

影响华北汛期降水的水汽输送过程

周晓霞¹ 丁一汇² 王盘兴¹

1 南京信息工程大学大气科学系, 南京 210044

2 中国气象局国家气候中心, 北京 100081

摘 要 利用 1951~2005 年 NCEP 再分析资料和中国 160 站月降水资料, 分析了华北汛期水汽输送的时空特征及其与降水的关系, 发现不同水汽通道对华北降水的影响区域不同。华北的水汽输送也具有明显的年际变化, 华北多雨年和少雨年的水汽通量分布有明显差异。EOF 分析表明, 在华北汛期多雨年, 上述水汽通道有向华北地区的正异常水汽输送。华北汛期水汽主要来自亚洲季风水汽输送, 其次是西风带的水汽输送, 它们与降水具有相似的年代际变化。1970 年代中期以后, 季风的水汽输送显著减弱, 西风带水汽输送的重要性相对增大, 华北降水在 1980 年代初的突变与季风水汽输送 1970 年代中期的突变密切相关。

关键词 华北汛期 水汽输送 亚洲季风 西风带

文章编号 1006-9895 (2008) 02-0345-13

中图分类号 P426.6

文献标识码 A

Features of Moisture Transport Associated with the Precipitation over North China during July - August

ZHOU Xiao-Xia¹, DING Yi-Hui², and WANG Pan-Xing¹

1 *Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044*

2 *National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081*

Abstract The July - August Asian monsoon moisture transport and its relationship with the rainfall over North China have been investigated using NCEP/NCAR monthly mean reanalyses and precipitation data of 160 stations in China over 1951 - 2005. Results show that different moisture paths connect with different regional rainfall in North China, respectively. The features of moisture fluxes in North China rainy season with more rainfall are quite opposite to that with less rainfall. Experience Orthogonal Function (EOF) analysis describes that anomalous influxes through every moisture path to North China correspond to the positive rainfall anomaly over this region, and vice versa. The Asian monsoon contributes much more than the westerlies in terms of vapor transfer into the North China. Both moisture influxes are closely related to the rainfall in North China on the interdecadal time scale. The moisture transfer by Asian monsoonal currents underwent an abrupt weakening at the end of the 1970s which was in connection with the distinct decrease of precipitation over North China from the beginning of the 1980s and gave relative emphasis to the westerly moisture transfer associated with rainfall over North China.

Key words North China rainy season, moisture transport, Asian monsoon, westerlies

1 引言

华北地区的长期干旱十分严重, 特别是 20 世

纪 80 年代以来, 华北地区夏季持续干旱, 对工农业生产和人民生活产生了重大影响, 引起了众多气象学家的关注。

许多学者分析了华北夏季降水的年际和年代际变化及其原因, Wang^[1]揭示了 1970 年代末对流层温度和风场发生的转变, 在这次转变之后亚洲和非洲的季风环流减弱, 降水也发生了相应变化。郭其蕴等^[2]研究了东亚夏季风的年代际变率对中国气候的影响, 指出东亚夏季风在 1970 年代中期发生了年代际减弱, 华北地区的降水也随之由多变少。Hu 等^[3]详细阐述了中国气候的长期变化与全球变暖的关系, 指出华北地区变为干暖、中部地区变为湿冷, 这种气候变化可能与印度洋海表温度升高有关。陈隆勋等^[4]探讨了中国近 80 年来气候变化特征及其形成机制, 表明中国降水呈现明显的年代际变化, 多雨带在 1980 年代及以后由华南北移到长江中下游, 强调了人类活动对气候变化的影响。Yu 等^[5]和 Xin 等^[6]的研究都表明, 对流层高层变冷与气候变化紧密相联。Yu 等^[5]指出, 华北干旱和长江流域多雨的趋势是东亚对流层高层变冷造成的, 变冷与对流层和平流层相互作用有关。张庆云等^[7]的研究表明, 华北降水的年际和年代际变化, 是与夏季东亚-西太平洋地区上空 500 hPa 位势高度场以及西太平洋副热带高压脊线位置的年际和年代际变化密切相关的。吴志伟等^[8]的分析表明, 近 50 年华北干旱与洪涝强度相当, 华北雨季总体呈干旱的趋势, 年际变化最弱, 年代际变化很强, 从同期 500 hPa 高度场来看, 华北雨季与副高相关显著, 且受其西北侧中高纬地区的环流影响较大; 从前期海温来看, 华北雨季与大西洋西部和北太平洋海温关系密切。鲍名和黄荣辉^[9]研究了近 40 年我国暴雨的年代际变化特征, 指出 70 年代末开始的华北暴雨减少可能与赤道中、东太平洋海表面温度的年代际变化有关。

目前, 关于水汽输送与降水关系的研究也已有不少工作^[10~13]。樊增全等^[14]对 1980~1987 年华北地区上空水汽输送特征的分析发现, 华北地区水汽输送的方向、垂直结构和水汽源地等都反映了东亚季风环流的特点。华北地区水汽输送在 700 hPa 以上入境量多于出境量, 在 700 hPa 以下相反, 而且低层的水汽净输出多于中、高层的水汽净输入, 水汽通量绝大部分集中在地面到 500 hPa 层内。Simmonds 等^[15]指出中国东南部的水汽主要来自南海和孟加拉湾, 对于东北及华北的部分地区, 中纬度的西风水汽输送起主导作用。Zhou 等^[16]讨论了

与中国夏季降水典型异常型相对应的水汽输送的变化, 发现与降水异常相对应的水汽输送的源头为西太平洋, 而不同于气候平均态降水所对应的水汽源地。田红等^[17]分析了夏季水汽输送特征及其与中国降水异常的关系, 揭示出北方型雨带对应的水汽输送特征为中纬度西风异常输送与副热带高压西北侧的西南异常输送在华北辐合。王可丽等^[18]分析了西风带与季风对中国西北地区的水汽输送, 发现西北大部分地区的水汽来源于西风带, 南亚夏季风的水汽输送主要影响西北地区南部和东部。张文君等^[19]在对中国东部水分收支进行分析时表明, 华北在年平均、夏季以及冬季均为水汽源区。

综上所述, 尽管前人已经取得了研究成果, 但对与降水相联系的水汽输送特征及其对华北汛期降水的影响研究还不是很多, 仍需深入探讨。本文试图从水汽输送的角度, 分析影响华北汛期降水的不同水汽通道的作用, 揭示华北汛期降水异常时期的水汽输送特征, 尤其是年代际和年际的变率, 并比较了西风带和季风水汽输送对华北地区水汽收支的贡献。

2 资料和方法

使用 1951~2005 年 NCEP/NCAR 月平均资料, 包括从 1000~300 hPa 八个标准气压层的风场 (u 、 v 分量)、比湿 q 以及相应的地面气压 p_s 资料, 水平格距为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, 以及国家气候中心整编的中国 160 站月降水资料。将每年 7~8 月 ($35^\circ\text{N} \sim 42.5^\circ\text{N}$, $110^\circ\text{E} \sim 120^\circ\text{E}$) 范围内面积平均的降水量作为该年华北汛期降水。水汽通道强度定义为, 从地面到 300 hPa 垂直积分的水汽通量在水汽通道所在的经度或纬度范围内的平均值。序列长度均为 1951~2005 年。

需要说明的是, 本文只利用月平均资料计算水汽输送的定常分量。因为根据周天军等^[20]的估算, 定常分量较之瞬变分量要大一个量级, 是决定水汽输送的主要部分, 特别是在陆地上。所以这样计算是合理的。

(1) 从地面到 300 hPa 垂直积分的水汽通量计算^[21]:

纬向水汽通量:

$$Q_\lambda = \frac{1}{g} \int_{300}^{p_s} (uq) dp, \quad (1)$$

经向水汽通量:

$$Q_{\varphi} = \frac{1}{g} \int_{300}^{p_s} (\omega q) dp. \quad (2)$$

(2) EOF 和 Morlet 小波分析是在大气科学研究中经常使用的方法，详细介绍参看文献[22, 23]。

3 7~8 月亚洲季风区不同水汽通道与华北汛期降水的相关分析

为确定影响华北汛期降水的水汽通道，考查了

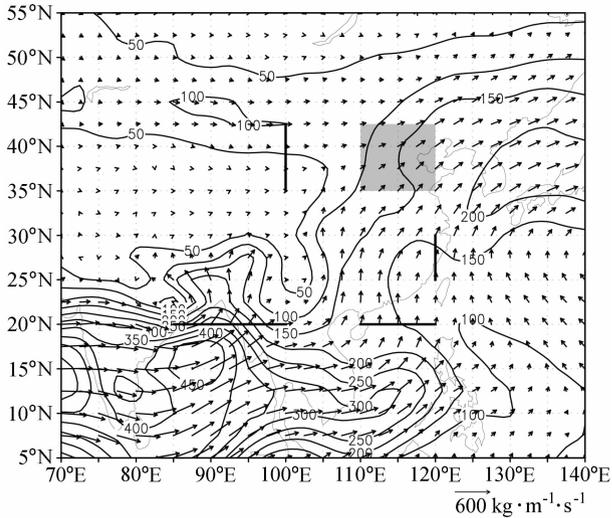


图 1 1951~2005 年平均的 7~8 月水汽输送场 (单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)。矩形阴影表示华北区域, 4 条粗线段分别表示西风带通道、太平洋通道、南海通道和孟加拉湾通道与地面相交的位置

Fig. 1 Jul - Aug moisture transport averaged for 1951 - 2005 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$). The rectangle shading indicates the North China area, the 4 thick sections denote intersection of westerly path, Pacific path, SCS (the South China Sea) path, and BOB (the Bay of Bengal) path at surface, respectively

1951~2005 年 7~8 月多年平均的整层水汽通量 (图 1), 可见进入中国大陆的水汽主要来自孟加拉湾、南海、西太平洋和中纬度西风带的输送, 结合亚洲地区水汽输送的均方差 (图略) 与华北汛期降水和水汽输送场的相关分布 (图 2), 以及水汽通道靠近大陆的原则, 确定了 4 条与华北汛期降水相联系的水汽通道: 孟加拉湾通道: ($20^{\circ}\text{N}, 85^{\circ}\text{E} \sim 100^{\circ}\text{E}$) 的经向通量; 南海通道: ($20^{\circ}\text{N}, 110^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$) 的经向通量; 太平洋通道: ($25^{\circ}\text{N} \sim 30^{\circ}\text{N}, 120^{\circ}\text{E}$) 的纬向通量; 西风带通道: ($35^{\circ}\text{N} \sim 42.5^{\circ}\text{N}, 100^{\circ}\text{E}$) 的纬向通量。另外, 还选取了通过 ($35^{\circ}\text{N}, 110^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$) 的经向输送, 把它作为西南和东南季风中偏南分量的合成, 代表季风的水汽输送, 称为 35°N 通道。这个通道的水汽来源可能始自孟加拉湾、南海和太平洋通道, 它表达了这些通道在向北输送过程中对华北水汽输送的直接影响。虽然它与上述三个通道有密切关联, 但本文把它作为特殊季风通道看待。

表 1 列出了各水汽通道的平均值和标准差以及与华北汛期降水的相关系数。从表 1 可知, 水汽通道强度由大到小依次为南海、孟加拉湾、 35°N 通道、西风带和太平洋通道。与华北汛期降水相关密切程度依次为 35°N 通道、西风带、太平洋、孟加拉湾和南海通道, 其中前三项相关显著性通过了 95% 的信度。图 3 是各条水汽通道的标准化序列, 图 4 为华北汛期这些水汽通道与中国 160 站降水的相关分布。可见, 35°N 通道与整个华北降水的相关都很显著, 与长江中下游降水呈负相关。西风带通道

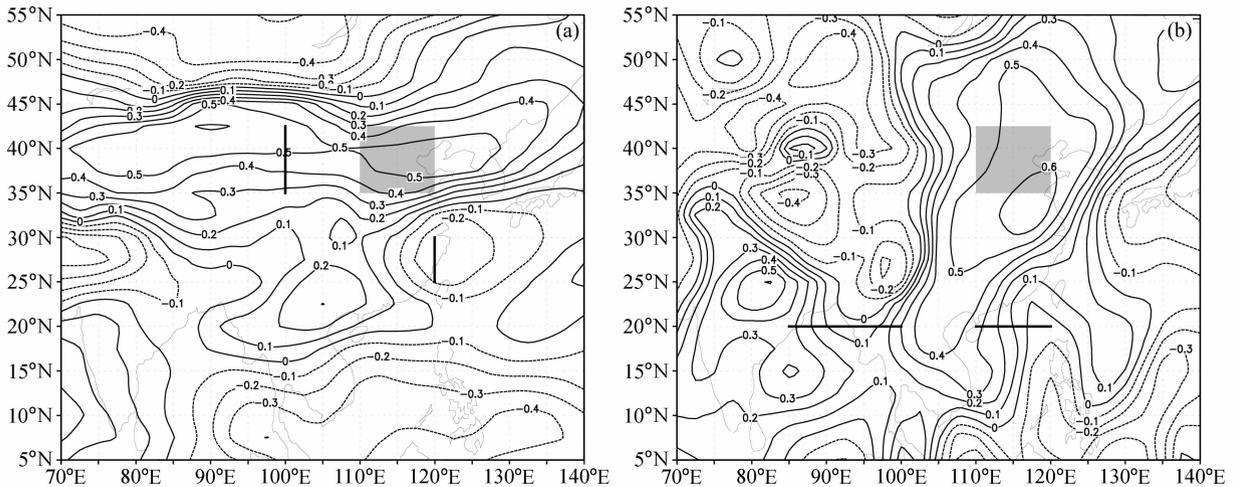


图 2 同图 1, 但为水汽输送通量和华北降水的相关分布: (a) 纬向输送, (b) 经向输送

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for correlation distribution of moisture transport and rainfall in North China: (a) Zonal moisture transport; (b) meridional moisture transport

表 1 水汽通道的平均值和标准差 (单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 以及与华北汛期降水的相关系数

Table 1 Mean values and standard deviations ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) of moisture paths and the correlation coefficients with North China rainfall during Jul - Aug

水汽通道	平均值	标准差	相关系数
孟加拉湾	141.8	22.7	0.24
南海	142.7	31.5	0.20
太平洋	43.1	61.9	0.28*
西风带	52.3	25.5	0.50*
35°N 通道	103.0	70.3	0.62*
印度季风	245.6	50.0	-0.11
东亚上空	-25.3	68.3	0.25

注: * 表示相关显著性通过了 95% 的信度。

与河套东北部和东北平原的降水相关较好, 负相关区在长江中下游。太平洋通道与河套西北部降水为正相关, 负相关区位于长江流域。孟加拉湾通道与河套顶部的降水正相关显著, 与华北南部的降水有弱的正相关。南海通道与华南西部和华北南部的降水表现为弱的正相关。可以看出, 这些水汽通道对华北汛期降水影响区域各不相同, 其中 35°N 通道和西风带通道与华北地区降水相关最好, 说明华北的水汽主要经此通道而来。另外有趣的一点是, 这些通道与华北和长江流域降水的相关大多相反, 表明华北和长江流域的降水多呈反位相分布。

