8 月急流又有所增强，特别是在 8 月下旬，强度的变化显著，在下旬中心强度超过 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。急流轴从 6 月初的 35°N 附近一直向北移动，到了 8 月初急流轴移动到 40.5°N 附近，之后急流轴开始南撤。急流的强度伴随着急流轴的向北移动不断地减弱。

图 2 分别给出了整个夏季平均和其中各月的纬向风场在东亚地区的分布情况。总体来看，急流的分布呈东西走向，中心向东一直延伸到太平洋。从整个夏季来看，急流强度的最大值区位于 $(40^\circ\text{N}, 90^\circ\text{E})$ 。就各月而言，6 月，急流强度的最大值区位于日本 $(37.5^\circ\text{N}, 150^\circ\text{E})$ 上空附近，中心最大风速在 $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上；7 月，急流强度的最大值区位于 $(40^\circ\text{N}, 90^\circ\text{E})$ 附近；8 月，急流强度的最大值区位于 $(42.5^\circ\text{N}, 90^\circ\text{E})$ 附近。尽管急流强度的最大值往往不在东亚上空，但急流的南北移动在东亚是最明显的。

3.1 急流与天气尺度波动活动量间的关系

天气尺度的波动（2.5~6 d）是本节关心的重点。由于所考虑的时间尺度较小，因此滤波得到的结果较为难以辨别和分析，但是大致可以判

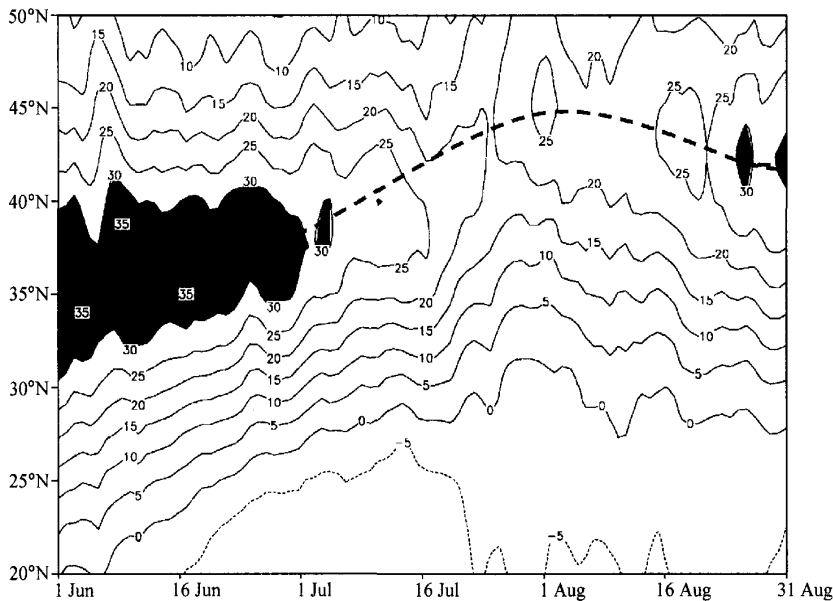


图 1 气候态下夏季 200 hPa 纬向风场（110~145°E 平均，单位： $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）。粗虚线为急流轴，阴影区风速大于 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Fig. 1 Climatic zonal wind ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 200 hPa in JJA (Jun, Jul, Aug), averaged over 110~145°E, axis of jet is showed with dashed line, values larger than $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ are shaded

