

夏季亚洲季风区的水汽输送及其对中国降水的影响^{* 1}

周晓霞^{1,2} 丁一汇³ 王盘兴²
ZHOU Xiaoxia^{1,2} DING Yihui³ WANG Panxing²

1. 中国气象局气候研究开放实验室,北京,100081

2. 南京信息工程大学大气科学系,南京,210044

3. 国家气候中心,北京,100081

1. *Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, CMA, Beijing 100081, China*

2. *Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China*

3. *National Climate Center, Beijing 100081, China*

2006-03-21 收稿,2006-06-22 改回.

Zhou Xiaoxia, Ding Yihui, Wang Panxing. 2008. Moisture transport in Asian summer monsoon region and its relationship with summer precipitation in China. *Acta Meteorologica Sinica*, 66(1):59–70

Abstract The characteristics of moisture transport over Asian summer monsoon region and its relationship with China summer precipitation are examined by a variety of statistical methods using NCEP-NCAR reanalysis data for 1948–2005. Results show that: (1) The zonal-mean moisture transport in Asian monsoon region is unique because of the monsoon activities. Asian summer monsoon region is a dominant moisture sink during summer. Both the Indian monsoon and East Asian monsoon areas have their convergence center, respectively. (2) Most column moisture congregates in the lower troposphere primarily from the Bay of Bengal and in the mid and upper layers, the vapor flux comes from mid-latitude westerlies as well as the tropical West Pacific Ocean. (3) The moisture fluxes by Indian monsoon enhance from May to July mostly in zonal transport while those by East Asian monsoon intensify mainly in meridional transport from June to July. Both reach their maxima in July and then decrease from August. The sub-tropical westerly moisture fluxes south to the Tibet Plateau across 90°E is strong in spring, while the mid-high latitude and tropical westerly vapor transfer change in phase and increase from January to July. The tropical westerly transport accounts for about 80% of the total moisture transport in July and only 18% from mid-high latitudes. (4) The moisture transfer and budgets over Asian monsoon region undergo a substantial change after the South China Sea monsoon onset, especially in the Bay of Bengal and IndoChina peninsula and the South China Sea. The northern boundary of South China Sea is of great importance in providing abundant moisture for China continent during summer. (5) The northward progress of the moisture transfer coincides with the seasonal march of the rainbelts very well. The EOF1 of moisture transport field basically depicts the consistent northward transport anomaly with an obvious decreasing trend over East Asian monsoon region from 1951 to 2005. Further analyses suggest that this trend owing to the weakness of East Asian Summer monsoon is largely responsible for the decline of rainfall over North China. The EOF2 reveals that moisture flux convergence from northeast and southwest over Yangtze River Valley shows a slight increasing trend from 1980's and it is consistent with the fact of more frequently occurred heavy rainfall over there. The correlation analyses denote that the interdecadal variation of the East Asian summer monsoon accounts for the main part of the variation.

Key words Asian monsoon region, Moisture transport, China summer precipitation

* 资助课题:国家重点基础研究发展计划“973”计划,“亚印太交汇区”海气相互作用及其对中国短期气候的影响——课题四:亚洲季风区水分循环和变异机制(2006CB403604)。

作者简介:周晓霞,主要从事季风气象学的研究。Email:zhouxx@cma.gov.cn

摘要 利用 1948—2005 年 NCEP/NCAR 逐日及月平均资料,研究了亚洲季风区水汽输送的气候特征及其与中国夏季降水的关系。结果表明:(1)亚洲夏季季风区不论在纬向和经向输送上,都表现了其独特性。夏季亚洲季风区为强大的水汽汇,东亚大陆和印度季风区均有较强的水汽辐合中心。(2)大部分水汽集中在对流层中下层,主要来自印度季风区,而对于对流层中上层,则以西太平洋和中纬西风带的输送为主。(3)印度季风在 5—7 月纬向向东的输送加强,东亚季风在 6—7 月以经向向北的输送加强为主,7 月达最强,8 到 9 月季风减弱直至结束。亚洲季风区青藏高原南侧的南支西风对东亚的水汽输送有重要作用,表现为春季最强,中高纬和热带西风输送变化同步,在盛夏达到最大,7 月热带西风输送的水汽占三支水汽总输送的 80% 左右,来自中高纬地区的水汽约占 18%。(4)季风爆发后,大量水汽从南半球输送到亚洲季风区。水汽辐合增加最大在孟加拉湾、中南半岛和南海地区,中国大陆的水汽主要经南海北边界输入。(5)水汽输送的北进与雨带的北推相一致。水汽输送场的时空分析表明,EOF1 和 EOF2 分别代表强弱季风年的水汽输送特征。EOF1 反映了东亚季风区一致的异常向北输送,并且在 1970 年代末发生了明显减弱。它与华北降水相关密切,表明自 1980 年代以来东亚季风向北水汽输送的减弱是华北干旱的主要原因。EOF2 的主要特征是从 1980 年代之后,来自东北和西南的异常水汽在长江流域辐合,导致长江流域降水增多。相关分析表明,东亚夏季风在年代际尺度上的变化对此起了重要作用。

关键词 亚洲季风区,水汽输送,中国夏季降水

中图法分类号 P434⁺.5

1 引言

中国位于亚洲季风区,季风环流对水汽的输送起着十分重要的作用,而水汽输送的路径和源汇决定了降水的分布。竺可桢(1934)提出中国降水与东亚季风有密切关系,因此研究亚洲季风区水汽输送的特征及其与中国夏季降水的关系,对于了解水分循环和预测旱涝的发生有很重要的实际意义。

在 20 世纪 50 年代末,徐淑英(1958)利用 33 个探空站资料计算了 1956 年中国东部大陆的水汽输送和水分平衡。Yi Lan(1995)比较了 1980—1989 年印度季风和东亚季风区水汽输送的特征,指出全球平均水汽输送场的三维分布清楚地反映了亚洲季风系统的不对称性和反 Hadley 季风环流的存在。黄荣辉等(1998)、樊增全和刘春蓁(1992)、高国栋等(1999)和谢安等(2002)分别研究了东亚季风区、华北地区、淮河流域和长江中下游地区水汽输送的气候特征。Rosen 等(1979)计算了 5 a 平均水汽输送通量场的变化,发现在年平均尺度上,南半球是北半球的水汽源和潜热源。Chen(1985)详细分析了全球大气研究计划第一次全球试验(FGGE)期间水汽含量的分布以及高水汽中心的维持,指出非辐散分量代表了水汽输送的主要特征,而定常辐散部分,主要是指 Hadley 和 Walker 环流,则维持了高水汽中心的存在。Simmonds 等(1999)讨论了中国夏季水汽输送和收支,指出东南亚和印度季风环流分别从南海和孟加拉湾为中国东南部提供水汽,而对于东北地区,中纬度的西风水汽输送起主导作用。

也有不少气象学家对降水个例进行了详细讨论。谢义炳、戴武杰(1959)用风湿资料计算了 1957 年夏季黄河中下游强降水的水汽输送情况,指出这次黄淮降水的水汽主要来源于南海。丁一汇等(2003)和胡国权等(2003)全面分析了 1991 和 1998 年中国大洪水时期的水汽收支,指出暴雨的水汽来自大范围的水汽向暴雨区辐合,辐合主要发生在大气低层,南海地区的水汽输送与中国强降水密切相关。

对于水汽输送和中国雨带关系的研究还不是很多。Zhang(2001)指出,当印度季风水汽输送偏强(弱),东亚季风水汽输送偏弱(强)时,对应长江中下游地区降水偏少(多)。田红等(2002)分析了夏季水汽输送的特征,并讨论了中国夏季 3 类雨型与异常水汽输送的关系。Zhou 等(2005)发现长江流域的异常降水对应一支东北风和一支西南风水汽输送在该地辐合,而淮河流域的异常降水带为中纬度西风 and 副热带西南风携带的水汽在此汇合所致。由于所用资料和方法不尽相同,所得结论也略有差异。

