

## 中国东部地区夏季水汽输送个例计算\*

謝义炳      戴武杰

(北京大学)

(中央气象科学研究所)

### 提 要

本文根据实测風与溫度紀錄計算了1957年7月11日到20日黄河中下游地区大量降水的水汽輸送情况,并簡單討論水汽循环問題。

### 1. 列言

降水的預报,尤其是降水量的預报,是气象学中重大而又困难的問題。面对这个問題,一般采取三种探索性的研究方法。第一种是不考虑降水过程的細致物理机构,仅仅考虑大气环流的粗略变化与某地区降水的統計联系,或降水量時間分布的有限性与历史相似性等,来从事預报,例如 Walker<sup>[1]</sup>与楊鑑初<sup>[2]</sup>方法等,中央气象局与北京大学合作的关于長江中上游降水中長期預报工作<sup>[3]</sup>,也屬于这一类型。第二种是适当地考虑成云降水的垂直运动及其与大型流場或天气系統的关系,利用近代計算技术或半經驗規律从事預报,如 Smagorinsky<sup>[4]</sup>、章淹<sup>[5]</sup>等,都屬这一类型。第三种是考虑水份的整个循环过程,包括蒸發、傳送、凝結、降落等及其与流場的关系,寻找其物理机构与預报途徑。这一方面的工作,迄現在为止还未到預报应用阶段,只是基本研究性質,而包括全部水汽循环过程的也少。小尺度的如雷雨研究<sup>[6]</sup>大尺度的如 Benton<sup>[7]</sup>、徐淑英<sup>[8]</sup>的水汽傳送計算等工作,都屬于这一类型。本文工作与徐淑英工作的性質相似,其不同点在于計算对象不是年或月的平均值,而是个例。虽不能作概括性了解参考,但对典型情况,則可作較詳尽的分析。所选是在黄淮地区連續大量降水的例子,降水地区的南北方都有較广泛的台站網,对水汽的傳送情况,因而有可能作較精确的計算,所得水份循环的結構与量級,因而也可能提供設計預报或水利建設方案的初步参考。

### 2. 选用資料与計算方法

本文选用了1957年7月11日到20日長江以南五岭以北基本无雨,黄淮地区大量連續降水(华南及西南也有降水,但限于紀錄,不是研究重点),东亚高空流場基本定常,雨量 大而持續,黄河汛情緊張的例子。选用00世界时探空与測風紀錄作为計算根据,計算限于由地面到400毫巴面的大气中下層。400毫巴以上,水汽測風紀錄都較少,因此加以忽略。計算时,将由地面到400毫巴面的中低層大气划分为三層,即由地面—800毫巴面,800—600毫巴面,与600—400毫巴面,分別計算每一層中的水汽通量。三層相加即得水

\* 1959年1月15日收到。

汽通量总辐散, 计算方程如下:

$$W = \int_{p_1}^{p_2} \mathbf{w} dp, (\text{单位: } g/cm \cdot \text{sec}) \quad (1)$$

$$\mathbf{w} = \frac{1}{g_e t} \int_{t_1}^{t_2} \frac{\zeta_w}{\zeta} \mathbf{v} dt, (\text{单位: } g/cm \cdot \text{mb} \cdot \text{sec}) \quad (2)$$

上二式中,  $p$  是气压,  $t$  是时间,  $p_1$  及  $p_2$  是某层上下两等压面的气压值,  $t_1$  及  $t_2$  是时间段的前后界值,  $g_e$  是重力加速度,  $\zeta_w$  是水汽密度,  $\zeta$  是干空气密度,  $\mathbf{v}$  是向量风速。因此  $\mathbf{w}$  是经过某一层间单位剖面面积、在单位时间里的水汽通量, 剖面铅直坐标采用毫巴, 因而其单位是克/厘米·毫巴·秒。  $W$  是在单位时间里经过单位剖面长度的水汽通量, 单位是克/厘米·秒。

实际计算水汽通量时, 900, 700, 及 500 毫巴面的实测风速、风向与湿度纪录, 作为地面—800 毫巴, 800—600 毫巴, 600—400 毫巴三层中的平均情况。在作此决定之前, 曾把这三等压面上的湿度与相当各层的平均湿度加以比较, 发现其误差在 2% 以下。在有些地区缺少风速风向观测时, 则根据等风速线及等风向线图的分析, 将其内插补入。

### 3. 水汽输送情况

#### 1957 年 7 月 11 日到 20 日平均情况

这十日中, 高空形势与雨区比较恒定, 其 850, 700, 500 毫巴的平均形势场如图 1—3。由这三图, 可看到太平洋高压由我国东南沿海伸向内陆, 其控制区域由低空到高空逐步向西北扩展。在华北、内蒙与新疆地区的小高压随高度的增加逐步不明显(500 毫巴面