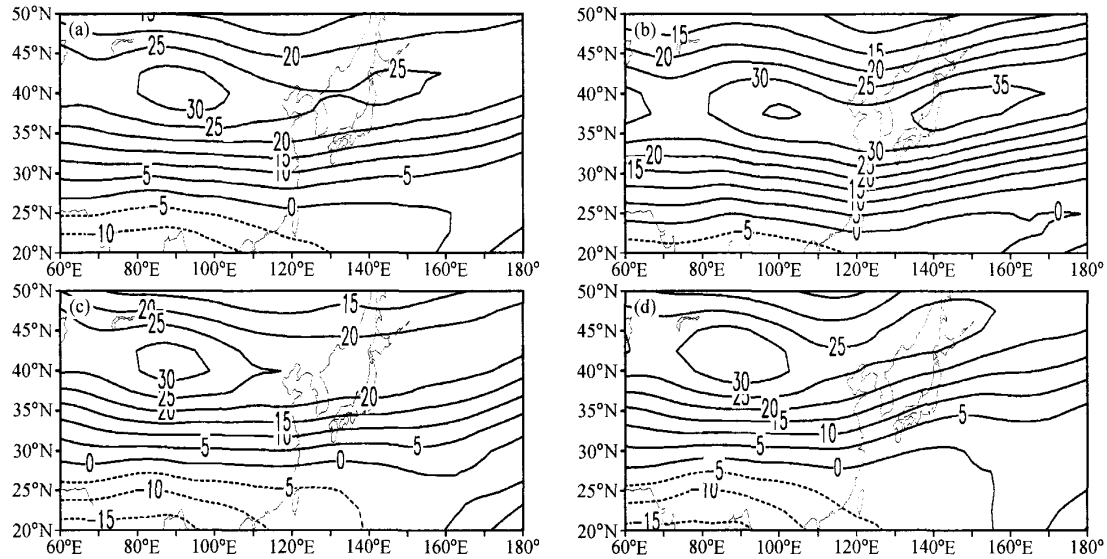


图2 气候态下(1979~2003年平均)200 hPa 纬向风场分布(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$): (a) 夏季; (b) 6月; (c) 7月; (d) 8月
Fig. 2 Climatological zonal wind ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 200 hPa, averaged over 1979—2003; (a) JJA, (b) Jun, (c) Jul, (d) Aug

断出天气尺度的波动在6月和8月是比较活跃的。

因此为了便于分析天气尺度波动的气候变化特征的影响,在这里,首先对500 hPa 位势高度场滤出的高频波(2.5~6 d)部分进行处理,之后利用前面所定义的活动量 Q ,得到500 hPa 天气尺度波动活动量。图3给出的是气候平均意义下活动量的变化状况(为方便和急流对比,虚线即图1中急流轴的位置,方框大致对应图1中的阴影处,即急流强的区域)。活动量在6月最大,7、8月活动量有所减弱,这种减弱的程度在7月表现的最为显著,8月略有增强。活动量大值区基本位于急流的北部,并随着急流轴的南北偏移而移动,当急流向北移动时,活动量也以同样的方向移动。我们同样将活动量和急流强度做一个比较,结果表明两者之间的变化也基本一致,也就是说,强的急流对应着较为活跃的天气尺度波动。

3.2 热量涡动输送特征

图4给出的是110~145°E 平均的热量涡动输送($\overline{VT'}$)。可以看出,东亚地区有向北的热量输送,其最大值区位于200 hPa、40°N 附近,中心位置和急流轴的位置是一致的。中心输送强度在1.4 $\text{K} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,低层850 hPa 附近也存在一个大值区,但中心数值较小,仅为0.6 $\text{K} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

为了便于和急流进行比较,我们沿40°N 做了一个热量涡动输送的剖面图(图5)。由图可见,高频波对于热量的向北输送存在于90°E 以东地区,相比于其他各层,200 hPa 的高频波向北的热量输送是最大的,中心数值为1.8 $\text{K} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,中心位置和急流轴的位置(110~145°E)也是一致的。以上分析表明,急流确实与高频波的热量输送存在一定的联系。

4 急流和热量涡动输送年际变化间的关系

夏季东亚急流具有明显的年际变化^[16]。由于急流在夏季各个月具有明显不同的特征,在此我们对整个夏季平均和6、7、8月的情况分别做了讨论。需要说明的是,由于不同月急流轴所处的位置不同,因此针对不同情况取不同纬度的纬向风平均来代表急流的强度,以下将详细说明。但是热量涡动输送强度的年际变化在急流轴附近随纬度变化不明显,因此热量涡动输送的年际变化均取在40°N。图6给出的是夏季急流和热量涡动输送年际变化之间的关系。从整个夏季来看,气候平均意义下急流轴的位置位于40°N,因此我们用40°N的200hPa纬向风在110~145°E的平均