根据水汽通道强度标准化序列 (见图 3), 规定大于一个标准差的年份为水汽输送强年, 小于一个负标准差的年份为水汽输送弱年。35°N 通道强年有 1958、1960、1961、1962、1963 和 1964 年, 弱年有 1980、1993、1999 和 2002 年; 西风带通道强年有 1957、1958、1959、1960、1961、1962 和 1963 年, 弱年有 1954、1955、1999、2000、2001、2002、2004 和 2005 年; 南海通道强年有 1951、1952、1954、1955、1959、1963、1973、1987 和 1997 年, 弱年有 1978、1984、1986、1989、1990、1992、2000 和 2001 年; 孟加拉湾通道强年有 1958、1959、1961、1962、1967、1969、1980、1983 和 1991 年, 弱年有 1951、1953、1964、1965、1979、1985 和 2002 年; 太平洋通道强年有 1960、1961、1972、1973、1978 和 1994 年, 弱年有 1954、1957、1965、1969、1974、1980、1983、1987、1993、1998 和 1999 年。

图 5 是各水汽通道强年和弱年的水汽输送合成

差值, 图 6 是对应的降水场合成差值。由图 5a 可见, 当 35°N 通道强度增强时, 来自西风带和太平洋的水汽输送也同时有所增强, 图 6a 中降水最大正异常区与图 5a 的水汽输送最大中心重合, 位于华北中部, 而江南地区为降水负距平。水汽通道强度弱年与强年相反。

西风带通道水汽输送强度增大时, 同时伴有偏南风水汽输送的增大, 图 6b 中降水正异常区位于河套东北部、黄河下游和东北南部, 而长江和江南地区为降水负距平区。该水汽通道弱时情况相反。

当太平洋通道的东风水汽输送增强时 (图 5c), 纬向水汽输送场大致呈带状结构, 即在 22.5°N 以南, 西风输送加强, 在 22.5°N~35°N 之间东风输送加强, 再往北又是西风输送加强区, 来自副热带西太平洋的东南风在长江以北转为西南风进入北方地区。这种分布基本符合张庆云等^[24]指出的热带季风槽加强、梅雨锋减弱的情形, 对应的降水异常为江淮流域大范围降水减少, 河套北部、河北平原东部和华南沿海降水增加 (图 6c)。

图 5d 是孟加拉湾通道加强的情形, 可见水汽经中南半岛、云贵高原向东北到达长江中游并继续向北输送, 长江与黄河之间为水汽通量的大值区。图 6d 中降水的正异常区位于广西、长江中游和河套北部, 与图 4d 的相关分布一致。

图 5e 表明, 当南海通道强时, 中国东部大陆的经向输送均增大, 但江淮之间增加较少。图 6e 中降水的分布为, 华南沿海、长江以北的大部分地区均为降水正距平, 而长江流域出现了较小的负距平。而在南海通道弱年 (图略), 降水除东南沿海略偏多以外, 其他均为少雨。可见, 南海通道强时, 容易造成南北降水多、中间降水少; 当南海的水汽输送弱时, 容易导致大范围的降水减少。

上面分析了不同水汽通道与华北汛期降水的关系, 那么作为热带水汽的最终来源, 印度季风区和热带西太平洋的水汽输送与华北汛期降水有怎样的关系? 为了回答这个问题, 定义通过 (10°N~20°N, 100°E) 的平均西风水汽通量为印度季风区水汽输送强度, 通过 (10°N~20°N, 130°E) 的平均东风水汽通量 (定义此通道东风为正) 为来自热带太平洋的水汽输送强度, 称为东亚上空的水汽输送强度。它们与华北汛期降水的相关系数见表 1。可见, 东亚上空的水汽强度与华北降水的

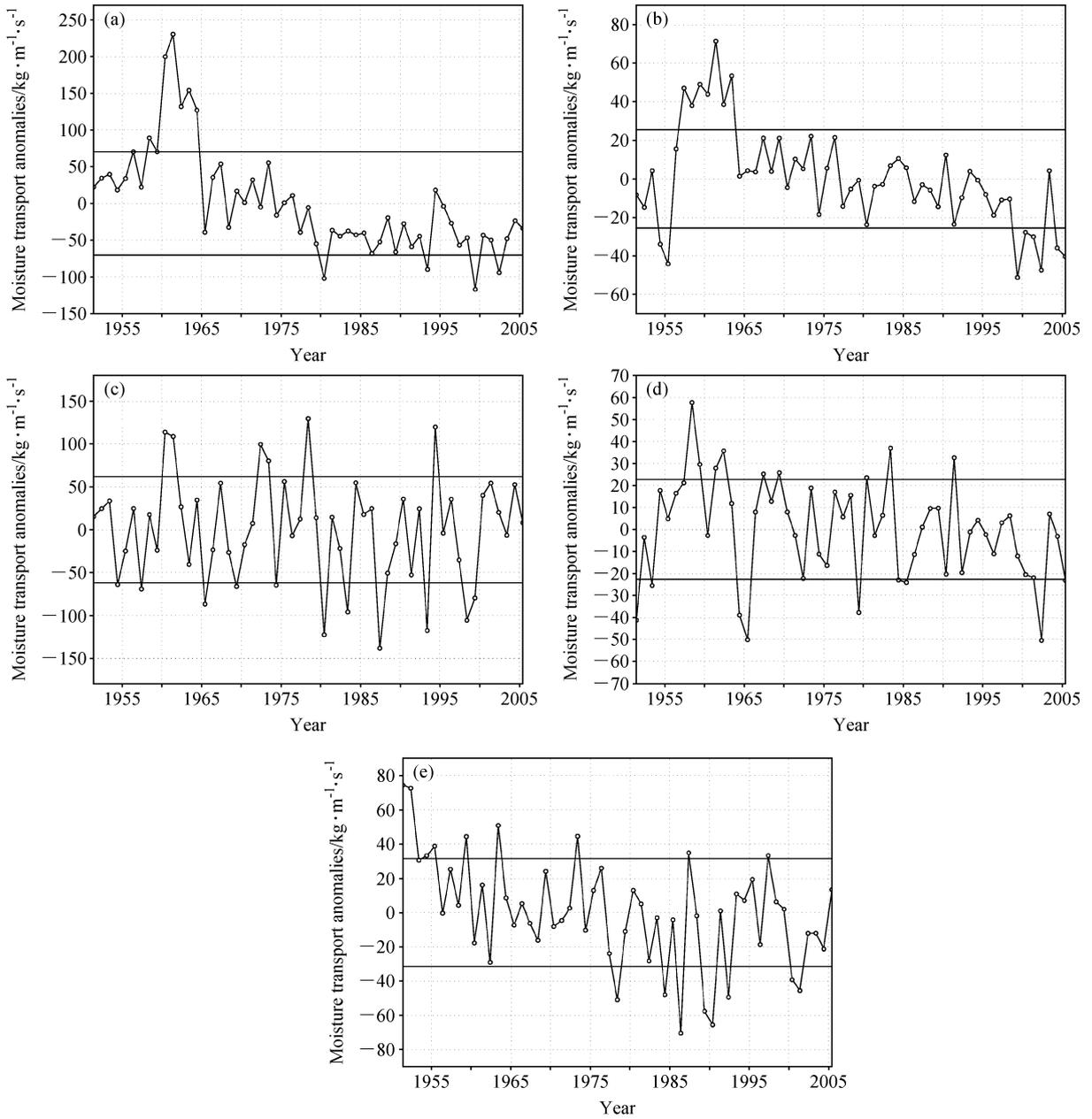


图 3 1951~2005 年各水汽通道强度距平序列：(a) 35°N 通道；(b) 西风带通道；(c) 太平洋通道；(d) 孟加拉湾通道；(e) 南海通道。图中上下两条直线分别代表正负一倍平均值