综上所述,关于水汽输送的研究已得到了许多有价值的结论,但大多数研究所用资料时段较短,或偏重于个例分析,或针对某一局部地区。鉴于此,本文采用较长时期的再分析资料,对夏季亚洲季风区的水汽输送特征做较全面的分析,特别研究亚洲季风区水汽输送与中国夏季降水的关系。

2 资料和计算方法

本文使用了 1948—2005 年 NCEP/NCAR 逐日

资料及月平均资料,包括从 1000—300 hPa 8 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,1979—2004 年的 CMAP 候降水资料,水平格距均为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$;还用到了 1951—2005 年中国 160 站月降水量资料(由国家气候中心整编)。其中图 4—6 是用 NCEP 日平均资料计算得到的,其他用的是月平均资料。

(1) 水汽通量的计算(丁一汇,2005)

因为水汽主要集中在对流层中低层,忽略 300 hPa 以上大气中的水汽,则单位气柱整层大气水汽输送通量 Q 为(从地面积分到 300 hPa)

$$Q = \frac{1}{g} \int_{300}^{p_s} (\mathbf{V}q) dp \quad (1)$$

分别可得在纬向和经向的水汽输送通量

$$Q_\lambda = \frac{1}{g} \int_{300}^{p_s} (uq) dp \quad (2)$$

$$Q_\phi = \frac{1}{g} \int_{300}^{p_s} (\omega q) dp \quad (3)$$

(2) 垂直积分的水汽通量散度的计算

$$Q_{\text{div}} = \frac{1}{g} \int_{300}^{p_s} \nabla \cdot (\mathbf{V}q) dp = \frac{1}{g} \int_{300}^{p_s} \mathbf{V} \cdot \nabla q dp + \frac{1}{g} \int_{300}^{p_s} q \nabla \cdot \mathbf{V} dp \quad (4)$$

式中右边两项分别为水汽平流和风场散度引起的水汽通量散度项, g 为重力加速度, \mathbf{V} 为二维风矢量, u

和 v 分别为经向和纬向风速, q 为比湿, p_s 为地面气压。

(3) 水汽通量的流函数和势函数的计算(丁一汇,1989;周天军等,1999)

根据 Helmholtz 定理,垂直积分的水汽通量 Q 可表示为:

$$Q = \mathbf{k} \times \nabla \psi + (-\nabla \chi) = Q_\psi + Q_\chi \quad (5)$$

其中 ψ 为水汽流函数, χ 为水汽势函数

$$\begin{aligned} \nabla^2 \psi &= \mathbf{k} \cdot \nabla \times Q = \nabla \cdot Q \times \mathbf{k} - \\ \nabla^2 \chi &= \nabla \cdot Q \end{aligned} \quad (6)$$

求解泊松方程,可得到垂直积分水汽通量的流函数和势函数,进一步可求得它的无辐散分量 Q_ψ 和无旋分量 Q_χ 。

3 亚洲季风区的水汽输送特征

3.1 纬向平均的水汽通量特征

将全球 1948—2005 年(无特别说明,文中气候平均都是指 1948—2005 年)夏季(6—8 月)平均整层大气纬向和经向水汽通量,分别沿整个纬圈和亚洲季风区所跨经度(40° — 122.5°E)求纬向平均(图 1)。可见全球平均的纬向输送(图 1a)受行星风带的影响很明显,在热带地区为东风输送,在中高纬地区为西风输送,南半球中高纬向东的通量比北半球要强。这与 Rosen 等(1979)和田红等(2002)的结论

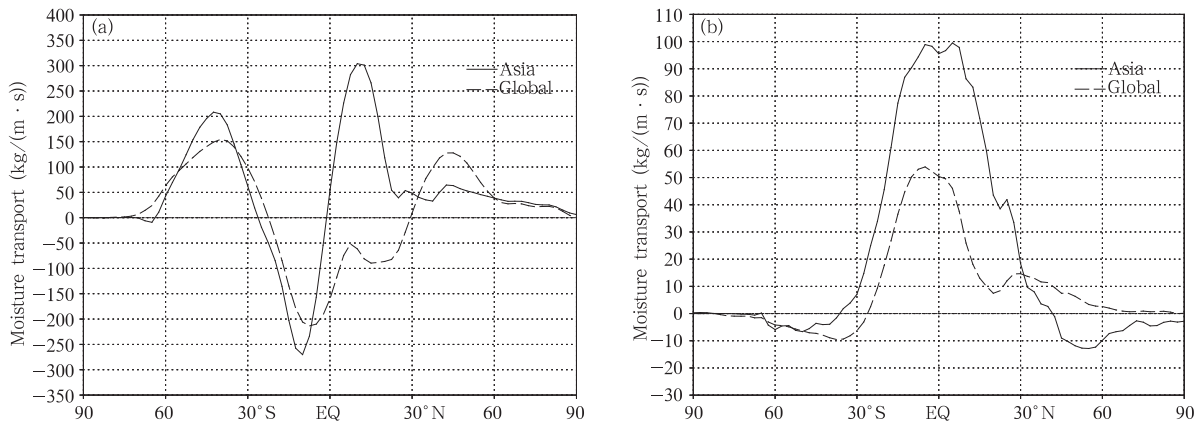


图 1 夏季纬向平均的水汽输送(1948—2005 年)

(a. 纬向输送, b. 经向输送; 实线: 40° — 122.5°E , 虚线: 纬圈平均。单位: $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$)

Fig. 1 Summer zonal (a) and meridional (b) moisture transports ($\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$) averaged over 40° — 122.5°E

(solid line) and 0° — 360°E (dashed line) for 1948—2005

相似。而亚洲季风区却明显不同,尤其在赤道以北,亚洲夏季风区均为向东的输送,特别是在热带地区,西风输送非常强,最大值在 10°N 附近超过了 $300 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 。从经向水汽通量来看(图 1b),季风区的输送比整个纬圈平均要大,在赤道地区前者几乎是后者的 2 倍,还有一点不同,在 40°N 以北,亚洲季风区平均为向南的输送而不是向北输送。

可见,水汽输送场反映了低层风场的特征,而亚洲季风区与同纬度其他地区显著不同。

3.2 水汽源汇分布及水汽输送通量

根据风向量可以分解为无辐散和无旋两部分,这 2 个分量又分别可用速度势和流函数表示(丁一汇,1989)。考察了多年平均的水汽流函数及无辐散分量与势函数及无旋分量(图略),在副热带太平洋上存在着强大的反气旋输送中心,与海洋上的反气旋环流对应,赤道印度洋则是很强的印度季风环流。

东部大洋上的水汽通过赤道东风带源源不断地输送到南印度洋,在非洲东海岸转向,汇入索马里急流,共同构成很强的印度季风气流,以后向东继续输送到中南半岛至南海一带,在这里转为偏北方向,进入中国东部大陆及沿海,继续向东北到达日本岛和西北太平洋,将大量水汽输送到以上地区。这与 Chen (1985), Yi Lan (1995) 和周天军等 (1999) 的研究相一致。

水汽通量的势函数及无旋分量表示水汽的辐合与辐散情况。中国东部地区和西太平洋为势函数的极小值区,数值小于 $-300 \times 10^6 \text{ kg}/\text{s}$,表明这里是夏季全球最强的水汽汇区。同时可以看出,东亚地区的强降水是和范围甚至半球的水汽输送和水汽辐合相联系的,其中最主要的是来自印度洋的水汽,其次是来自太平洋的水汽。图 2a 中的水汽输送矢量也清楚地表明,印度夏季降水的水汽主要由索马