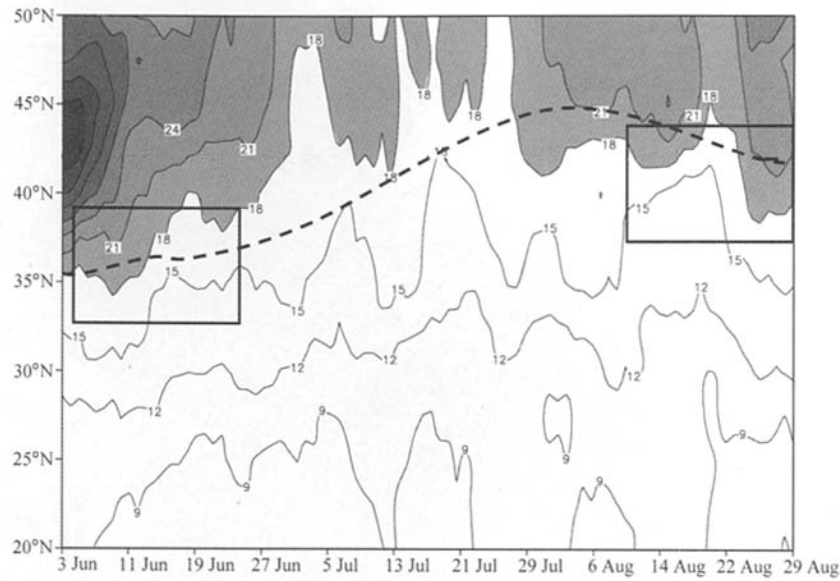


图3 气候平均意义下的天气尺度波动活动量 Q (单位: gpm)。虚线为急流轴, 方框为急流强的区域, 阴影为活动量大于 18 gpm 的区域

Fig. 3 Climatic synoptic activity (gpm), axis of jet is showed with dashed line, square region indicates strong jet stream, values larger than 18 gpm are shaded

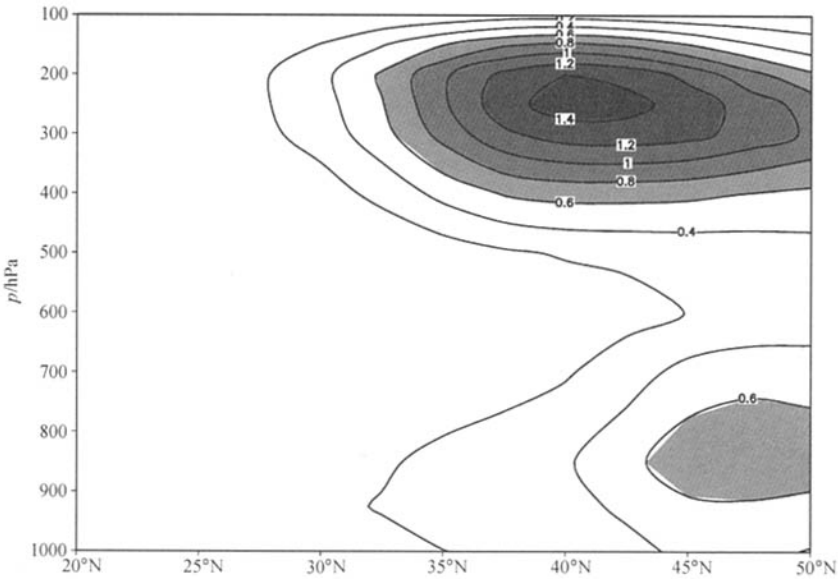


图4 气候平均意义下夏季(6、7、8月)平均热量涡动输送 ($\overline{VT'}$, 单位: $K \cdot m \cdot s^{-1}$)。110~145°E 平均, 阴影为热量输送大于 0.6 $K \cdot m \cdot s^{-1}$ 的区域

Fig. 4 Climatic transient eddy heat flux ($K \cdot m \cdot s^{-1}$) in JJA mean, averaged over 110—145°E, values larger than 0.6 $K \cdot m \cdot s^{-1}$ are shaded, zero contour is not shown

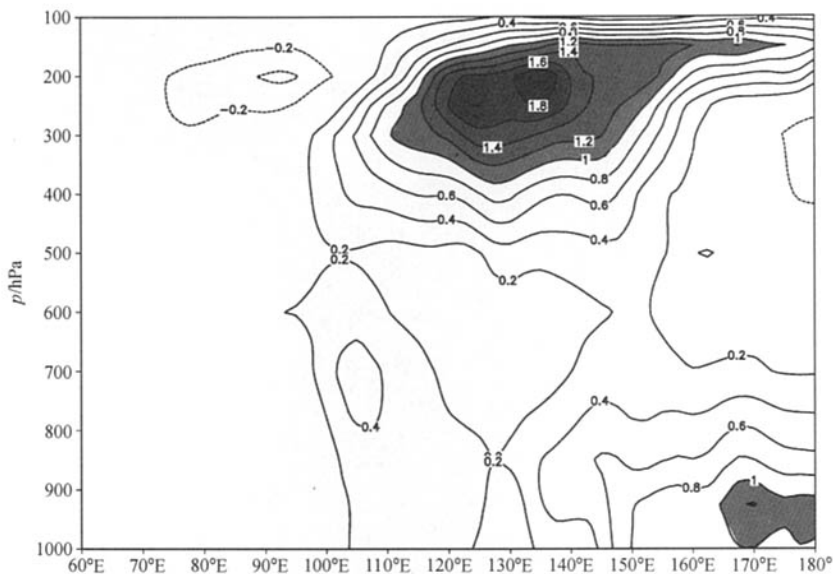


图5 气候平均意义下沿 40°N 夏季 (6、7、8 月) 平均热量涡动输送 ($\overline{V'T'}$, 单位: $\text{K} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。阴影为热量输送大于 $1.0 \text{ K} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的区域

