

赵瑞霞, 吴国雄, 张 宏. 夏季风期间长江流域的水汽输送状态及其年际变化. 地球物理学报, 2008, 51(6): 1670 ~ 1681  
Zhao R X, Wu G X, Zhang H. Seasonal characteristic and interannual variability of the atmospheric hydrological cycle in the Yangtze River basin during the summer monsoon period. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(6): 1670 ~ 1681

## 夏季风期间长江流域的水汽输送状态及其年际变化

赵瑞霞<sup>1,2</sup>, 吴国雄<sup>2</sup>, 张 宏<sup>3</sup>

1 中国气象局国家气象中心, 北京 100081  
2 中国科学院大气物理研究所 LASG 实验室, 北京 100029  
3 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

**摘 要** 本文利用 NCEP/NCAR 再分析资料, 分析了长江流域夏季风期间的水汽收支和循环, 着重研究了不同月份与水汽收支的年际变化显著相关的大尺度水汽输送和环流异常. 流域范围的西南夏季风水汽输送以 6、7 月最为强烈, 经向输送在 5 ~ 8 月造成流域水汽辐合, 9 月造成辐散; 纬向输送在 5 ~ 7 月造成流域水汽辐散, 8、9 月造成辐合. 研究表明, 在不同月份, 流域的南北边界处的水汽输送在流域水汽收支的年际变化中起着不同的作用. 这种变化与大气环流的异常密切相关. 在夏季风相对较弱月份(5、8、9 月), 流域水汽收支的年际变化极大地受到流域南边界南风水汽输入通道的影响, 对应于水汽收入偏丰年, 该 3 个月 500 hPa 高空在青藏高原东部都存在显著异常低压区, 而且, 8、9 月在中南半岛及其以东洋面存在显著异常反气旋环流, 与 8 月西太副高的向西向南异常伸展, 以及 9 月副高的西伸较弱和南北范围较宽有关, 这些异常环流均造成南边界的大量异常水汽输入. 而在夏季风十分强盛的 6、7 月, 流域北边界南风水汽输出极大增加, 成为流域水汽收入年际变化的关键敏感通道, 对应于水汽收入偏丰年, 6 月 500 hPa 高空主要受中纬度以黄海和东海为中心的异常低压系统和气旋性异常环流影响, 与该区域副高偏南、偏弱有关, 而 7 月则主要受中高纬以外兴安岭为中心的异常高压和反气旋性异常环流影响, 应该是由于该区域大陆高压的频繁生成造成的, 它们均造成流域北边界水汽输出的异常减少.

**关键词** 长江流域, 水汽循环, 夏季风, 年际变化, 异常环流

文章编号 0001-5733(2008)06-1670-12

中图分类号 P426

收稿日期 2007-01-29, 2008-09-11 收修定稿

### Seasonal characteristic and interannual variability of the atmospheric hydrological cycle in the Yangtze River basin during the summer monsoon period

ZHAO Rui-Xia<sup>1</sup>, WU Guo-Xiong<sup>2</sup>, ZHANG Hong<sup>3</sup>

1 National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

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

3 Meteorological Observation Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

**Abstract** The atmospheric hydrological cycle over the Yangtze River basin during summer monsoon period is examined using the NCEP/NCAR reanalysis. The primary focus is the linkage between the interannual variability of the moisture convergence in Yangtze River and the large-scale water vapor transport and circulation fields. The southwest wind over the basin is strongest during June to July. The meridional water vapor transport makes convergence over the river in May to August, and divergence over it in September; and the zonal water vapor transport makes divergence over the river in May to July, and convergence over it in August to September. During

基金项目 国家气象局气候变化专项(CCSF2007-9); 科技部项目(2006CB403600); 国家自然科学基金项目(90502003, 40475027, 40221503, 40523001)资助.

作者简介 赵瑞霞, 女, 1974 年生, 博士, 主要从事水文气象研究工作. E-mail: zhaorx@cma.gov.cn

the period when the summer monsoon is comparatively weaker over the east of China, such as May, August and September, the interannual variation of the water vapor budget over the river is significantly affected by the variation of the south wind across the south boundary. While the Yangtze River is unusually wet, an anomalous low-pressure is established over the east of Qinghai-Tibet plateau for the three months, and an anomalous anti-cyclonic circulation accompanied with a positive air pressure anomaly is established over Indo-China Peninsula as well as its eastern ocean in August and September. These two anomalous circulations all increase the water vapor input through the south boundary. But during the period when the summer monsoon is comparatively stronger over the east of China, such as June and July, the water vapor output by the south wind across the north boundary is evidently increased, and becomes the most vital path for the interannual variation of the water vapor budget over the river. While the river is unusually wet, an anomalous cyclonic circulation accompanied with a negative pressure anomaly is established in June over the Yellow Sea and the East China Sea in mid-latitude, and an anomalous anti-cyclonic circulation accompanied with a positive air pressure anomaly is established in July over the region around the outer Xinganling mountain in mid and high latitude. These two different anomalous circulations all decrease the water vapor output through the north boundary.

**Key words** Yangtze River basin, Water vapor cycle, Summer monsoon, Interannual variability, Anomalous circulation

## 1 引 言

东亚夏季风的年际变化很大,可以达到季节变化的量级,这是季风演变最重要的特征之一.长江流域位于东亚季风区,其水分循环的年际变化十分明显,是我国涝灾的主要集中区,中游旱灾也十分频繁.因而,对长江流域水汽收支丰枯的年际变化及其对应的大尺度水汽输送环流异常进行研究是很重要的.

已有的关于长江流域水分收支和循环年际变化的研究,大部分致力于分析该流域某区域某次暴雨期间的水汽通道和水汽源汇<sup>[1-5]</sup>.如陶杰等(1994)<sup>[1]</sup>、胡国权和丁一汇(2003)<sup>[2,3]</sup>对1991年7月、1998年夏季江淮梅雨暴雨的水汽源地及其输送通道进行分析,指出江淮地区梅雨暴雨水汽主要来自孟加拉湾和南海及其以东地区,且主要以定常涡动的方式进行输送,在850~500 hPa层有两个重要水汽源地,而地面到850 hPa更重要的水汽源地是南海.在降水过程中,暴雨区的水汽主要是从南边界和西边界流入,东边界和北边界流出,并且水汽的流入、流出主要在中低层进行.

