

1991年江淮流域持续性特大暴雨的水汽输送*

谢齐强

(武汉暴雨研究所, 430074)

提 要

讨论了1991年5月上旬到7月下旬逐旬水汽通量的变化。来自孟加拉湾和来自南海的水汽通量各旬之间变化很大并且有正相关关系。这种变化引起进入江淮流域南界的水汽发生变化, 导致江淮流域的水汽收支各旬不同。5月下旬和7月上旬, 水汽收入达到峰值, 为暴雨提供了丰沛的水汽。说明江淮流域的水汽主要来自孟加拉湾和南海。

关键词: 江淮流域 特大暴雨 水汽输送

引 言

有丰富水汽供应, 是能否下暴雨的一个重要条件。分析1991年的水汽输送和江淮流域的水汽收支, 对研究江淮流域持续性特大暴雨的成因显得尤为重要。

本文计算水汽通量的范围是 20° — 40° N, 100° — 125° E(图1中 ABCD 区), 计算江淮流域的水汽收支之周界(图1中 BGHI 虚线区)东西方向长1700km, 南北宽800km, 格距为100km, 分200、300、700、850和900hPa 5层。等压面上的水汽通量为:

$$F_{pi} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{g} v_{pj} b_j + \frac{1}{2g} (v_{pi} q_i + v_{oi} q_o)$$

整层水汽通量:

$$F = (F_{200} + F_{300} + F_{700}) \times 200 \times 10^7$$

F_{pi} 表示各格点上垂直于界线的风速分量与比湿相乘再除以重力加速度之和, 向界内流入为正, 单位为 $g \cdot s^{-1} \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1}$ 。整层水汽通量的单位为 $g \cdot s^{-1}$ 。逐日计算1991年5月1日—7月31日的水汽通量, 再合成为各旬

的水汽通量。文内着重分析了1991年7月上旬的水汽输送和江淮流域的水汽收支, 进而讨论了各旬的变化。

1 水汽的水平输送

我们在图1中的 ABCD 范围内分段计算水汽通量以表示不同方向进入该区水汽的多寡。1991年7月上旬由图1中的西南方(EDF 段)进来的水汽通量为 $3.01 \times 10^{11} g \cdot s^{-1}$ (见表1), 上、下各层中以700和850hPa 最强。此界离孟加拉湾的最近距离为500km, 从1991年7月上旬850hPa 热带流线图(图略)可以看出, 进入此界的水汽来自孟加拉湾。图1中的 FC 段正置南海上, 经此界面进入大区的水汽来自南海。1991年7月上旬由南海进入 ABCD 区的水汽通量为 $4.00 \times 10^{11} g \cdot s^{-1}$, 以900和850hPa 最强, 往上减弱。东边(图1中 BC 段)为水汽输出界。从1991年7月上旬各等压面上的水汽通量分布中可以看出, 300hPa 以下有明显的水汽输送带。由较强的风速和高湿区组成。这是10天的平均情况, 它没有逐日图上的急流和高湿区那样窄、强, 而显得比较宽广、平缓, 但是还可见到明显的输送带, 说明

* 此项工作得到国家科技攻关85-906-08-91专题的资助。

水汽输送在这段时间是非常强的。这支输送带的北界在贵阳、芷江、武汉、南京一线，南界在桂林、南昌、杭州附近。这支输送带走向在低层偏南北向，中层接近于西西南到东东北向。图1为1991年7月上旬700hPa的水汽通量分布，最大值为 $15.7\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$ ，在桂林附近。850hPa上的水汽通量最大值为 $17.6\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$ ，位置偏东南，900hPa更偏南，南风分量更强。由孟加拉湾和南海进入ABCD区的水汽主要沿输送带自西西南向东东北输送，大部分进入江淮流域，小部分由东界流出。