Fig. 3 Jul - Aug moisture transport anomalies of each path from 1951 to 2005; (a) 35°N path; (b) westerly path; (c) Pacific path; (d) BOB path; (e) SCS path. The upper and lower beelines represent the positive and negative mean values, respectively

相关要好于印度季风，虽然印度季风的水汽强度比东亚上空大几乎一个量级，但它们的标准差却相差不多，表明相对于平均值，东亚上空的年际变率更大，也说明它对华北汛期降水的影响可能更为重要。计算表明，印度季风向东和东亚上空向西的输送强度为显著反相关，相关系数为-0.52，也就是说，东亚季风向西的水汽输送偏弱时，印度上

空向东的水汽偏强，水汽可以一直向东输送到菲律宾以东洋面，使得在南海附近转向进入中国大陆的水汽减少，特别是到达华北的水汽大大减少；反之，当东亚上空向西的水汽输送偏强时，印度季风向东的水汽输送偏弱，它们通常在 100°E~125°E 之间汇合转向流入华南，可继续伸向北方地区甚至到达西北太平洋。这反映了经向和纬向水汽输送的

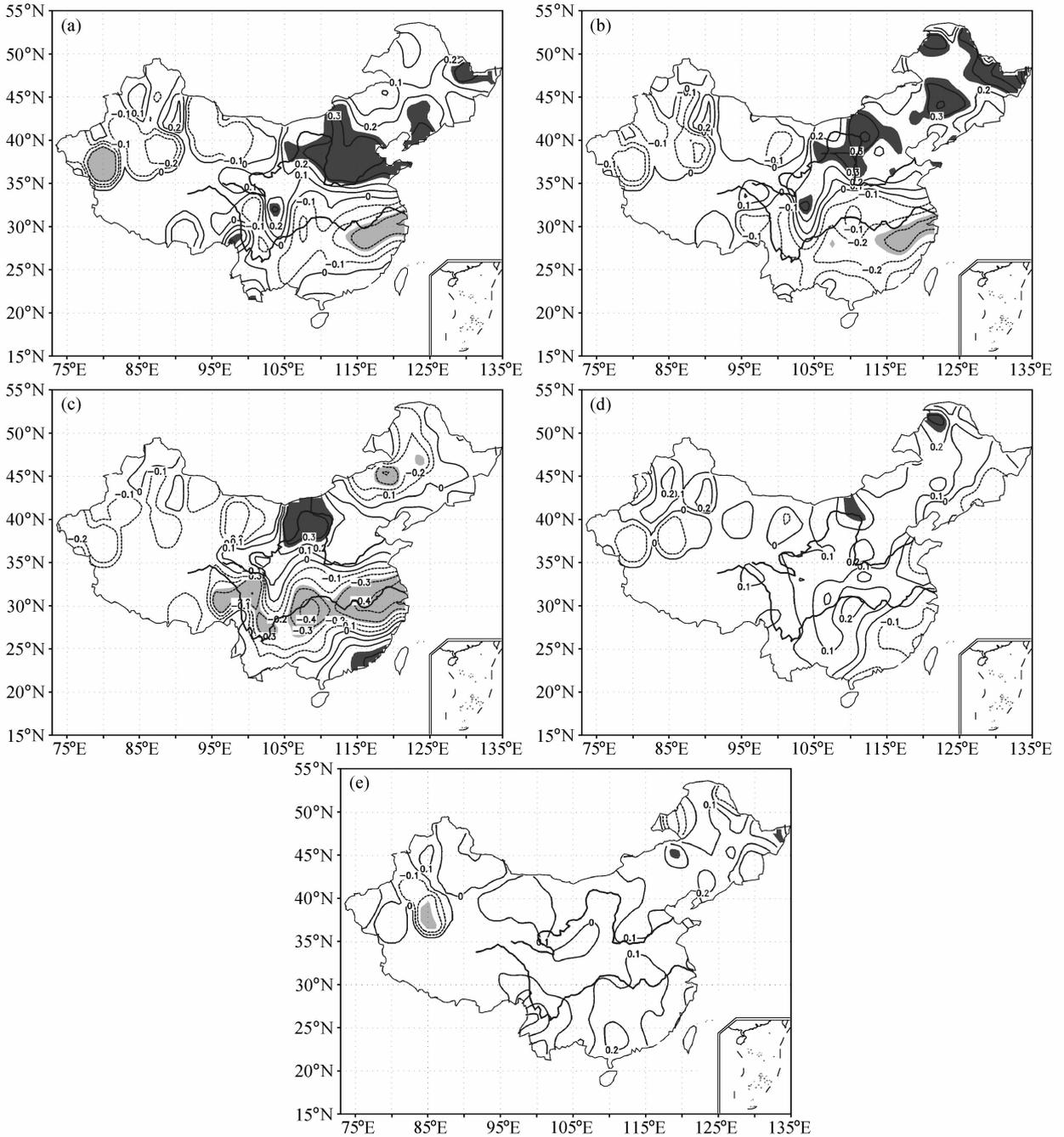


图4 1951~2005年各水汽通道强度与中国160站7~8月降水量的相关分布。深(浅)色阴影表示正(负)相关显著性通过95%的信度。其余同图3

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for the correlation distribution of intensity of each moisture path and 160-station rainfall in China during Jul-Aug. Dark (light) shadings indicate positive (negative) correlation over 95% confidence level

关联。在华北汛期的8个涝年里,其中有5年东亚上空水汽输送偏强,表现为东风输送,而在华北汛期的12个旱年里,有8年东亚季风的输送偏弱,表现为西风输送。站点的观测资料很好地验证了上述结论。