Fig. 5 Climatic transient eddy heat flux ($\text{K} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) along 40°N, values larger than $1.0 \text{ K} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ are shaded, zero contour is not shown

来代表急流的强度。热量涡动输送和急流强度呈正相关, 相关系数为 0.79, 通过 99% 的信度检验。

夏季 3 个月中, 气候意义下急流轴的位置分别位于 37.5、40 和 42.5°N, 因此我们分别用这 3 个纬度上 110~145°E 平均的 200 hPa 纬向风来代表急流的强度。急流强度和热量涡动输送的相关系数在 6、7、8 月分别为 0.57、0.68、0.59, 均通过 99% 的信度检验。这说明在年际变化时间尺度上, 夏季的急流和热量涡动输送之间存在密切的联系: 强的热量向北输送对应着强的急流, 弱的热量输送对应着弱的急流。

我们以纬向风速异常超过 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为标准, 选取了 10 个急流强的年份和 9 个急流弱的年份, 对热量涡动输送进行合成分析。结果表明, 急流强度和热量涡动输送的南北偏移有一定的联系。图 7 给出的是急流强度的年际变化。夏季的急流轴的平均位置在 40°N 附近, 所以每年都取在此纬度上 110~145°E 平均的 200 hPa 纬向风代表急流的强度。

图 8 和图 9 分别是急流强年份和弱年份的纬向风场合成。整个夏季, 强年份的急流轴位置位于 40°N, 弱年份位于 42.5°N, 和弱年相比, 强年

的中心大值区所覆盖的区域更广, 东西伸展的程度更大。6 月, 强年中急流存在两个大值区, 中心值都在 $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上, 急流轴位于 37.5°N 附近, 相比之下, 弱年中急流仅有一个大值区, 急流轴的位置更偏北, 位于 40°N 附近。7、8 两月, 强年中急流轴都大致位于 40°N, 弱年中急流轴都大致位于 42.5°N, 强年中的急流东西伸展的程度远远大于弱年。综上所述, 急流强的年份中, 急流轴的位置比弱年偏南, 且急流的东西伸展程度更大, 覆盖范围更广。

图 10 给出的是急流强、弱年份合成的热量涡动输送。在急流强的年份 (图 10a) 中, 急流轴的平均位置位于 41°N, 热量涡动输送中心位于 200 hPa、39°N 附近, 中心强度在 $1.8 \text{ K} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。在低层, 大致位于 850 hPa 附近也有一个向北的热量输送中心, 强度较小。急流弱的年份 (图 10b) 急流轴的平均位置位于 42°N, 热量涡动输送中心位于 200 hPa、43°N 附近, 中心强度在 $1.2 \text{ K} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。在低层, 同样也有一个向北的热量输送中心。和急流强的年份相比, 这个中心的强度有所增强, 达 $0.8 \text{ K} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。由以上的分析可知, 在急流强的年份, 高层热量