也有研究利用合成分析的方法对长江中下游夏季旱涝年份的环流特征进行了统计<sup>[6-8]</sup>,如杨辉(2001)<sup>[6]</sup>对1980~1997年6~8月期间长江中下游

的严重涝月和旱月所对应的大气环流进行了合成分析,结果表明,长江中下游严重涝年,在对流层中下层,来自于孟加拉湾和南海的南风异常和长江流域以北的北风异常在长江中下游辐合,这两股异常气流分别与西太平洋上反气旋异常系统(中心位于22°N, 140°E)和气旋异常系统(中心位于日本海)有关,严重旱年基本相反.

降水首先必须要有充足的水汽供应,水汽可以来源于当地蒸发,也可以通过边界由其他区域输送而来.水汽辐合是外面水汽输入与当地水汽输出的综合效果,对于降水的多寡具有决定性的作用,其年际变化与降水显著相关<sup>[9-16]</sup>.费建芳、乔全明(1994)的研究表明<sup>[9]</sup>,强水汽辐合区和中国东部雨带的位置变化及热源分布有着密切关系.但是,从水汽辐合到形成降水,还需要有利的宏微观条件,因而大尺度大气环流异常与水汽辐合多寡的对应关系更加直接.

本文将主要研究夏季风期间(5~9月),长江流域不同月份水汽收支的年际变化与大尺度水汽输送环流异常的对应关系.由上可知,以前的研究主要使用个例分析或者合成分析的方法,针对某次个例或者将整个夏季的旱涝作为研究对象,对于分析结果大多缺乏显著性检验.然而,随着夏季风的北进和南退,不同月份长江流域水汽收支的年际异常所对应的异常大尺度环流以及异常水汽输送通道不尽相

同. 本文将在流域尺度上<sup>[17,18]</sup>, 针对长江流域主要积水面积主体, 使用回归分析方法<sup>[18]</sup>, 对夏季各个月份的水汽收支分别进行分析, 且主要分析通过信度检验的研究结果.

## 2 资料和方法说明

本研究使用了 NCEP/NCAR 再分析资料(以下简称 NRA)中 1958~2001 年 5~9 月的  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  网格资料, 利用 6 小时一次的 8 层等压面(至 300 hPa)及地面的水平风速和湿度资料以及地面气压资料, 计算了垂直积分(考虑地形)的整层水汽输送和辐合以及各层等压面的水汽输送. 同时还使用了同期 NRA 中 500 hPa 及 850 hPa 位势高度场资料. 由赵瑞霞和吴国雄(2006, 2007)<sup>[19,20]</sup>对 NRA 的评估工作知, NRA 可以用于研究长江流域各月水汽收支的年际变化.

垂直积分的整层水汽输送矢量( $Q_v$ )及其造成的辐合(MC), 以及各层等压面水汽输送( $Q_{vL}$ )的计算方程如下:

$$Q_v = \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_s} \overline{qV} dp, \quad (1)$$

$$MC = - \frac{1}{Q_v} \cdot Q_v, \quad (2)$$

$$Q_{vL} = \overline{qV}, \quad (3)$$

其中, 上划线表示月平均,  $p_t$  及  $p_s$  分别指大气层顶气压(这里取 300 hPa)及地面气压,  $q$  为比湿,  $V$  为水平风矢量. 垂直积分过程中, 变量  $q$  及  $V$  首先在垂直方向上插值为等间隔的 21 层, 然后进行积分.

本文将首先分析长江流域夏季风期间水汽循环和收支的季节推进过程, 并将主要使用回归分析方法, 研究该流域夏半年(5~9 月)各月份水汽收支丰枯年所对应的 500 hPa 和 850 hPa 高度场异常、整层水汽水平输送环流场异常的水平分布, 以及与之相对应的各边界水汽输送异常的垂直分布. 它们共同表征了异常的环流形势, 并显示了该月对流域水汽收支年际变化有显著正贡献的各个通道(以下简称该月“敏感水汽通道”). 另外, 还给出了各月份长江流域水汽收支和各敏感水汽通道水汽收支的年际异常, 分析了各月水汽收支丰枯年所对应的各通道的年际异常情况. 文中所说的水汽收支丰(枯)年是指水汽收支指数值大于(或小于)它在年际变化中的一个正(或负)标准差值的年份. 在以上所有的计算中, 各变量的年际变化中均已去除线性趋势变化.

这里就回归分析方法进行简单介绍. 对于某特

定月份而言, 去掉 1958~2001 年该月流域水汽辐合 MC 的时间序列的线性变化趋势, 将得到的新的时间序列作为当月流域水汽收支指数, 同时将每个格点(水平场或垂直场中)的水汽输送值和位势高度值的线性趋势也都去掉, 将去除趋势变化后的格点变量对流域的水汽收支指数进行线性回归, 然后取流域水汽收支指数年际变化中的一个正标准差值代入回归方程, 从而得到对应于流域水汽收入偏多年环流异常的格点值. 在回归分析中, 使用相关系数  $t$  检验对各格点的回归异常值进行了显著性检验, 文中主要针对通过 0.1 信度检验的显著相关结果进行分析.

长江流域的区域范围如图 2a 中中国范围内的灰色粗实线所示, 流域水汽辐合值即为该实线所围面积上的积分值, 我们取 ( $25^\circ \text{N} \sim 34^\circ \text{N}$ ,  $97.5^\circ \text{E} \sim 117.5^\circ \text{E}$ ) 为其近似边界, 来分析各边界的异常水汽输送情况.