4 华北汛期降水和水汽输送特征

图7为华北汛期降水的年际变化曲线及小波分析实部,汛期平均降水量为263 mm,标准差为57 mm。华北汛期降水表现出明显的年际和年代际

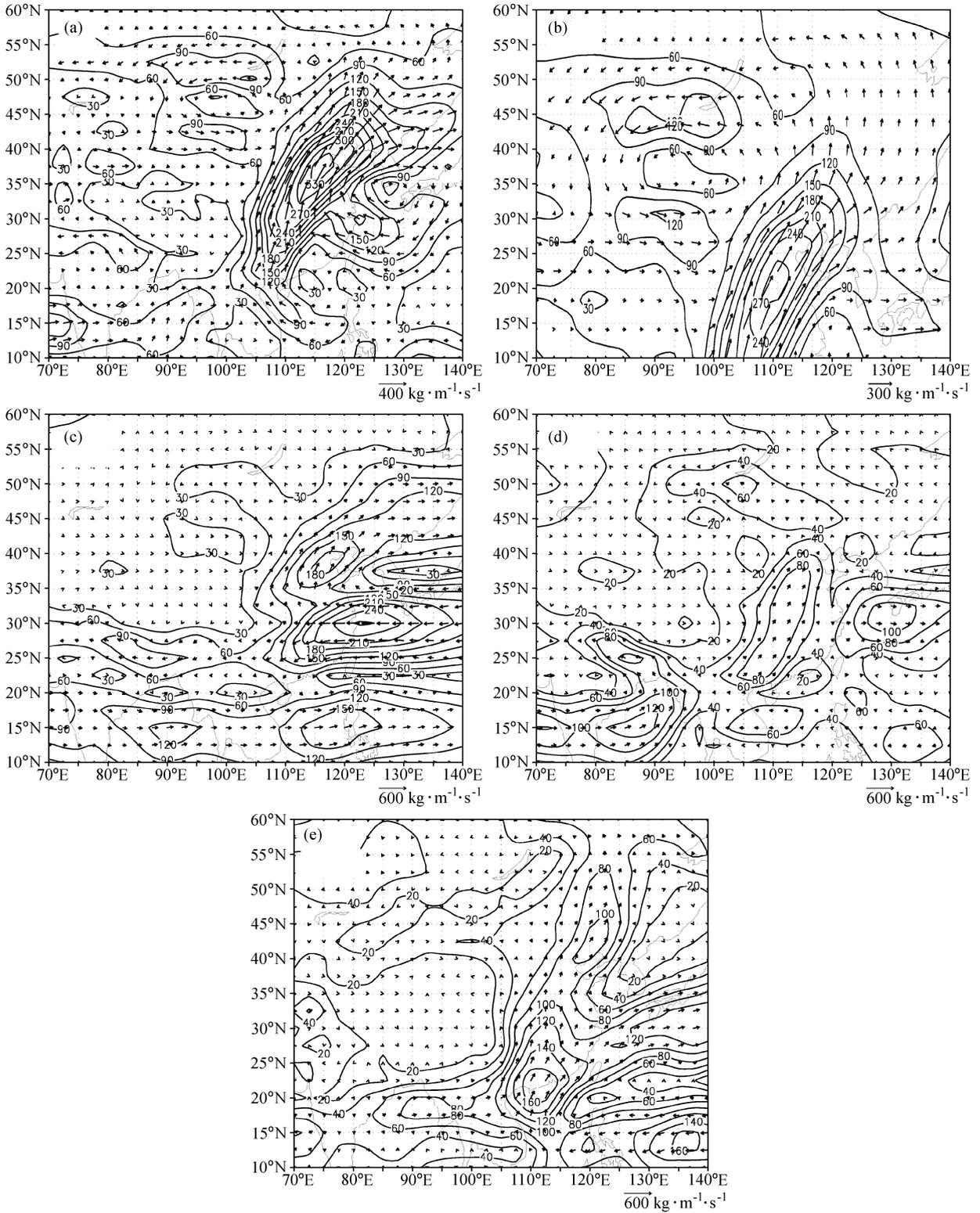


图5 1951~2005年各水汽通道强年和弱年水汽输送合成差值分布，其余同图3

Fig. 5 Same as Fig. 3, but for the difference of composite moisture fluxes between weak and strong moisture path years

变化。1959、1963、1964、1996年降水距平百分率超过了40%，而1980、2002年降水距平百分率低

于-40%。从年代际尺度来看，50年代到60年代前半段，为多雨期，1965年以后降水明显减少，70

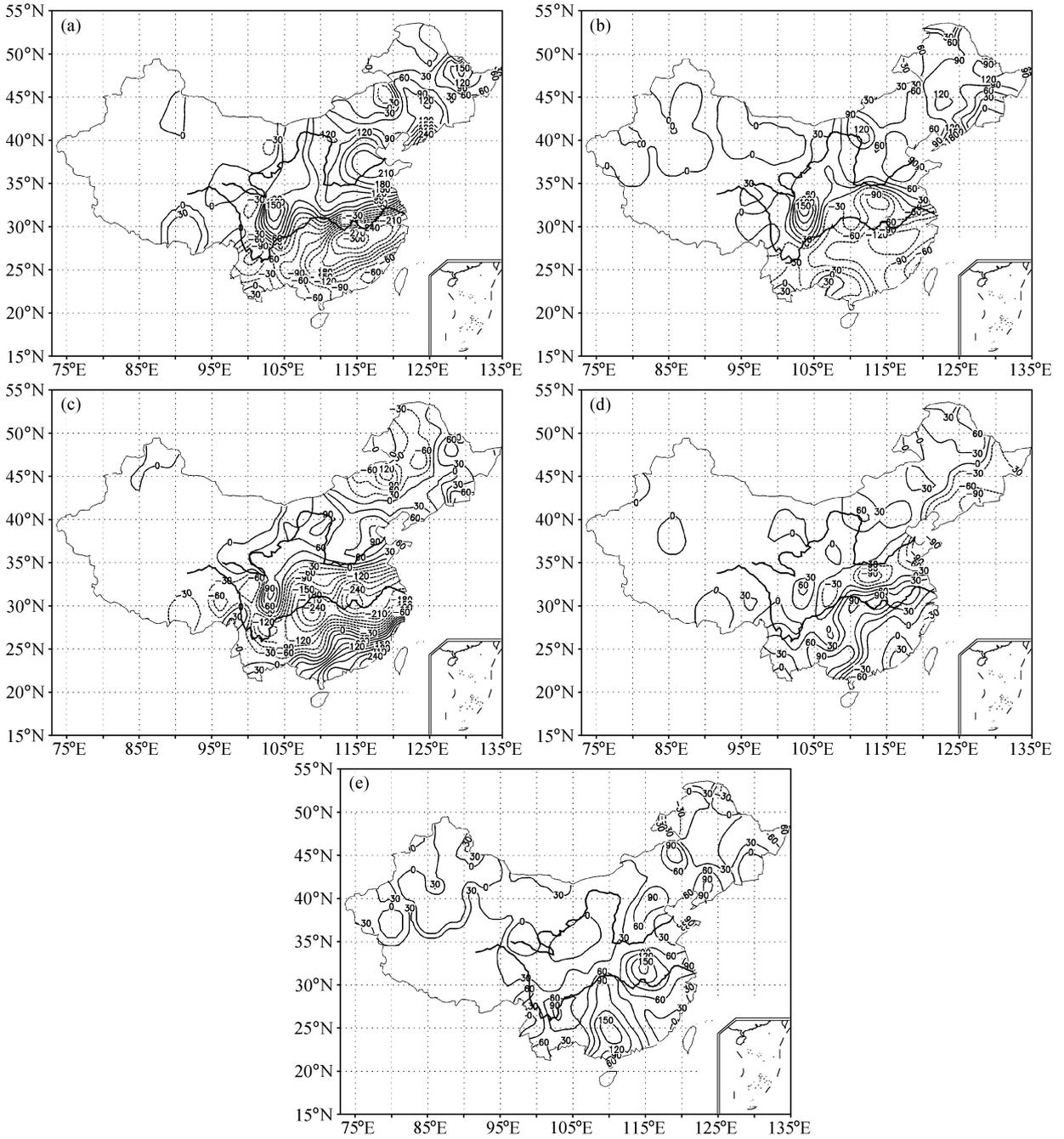


图6 1951~2005年各水汽通道强年和弱年降水合成差值分布(单位: mm)。实(虚)线表示水汽通道强年降水大于(小于)弱年降水。其余同图3

Fig. 6 Same as Fig. 3, but for difference of composite rainfall (mm) between weak and strong moisture path years. Solid (dashed) lines indicate that rainfall in strong moisture path years is more (less) than that in weak moisture path years

年代中期又表现为增多, 80年代到90年代初, 又一次下降, 90年代中期出现了短暂的回升, 但从90年代后期开始到2005年, 又进入了一个低谷, 几乎是近55年降水最少的时期, 其中1997、1999和2002年发生了严重的干旱, 与50年代相比, 降

水量减少了近1/3。

图7b是华北汛期降水的小波分析, 华北汛期降水存在准17年、准11年和准3年左右的周期。准17年周期在整个时段都存在, 准11年周期从70年代中期以后才出现, 80年代到90年代中期, 6