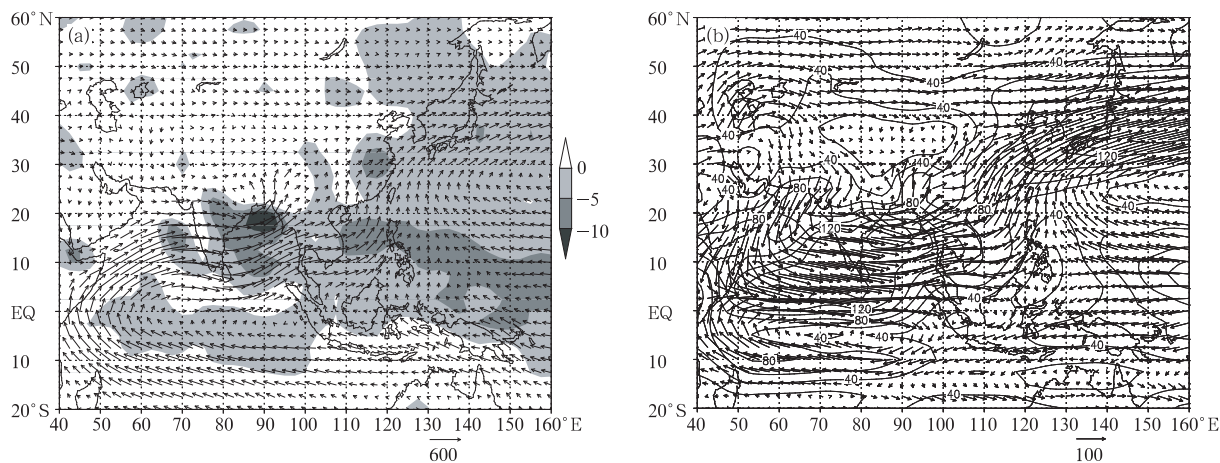


图 2 1948—2005 年夏季平均的水汽通量矢量(单位: $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$)及其散度(单位: $10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$); a. 地面—300 hPa, b. 700—500 hPa 水汽通量矢量

Fig. 2 Summer mean moisture flux ($\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$); vectors and its divergence (shadings; $10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) vertically integrated from the ground surface to 300 hPa (a) and from 700 to 500 hPa (b) over 1948—2005

里急流经阿拉伯海而来,东亚季风区有多支水汽流共同影响。这与黄荣辉(1998)的分析相吻合。图 2 中的阴影部分表示水汽通量辐合区,可见 3 个最强的辐合区分别位于南亚季风区的印度半岛—孟加拉湾以及东亚季风区的南海和江淮流域,其中以孟加拉湾北部的辐合最强,它主要影响印度季风降水,位于江淮流域的辐合中心则影响着梅雨的丰欠。

上述分析表明,亚洲季风区的水汽来自 3 大洋,其中来自印度洋的西南风水汽输送贡献最大。夏季有多条水汽通道为东亚季风区提供水汽,以经过孟

加拉湾到达南海转向的一支为最强。在亚洲季风区存在强的辐合中心,对应夏季当地的强降水。

3.3 不同高度层水汽输送通量的分布

水汽输送的垂直分布受比湿的影响较大,主要集中于对流层低层。从地面到 700 hPa(图略),中国大陆东部的水汽主要来自印度西南季风的输送,到达南海与 105°E 的越赤道气流共同转为向北输送,进入中国南方地区,数值可达 $120 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$,为整层气柱水汽输送的一半左右。太平洋的水汽通道偏东,主要影响日本岛及以东洋面。在 700—500 hPa

层(图 2b), 中国大陆东部的水汽一部分是由孟加拉湾经过云贵高原流入, 一部分是经中南半岛和南海流入, 105°E 越赤道气流消失, 来自太平洋的水汽仍限于 120°E 以东, 但是中纬度西风带的输送有所加强, 达到了 $40 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。而 500—300 hPa 层(图略)的水汽输送与中低层有明显不同, 来自印度季风区的水汽显著减弱, 中纬度西风带的输送依然维持, 略有南移, 还有一条水汽通道由西太平洋经南海而来, 主要向长江流域及以北地区输送水汽。

可见, 夏季在对流层不同高度, 水汽来源不尽相同, 在对流层低层, 水汽主要来自南海(源于孟加拉湾), 占整层水汽输送的 50% 左右, 而对于对流层中层, 中纬度西风带的输送有所加强, 到了对流层高层, 仅以中纬西风带的输送和由西太平洋经南海进入中国大陆的水汽输送为主, 大的水汽通量位于中国北方地区。

3.4 水汽输送的逐月变化以及不同纬度纬向水汽输送的季节变化

图 3 是夏季各月水汽输送的差值场, 可以看到, 4—5 月(图略), 主要是印度西南季风输送加强, 向东一直可达菲律宾以东洋面, 6 月与 5 月的差值(图 3a)与此类似, 从阿拉伯海到南海的西南风进一步加强, 同时菲律宾东北洋面已由西南风转为副高边缘弱的东南气流。从 6 月到 7 月(图 3b), 只有阿拉伯海和印度半岛有弱的西南风距平, 在日本以南的副热带太平洋和长江流域以及华南地区出现了较强的偏东风输送距平, 在南海北部为偏北风加强, 在华北及东北地区为南风输送距平, 7 月的这种变化是与副高的活动相联系的。7 月到 8 月(图 3c), 从华北以南的东部大陆、中南半岛北部、以及印度半岛和阿拉伯海, 均表现为东北风的输送距平, 表明季风气流已开始减弱。9 月中国大陆东部为偏北风异常, 整