## 3 长江流域水汽收支的年循环及其年际变化幅度

由图 1 可以看到, 长江流域的水汽辐合在 5~6 月最大, 其次就是 7~9 月, 而 12~2 月则为水汽辐散, 5~9 月 5 个月期间的水汽辐合占全年水汽辐合的 95.31%. 而且, 该流域总水汽辐合的年际变化幅度也在 5~9 月期间很大, 以 7 月最大, 9 月次之, 这应该与季风雨带的季节性北跳和南退进程的年际变

图 1 1958~2001 年长江流域水汽辐合的多年平均季节循环(ave\_MC, 左坐标)和各月年际变化的标准差(SD\_MC, 右坐标) ( $\text{mm} \cdot \text{day}^{-1}$ )

Fig. 1 Annual cycle of the long-term mean monthly moisture convergence (left coordinate) and the standard deviations of the monthly moisture convergence (right coordinate) for the Yangtze River basin during 1958~2001 ( $\text{mm} \cdot \text{day}^{-1}$ )

化较大有关。5月、8月流域水汽辐合的年际变化幅度基本相同,6月略大。可见,不论长江流域的水汽辐合本身,还是其年际变化幅度,均在5~9月期间达到年内较大值,因而本文将主要针对长江流域5~9月各个月份水汽收支的年际变化,分析与之对应的大尺度环流异常。

#### 4 长江流域水汽循环的季节推进过程以及各月水汽收支丰枯年份所对应的大尺度水汽输送环流异常

5~9月基本上包括了东亚夏季风发展北进和减弱南退的整个进程,随着季风系统的北进和南退,各个月份影响流域水汽收支的环流形势有很大的不同,造成流域水汽收支年际变化的环流异常也会有很大的变化,所以,分别讨论5~9月期间每个月的水汽收支丰枯年份所对应的大尺度水汽输送环流异常,有利于更清楚地了解长江流域夏季旱涝的形成机理。

##### 4.1 5月份

由图2a,2f知,5月份,500 hPa西太副高脊线仍然位于15°N附近,西南夏季风刚刚建立。长江流域的水汽主要来自于流域南边界和西边界的西南风输入,其中西边界的水汽收入远小于南边界,而主要的水汽输出通道为流域东边界的西风输出,其量值与南边界的水汽输入十分接近,北边界的向北输出相对较弱。经向输送造成流域水汽辐合,而纬向输送则造成流域水汽辐散。首先,一支强西南水汽输送带自孟湾南部经中南半岛、南海北部,向长江流域中下游输送大量水汽,南风分量输送大值区主要位于长江流域以南。同时,25°N附近存在强西风水汽输送带,在孟湾北部转为西南风输送,由西边界及南边界进入流域。另外,经由菲律宾群岛而来的东南水汽输送在中南半岛附近转为西南输送,加强了西南输送带的强度。

图3给出了长江流域5月份水汽收支偏多年(+1.0)所对应的整层水汽输送矢量显著异常场、500 hPa显著异常高度场和水汽收支丰枯年的586线位置,与之相对应的流域各边界水汽输送异常的垂直分布,以及该月水汽辐合和各敏感水汽通道水汽收入的年际异常。图3(a~e)中的水汽输送异常及位势高度异常,都是使用前面第3节中介绍的线性回归分析方法计算得到的。以下只对与流域水汽收支年际变化显著相关的结果进行阐述和分析,图

3a中所显示的异常量即为通过0.1信度检验的显著相关结果,图3(b~e)中色标所示深度的阴影区为通过0.1信度检验的显著相关结果,后面4.2~4.5小节中也是如此。由图3(a~e)可以看到,长江流域水汽收入偏多年,500 hPa高度场上在鄂霍次克海存在高度显著正异常区(图3a),这可能与该地区阻高的频繁生成有关。在其西南侧存在由日本海而来、途经黄海的东南偏东异常水汽输送,经流域东边界700 hPa以下进入流域,大值中心位于920 hPa左右(图3c),并增加了流域北边界东部700 hPa以上的北风输出(图3e)。

同时,在青藏高原东部存在高度负异常中心(图3a),其东南侧存在西南风异常水汽输送,自印度半岛、孟湾东南部及中南半岛而来的水汽,由南边界中东部几乎整层流入长江流域(图3d),在110°E的850 hPa层存在异常输入大值中心,并造成流域东边界南部900~600 hPa之间的水汽输出(图3c)。在南边界的异常水汽输入中,还汇入了由菲律宾群岛附近和新几内亚岛以北附近洋面而来的在中南半岛转向的西南风异常水汽输送(图3a)。

由上可见,长江流域5月水汽收入偏多年,副高位置没有显著异常,但明显受到500 hPa等压面上高原东部异常低压和中高纬鄂霍次克海异常高压系统的影响,与之相对应,对流域水汽收入有显著正贡献的敏感水汽输送通道包括:南边界中东部几乎整层的异常输入通道、东边界中北部低层的异常输入通道。

由图3c,3d,3f可知,所有正贡献敏感通道中,南边界通道的异常水汽收支及其年际变化幅度都更大一些。需要说明的是,在图3f及后面图4~7(f)中,南边界和西边界“水汽收入”的年际异常对应着该两边界水汽输送通量的年际异常,而东边界和北边界“水汽收入”的年际异常则定义为该两边界水汽输送通量年际异常的负值。1958~2001年期间,长江流域5月水汽收入的偏多年份有1962、1967、1970、1971、1972、1975、1978、1983、1984、1988年等10年,其中有5年两个正贡献敏感通道均存在向流域的异常水汽输入,3年只有南边界中东部通道存在异常水汽输入,其他2年则只有东边界中北部通道存在异常水汽输入;长江流域5月水汽收入偏少年份有1958、1960、1965、1966、1969、1979、1981、1982、1986、1994、2000年等11年,2个正贡献敏感通道大部分年份为异常水汽输出,其中有6年两个通道均为向流域外的异常水汽输出,3年只有南边

图 2 1958~2001 年 (a)~(e) 5~9 月亚洲季风区整层积分的水平水汽输送矢量 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 和 500 hPa 高度场 586、588 线 (gpm) 位置的水平分布场, 以及 (f) 长江流域西 (Trw)、东 (Tre)、南 (Trs)、北 (Trn) 边界水汽输送通量和经 (Bgt\_y)、纬 (Bgt\_x) 向水汽收支 ( $1.0 \times 10^{12} \text{kg} \cdot \text{day}^{-1}$ ) 的季节循环  
(a)~(e) 中阴影为经向水汽输送绝对值大于  $100 \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  的区域; (a) 中中国范围内的灰色粗实线为长江流域边界, 黑色细实线矩形框为其概化边界.