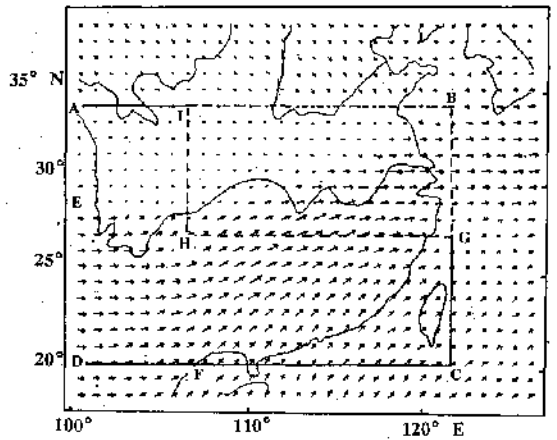


图1 1991年7月上旬700hPa水汽通量

表1 1991年7月上旬水汽通量

| | ABCD区 | | | | 合计 | 江淮流域 | | | | 合计 |
|--------|-------|------|-------|------|------|------|------|-------|-----|------|
| | 孟加拉湾 | 南海 | 东界 | 西北界 | | 西界 | 南界 | 东界 | 北界 | |
| 200hPa | -14 | -2 | -5 | 29 | 8 | 14 | -16 | -8 | 12 | 2 |
| 500hPa | 309 | 202 | -371 | 444 | 583 | 189 | 126 | -302 | 189 | 202 |
| 700hPa | 793 | 643 | -653 | 297 | 1081 | 21 | 553 | -414 | 182 | 342 |
| 850hPa | 557 | 1111 | -934 | 71 | 806 | -3 | 856 | -476 | 60 | 437 |
| 900hPa | 404 | 1154 | -938 | -31 | 588 | 13 | 915 | -440 | -25 | 462 |
| 整层 | 3010 | 3997 | -3924 | 1420 | 4504 | 445 | 3186 | -2311 | 692 | 2012 |

注：等压面上水汽通量单位 $10^{-1}\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$ ，整层水汽通量单位 $10^6\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$

那么，孟加拉湾和南海究竟何者是供给江淮流域的水汽来源呢？我们用各层等压面上的流线来讨论。由流线的性质可知，含有水汽的空气是沿流线的切线方向运动而不会穿过流线的。据此，我们可在等压面上由图1中的F点作一流线以分离来自孟加拉湾和南海的水汽，这条流线在江淮流域南界（图1中GH段）的截点以西的水汽来自孟加拉湾，以东的水汽来自南海。由各层等压面上分离孟加拉湾和南海的流线在江淮流域南界的截点（表2中的黑线所在处）看来，由南海进入ABCD区的水汽大部分在未到达江淮流域（BGHI区）时就由东界流出了，而由孟加拉湾来的水汽则主要进入江淮流域（表2中黑体线西侧）。其中500、700和850hPa附近进入江淮流域的水汽主要来自孟加拉湾，900hPa附近的水汽来自南海的为来自孟加拉湾的1.2

倍。这与文献[2]、[3]中提到中层的水汽来自孟加拉湾、低层水汽来自南海是相符合的。而我们的着眼点时间更长、范围更大。由500、700和900hPa3层合计计算孟加拉湾来的水汽通量为 $2.26\times 10^{11}\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ ，南海来的水汽通量为 $1.04\times 10^{11}\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ 。整个看来，进入江淮流域南界（GH段）的水汽，约有2/3来自孟加拉湾，1/3来自南海。

由表2还可看出，在江淮流域南界的14格点（长沙西面150km）附近，从900到700hPa为水汽通量的高值区，500hPa高值区偏西100km。这意味着在此附近进入江淮流域的水汽相对比较集中。