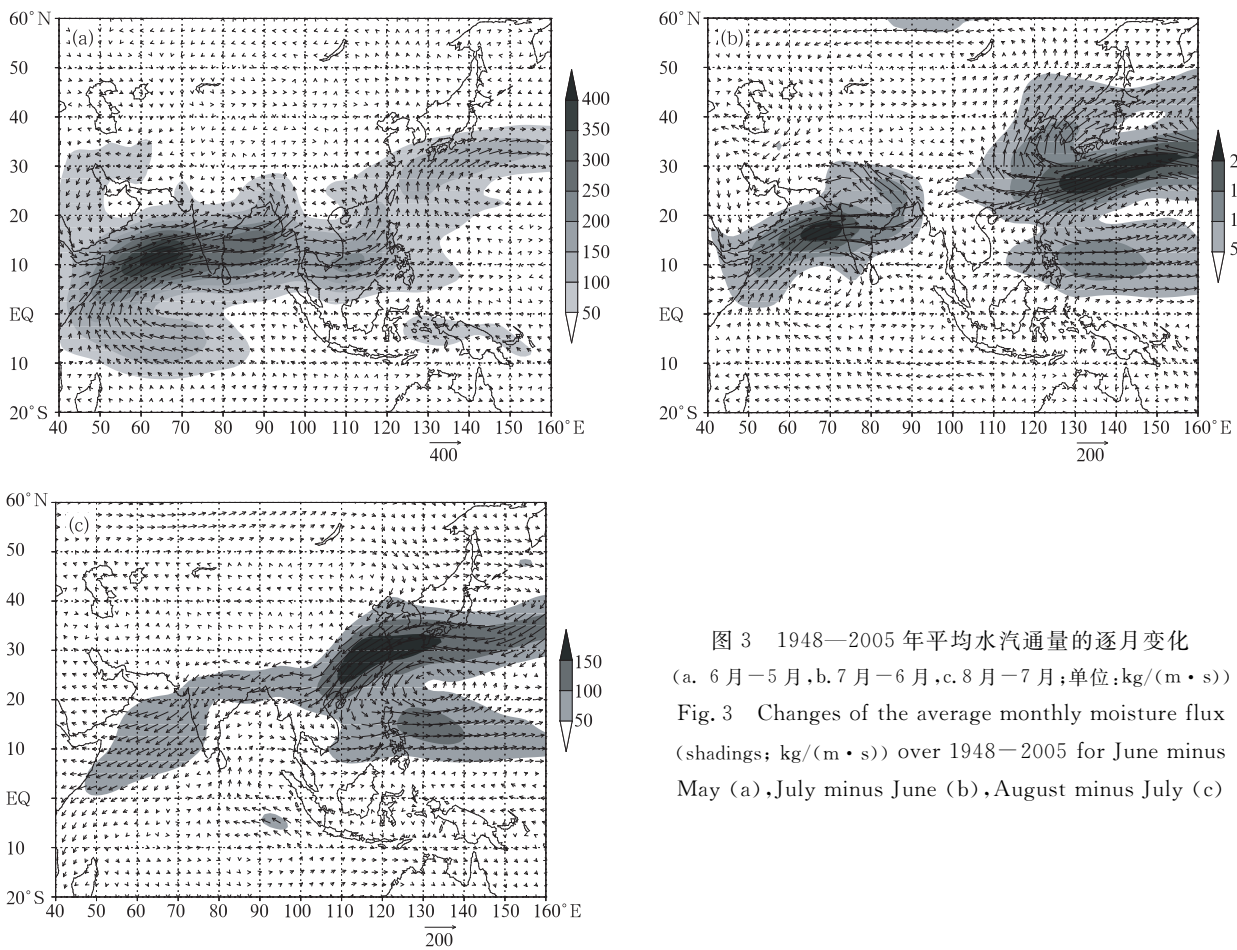


图 3 1948—2005 年平均水汽通量的逐月变化
(a. 6 月—5 月, b. 7 月—6 月, c. 8 月—7 月; 单位: $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$)
Fig. 3 Changes of the average monthly moisture flux (shadings; $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$) over 1948—2005 for June minus May (a), July minus June (b), August minus July (c)

个印度季风区以及南海和菲律宾以东的洋面基本上较强的偏东风距平,进一步表明了9月亚洲夏季风的势力发生了明显减弱。

分析发现,印度西南季风在5—7月主要是纬向输送的持续加强,加强最明显的是在6月,7月总输送达最强;而西太平洋的输送6—7月是增强的,也是在7月达到最强,但经向输送更明显。8到9月开始减弱,8月太平洋的水汽输送减弱较明显,9月印度季风区的偏西风输送也大幅减弱,预示了季风的结束。

前面分析了水汽输送的月际变化,为了更清楚地看到上游地区不同纬度水汽输送的季节变化,图4给出了通过 90°E , $40^{\circ}\text{--}50^{\circ}\text{N}$ 、 $20^{\circ}\text{--}30^{\circ}\text{N}$ 和 $5^{\circ}\text{--}15^{\circ}\text{N}$ (分别代表中高纬、副热带和热带西风)纬带平均的纬向输送。其中中高纬的水汽输送最弱,副热带的输送也较弱,热带纬向输送最强。前两支常年都为西风输送,热带季风在4—10月为西风输送。中高纬西风输送与热带西风同位相变化,在夏季最强,最大约 $75\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 。副热带西风输送在春季最大,4月可达 $100\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$,而后逐渐减小,到8月底减到最小,秋季又开始缓慢上升,持续到春季。热带纬向输送自4月由东风转为西风,出现夏季流型,西风风速迅速增大,在盛夏7月达极值约为 $350\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$,之后又开始变弱,到10月以后,从西风转变为东风,12月东风发展最强盛,夏季环流型完全被冬季环流型所取代。

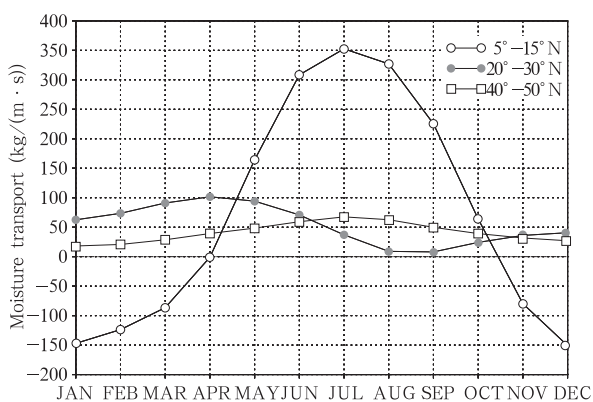


图4 1948—2005年不同纬度带 $40^{\circ}\text{--}50^{\circ}\text{N}$ 、 $20^{\circ}\text{--}30^{\circ}\text{N}$ 和 $5^{\circ}\text{--}15^{\circ}\text{N}$ 平均纬向输送通过 90°E 的季节变化(单位: $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$)

Fig. 4 Seasonal variations of the zonal moisture flux (unit: $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$) across 90°E averaged over $40^{\circ}\text{--}50^{\circ}\text{N}$, $20^{\circ}\text{--}30^{\circ}\text{N}$, and $5^{\circ}\text{--}15^{\circ}\text{N}$ for 1948—2005

计算表明,在5月之前,副热带西风水汽输送是南方降水的主要来源,而东亚季风区夏季降水以热带西风输送为主,7月这支水汽占3支气流总输送的80%左右,来自中高纬的水汽大约占18%,共同为季风区降水提供充足的水汽来源。

4 南海夏季风爆发前后水汽输送与收支的变化

陆渝蓉等(1983)的计算表明中国的水汽输送与环流特征和季风进退有密切联系。Fasullo和Webster(2006)给出了一个水文学的定义,用来描述印度季风的爆发和撤退,同样说明了季风环流和水汽输送是紧密相联的。为了定量地讨论南海夏季风爆发前后水汽输送和收支的改变,计算了4月第1候至5月第3候和5月第5候至7月第2候的水汽输送和各区域的收支情况。在南海季风爆发(5月第4候)前(图5a),整体水汽输送较弱,水汽通量主要分布在副高的南北边界以及中国大陆东南部,另外在 $20^{\circ}\text{--}10^{\circ}\text{S}$ 有一支东风输送,越赤道输送很小。季风爆发之后(图5b),水汽通道迅速建立,越赤道气流和印度季风区向东的水汽输送显著加强,南半球的水汽不断向亚洲季风区流入,最大的输送发生在阿拉伯海、孟加拉湾和南海地区,因而季风爆发改变了亚洲夏季风水汽输送的状况。

图6是季风爆发前后不同季风区的水汽收支情况。季风爆发前(图6a),各区水汽收支都较小,除中南半岛和南海北边界以及中国大陆东南部的东西边界外,经向和纬向输送都很弱,南海的水汽主要来自西太平洋。季风爆发后(图6b),跨赤道输送显著增强,在阿拉伯海南边界的越赤道气流达到 $256.9 \times 10^6\text{ kg/s}$,成为最强的水汽汇。南海的水汽主要来自西边界的输入,由爆发前的水汽源变为了水汽汇,通过孟加拉湾和南海地区北边界的水汽明显增大,东部大陆地区的水汽主要来自南海,其次是中南半岛和孟加拉湾。 $5^{\circ}\text{--}22.5^{\circ}\text{N}$ 均为很强的西风输送,在印度和阿拉伯海地区最大,超过了 $500 \times 10^6\text{ kg/s}$ 。

5 水汽输送与中国东部降水的关系

5.1 水汽输送与中国东部雨带的进退

季风的爆发改变了水汽输送的分布,水汽输送的前缘又会影响东部雨带的季节推进。图7是1979—2004年4—9月 $110^{\circ}\text{--}120^{\circ}\text{E}$ 平均的水汽输