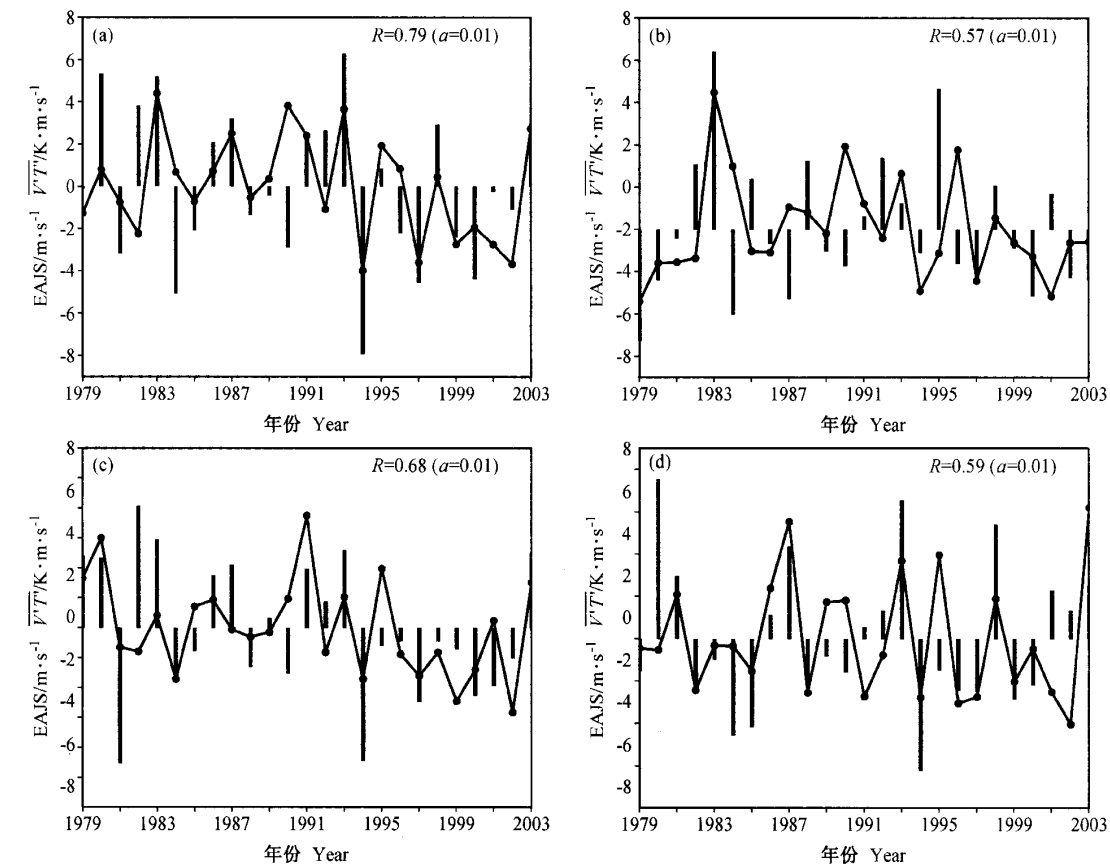


图 6 急流强度 (EAJS, 柱线) 和热量涡动输送 ($\overline{V'T'}$, 实线) 的年际变化: (a) 夏季平均, (b) 6 月, (c) 7 月, (d) 8 月
Fig. 6 Relationship between East Asian jet strength (EAJS) and transient eddy heat flux, strength of jet is showed with bar, transient eddy heat flux is showed with line; (a) JJA, (b) Jun, (c) Jul, (d) Aug

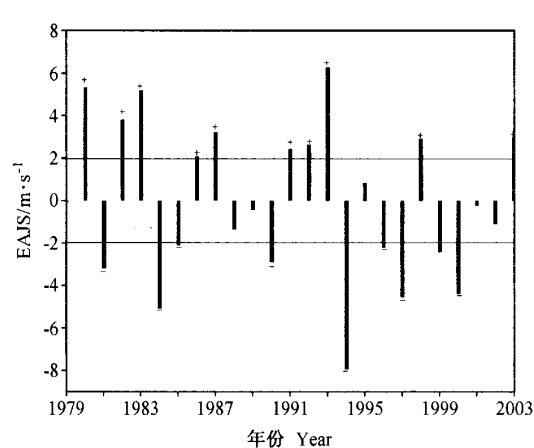


图 7 夏季急流强度的年际变化 (+、- 分别为急流强、弱年份)
Fig. 7 Interannual variability of EAJS (“+” indicates the strong East Asia jet (EAJ) year, “-” indicates the weak EAJ year)

涡动输送是偏南、偏强的; 在急流弱的年份, 高层热量涡动输送是偏北、偏弱的, 而低层的热量涡动输送是加强的。

为了进一步分析急流强、弱和热量涡动输送异常之间的联系是否达到统计信度, 给出了夏季急流强、弱年的热量涡动输送差值 (图 11)。从图中可以看到, 在急流强的年份中, 热量涡动输送有两个加强的区域, 一个是位于 200 hPa、40°N 急流轴附近, 另一个是位于低层 900 hPa 附近。这也表明, 急流的强度和热量涡动输送之间确实存在密切的联系。