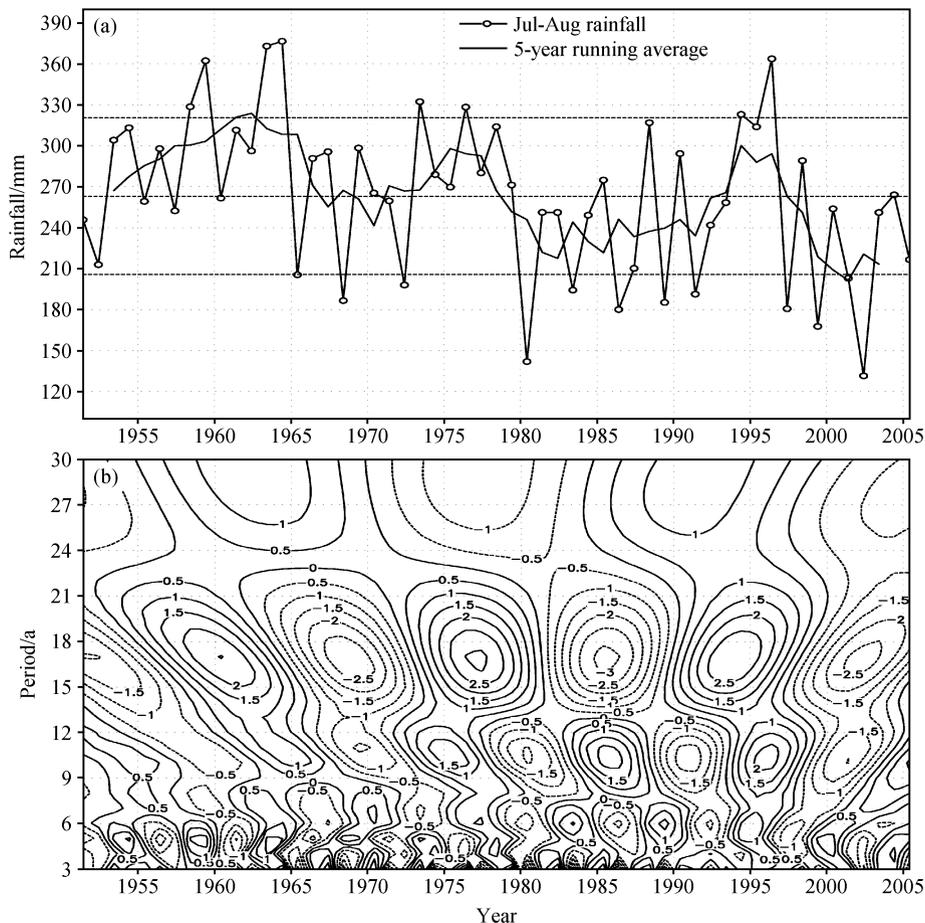


图 7 华北汛期降水的年际变化曲线 (a) 及其小波分析实部 (b)。(a) 虚线为一倍正 (上虚线)、负 (下虚线) 标准差及气候平均值 (中虚线)

Fig. 7 Interannual variation of Jul - Aug rainfall over North China (a) and its real part of Morlet wave analysis (b). The dashed lines are positive (upper) and negative (lower) standard deviations and rainfall climatology (middle) in (a)

年周期的振荡也有所反映, 准 3 年周期存在于 60 年代中期到 80 年代末, 之后, 周期趋于缩短。图 4a 中的 5 年滑动平均曲表明, 华北降水经历了将近 3 个周期, 每个多雨期和少雨期基本与准 17 年周期的正负位相中心对应。降水的第一次转折 1965 年是从正位相转为负位相, 第二次转折 70 年代末对应于准 17 年周期正位相减弱、准 11 年周期负位相很强的时期, 这两种周期共同作用的结果, 造成了降水的第二次显著减少。90 年代以后, 降水变化的准 11 年周期变得更加明显, 如 1980 年的干旱, 特别是 90 年代前期的少雨与准 11 年的负位相中心对应, 90 年代中期雨量的突增对应着准 11 年周期和准 17 年正位相的叠加。90 年代中期以后, 准 11 年和准 17 年周期均为负位相, 导致了这一时期内持续干旱。

华北汛期西风带通道和 35°N 通道强度同样具有准 11 年和准 17 年的周期 (图略), 而且与降水的正负位相变化相当同步, 但除此之外还有 27 年左右的周期, 这是与降水不同的。需要指出的是, 对于 90 年代中期降水量的急剧回升, 35°N 的水汽输送也相应增强, 西风带输送强度却是减弱的, 对比这两条水汽通道的小波分析图可发现, 它们 10 年以上周期的位相均相同, 但年际尺度的周期位相相反, 35°N 通道处于正位相, 西风带通道处于负位相, 可能是年际尺度周期造成了二者变化的不同。

为揭示华北汛期水汽通量场的时空分布特征, 对 1951~2005 年 7~8 月整层水汽通量场进行了 EOF 分析, 并考查了其与中国降水的相关。图 8 是 EOF 第一模态及其与中国同期降水的相关分布。图 8a 清楚地描绘了来自南海、孟加拉湾、西

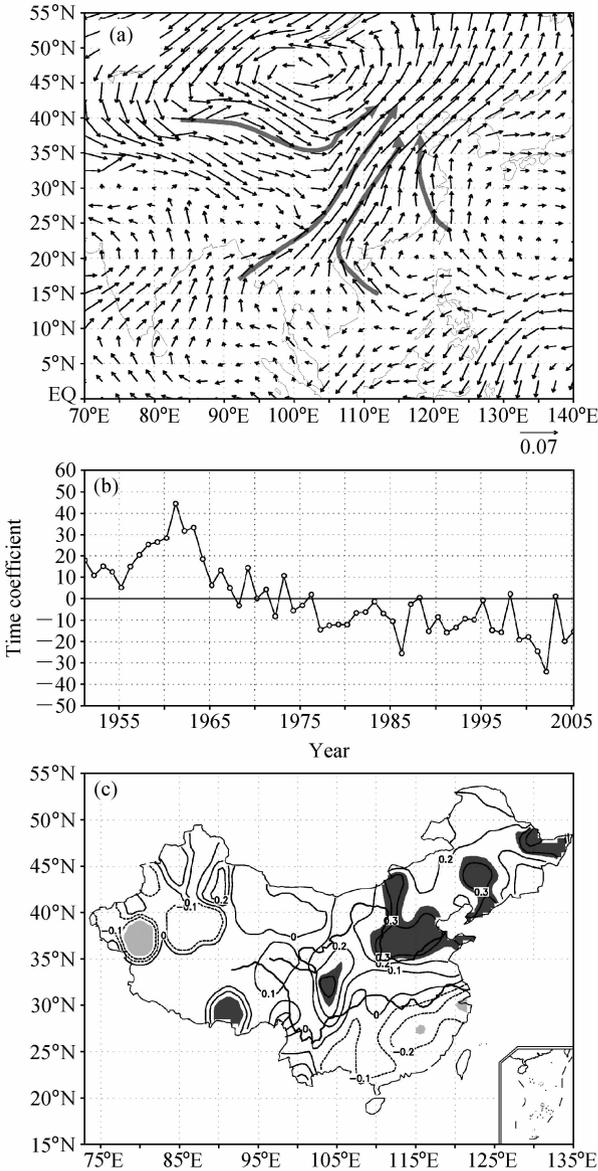


图8 华北汛期水汽输送 EOF 第一模态及其与中国同期降水的相关分布: (a) 水汽输送场的空间分布; (b) 时间系数; (c) EOF 时间系数与降水的相关场, 深(浅)阴影表示正(负)相关显著性通过 95% 的信度

Fig. 8 (a) Spatial distribution and (b) time coefficient of the first EOF (Experience Orthogonal Function) mode of moisture transport over North China during Jul - Aug, and (c) the correlation between the time coefficient and rainfall over China. Dark (light) shadings indicate positive (negative) correlation over 95% confidence level in (c)

太平洋和中纬度西风带的四支异常水汽流入华北地区。结合图 8b 和图 8c 可知, 这是华北多雨时的水汽输送分布型。EOF 第一模态的时间系数与华北汛期降水的演变具有相似的年代际特征, 在 60 年