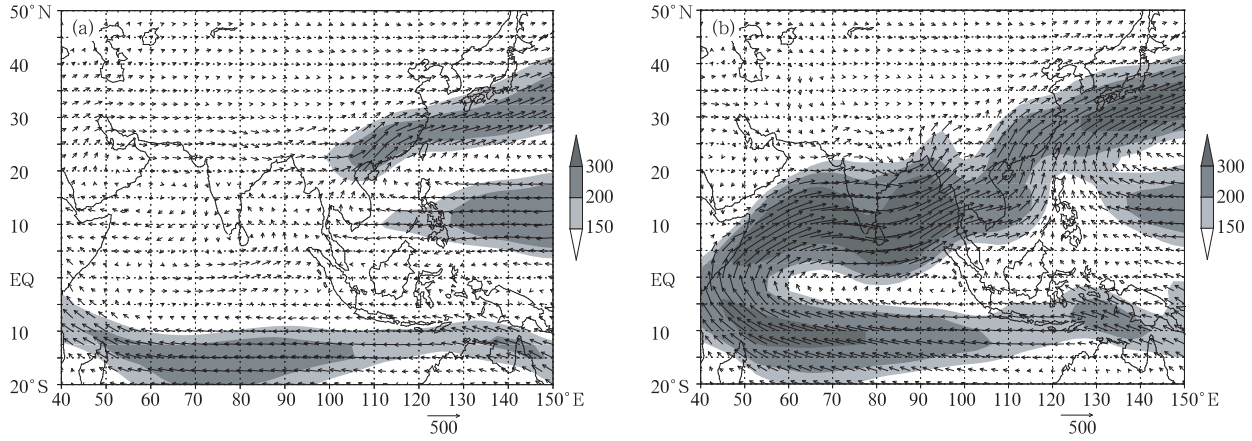


图5 1948—2005年平均的水汽输送

(a. 南海季风爆发前(4月第1候—5月第3候), b. 爆发后(5月第5候—7月第2候);单位: $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$)

Fig. 5 Moisture transports (unit: $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$) averaged over 1948—2005

(a. prior to the onset (1st pentad of April—3rd pentad of May), b. after the onset (5th pentad of May—2nd pentad of June) of the South China Sea summer monsoon (SCSSM))

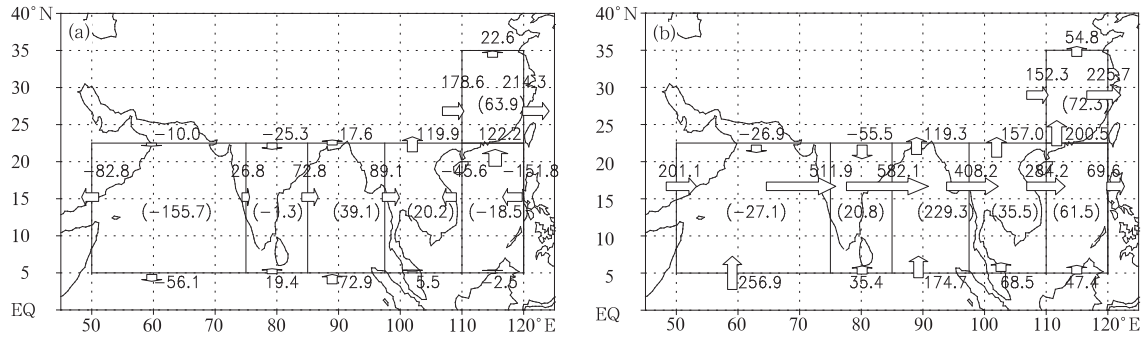


图6 1948—2005年平均的不同季风区的水汽收支

(a. 南海季风爆发前(4月第1候—5月第3候), b. 爆发后(5月第5候—7月第2候);单位: 10^6 kg/s)

Fig. 6 Moisture budgets (unit: 10^6 kg/s) over various monsoon areas averaged for 1948—2005

(a. prior to the onset (1st pentad of April—3rd pentad of May), b. after the onset (5th pentad of May—2nd pentad of June) of the SCSSM)

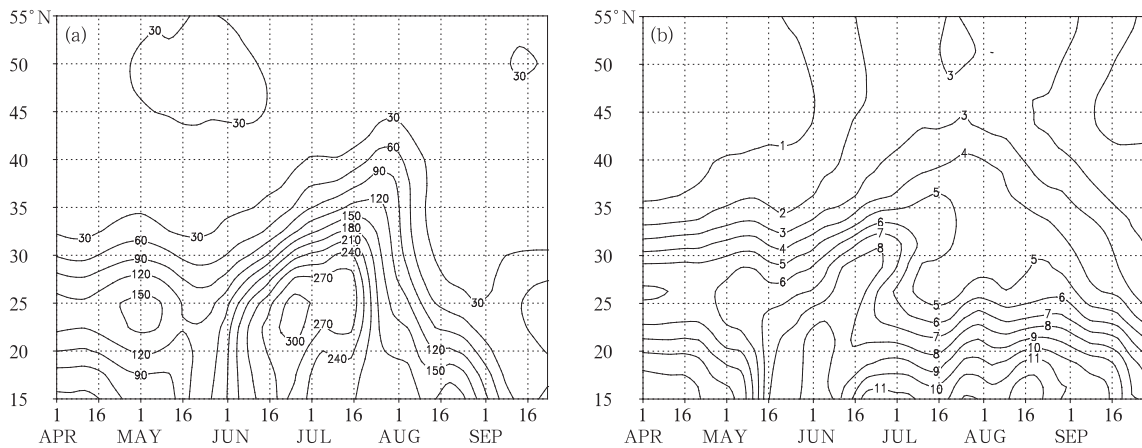


图7 1979—2004年 110° — 120°E 平均水汽输送(a,单位: $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$)

和降水量(b,单位: mm/d)逐候纬度-时间剖面

Fig. 7 The latitude-time (pentad to pentad) cross-sections of pentad mean (a) moisture transport (units: $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$) and (b) precipitation rates (units: mm/d) averaged over 110° — 120°E for 1979—2004

送和逐候降水量演变。4月中下旬到5月中上旬,在 25°N 的水汽输送大值中心对应着华南前汛期降水,随着季风在5月中旬的爆发,华南降水达到最大。6月中旬左右,图7a中 $120\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 的等值线伸到 30°N ,同时图7b中 $8\text{ mm}/\text{d}$ 的降水率等值线也北伸到了 30°N ,标志着江淮梅雨的开始,之后从7月中下旬到8月初,水汽输送通量和降水都维持在较高值状态,且都达到了最北位置,对应华北雨季。8月上旬开始,水汽输送陡然减弱, 35°N 以南的降水也突然减少,9月初,水汽输送和降水的最大中心退回到南海北部。可见整个过程中,二者的变化都非常同步。

5.2 水汽通量场的时空特征

为了进一步研究水汽输送场的时空变化,对多年平均(1951—2005年)的夏季水汽输送场进行了EOF分解,第1模态(EOF1)和第2模态(EOF2)解释的方差分别为17.6%和10.6%。

EOF1(图8a)反映了东亚季风区一致的异常向北输送,来自孟加拉湾、南海和西太平洋以及中纬度西风带的水汽,以不同的方式共同流入中国东部大陆,到达华北及东北地区。这是强季风年的水汽输送特征。对应的时间系数(图8b)表现出明显的年代际变化,大约在1974年之前,时间系数基本为正,表明有向北的水汽输送正异常。由滑动 t -检验方