Fig. 2 The long-term mean vertically integrated horizontal moisture flux ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and the 586, 588 contours (gpm) of the 500 hPa geopotential height field for (a)~(e) May to September over the Asia Monsoon area during 1958~2001, and (f) the long-term mean annual cycle of zonal (Bgt\_x) and meridional (Bgt\_y) water vapor budgets and the moisture fluxes through the west (Trw), east (Tre), south (Trs) and north (Trn) boundaries ( $1.0 \times 10^{12} \text{kg} \cdot \text{day}^{-1}$ )  
Regions where the meridional water vapor transport exceeds  $100 \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  are shaded in (a)~(e);  
In (a), the thick solid curve in China is the Yangtze River basin outline, and the thin solid rectangle box is the approximate outline of the Yangtze River basin.

界中东部通道存在异常水汽输出, 其余 2 年只有东边界中北部通道存在异常水汽输出.

#### 4.2 6 月份

6 月份 (图 2b, 2f), 西太副高脊线北移至  $24^{\circ}\text{N}$  左右, 且明显东移, 西南季风极大加强并向北推进, 强水汽输送带变宽. 越赤道气流以及孟湾、南海和中国东南部南风分量加强,  $20^{\circ}\text{N} \sim 30^{\circ}\text{N}$  印度半岛的西

北风输送也比较强. 此时, 由于季风系统的整体北进, 由西太平洋而来的东南风输送对于长江流域的水汽输入不再有明显的加强作用. 与以上输送流场的变化相对应, 长江流域南边界、西边界的西南风输入均加强, 北边界及东边界的西南风输出也加强. 其中南、北边界水汽吞吐量的增加更为明显, 尤其是南边界的水汽输入, 因而大大增加了流域 6 月的水汽

图 3 1958~2001 年 5 月份长江流域水汽辐合偏多年 (+1.0) 所对应的 (a) 整层水汽输送矢量显著异常场 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )、500 hPa 显著异常高度场 (阴影) (gpdm) 和水汽收支丰 (实线)、枯 (虚线) 年 500 hPa 高度场 586 线 (gpdm) 位置, 以及水汽辐合偏多年所对应的 (b) 西、(c) 东、(d) 南、(e) 北边界异常水汽输送通量的垂直分布场 ( $1.0 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ); (f) 流域水汽辐合 (MC) 的年际异常 ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 以及对流域水汽收支年际变化有显著正贡献的各敏感水汽通道水汽收入的年际异常 ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 其中包括南边界 103°E 以东整层通道 (Rs) 和东边界 27.5°N 以北 700 hPa 以下通道 (Re) (a) 中所显示的显著异常量均通过 0.1 信度检验; (b)~(e) 中色标所示深度阴影区为通过 0.1 信度检验部分, 与横坐标相接的黑色直方柱阴影区为地面气压 (hPa), 图中, 南风 and 西风异常输送为正, 北风和东风异常输送为负; (f) 中三条横线分别

代表水汽辐合的偏多、偏少年标准 ( $\pm 1.0$ ) 以及零线, MC、Re 对应左坐标, Rs 对应右坐标; 线性回归分析中的各要素以及图中各要素均已去除线性趋势变化。

Fig. 3 The regression map of (a) the vertically integrated horizontal moisture flux ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and 500 hPa geopotential height field (gpdm) based on the moisture convergence index for the Yangtze River basin, the vertical cross-sections of the regression map of moisture flux of the (b) west, (c) east, (d) south and (e) north boundaries, and the (f) interannual anomalies of moisture convergence (MC) ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ) for the Yangtze River basin and the moisture input fluxes ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ) of different sensitive paths whose water vapor fluxes show strong positive correlations with the total moisture budget of the River. The sensitive paths include south (Rs) and east (Re) routes. The moisture flux is draw only when the regression is 90% statistically significant in (a). And in (b)~(f), the 90% statistically significant areas are shaded as the color bar, the dark histogram connected to the abscissa denotes the surface air pressure (hPa), the south and west wind anomalies are positive, and the north and east wind anomalies are negative. In (f), the three horizontal lines represent the standards when the total moisture budgets equal to  $\pm 1.0$  and zero separately, the left coordinate is corresponding to MC and Re, and the right coordinate is corresponding to Rs. The linear trends of all the elements in the pictures and the regression process have been subtracted.

收入 (参见图 1)。

长江流域 6 月水汽收入偏多年 (图 4), 以黄海及东海为中心, 在中国东部至 150°E 以西太平洋面, 存在一个显著的气旋性水汽输送异常环流, 对应 500 hPa 在该区域存在一个高度负异常中心区, 与该区域副高位置偏南有关 (图 4a)。此异常环流北支的东北风气流, 造成长江流域北边界中东部以 850 hPa 为大值中心几乎整层的大量北风异常输入 (图 4e), 以及东边界北部 900~400 hPa 的显著东风异常输入 (图 4c); 同时在发生转向后, 增加了东边界南部 800 hPa 以上的东风输出。北边界的异常北风输入应该主要对应于南风输出的减少, 实际上是一种季风水汽输送向北推进的受阻现象。该异常环流南支的西南气流由中南半岛及南海北部而来, 由于位置偏南、偏东, 并未明显增加流域南边界的水汽收入。

另外, 此 500 hPa 高度场上的异常低压一直向西延伸至阿富汗地区, 高原上也为异常低压 (图 4a), 与此对应, 在其南侧低纬地区存在从阿拉伯海途经印度半岛的西风水汽输送异常, 从西边界横断

正贡献的敏感水汽输送通道包括:北边界东部整层异常输入通道、东边界北部中层异常输入通道、西边界南部边缘低层异常输入通道.