从形势上分析，能维持这一稳定的西南气流的水汽输送带，需要孟加拉湾到中南半岛为低压槽控制，西太平洋副热带高压强且偏西南。

表2 1991年7月上旬江淮流域南界之水汽通量($10^{-1}g \cdot s^{-1} \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1}$)

| 格点号 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 孟加拉湾 | 南海 |
|--------|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-------|-------|
| 500hPa | -0.5 | 4 | 7 | 10 | 12 | 13 | 12 | 10 | 10 | 9 | 7 | 5 | 5 | 5 | 6 | 5 | 4 | 1.5 | 104.5 | 0 |
| 700hPa | 11 | 27 | 36 | 41 | 45 | 49 | 50 | 48 | 50 | 45 | 40 | 32 | 25 | 19 | 15 | 10 | 7 | 3 | 543 | 10 |
| 850hPa | 12.5 | 34 | 47 | 60 | 71 | 77 | 80 | 75 | 76 | 67 | 59 | 51 | 44 | 37 | 28 | 19 | 14 | 5.5 | 599.5 | 257.5 |
| 900hPa | 11.5 | 33 | 47 | 63 | 78 | 84 | 86 | 81 | 80 | 70 | 60 | 53 | 47 | 41 | 33 | 22 | 17 | 6.5 | 402.5 | 110.5 |

注:格点号自西到东,粗黑线以东为来自南海的水汽通量。

2 江淮流域的水汽收支

分析江淮流域暴雨时,只知道南界有水汽流入是不够的,还需要了解四周的水汽收支。1991年7月上旬江淮流域的水汽收支计算结果列于表1。由表1可见,水汽通量主要在400hPa以下,以南界(图1中GH段)进入江淮流域的水汽通量最大,为 $3.19 \times 10^{11}g \cdot s^{-1}$,其次为北界(图1中IB段)进入的水汽,约占南来的1/5,西部(图1中IH段)进入的水汽为南来的15%,东部为水汽输出界,达到 $2.31 \times 10^{11}g \cdot s^{-1}$ 。按强度排列,南界输入最强,西界其次,北界再次。各个方向水汽通量的上、下层分布不同,南界来的水汽主要由低层进入,500、700、900hPa的水汽通量之比为1:4:7。它与南海进入ABCD区的水汽通量分布相似,这种垂直分布是由南向北输送水汽的一个特征。主要是因为低层比湿大,且风的南风分量较上层大的缘故。西来水汽主要由500hPa附近进入,乃因该层西风分量较低层大。北界位于江淮切变线北侧,500、700hPa流入水汽,900hPa有南风分量,为水汽输出层。东界的500、700、900hPa3层输出的水汽通量大致相同。由表1还可以看出,江淮流域四周的水汽在南北方向是辐合的,是主要的,而在东西方向是辐散的。这是与文献[4]、[5]中提出的雨带纵向上水汽辐散、横向上水汽辐合相一致的。为什么7月上旬在江淮流域南北向上有这么强的辐合呢?这是由于南北两侧西风和东风形成的切变线上南面有南风、北面有北风,南北风的辐合形成水汽辐合。四周水汽通量之和各层均为正值,说明500、

700、850、900hPa均有水汽流入,水汽辐合层次相当深厚。900hPa附近的水汽流入为500hPa流入的2.3倍,这意味着低层的水汽辐合是主要的,中层也不可忽视,这是1991年7月上旬江淮流域持续性暴雨的一个特点。整个区域水汽净收入达 $2.01 \times 10^{11}g \cdot s^{-1}$ 。

我们对计算结果作了检验。据淮河水利委员会的资料,1991年6月底—7月3日的4场强降雨使淮河流域的河、湖库容增加了近250亿 m^3 的水。按我们计算江淮流域的水汽净收入推算出4天的总降水量为680亿 m^3 。它近似于淮河流域测得水量的3倍。而我们计算的江淮流域还包括长江中、下游、太湖等,面积约为淮河流域的3倍,说明计算方案可能是可行的。再者,我们计算1991年6月30日08时江淮流域的水汽净通量为 $4.8 \times 10^{11}g \cdot s^{-1}$,折合成一天的水汽收入为 $4.0 \times 10^{16}g$ 。而6月30日08时到7月1日08时江淮流域格点化的实际降水总量相当于 $3.9 \times 10^{16}g$ (即390亿 m^3 水)。可见计算的水汽收入与实际降水相当吻合。说明这种计算方案是正确的。从计算的水汽水平收支与实际降水一致的事实可以看出,暴雨的维持主要靠水平方向的水汽辐合。