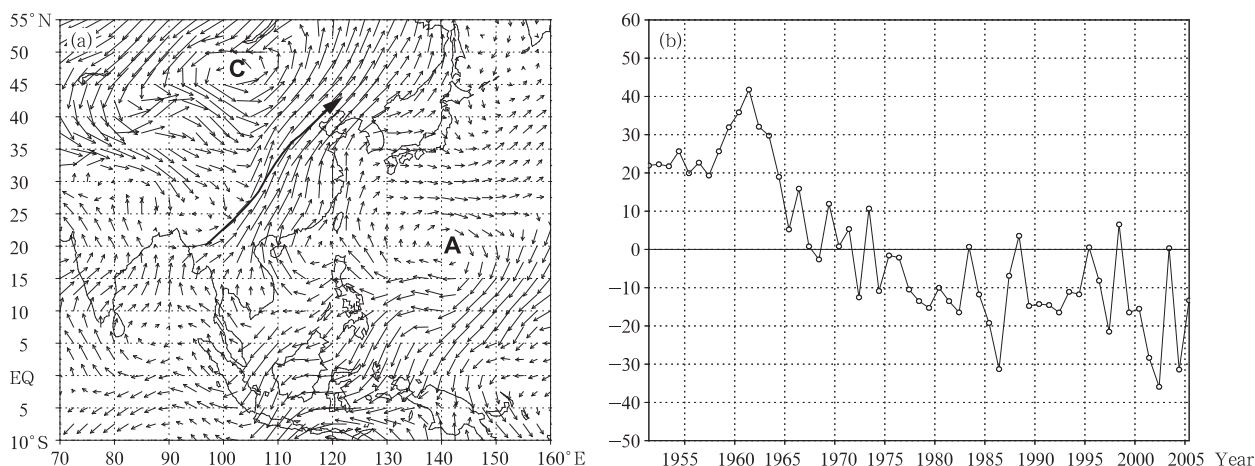


图8 1951—2005年夏季水汽输送场的EOF第1模态(a.空间模型,b.时间系数)
Fig. 8 First EOF mode (EOF1) of summer moisture transport field for 1951—2005
(a. spatial pattern, b. time coefficient)

法得到时间系数的突变点为1979年,表明在70年代末之后,水汽输送发生了明显变化,向北的异常输送显著减弱。

EOF2(图9a)主要表现为长江以南和以北分别为西南风和东北风输送距平。这是弱季风年的水汽输送特征。当时间系数(图9b)为正时,两支异常气流在长江及江南地区汇合。可以看出,从80年代起正值相对较多,这表明在此之后,长江流域水汽辐合偏多。

5.3 水汽通量场与中国夏季降水的关系

为了研究水汽输送对降水的影响,分析了EOF的两个模态与中国夏季降水的关系(图10)。图10a

中显著正相关区位于华北一带,表明空间型EOF1与华北降水关系密切。孙颖等(2002)的研究表明,夏季风的活动能够改变大尺度水汽输送及辐合,进而影响着主要雨带的分布。图10b给出了夏季风指数(张庆云等,2003)、EOF1的时间系数与华北降水距平的年际变化曲线。其两两相关都达到了0.05的信度水平,并且在年代际尺度上的相关要好于年际尺度,大约在20世纪70年代末都发生了均值的改变,说明夏季风的减弱使得向北的水汽输送减弱,从而使华北的降水减少,这与已有的研究一致(赵声蓉等,2003)。

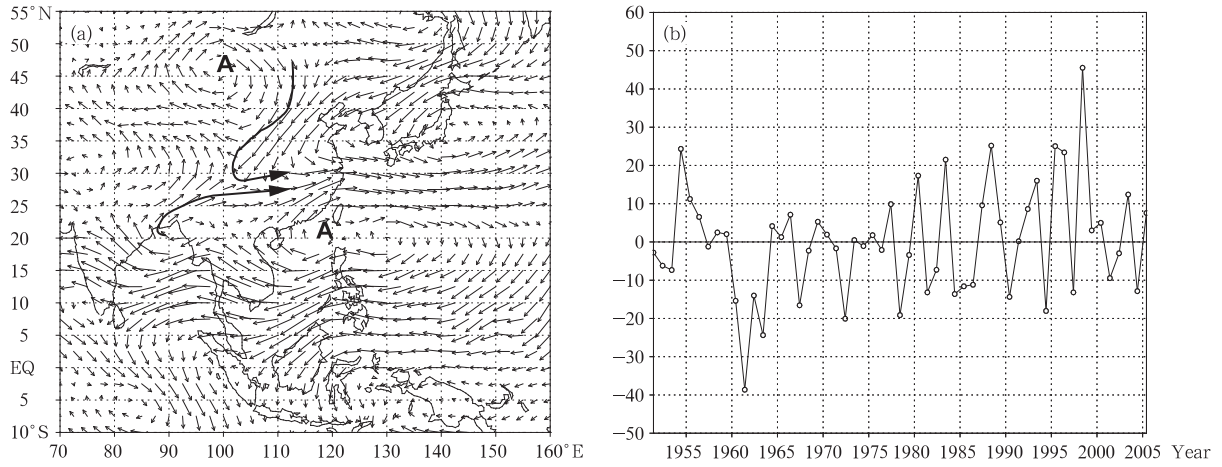


图9 1951—2005年夏季水汽输送场的 EOF 第2 模态
Fig. 9 As in Fig. 8 except for the EOF2 mode

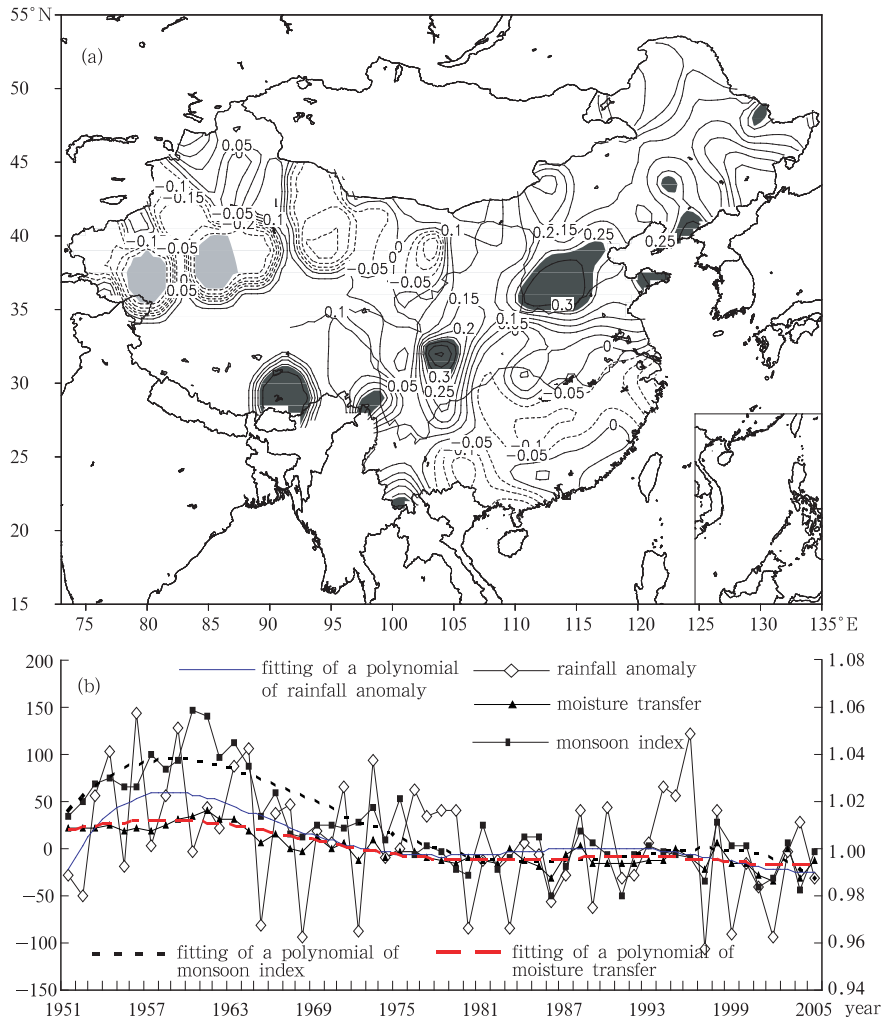


图 10 1951—2005 年水汽输送场 EOF1 的时间系数与降水场的相关分布(a)、季风指数和华北降水距平百分率的年际变化以及多项式拟合曲线(b)
(图 a 中阴影区表示显著相关超过 0.05 信度)