由图 4b, 4c, 4e, 4f 可知, 所有正贡献敏感通道中, 北边界通道的异常水汽收支及其年际变化幅度最大. 1958~2001 年期间, 在长江流域 6 月水汽收入偏多年份 1962、1964、1968、1973、1974、1998 年等 6 年中, 北边界和东边界正贡献敏感通道有 3 年为异常水汽输入, 西边界正贡献敏感通道有 4 年为异常水汽输入; 在 6 月水汽收入偏少年份 1960、1961、1966、1984、1988、1993、2001 年等 7 年中, 与流域东北侧异常东北风输送气流对应的北边界或东边界正贡献敏感通道有 4 年为异常水汽输出, 西边界正贡献敏感通道有 3 年为异常水汽输出.

#### 4.3 7 月份

7 月份 (图 2c, 2f), 副高脊线北移至 27°N 左右, 西南季风水汽输送带进一步加强、变宽、北进, 中国东部的南风分量进一步加大、并极大地向北扩展, 西风分量减小; 印度半岛北部 (20°N~30°N) 的西北风水汽输送明显减弱, 与之相对应, 孟湾北部至长江流域西边界的西风输送分量也有所减小, 南风分量加大. 因而流域东、西边界的西风输送减弱, 尤其是东边界, 纬向水汽辐散减少. 而南、北边界的南风水汽输送进一步加强, 尤其是北边界的南风输出极大加强, 因此, 经向水汽辐合减少. 且经向辐合的减少量大于纬向辐散的减少量, 所以 7 月总的水汽辐合量减少 (参见图 1).

由图 5 可以看到, 长江流域 7 月水汽辐合偏多年, 在长江流域 30°N 以北至高纬地区存在一个大范围的反气旋性异常环流 (图 5a), 对应 500 hPa 在 (82.5°E~140°E, 45°N~65°N) 范围存在以外兴安岭为中心的位势高度正异常中心区, 这应该与该地区大陆高压的频繁生成有关. 此反气旋南支的东北风异常水汽输送指向长江流域地区, 在长江流域北边界中东部以及东边界北部造成东北风异常水汽输送. 北边界中东部的显著北风异常水汽输入 (图 5e), 在 103°E~109.5°E 之间主要位于地面到 650 hPa, 以靠近地面处最大, 向上逐渐减少; 而在 111°E 以东则主要位于 890 hPa 以下, 大值中心位于 920 hPa 附近. 此异常北风输入实际上对应于南风输出的减少, 表征了季风水汽输送向北推进的受阻现象. 东边界北部的显著东风异常水汽输入主要位于 32.5°N~34°N 之间的 930~600 hPa 层, 大值输送中心位于 900 hPa (图 5c).

图 4 同图 3, 但为长江流域 6 月份, 且 (f) 中对流域水汽收支年际变化有显著正贡献的水汽通道包括西边界南部边缘 550 hPa 以下通道 (Rw)、东边界 32°N 以北 (900~400 hPa) 层通道 (Re) 和北边界 104°E 以东整层通道 (Rn)

(f) 中 Rw、Re 对应左坐标, MC、Rn 对应右坐标.

Fig. 4 As in Fig. 3 except for June, and the sensitive paths include west (Rw), east (Re) and north (Rn) routes. The left coordinate is corresponding to Rw and Re, and the right coordinate is corresponding to MC and Rn in (f).

山脉地区 550 hPa 以下进入长江流域 (图 4b). 两支气流在长江流域汇合 (图 4a), 形成辐合, 增加了长江流域的水汽收入.

可见, 6 月长江流域水汽收入的偏多, 主要受中纬度以黄海和东海为中心的异常低压系统及其向西延伸的异常低压带的影响, 对流域水汽收入有显著

(图 5a), 经横断山脉从西边界南部整层以及中部 600 hPa 以上进入长江流域(图 5b); 且其中一部分在高原南部发生转向, 与前面的东北风异常输送汇合, 形成流域南边界西部 350 hPa 以下的北风异常水汽输出(图 5d). 同时, 由孟湾东南部而来的显著西南风异常水汽输送也在高原南麓转向为西北风异常输送, 然后与南海的显著西南风异常水汽输送汇合, 从南边界东部 500 hPa 以下进入长江流域, 大值中心位于 850 hPa, 此异常输入比南边界西部的异常输出范围及强度大很多. 此西南气流同时造成流域东边界中南部 900 hPa 以上的显著西南风异常水汽输出(图 5c). 500 hPa 高度场上 20°N 以南直至南半球的位势高度呈显著正异常, 副高位置略微偏南且范围偏大, 这对于孟湾东南部及南海的西南风异常水汽输送有明显作用(图 5a).

可见, 7 月长江流域水汽收入偏多年, 极大地受到中高纬高空位势高度场正异常系统影响, 同时对应 20°N 以南直至南半球的位势高度正异常区, 副高位置略微偏南且范围偏大. 三支异常输送气流分别主要从东、北边界、西边界和南边界进入长江流域, 形成辐合, 因而对流域水汽收入有显著正贡献的敏感水汽输送通道包括: 北边界中东部低层通道、东边界北部边缘中层通道、西边界南部整层通道、南边界东部中低层通道.

由图 5f 可知, 1958~2001 年期间, 在长江流域 7 月水汽收入的偏多年份 1958、1963、1969、1970、1977、1996、1997、1998、1999 年等 9 年中, 与流域东北侧异常东北风输送气流对应的北边界或东边界正贡献敏感通道有 6 年为异常水汽输入, 南边界和西边界正贡献敏感通道均有 7 年为异常水汽输入; 在偏少年份 1959、1961、1962、1971、1985、1990、1992、2000、2001 年等 9 年中, 北边界或东边界正贡献敏感通道共有 8 年, 西边界通道也有 8 年, 南边界敏感通道有 7 年为异常水汽输出.