代中期之前, 强的向北经向通量对应着华北的多雨时期, 70 年代中期以后的负异常输送, 反映了经向水汽通量的减弱, 对应华北的降水减少。华北多雨和少雨年水汽通量的差异与 EOF 分析的结果吻合。值得一提的是, 图 8c 也反映出华北与长江流域降水为反位相变化。

为了比较西风带和季风气流(包括西南季风和东南季风)对华北地区水汽收支的贡献, 图 9 给出了华北地区西风带和季风气流的水汽输入量以及华北汛期降水距平百分率。西风带和季风的水汽输送量在 60 年代中期和 80 年代初都出现了明显的减少, 与降水的变化一致。1999 年以后, 西风带的水汽输送量和华北降水又有明显的下降。值得注意的是, 对于 90 年代中期华北出现短暂的多雨期, 季风的输送量出现了相应的增强, 而西风带输送强度却是下降的, 结合前面的小波分析可以推断, 季风气流的输送此时期起了主要作用。

用 M-K 方法对三个序列进行突变检验发现, 华北汛期季风水汽输送、西风带水汽输送和降水量分别在 1975、1994 和 1980 年发生突变(图略), 可以推断 1980 年降水量的突变与 1975 年季风水汽输送突变有密切关系。结合前人对气候跃变的研究^[1], 将序列分为 1951~1976 和 1977~2005 两个气候段。计算表明, 来自季风的水汽量的均值和方差远远大于西风带水汽输送量。在 1977 年之前, 三条曲线都处于高值段, 之后均维持在较低水平, 其中季风的水汽输送量减少得最剧烈, 与西风带水汽输送量的差值变小, 几乎为前半段差值的 1/3。在 1951~1976 年, 季风输送的水汽量约为西风带的 3 倍, 而在后半段尚不到 2 倍。这表明在 1977~2005 年, 季风输送水汽量大大减少, 西风带的作用相对增强。西风带水汽通道强度与 500 hPa 区域西风指数的相关系数为 0.87, 季风水汽输送强度与东亚季风指数的相关系数为 0.83, 均通过了 99% 的信度。这说明华北汛期降水与西风环流和东亚季风密切相关。

计算表明, 华北的水汽以西边界和南边界输入为主, 西边界的水汽主要由西风带气流提供, 中心值位于 700~500 hPa 层; 南边界的水汽来自印度西南季风和东亚季风气流, 以 700 hPa 以下输送为主(图略), 这与地形作用有关。为进一步了解华北区域的水汽收支特征, 根据图 7a, 选取华北汛期

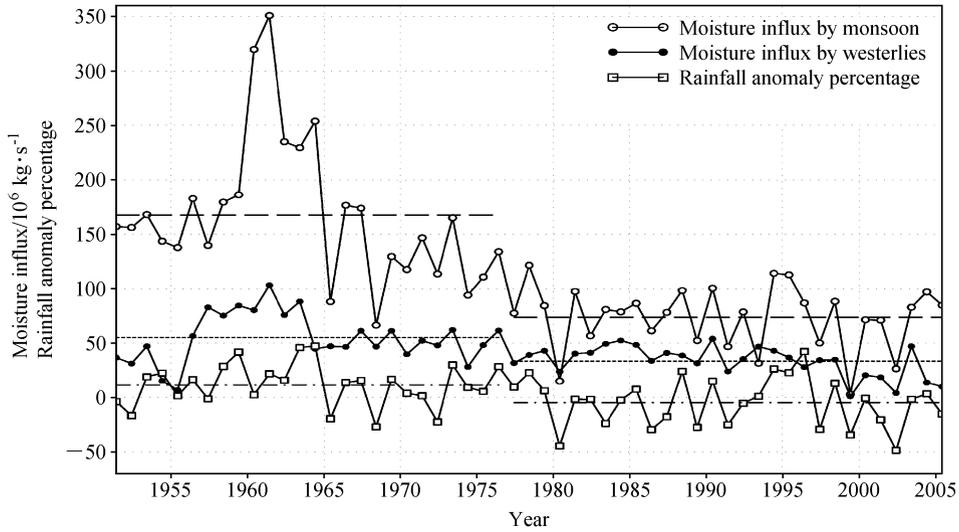


图 9 华北地区西风带和季风输送水汽量以及降水距平百分率。长虚线、短虚线、点划线为季风、西风带水汽输送量、降水距平百分率在 1951~1976 和 1977~2005 年的平均值

Fig. 9 The moisture influx to North China by westerlies and Asian monsoon and the rainfall anomaly percentage over North China during Jul - Aug, the short, long and dot dashed lines denote their mean values for 1951 - 1976 and 1977 - 2005, respectively

要说明的是，根据 Zhou 等^[14]对 NCEP/NCAR 再分析资料和 ERA40 资料的比较，前者估算的水汽输送强度要明显强于后者。基于此，该定量评估可能存在资料上的不确定性。

5 结论

利用 1951~2005 年 NCEP 再分析资料和中国 160 站月降水资料，通过对水汽输送气候态的分析和相关计算，确定出 4 条与华北汛期降水相联系的水汽通道，分析了它们以及 35°N 通道对华北地区水汽输送和汛期降水的影响，讨论了华北汛期水汽输送场的时空特征，并比较了西风带和季风水汽输送量对华北地区水汽收支的贡献，初步得到以下结论：

(1) 影响华北汛期降水的 4 条水汽通道以及 35°N 通道强度和变率各不相同，它们对华北降水的影响区也存在差异，35°N 水汽通道和西风带水汽通道与华北汛期降水相关最好。在水汽通道强、弱年水汽通量场和降水异常的分布特征都有很好的对应关系。

(2) 10°N~20°N 东亚上空向西的水汽输送偏弱时，印度季风向东的水汽输送偏强，印度季风气流可以一直向东到达菲律宾以东洋面，使在南海附近转向进入中国大陆的水汽偏少，从而导致华北汛

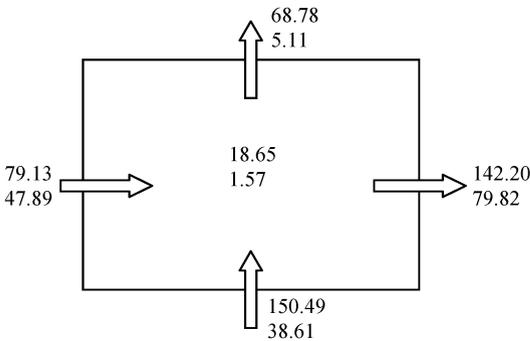


图 10 华北汛期多雨和少雨年水汽收支(单位: 10⁶ kg/s)。箭头表示水汽输送方向，上面的数字对应多雨年，下面的数字对应少雨年

Fig. 10 Moisture budget (10⁶ kg/s) in wet (upper digits) and dry (lower digits) years over North China

降水量大于一倍标准差的 8 个多雨年和小于一倍负标准差的 12 个少雨年，计算了华北区域多、少雨年整层水汽收支。由图 10 可见，多雨年时，华北地区主要由南边界输入水汽，西边界来的水汽约为南边界的一半，整个区域为水汽盈余。而少雨年时，华北地区各边界的水汽通量都显著减少，其中南边界的水汽通量减幅最大，整个区域的水汽盈余量不到多雨年的 1/10。可见，华北地区降水的增多(减少)是由西边界和南边界的输送增加(减少)造成的，特别是南边界的水汽输送起了主要作用。需

期降水也偏少;反之,印度季风气流和东亚热带季风气流在 $100^{\circ}\text{E}\sim 125^{\circ}\text{E}$ 一带汇合转向流入华南,当继续向北到达华北和东北地区时,容易造成北方降水偏多。这反映了经向和纬向水汽输送的关联。