5 结论

利用 NCEP/NCAR 逐日再分析资料, 本文分

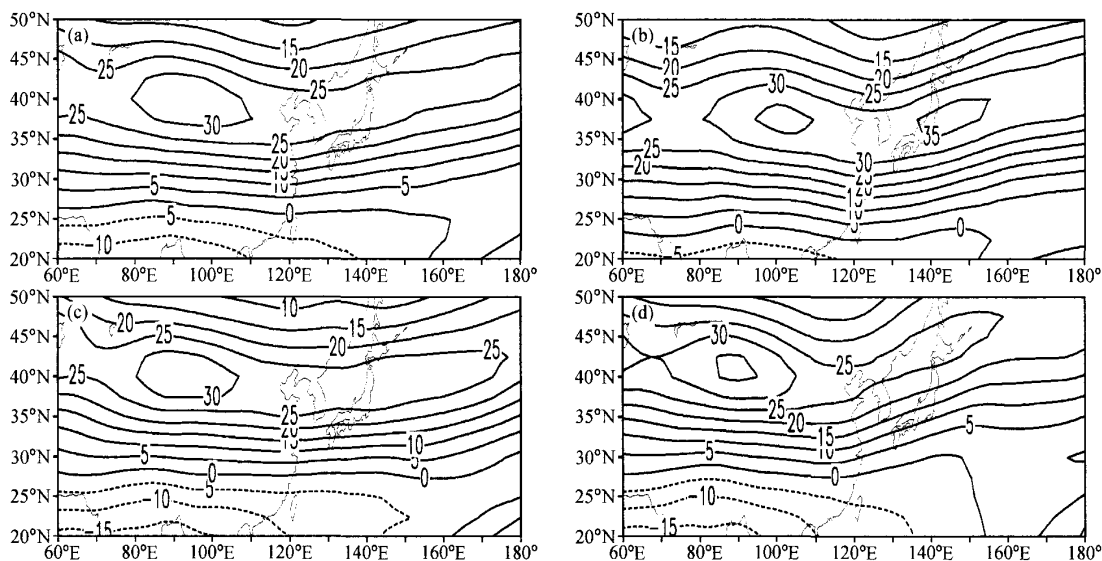


图8 强急流年份 200 hPa 纬向风场合成 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$): (a) 夏季, (b) 6月, (c) 7月, (d) 8月

Fig. 8 Composite zonal wind at 200 hPa for strong EAJ year; (a) JJA, (b) Jun, (c) Jul, (d) Aug

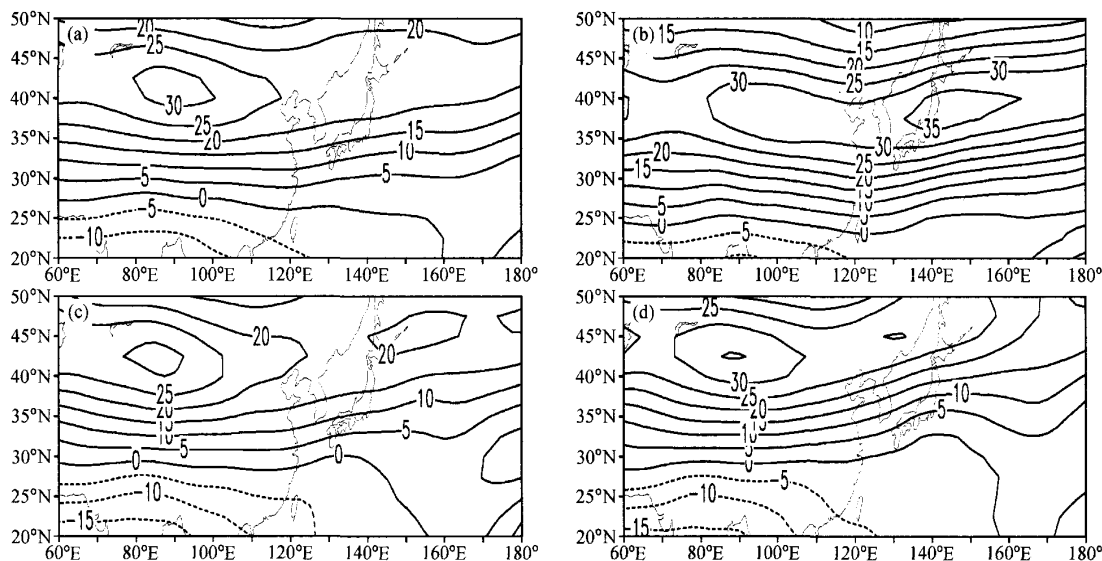


图9 弱急流年份 200 hPa 纬向风场合成 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$): (a) 夏季, (b) 6月, (c) 7月, (d) 8月

Fig. 9 Composite zonal wind at 200 hPa for weak EAJ year; (a) JJA, (b) Jun, (c) Jul, (d) Aug

析了夏季东亚高空急流和天气尺度波动的气候特征之间的关系。通过对天气尺度波动活动量和热量涡动输送的研究,发现:

(1) 在气候平均意义下,急流和天气尺度波动活动之间有很好的对应关系。天气尺度波动活动强的区域基本位于急流以北,急流强度和天气尺度波动活动的强弱变化基本一致,天气尺度波

动在6月和8月较为活跃,其南北移动与急流轴的南北偏移一致。

(2) 对急流和热量涡动输送年际变化的分析表明,向北输送的最大值区域出现在气候平均意义下急流轴的位置,即 40°N ,其随纬度变化并不明显。不论从整个夏季,还是单个月来看,急流的强度和热量涡动输送之间都存在着显著的正相

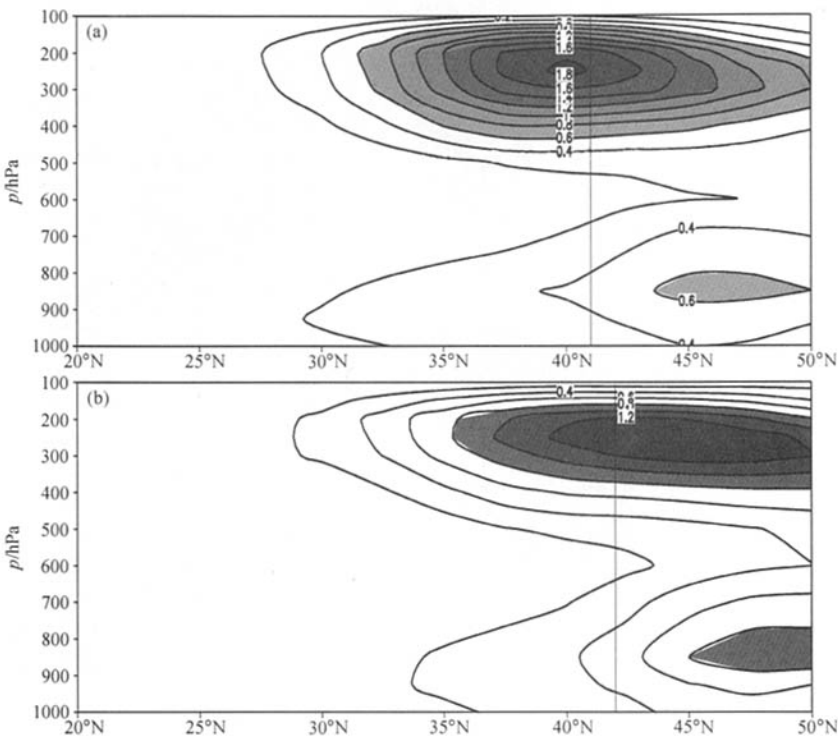


图 10 急流强 (a)、弱 (b) 年份合成的夏季平均热量涡动输送 [单位: $\text{K} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, (a) 中阴影区大于 $0.6 \text{ K} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, (b) 中阴影区大于 $0.8 \text{ K} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; 竖线为急流轴的位置]

Fig. 10 (a) Strong EAJ, values larger than $0.6 \text{ K} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ are shaded, (b) weak EAJ, values larger than $0.8 \text{ K} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ are shaded, axis of jet is showed with line (units: $\text{K} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

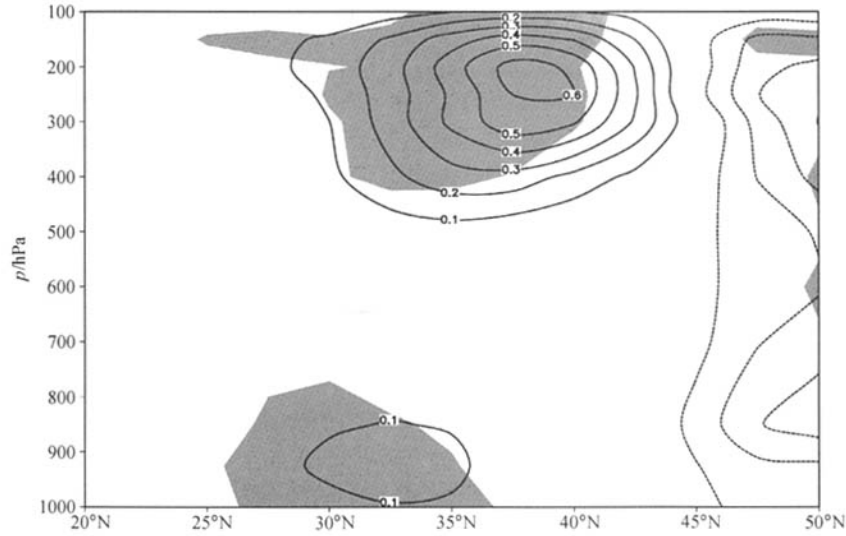


图 11 急流强、弱年份夏季平均热量涡动输送 ($\overline{V'T'}$) 的差值 (单位: $\text{K} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 阴影区通过 95% 信度检验)