#### 4.4 8 月份

8 月份(图 2d, 2f), 副高脊线进一步北移至 31°N 附近, 强度有所减弱, 且明显东撤; 季风系统也随之继续向北、向东推进. 由孟湾经中南半岛而来的西南风水汽输送明显向东延伸, 补偿北移、东撤的副高西南侧的东南风输送, 因而长江流域的西南季风输送极大减弱. 流域东、西边界的西风输送都减弱, 尤其是东边界, 其水汽输出小于西边界的水汽输入, 纬向输送造成流域水汽辐合; 同时, 流域南、北边界的南风水汽输送也减弱, 尤其是南边界的水汽输入减弱

图 5 同图 3, 但为长江流域 7 月份, 且 (f) 中对流域水汽收支年际变化有显著正贡献的水汽通道包括西边界 27.5°N 以南整层和 (27.5°N ~ 30°N) 之间 600 hPa 以上通道 (Rw)、东边界 (32.5°N ~ 34°N) 之间 930 ~ 600 hPa 层通道 (Re)、南边界 (109°E ~ 117°E) 之间 500 hPa 以下通道 (Rs)、北边界 (103°E ~ 109.5°E) 之间 650 hPa 以下和 111°E 以东 890 hPa 以下通道 (Rn)

(f) 中 Rw、Re、Rn、MC 对应左坐标, Rs 对应右坐标.

Fig. 5 As in Fig. 3 except for July, and the sensitive paths include west (Rw), east (Re), south (Rs) and north (Rn) routes

The left coordinate is corresponding to Rw, Re, Rn and MC, and the right coordinate is corresponding to Rs in (f).

另外, 长江流域水汽辐合偏多年, 低纬地区存在从孟湾以北地区而来的显著西南风异常水汽输送



为 6 月的一半以下,减弱幅度远大于北边界,经向水汽输送造成的水汽辐合进一步大大减弱,量值与纬向输送造成的水汽辐合十分接近.流域总的水汽辐合略微增加(见图 1).

图 6 表明,长江流域 8 月水汽辐合偏多年,在中南半岛及其以东太平洋面(95°E~160°E,0°~35°N)存在显著反气旋性异常环流,对应 500 hPa 在该区域存在一小块显著增压区,与水汽收入偏少年相比,西太副高向南、向西扩展.在低空 850 hPa 低纬相应位置存在与此反气旋性环流相当尺度的显著异常闭合高压区与之匹配(图 8a).反气旋环流西北支的西南风异常输送,将水汽由孟湾东南部、中南半岛、南海及 10°N~15°N 的西太平洋输送到长江流域,显著加强了流域南边界东部地面至高空 400 hPa 的南风异常水汽输入,大值输送中心位于 900 hPa(图 6d);同时,也增加了流域东边界 28°N 以南 870~750 hPa 层的水汽输出(图 6c).此反气旋性异常输送的南支至东支,应该对应于前面所述的来自于孟湾并向东延伸的西风输送气流以及与之相联系的副高西南侧东南风输送气流的减弱,因而加强了与西支相对应的长江流域及其以南的东亚西南季风.

同时,500 hPa 高度场上青藏高原南部存在位势高度显著负异常区(图 6a),其南侧存在由印度半岛中部向东的显著西风异常水汽输送,汇入以上西南气流,加强了南边界的南风异常输入,且在北边界 110°E 以西 600~330 hPa 之间对应存在显著的微弱北风异常输出(图 6e).另外,长江流域水汽收入偏多年,在西伯利亚及满洲里地区 500 hPa 存在位势高度显著正异常区,这可能对副高的向南、向西伸展有影响,不过并未出现明显的异常水汽输送与之配合.

可见,8 月长江流域水汽收支的年际变化主要受低纬水汽输送异常的影响,在中南半岛及其以东太平洋面上空低层存在显著异常闭合高压区,以及反气旋性异常输送环流.同时,青藏高原南部上空 500 hPa 存在位势高度显著负异常区.与异常环流对应,对流域水汽收入有显著正贡献的敏感水汽输送通道主要为南边界东部中低层通道.

由图 6f 可知,1958~2001 年期间,在长江流域 8 月水汽收入偏多年份 1964、1968、1975、1979、1988、1995、1998、2000 年等 8 年中,南边界正贡献敏感通道有 4 年为异常水汽输入;在偏少年份 1966、1977、1986、1990、1997 年等 5 年中,南边界敏感通道均为异常水汽输出.

图 6 同图 3,但为长江流域 8 月份,且(f)中对流域水汽收支年际变化有显著正贡献的水汽通道只有南边界 104°E 以东 400 hPa 以下通道(Rs)  
(f)中 MC 对应左坐标,Rs 对应右坐标.

Fig. 6 As in Fig. 3 except for August, and the sensitive path only includes south (Rs) route  
The left coordinate is corresponding to MC, and the right coordinate is corresponding to Rs in (f).

#### 4.5 9 月份

9 月份(图 2e,2f),西太副高南退至 29°N 附近,且 586 闭合线向流域南部及其以南地区延伸.西伸副高西北侧的西南风输送,造成流域东、西边界的西风输送比 8 月增加,纬向水汽输送造成的辐合加大.同时此西伸副高切断了西南季风的向北输送,东亚西南夏季风输送基本结束,流域南、北边界的南风水

而来的异常输送流相连接,将水汽从流域西边界输入(图 7b),主要位于北部离地面约 50 hPa 以上,厚度约 200 hPa;同时也造成流域北边界南风水汽输出的增加(图 7e).

同时,从菲律宾群岛周围洋面、经南海、中南半岛至长江流域存在反气旋性输送环流,850 hPa 低空在其右侧存在显著的位势高度异常偏高区与之对应(图 8b),此反气旋性异常输送气流大幅增加了流域南边界中东部 400 hPa 以下的水汽输入(图 7d),强输送中心位于 107.5 °E 附近的 850 hPa 层;也增加了流域东边界 30 °N 以北约 750 hPa 以上的西风异常水汽输出(图 7c).该反气旋性异常输送气流,与水汽收入偏多年副高(586 线)的西伸较弱及南北范围偏宽有一定关系.另外,在热带地区 500 hPa 还存在大范围位势高度负异常区(图 7a),在赤道及其北侧至 15 °N 左右存在很强、很宽的东风异常水汽输送带,加强了流域以南的西南风异常水汽输送.