华北汛期降水具有明显的年际和年代际振荡,特别是在年代际尺度上,与西风带通道和 35°N 通道强度有着相似的变化,它们都存在准 17 年和准 11 年的周期,且位相变化非常一致。华北降水的准 17 年周期在整个时段都比较明显,但从 20 世纪 90 年代以后,华北降水的准 11 年周期可能更为重要。

(3) 7~8 月亚洲季风区水汽输送场 EOF 第一模态与华北汛期降水密切相关,其空间分布特征反映了各条水汽通道对华北降水的作用,多雨和少雨年的水汽通量异常特征与 EOF 分析结果一致。西风带水汽输送大值位于 $700\sim 500\text{ hPa}$ 层,季风的水汽输送以 700 hPa 以下为主。季风气流输送到华北的水汽其平均值和方差远远大于西风带的水汽输送,特别是在 1977 年之前,前者水汽输送量约为后者的 3 倍,从 1977 年以后,两者都明显减弱,但季风气流减弱更剧烈,说明西风带水汽输送对华北降水的相对作用明显增大。

(4) 水汽收支分析表明,华北汛期多(少)雨年,西边界和南边界的水汽通量增强(减弱),整个区域有较多(较少)的水汽盈余,其中南边界水汽通量的变化起主要作用。

参考文献 (References)

- [1] Wang Huijun. The weakening of Asian monsoon circulation after the end of 1970's. *Adv. Atmos. Sci.*, 2001; **18**: 376~386
- [2] 郭其蕴,蔡静宁,邵雪梅,等. 东亚夏季风的年代际变率对中国气候的影响. *地理学报*, 2003, **58** (4): 569~576
Guo Qiyun, Cai Jingning, Shao Xuemei, et al. Interdecadal variability of East-Asian summer monsoon and its impact on the climate of China. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2003, **58** (4): 569~576
- [3] Hu Z Z, Yang S, Wu R. Long-term climate variations in China and global warming signals. *J. Geophys. Res.*, 2003; **108** (D19), 4614, doi:10.1029/2003JD003651
- [4] 陈隆勋,周秀骥,李维亮,等. 中国近 80 年来气候变化特征及其形成机制. *气象学报*, 2004, **62** (5): 634~646
Chen Longxun, Zhou Xiuji, Li Weiliang, et al. Characteristics of the climate change and its formation mechanism in China in last 80 years. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **62** (5): 634~646
- [5] Yu Rucong, Bin Wang, Zhou Tianjun. Tropospheric cooling and summer monsoon weakening trend over East Asia. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31**, L22212, doi: 10.1029/2004GL021270
- [6] Xin Xiaoge, Yu Rucong, Zhou Tianjun, et al. Drought in late spring of South China in recent decades. *J. Climate*, 2006, **19** (13): 3197~3206
- [7] 张庆云,卫捷,陶诗言. 近 50 年华北干旱的年代际和年际变化及大气环流特征. *气候与环境研究*, 2003, **8** (3): 307~318
Zhang Qingyun, Wei jie, Tao Shiyan. The decadal and inter-annual variations of drought in the Northern China and association with the circulations. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2003, **8** (3): 307~318
- [8] 吴志伟,江志红,何金海. 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*, 2006, **30** (3): 391~401
Wu Zhi-Wei, Jiang Zhi-Hong, He Jin-Hai. 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 Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (3): 391~401
- [9] 鲍名,黄荣辉. 近 40 年我国暴雨的年代际变化特征. *大气科学*, 2006, **30** (6): 1057~1067
Bao Ming, Huang Rong-Hui. Characteristics of the interdecadal variations of heavy rain over China in the last 40 years. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (6): 1057~1067
- [10] 张人禾. El Niño 盛期印度夏季风水汽输送在我国华北地区夏季降水异常中的作用. *高原气象*, 1999, **18** (4): 567~574
Zhang Renhe. The role of Indian summer monsoon water vapor transportation on the summer rainfall anomalies in the northern part of China during the El Niño mature phase. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1999, **18** (4): 567~574
- [11] 丁一汇,胡国权. 1998 年中国大洪水时期的水汽收支研究. *气象学报*, 2003, **61** (2): 129~145
Ding Yihui, Hu Guoquan. A study on water vapor budget over China during the 1998 severe flood periods. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, **61** (2): 129~145
- [12] 何金海,刘芸芸,常越. 西北地区夏季降水异常及其水汽输送和环流特征分析. *干旱气象*, 2005, **23** (1): 10~16
He Jinhai, Liu Yunyun, Chang Yue. Analysis of summer precipitation anomaly and the feature of water vapor transport and circulation in Northwest China. *Arid Meteorology* (in Chinese), 2005, **23** (1): 10~16
- [13] Chen M, Pollard D, Barron E J. Hydrologic processes in China and their association with summer precipitation anomaly

- lies. *Journal of Hydrology*, 2005, **301**: 14~28
- [14] 樊增全, 刘春蓁. 1980-1987 年华北地区上空水汽输送特征. *大气科学*, 1992, **16** (5): 548~555
Fan Zengquan, Liu Chunzhen. Analysis on the process of water vapor transfer over North China during 1980-1987. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1992, **16** (5): 548~555
- [15] Simmonds I, Bi D, Hope P. Atmospheric water vapor flux and its association with rainfall over China in summer. *J. Climate*, 1999, **12** (5): 1353~1367
- [16] Zhou T J, Yu R C. Atmospheric water vapor transport associated with typical anomalous summer rainfall patterns in China. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**, D08104, doi:10.1029/2004JD005413
- [17] 田红, 郭品文, 陆维松. 夏季水汽输送特征及其与中国降水异常的关系. *南京气象学院学报*, 2002, **25** (4): 496~502
Tian Hong, Guo Pinwen, Lu Weisong. Features of moisture transfer by summer monsoon and their relations to rainfall anomalies over China. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2002, **25** (4): 496~502
- [18] 王可丽, 江灏, 赵红岩. 西风带与季风对中国西北地区的水汽输送. *水科学进展*, 2005, **16** (3): 432~438
Wang Keli, Jiang Hao, Zhao Hongyan. Atmospheric water vapor transport from westerly and monsoon over the Northwest China. *Advances in Water Science* (in Chinese), 2005, **16** (3): 432~438
- [19] 张文君, 周天军, 宇如聪. 中国东部水分收支的初步分析. *大气科学*, 2007, **31** (2): 329~345
Zhang Wen-Jun, Zhou Tian-Jun, Yu Ru-Cong. A preliminary analysis on the moisture budget of East China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (2): 329~345
- [20] 周天军, 张学洪, 王绍武. 全球水循环的海洋分量研究. *气象学报*, 1999, **57** (3): 264~282
Zhou Tianjun, Zhang Xuehong, Wang Shaowu. The air-sea freshwater exchange derived from NCEP/NCAR reanalysis data. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1999, **57** (3): 264~282
- [21] 丁一汇. 天气动力学中的诊断分析方法. 北京: 科学出版社, 1989. 293pp
Ding Yihui. *The Diagnostic and Analysis Method in Synoptic Dynamics* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1989. 293pp
- [22] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 1999. 269pp
Wei Fengying. *Present Climatological Statistics Diagnosis and Forecasting Method* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1999. 269pp
- [23] 林振山, 邓自旺. 子波气候诊断技术的研究. 北京: 气象出版社, 1999. 174pp
Lin Zhenshan, Deng Ziwan. *Study on Wavelet Climatic Diagnosis Technique* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1999. 174pp
- [24] 张庆云, 陶诗言, 陈烈庭. 东亚夏季风指数的年际变化与东亚大气环流. *气象学报*, 2003, **61** (4): 559~568
Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Chen Lieting. The annual variability of East Asian summer monsoon indices and its association with the pattern of general circulation over East Asia. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, **61** (4): 559~568