3 5月上旬到7月下旬水汽通量的演变

上面讨论了1991年7月上旬这段暴雨最强时期的水汽输送及江淮流域的水汽收支情况。1991年的暴雨期长,前面还有两段暴雨,其相应的水汽输送和收支是如何变化的?为此,我们将计算的1991年5月上旬到7月下旬的水汽通量作成图2和表3。图2中的实线表示由南海进入ABCD区的水汽通量,虚线为孟

孟加拉湾进入 ABCD 区的水汽通量,点划线为进入江淮流域南界(GH 段)的水汽通量。

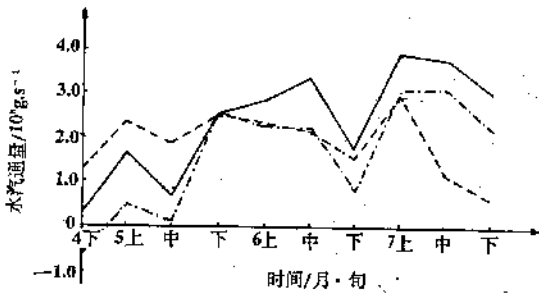


图2 1991年5月上旬—7月下旬水汽通量曲线

由图2可以看出,从5月上旬到7月下旬各旬中来自孟加拉湾进入图1中 ABCD 区的水汽通量起伏很大,大致呈上升的趋势。从南海进入 ABCD 区的水汽通量起伏亦很大并且上升的趋势更明显,5月上、中旬,由南海进入

ABCD 区的水汽通量比来自孟加拉湾的水汽通量小,到5月下旬两者相等。以后则比孟加拉湾的水汽多。各旬看来,它们的相差不多。值得注意的是,在5月下旬和7月上旬,由孟加拉湾和南海进入 ABCD 区的水汽同时增加,6月下旬又都为低值期,两者的起伏几乎是同步的,说明来自孟加拉湾和南海进入 ABCD 区的水汽变化有明显的正相关。这两部分水汽进入该区后,在我国南方没有大范围暴雨的情况下,大部分沿着西南气流输送到江淮流域南界(GH 段)而进入江淮流域,小部分由东界流出。这样一来,由孟加拉湾和南海进入 ABCD 区的水汽通量比较多,经西南气流输送进入江淮流域南界的水汽通量就比较多。由图2可见,进入江淮流域南界的水汽通量起伏很大,其峰谷与来自孟加拉湾和南海进入 ABCD 区的水汽变化十分吻合。

表3 1991年5月上旬—7月下旬水汽通量($10^{11} \text{g} \cdot \text{s}^{-1}$)

| ABCD 区 | 孟加拉湾 | 5月 | | | 6月 | | | 7月 | | | 差值 |
|--------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 上旬 | 中旬 | 下旬 | 上旬 | 中旬 | 下旬 | 上旬 | 中旬 | 下旬 | |
| ABCD 区 | 南海 | 1672 | 675 | 2515 | 2849 | 3412 | 1746 | 3997 | 3838 | 3087 | 3322 |
| | 西界 | 536 | 469 | 726 | 658 | 536 | 241 | 445 | 288 | 384 | 485 |
| | 南界 | 531 | 149 | 2652 | 2408 | 2341 | 881 | 3186 | 3205 | 2289 | 3057 |
| 江淮流域 | 东界 | -1184 | -1211 | -2161 | -2527 | -2605 | -1224 | -2311 | -1474 | -1478 | -1127 |
| | 北界 | 355 | 592 | -445 | 60 | 971 | 1000 | 692 | -651 | 33 | 1651 |
| | 合计 | 238 | 0 | 772 | 600 | 1243 | 897 | 2012 | 1370 | 1229 | 2012 |