Fig. 10 The correlation fields of EOF1 (a) time series and summer rainfall (Areas with confidence over 0.05 are shaded). The evolution (b) of East Asian Monsoon index (right y-axis), EOF1 time series with summer rainfall anomaly percentage in North China for 1951—2005

图 11a 是 EOF2 的时间系数与中国降水的相关分布。显著相关区几乎覆盖了长江中下游地区,计算表明,EOF2 的时间系数和长江流域降水距平的相关系数为 0.62,通过了 0.01 的信度检验。其中 1954、1969、1980、1983、1993、1998 年几个峰值年都为洪涝年,最为突出的是 1954 和 1998 年,1998 年的实况图与 EOF1 空间型极其相似,因而其时间系数也是最大,但该年的降水不如 1954 年,其原因是降水还受到其他因子的影响,虽然这两年中高纬形势稳定而相似,但 1954 年有 6—7 个低压系统从高

原东侧沿长江东移,造成连续的暴雨发生。另外,1998 年 7 月 4—15 日副高北跳,出现了梅雨间歇期。这可能是 1954 年比 1998 年降水多的一个原因。1961、1972、1976、1978、1981、1994 年均为谷值年对应长江流域干旱年。20 世纪 80 年代起多雨年较少雨年多,反映了近 20 多年来长江流域降水逐渐增加,洪涝灾害增多的事实。图 11b 表明长江流域降水和水汽输送相关较好,但与夏季风指数反相关关系均不显著,然而在年代际尺度上,其相关显著性都达到了 99% 的置信水平。这说明季风与夏季降水

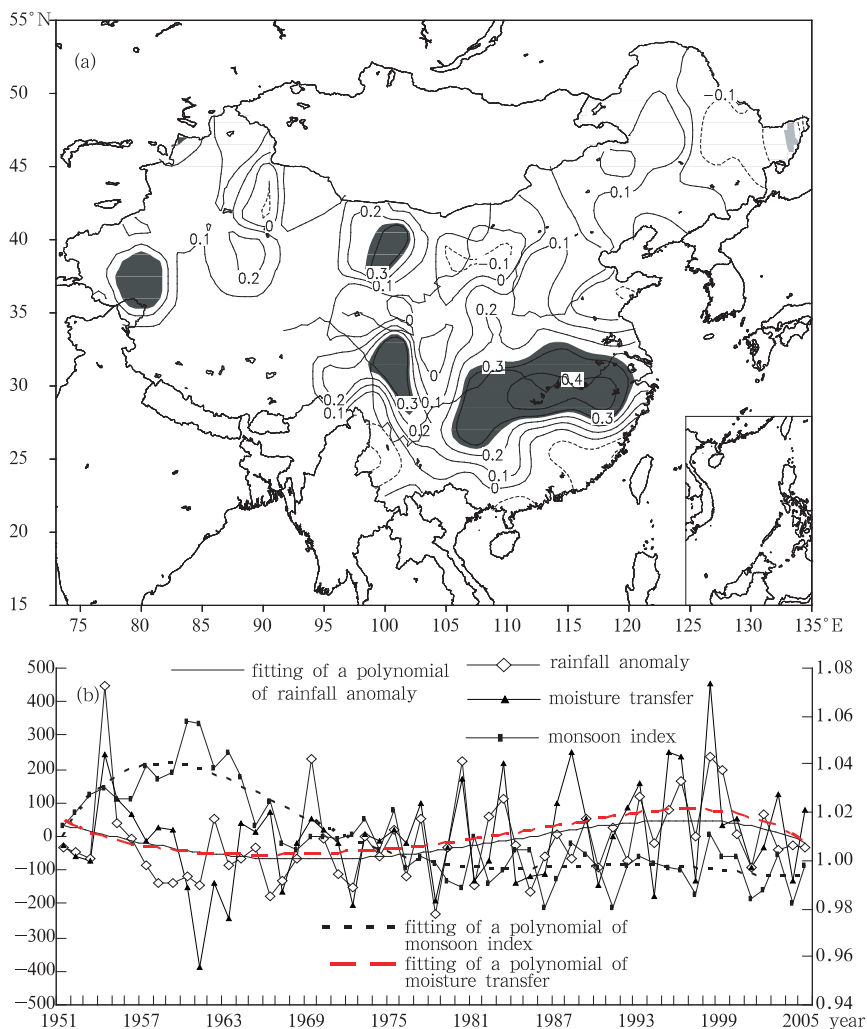


图 11 1951—2005 年水汽输送场 EOF2 的时间系数与降水场的相关分布(a)、季风指数和长江流域降水距平百分率的年际变化以及多项式拟合曲线(b)
(图 a 中阴影区表示显著相关超过 0.05 信度)

Fig. 11 The correlation fields of EOF2 (a) time series and summer rainfall (Areas with confidence over 0.05 are shaded). The evolution (b) of East Asian Monsoon index (right y-axis), EOF2 time series time and series summer rainfall anomaly percentage in Yangtze River Valley for 1951—2005

年际变化的关系要比年代际复杂。70年代末该区从一个少雨阶段进入一个相对多雨时期,这和张庆云等(2003)用不同的季风指数研究结果类似。

可见,夏季风的年代际减弱,改变了水汽输送场的分布,造成华北自20世纪80年代后降水持续减少,雨带南移,多雨区位于长江流域。同时也表明,季风不是影响降水的唯一因素。

6 结 论

本文首先分析了亚洲季风区水汽输送的气候特征,接着比较了南海季风爆发前后水汽输送与收支的改变,最后讨论了水汽输送的时空特征及其与中国夏季降水的关系。得出以下结论:

(1) 对于全球纬向平均来说,热带地区为东风输送,中高纬度为西风输送。亚洲季风区在赤道以北,是很强的西风输送。对于纬向平均的经向输送,亚洲季风区向北的水汽通量在赤道地区最大,约为全球平均的2倍。亚洲季风区不论在纬向和经向输送上,都表现了其独特性。大西洋、太平洋和印度洋均为季风区提供水汽,其中以印度洋的水汽输送为主,大西洋和东太平洋的水汽通过赤道东风带流入南印度洋,索马里急流对水汽的跨赤道输送有重要作用。亚洲季风区夏季为强大的水汽汇,东亚大陆和印度季风区均有强的辐合中心。

(2) 水汽通量集中在对流层低层,大约50%在700 hPa以下,在不同的高度层,东亚季风区的水汽来源不同,在对流层中下层,水汽主要来自印度季风区,而对于对流层中上层,是以西太平洋和中纬西风带的输送为主。

(3) 印度季风在5—7月纬向输送明显加强,东亚季风在6—7月以经向输送加强为主,7月都达到最大,8月开始减弱,到9月季风基本结束。进一步分析表明,不同纬度的纬向输送有明显差异。中高纬西风输送最弱,其次是副热带西风输送。副热带西风输送在春季最强,中纬度和热带西风输送同位相变化,都在盛夏7月达到最大,此时约80%的水汽来自热带西风输送,18%左右的水汽来自中高纬度西风带的输送。