由上可知,9 月长江流域水汽收支的年际变化与 8 月一样也是主要受低纬水汽输送异常的影响,在中南半岛及其以东太平洋面(115 °E ~ 145 °E, 15 °N ~ 32.5 °N)上空低层 850 hPa 存在显著异常高压区,在流域西北侧 500 hPa 高层存在位势高度负异常区.与之对应,对流域水汽收入有显著正贡献的敏感水汽输送通道主要为西边界北部中低层通道和南边界中东部中低层通道.

由图 7b,7d,7f 可知,南边界正贡献敏感通道的水汽收支的年际变化贡献更大一些.1958 ~ 2001 年期间,在长江流域 9 月水汽收入偏多年份 1970、1973、1974、1975、1979、1982、1985、1988、2000 年等 9 年中,南边界通道有 8 年、西边界通道有 6 年为异常水汽输入;在偏少年份 1958、1959、1960、1966、1976、1986、1991、1998 年等 8 年中,南边界通道有 7 年、西边界通道有 5 年为异常水汽输出.

## 5 结 论

本文分析了长江流域夏季风期间水汽收支和循环的季节推进过程,同时着重研究了该流域夏季风期间不同月份水汽收支的年际变化,及与其显著相关的大尺度水汽输送和环流异常.

长江流域水汽辐合及其年际变化幅度均在 5 ~ 9 月期间较大,水汽辐合在 5 ~ 6 月最大,其年际变化幅度以 7 月最大,9 月次之.流域范围的西南夏季风水汽输送以 6、7 月最为强烈,尤其是 7 月.经向输

图 7 同图 3,但为长江流域 9 月份,且(f)中对流域水汽收支年际变化有显著正贡献的水汽通道包括西边界 28 °N 以北 350 hPa 以下通道(Rw)和南边界 101 °E 以东 400 hPa 以下通道(Rs)  
(f)中 Rw、MC 对应左坐标,Rs 对应右坐标.

Fig. 7 As in Fig. 3 except for September, and the sensitive paths include west (Rw) and south (Rs) routes  
The left coordinate is corresponding to Rw and MC, and the right one is corresponding to Rs in (f).

汽输送均减少,尤其是南边界,经向水汽输送造成流域的水汽辐散.

由图 7 看到,长江流域 9 月水汽收入偏多年,500 hPa 高度场上(图 7a),在流域西北侧存在位势高度负异常区,在其周围存在弱的气旋性异常输送环流,其东南侧气流与由低纬印度半岛和孟湾西部

长江流域夏半年各个月份水汽收支丰枯年份所对应的大尺度水汽输送环流异常各不相同. 首先, 在中国东部夏季风相对较弱月份(5、8、9月), 流域水汽收支的多寡对于其主要的水汽输入通道(即南边界中部和东部几乎整层的南风水汽输入通道)十分敏感. 同时, 5月还存在东边界北部低层显著正贡献敏感通道, 9月存在西边界北部中层正贡献敏感通道. 另外, 这些月份所受敏感影响系统也有着比较相似的特征: 对应于水汽收入偏多年, 在500 hPa高空都受到青藏高原东部异常低压影响, 有利于流域南边界通道的南风异常水汽输入; 而且, 8、9月在中南半岛及其以东太平洋面存在大范围显著异常的反气旋性环流, 主要对应于低空该区域的显著增压区, 这应该主要是由于8月西太副高的向西向南异常伸展, 以及9月副高的西伸较弱和南北范围较宽造成的. 这几个月份长江流域水汽收入的年际异常也受到较高纬度系统的影响, 但其影响相对较小, 只有5月份, 比较明显地受到鄂霍次克海地区阻高频繁生成所导致的正高度异常的影响.

而当中国东部夏季风十分强盛时(6、7月), 流域北边界南风水汽输出极大增加, 成为流域水汽流出的关键通道之一, 也成为流域水汽收入年际变化的主要正贡献敏感通道. 但是, 它们所受的主要影响系统并不相同, 对应于水汽收入偏丰年, 6月500 hPa高空主要受中纬度以黄海和东海为中心的异常低压系统及其向西延伸的异常低压带影响, 在中国东部及以东洋面存在显著的气旋性异常输送环流, 与该区域副高偏南、偏弱有关; 而7月500 hPa高空则主要受到中高纬以外兴安岭为中心的异常高压及与其相对应的反气旋性异常输送环流的影响, 与该区域大陆高压的频繁生成密切相关. 两个不同的关键影响系统都造成了流域北边界中东部及东边界北部的北风异常水汽输入. 同时, 6月还存在西边界南部低层正贡献敏感通道, 7月存在西边界南部整层和南边界东部中低层正贡献敏感通道. 另外, 6、7月还对应着500 hPa低纬以及南半球的显著异常高压区, 尤其是7月.

#### 参考文献 (References)

- [1] 陶杰, 陈久康. 江淮梅雨暴雨的水汽源地及其输送通道. 南京气象学院学报, 1994, 4: 443~447  
Tao J., Chen J. K. Diagnosis of role of moisture sources and passages in Meiyu rain gush genesis. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 1994, 4: 443~447
- [2] 丁一汇, 胡国权. 1998年中国大洪水时期的水汽收支研究.

图8 1958~2001年(a)8月份、(b)9月份长江流域水汽辐合偏多年(+1.0)所对应的整层水汽输送矢量显著异常场( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )、850 hPa显著异常高度场(图中色标所示灰色阴影)(gpm)  
图中所显示的显著异常量均通过0.1信度检验;  
黑色阴影区为地面气压低于850 hPa区域;在线性回归分析中各要素均已去除线性趋势变化.

Fig. 8 The regression map of the vertically integrated horizontal moisture flux ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and 850 hPa geopotential height field (gpm) based on the moisture convergence index for the Yangtze River basin for (a) August and (b) September  
The moisture flux and 850 hPa geopotential height field anomalies are draw only when the regression is 90% statistically significant. The regions where the surface pressure is less than 850 hPa are shaded. The linear trends of all the elements in the regression process have been subtracted.