Fig. 11 Composite differences of transient eddy heat flux (strong—weak), the shading illustrates the significance at 95% level (units: $\text{K} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

关。合成分析的结果得出,急流的强度和热量涡动输送的南北偏移存在一定联系,在急流强的年份,输送是偏南的,在急流弱的年份,输送是偏北的。

参考文献 (References)

- [1] 高守亭, 陶诗言. 高空急流加速与低层锋生. 大气科学, 1991, **15** (2): 11~22
Gao Shouting, Tao Shiyan. The lower layer frontogenesis induced by the acceleration of upper jet stream. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1991, **15** (2): 11~22
- [2] 高守亭, 陶诗言, 丁一汇. 寒潮期间高空波动与东亚急流的相互作用. 大气科学, 1992, **16** (6): 718~724
Gao Shouting, Tao Shiyan, Ding Yihui. Upper wave-east Asian jet interaction during the period of cold wave outbreak. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1992, **16** (6): 718~724
- [3] 李勇红, 张可苏. 急流加速产生的高空锋生和低空锋生. 大气科学, 1992, **16** (4): 452~463
Li Yonghong, Zhang Kesu. Upper-level frontogenesis and lower-level frontogenesis forced by jet acceleration. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1992, **16** (4): 452~463
- [4] 吕克利, 钱滔滔. 高空西风急流和低空南风急流中的冷锋环流. 大气科学, 1996, **20** (6): 679~690
Lu Keli, Qian Taotao. The clod-frontal circulation in the upper-level westerly jet and low-level southerly jet. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1996, **20** (6): 679~690
- [5] Kung E C, Chan P H. Energetics characteristics of the Asian winter monsoon in the source region. *Mon. Wea. Rev.*, 1981, **109**: 854~870
- [6] Bell G D, Halpert M S, Schnell R C. Climate assessment for 1999. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2000, **81**, **6**: 1328~1328
- [7] 陶诗言, 赵煜佳, 陈晓敏. 东亚的梅雨与亚洲上空大气环流季节变化的关系. 气象学报, 1958, **29** (2): 119~134
Tao Shiyan, Zhao Yujia, Chen Xiaomin. The relationship between Meiyu in far east and the behaviour of circulation over Asia. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1958, **29** (2): 119~134
- [8] 叶笃正, 陶诗言. 在六月和十月大气环流的突变现象. 气象学报, 1958, **29** (4): 249~263
Ye Duzheng, Tao Shiyan. The abrupt change of circulation over northern hemisphere during June and October. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1958, **29** (4): 249~263
- [9] Yang S, Lau K M. Variation of east Asian jet stream and Asian-Pacific-American winter climate anomalies. *J. Climate*, 2002, **15**: 306~325
- [10] Webster P J. The effect of summer tropical heating on the location and intensity of the extratropical westerly jet streams. *J. Geophys. Res.*, 1990, **95**: 18705~18721
- [11] 董敏, 余建锐, 高守亭. 东亚西风急流变化与热带对流加热关系的研究. 大气科学, 1999, **23** (1): 62~70
Dong Min, Yu Jianrui, Gao Shouting. A study on the variations of the westerly jet over east Asia and its relation with the tropical convective heating. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1999, **23** (1): 62~70
- [12] Lu Riyu. Associations among the components of the east Asian summer monsoon system in the meridional direction. *J. Meteor. Soc. Japan*, 2004, **82** (1): 155~165
- [13] Trenberth K E. An assessment of the impact of transient eddies on the zonal flow during a blocking episode using localized Eliassen-Palm flux diagnostics. *J. Atmos. Sci.*, 1986, **43** (19): 2070~2087
- [14] Gao Shouting, Tao Shiyan, Ding Yihui. The generalized E-P Flux of wave-meanflow interactions. *Science in China* (Series B), 1990, **33** (6): 704~715
- [15] Blackmon M L. A climatological spectral study of the 500 mb geopotential height of the northern hemisphere. *J. Atmos. Sci.*, 1976, **33**: 1607~1623
- [16] Lin Zhongda, Lu Riyu. Interannual meridional displacement of the east Asian up-tropospheric jet stream in summer. *Adv. Atmos. Sci.*, 2005, **22** (2): 199~211