(4) 季风爆发后,水汽输送发生了显著变化,水汽通道迅速建立,大量水汽从南半球输送到亚洲季风区。不同的季风区域基本上都表现为水汽辐合的增加,最大变化发生在孟加拉湾、中南半岛和南海地

区,中国大陆地区的水汽主要由南海北边界输入。

(5) 水汽输送的北进与中国东部雨带的北推相对应。时空分析表明,水汽输送场的EOF1在20世纪70年代末之前,主要为向北的异常水汽输送,之后,这种向北的异常输送显著减弱,它与华北降水密切相关,分析发现东亚夏季风的年代际减弱导致向北水汽输送的减弱,进而使得华北降水减少。EOF2主要反映了长江流域降水的异常,其特征是来自东北和西南的异常水汽在长江流域交汇,时间系数的峰(谷)值年和长江流域多(少)雨年有很好的对应,从20世纪80年代起,时间系数处于相对高值态,与长江流域降水偏多相符。相关分析表明,东亚夏季风在年代际尺度上的变化对此有重要贡献。

References

- Ding Yihui, Hu Guoquan. 2003. A study on water vapor budget over China during the 1998 severe flood periods. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 61(2):129-145
- Ding Yihui. 2005. *Advanced Synoptic Meteorology* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 585pp
- Ding Yihui. 1989. *The Diagnostic and Analysis Method in Synoptic Dynamics*. Beijing: Science Press, 293pp
- Fan Zengquan and Liu Chunzhen. 1992. Analysis on the process of water vapor transfer over North China during 1980-1987. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 16(5):548-555
- Gao G D, Lu Y R, Zhai P M, et al. 1999. The features of water vapor transport in the atmosphere and their effects on flood/drought over the Huaihe River valley // *Study on Energy and Water Cycle over Huaihe River Basin*. Beijing: China Meteorological Press, 75-81
- Guo Qiyun. 1983. Analysis on the East Asian summer monsoon index and its variation. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 38(3):207-217
- Hu Guoquan, Ding Yihui. 2003. A study on the energy and water cycles over Changjiang-Huanghe River basins during the 1991 heavy rain periods. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 61(2):146-163
- Huang R H, Zhang Z Z, Huang G, et al. 1998. Characteristics of the water vapor transport in East Asian monsoon region and its difference from that in South Asian monsoon region in summer. *Chinese Journal of Atmospheric Science* (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 22:460-469
- Fasullo J, Webster P J. 2006. A Hydrological Definition of Indian Monsoon Onset and Withdrawal. *Journal of Climate*, 16:3200-3211
- Lu Yurong, Gao Guodong. 1983. The mean water vapor transport

- over China. Plateau Meteorology (in Chinese), 2:34-48
- Richard D Rosen, David A Salstein. 1979. Variability in the Annual Fields of Large-Scale Atmospheric Water Vapor Transport, Mon Wea Rev, 107:26-37
- Simmonds I, Bi D, Hope P. 1999. Atmospheric water vapor flux and its association with rainfall over China in summer. Journal of Climate, 12(5):1353-1367
- Sun Ying, Ding Yihui. 2002. Role of summer monsoon in anomalous precipitation patterns during 1997 flooding season. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 13(3):277-287
- Tian Hong, Guo P W, Lu W S. 2002. Features of moisture transfer by summer monsoon and their relations to rainfall anomalies over China. Journal of Nanjing Institute of Meteorology. 25(4):496-502
- Zhou Tian-Jun, Yu Ru-Cong. 2005. Atmospheric water vapor transport associated with typical anomalous summer rainfall patterns in China. Journal of Geophysical Research, 110: D08104, doi:10.1029/2004JD005413
- Chen Tsing-Chang. 1985. Global Water Vapor Flux and Maintenance during FGGE, American Meteorological Society, 1801-1819
- Xie An, Mao J Y, Song Y Y, et al. 2002. Climatological characteristics of moisture transport over Yangtze River basin. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 13(1):67-77
- Xie Yibing, Dai Wujie. 1959. Certain computational results of water vapor transport over eastern China for a selected synoptic case. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 30:173-185
- Xu Shuying. 1958. Water vapor transport and balance over China. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 29:3-43
- Yi Lan. 1995. Characteristics of the Mean Water Vapor Transport over Monsoon Asia, Advances in Atmospheric Sciences, 12(2):195-206
- Zhang Qingyun, Tao Shiyun, Chen Lieting. 2003. The interannual variability of East Asian summer monsoon indices and its association with the pattern of general circulation over East Asia. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 61(5):559-568
- Zhang R H. 2001. Relations of water vapor transport from Indian monsoon with that over east Asia and the summer rainfall in China. Adv Atmos Sci, 18:1005-1017
- Zhao Shengrong, Song Zhengshan, Ji Liren. 2002. Study of relationship between the anomalies of rainfall over North China and the Asian monsoon anomalies. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 60(1):68-75
- Zhou Tianjun, Zhang Xuehong, Wang Shaowu. 1999. The air-sea freshwater exchange derived from NCEP/NCAR reanalysis data. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 57(3):264-282
- Zhu Kezhen. 1934. Southeast monsoon and China precipitation. Acta Geog Sinica (in Chinese), 1:1-27

附中文参考文献

- 丁一汇, 胡国权. 2003. 1998年中国大洪水时期的水汽收支研究. 气象学报, 29(2):129-145
- 丁一汇. 2005. 高等天气学. 北京:气象出版社, 585pp
- 丁一汇. 1989. 天气动力学中的诊断分析方法. 北京:科学出版社, 293pp
- 樊增全, 刘春葵. 1992. 1980—1987年华北地区上空水汽输送特征. 大气科学, 16(5):548-555
- 高国栋, 陆渝蓉, 翟盘茂等. 1999. 淮河流域大气水汽输送特征及其对旱涝形成的影响. 淮河流域能量与水分循环研究. 北京:气象出版社, 75-81
- 郭其蕴. 1983. 东亚夏季风强度指数及其变化的分析. 地理学报, 38(3):207-217
- 胡国权, 丁一汇. 2003. 1991年江淮暴雨时期的能量和水汽循环研究. 气象学报, 29(2):146-163
- 黄荣辉, 张振洲, 黄刚等. 1998. 夏季东亚季风区水汽输送特征及其与南亚季风区水汽输送特征的差别. 大气科学, 22:460-469
- 陆渝蓉, 高国栋. 1983. 中国大气中的水汽平均输送. 高原气象, 2(4):34-48
- 孙颖, 丁一汇. 2002. 1997年东亚夏季风异常活动在汛期降水中的作用. 应用气象学报, 13(3):277-287
- 田红, 郭品文, 陆维松. 2002. 夏季水汽输送特征及其与中国降水异常的关系. 热带气象学报, 25(4):496-502
- 谢安, 毛江玉, 宋焱云等. 2002. 长江中下游地区水汽输送的气候特征. 应用气象学报, 13(1):67-77
- 谢义炳, 戴武杰. 1959. 中国东部地区夏季水汽输送个例计算. 气象学报, 30(2):171-185
- 徐淑英. 1958. 我国水汽输送和平衡. 气象学报, 29:33-43
- 张庆云, 陶诗言, 陈烈庭. 2003. 东亚夏季风指数的年际变化与东亚大气环流. 气象学报, 61(4):559-568
- 赵声蓉, 宋正山, 纪立人. 2003. 华北汛期降水与亚洲季风异常关系的研究. 气象学报, 61(1):68-75
- 周天军, 张学洪, 王绍武. 1999. 全球水循环的海洋分量研究. 气象学报, 57(3):264-282
- 竺可桢. 1934. 东南季风与中国之雨量. 地理学报, 1(1):1-27