送, 在5~8月期间造成流域水汽辐合, 但8月此辐合急剧减少, 主要是由于副高东移造成流域南边界水汽输入急剧减少所致. 至9月, 随着副高南撤、西伸, 经向水汽输送造成流域水汽辐散. 纬向输送在5~7月期间造成流域水汽辐散, 随着西南季风输送的减小, 8月东边界的水汽输出也急剧减少, 8、9月纬向水汽输送均造成流域水汽辐合, 成为流域水汽收入的主要来源, 尤其是9月.

- 气象学报, 2003, 2: 129 ~ 145
- Ding Y H, Hu G Q. A study on water vapor budget over China during the 1998 severe flood periods. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, 2: 129 ~ 145
- [ 3 ] 胡国权, 丁一汇. 1991 年江淮暴雨时期的能量和水汽循环研究. 气象学报, 2003, 2: 146 ~ 163
- Hu G Q, Ding Y H. A study on the energy and water cycles over Changjiang-Huaihe River basins during the 1991 heavy rain periods. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, 2: 146 ~ 163
- [ 4 ] 姚文清, 徐祥德, 张雪金. 1998 年长江流域梅雨期暴雨过程的水汽输送特征. 南京气象学院学报, 2003, 26(4): 496 ~ 503
- Yao W Q, Xu X D, Zhang X J. Water vapor features in the heavy monsoon precipitation processes of 1998 over the Yangtze basin. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2003, 26(4): 496 ~ 503
- [ 5 ] 周玉淑, 高守亭, 邓国. 江淮流域 2003 年强梅雨期的水汽输送特征分析. 大气科学, 2005, 2: 195 ~ 204
- Zhou Y S, Gao S T, Deng G. A diagnostic study of water vapor transport and budget during heavy precipitation over the Changjiang River and the Huaihe River basins in 2003. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, 2: 195 ~ 204
- [ 6 ] Yang H. Anomalous atmospheric circulation, heat sources and moisture sinks in relation to great precipitation anomalies in Yangtze River valley. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, 18(5): 972 ~ 983
- [ 7 ] 苗秋菊, 徐祥德, 张胜军. 长江流域水汽收支与高原水汽输送分量“转换”特征. 气象学报, 2005, 1: 93 ~ 99
- Miao Q J, Xu X D, Zhang S J. Whole layer water vapor budget of Yangtze River valley and moisture flux components transform in the key areas of the plateau. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2005, 1: 93 ~ 99
- [ 8 ] Xu X D, Chen L S, Wang X R, et al. Moisture transport source/sink structure of Meiyu rain belt along the Yangtze River valley. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49: 181 ~ 188
- [ 9 ] 费建芳, 乔全明. 梅雨前后亚洲季风区平均散度风环流和水汽输送的研究. 气象学报, 1994, 4: 452 ~ 459
- Fei J F, Qiao Q M. A study of the mean divergent circulations and the moisture flux over the Asian Monsoon before, during and after Meiyu. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1994, 4: 452 ~ 459
- [ 10 ] 田红, 郭品文, 陆维松. 中国夏季降水的水汽通道特征及其影响因子分析. 热带气象学报, 2004, 4: 401 ~ 408
- Tian H, Guo P W, Lu W S. Characteristics of vapor inflow corridors related to summer rainfall in China and impact factors. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2004, 4: 401 ~ 408
- [ 11 ] 吴国雄. 大气水汽的输送和收支及其对副热带干旱的影响. 大气科学, 1990, 14(1): 53 ~ 63
- Wu G X. Characteristics of water vapor transport and budget as well as its effect on the drought over the subtropical region. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1990, 14(1): 53 ~ 63
- [ 12 ] Daniel L C, Steve G. Water vapor transport over the Indian Ocean during the 1979 summer monsoon. Part I: Water vapor fluxes. *Monthly Weather Review*, 1987, 115(3): 653 ~ 663
- [ 13 ] He J H, Sun C H, Liu Y Y, et al. Seasonal transition features of large-scale moisture transport in the Asian-Australian Monsoon region. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007, 24(1): 1 ~ 14
- [ 14 ] Judah L C, David A S, Richard D R. Interannual variability in the meridional transport of water vapor. *Journal of Hydrometeorology*, 2000, 1(6): 547 ~ 553
- [ 15 ] Michio Y, Tomohiko T. Seasonal and interannual variability of atmospheric heat sources and moisture sinks as determined from NCEP-NCAR reanalysis. *Journal of Climate*, 1998, 11: 463 ~ 482
- [ 16 ] Li W P. Moisture flux and water balance over the South China Sea during late boreal spring and summer. *Theoretical and Applied Climatology*, 1999, 64: 179 ~ 187
- [ 17 ] Jose A M. Characteristics and spatio-temporal variability of the Amazon River basin water budget. *Climate Dynamics*, 2005, 24: 11 ~ 22
- [ 18 ] Yoshiki F, Hiromichi I, Kooiti M, et al. Interannual variability of summer water balance components in three major river basins of northern Eurasia. *Journal of Hydrometeorology*, 2003, 4: 283 ~ 296
- [ 19 ] 赵瑞霞, 吴国雄. 长江流域水分收支以及再分析资料可用性分析. 气象学报, 2007, 65(3): 416 ~ 427
- Zhao R X, Wu G X. Water budget for the Yangtze River basin and evaluation of ECMWF and NCEP/NCAR reanalysis data. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2007, 65(3): 416 ~ 427
- [ 20 ] 赵瑞霞, 吴国雄. 黄河流域中上游水分收支以及再分析资料可用性分析. 自然科学进展, 2006, 16(3): 316 ~ 324
- Zhao R X, Wu G X. Water budget for the Yellow River basin and evaluation of ECMWF and NCEP/NCAR reanalysis data. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 2006, 16(3): 316 ~ 324

(本文编辑 何燕)