由表3可以看出,各旬进入江淮流域的水汽中仍以南界最多,起伏变化最大,大小差值达 $3.06 \times 10^{11} \text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ 。西界进入的水汽相对比较稳定,为 $0.50 \times 10^{11} \text{g} \cdot \text{s}^{-1}$,在5月下旬和7月上旬亦为峰值,与南界的水汽变化有关联。东界在各旬中都为水汽流出,也比较稳定。北界变化虽然大,但总的进出量较小。于是进入江淮流域南界的水汽多寡在江淮流域的水汽收支中占了主导地位。5月下旬和7月上旬,进入江淮流域南界的水汽达到峰值,江淮流域的

水汽净收入多,暴雨也特强。

对北界的水汽通量也应当注意。如果从北界流出的水汽太多,如7月中旬,虽然从南界进来的水汽比7月上旬还多,但大部分从北界和东界流出了,江淮流域的水汽净收入减少,使雨量减少。从形势上看,是副热带高压控制本区,江淮切变线消失。

4 小结

我们计算水汽通量的方案格距细、层次

多,经过实际降水量的检验证明是正确的。针对1991年江淮流域暴雨本文计算水汽通量的范围大、时间长。计算结果说明,1991年7月上旬由孟加拉湾和南海来的水汽进入 ABCD 区后源源不断地从西南向东北输送到江淮流域。由南界进入的水汽是江淮流域水汽收支的主要部分,北界和西界也有少部分水汽进入。低层进入的水汽较多,中层进入的水汽也不容忽视。1991年各旬中由孟加拉湾和南海进入 ABCD 区的水汽有明显的正相关,这两方面进入 ABCD 区的水汽多,导致进入江淮流域南界的水汽多,江淮流域水汽收入多,暴雨频繁。

对于1991年7月上旬,我们用流线分离出来自孟加拉湾的水汽进入江淮流域的部分比来自南海的水汽要多出1倍。两者之比显然与大范围的风场有关。如果西风分量相对南风有所增加则来自孟加拉湾的水汽所占比重加大。由此推论,如果计算降水区的位置比较靠南和靠东,假设在华南或华东,则来自南海的水汽比重将加大以致成为主要的。

有了这些认识后,我们将比较注意孟加

拉湾和南海是否有明显的水汽向江淮流域输送,从而有助于预报江淮流域的暴雨并及时作出决策。

本项工作还有待深入;如分析各旬由孟加拉湾和南海进入江淮流域水汽的多寡;引入3、6、9的测风以细致地分析低层水汽通量以及考虑地形对水汽输送的影响;分析水汽输送的环流背景等。

致谢:工作中与胡伯威、朱福康进行了有益的讨论,计算部分得到王志斌、彭广的帮助,谨此致谢。

参考文献

- 1 王德翰,吴宝俊.暴雨分析方法.北京:气象出版社,1985,142—149.
- 2 章潼等.中尺度暴雨分析与预报.北京:气象出版社,1988,330.
- 3 马开玉等. A Synoptic Overview of a Heavy Rain Event in Southern China. *Weather and Forecasting*, June 1987, 2 (2):108—111.
- 4 朱谦阳. 1975年梅雨暴雨期的水汽收支分析.长江流域暴雨文集.北京:气象出版社,1982,172—173.
- 5 秋山孝子. Southerly Transversal Moisture Flux into the Extremely Heavy Rain fall Zone in the Rain Season. *J. met. Soc. Japan*, 53(1975), 304—316.

Moisture Transfer Associated with the Sustained Heavy Rain in 1991 over the Jianghuai Valley

Xie Qiqiang

(Wuhan Research Institute of Heavy Rain, 430074)

Abstract

Moisture transfer associated with the sustained heavy rain in 1991 over the Jianghuai valley is analyzed. It is shown that 2/3 of the moisture that entered to the Jianghuai Valley during July 1—10 1991 came from the Bay of Bangal and the remaining 1/3 from the South China Sea.

The evolution of moisture transfer during May 1 to July 10 1991 shows that both the moisture transfer from the Bay of Bangal and from the South China Sea are enhanced simultaneously and they are corresponding to the heavy rain over the Jianghuai Valley.

Kew Words: moisture transfer heavy rain Jianghuai Valley Bay of Bangal South China Sea