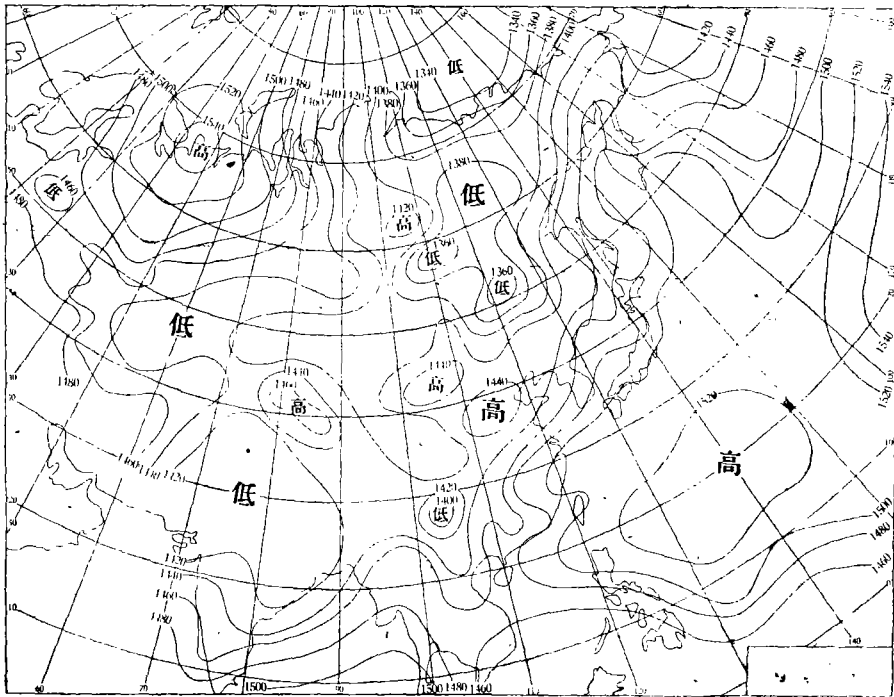


图 1. 1957 年 7 月 11 日到 20 日 03 北京时, 平均 800 毫巴等压面形势图, 等高线间隔 20 米。

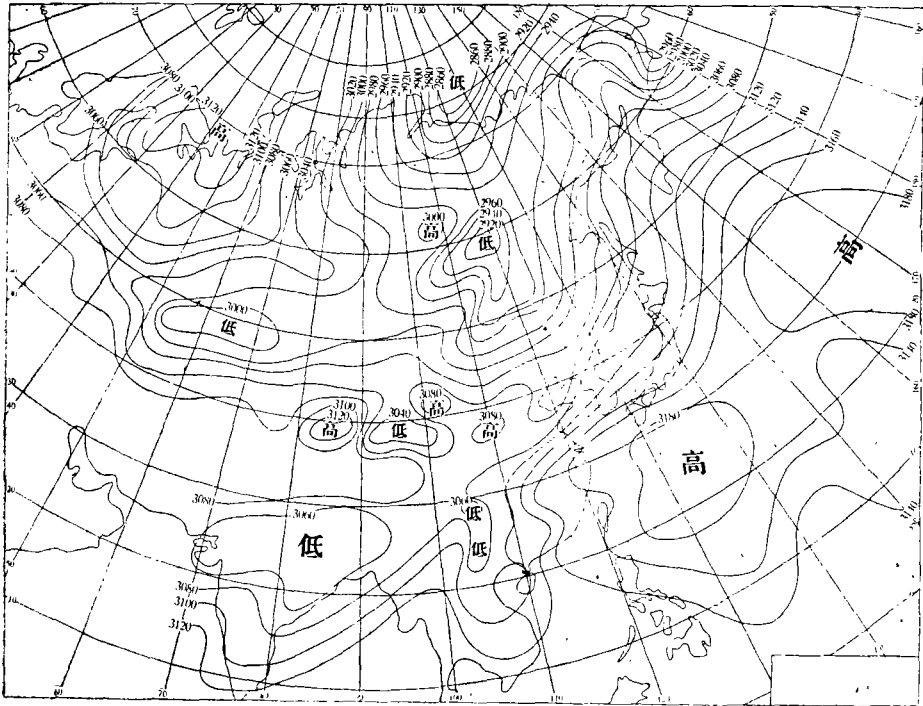


圖 2. 1967 年 7 月 11 日到 20 日 08 北京时, 700 毫巴等压面形势图, 等高线间隔 20 米。

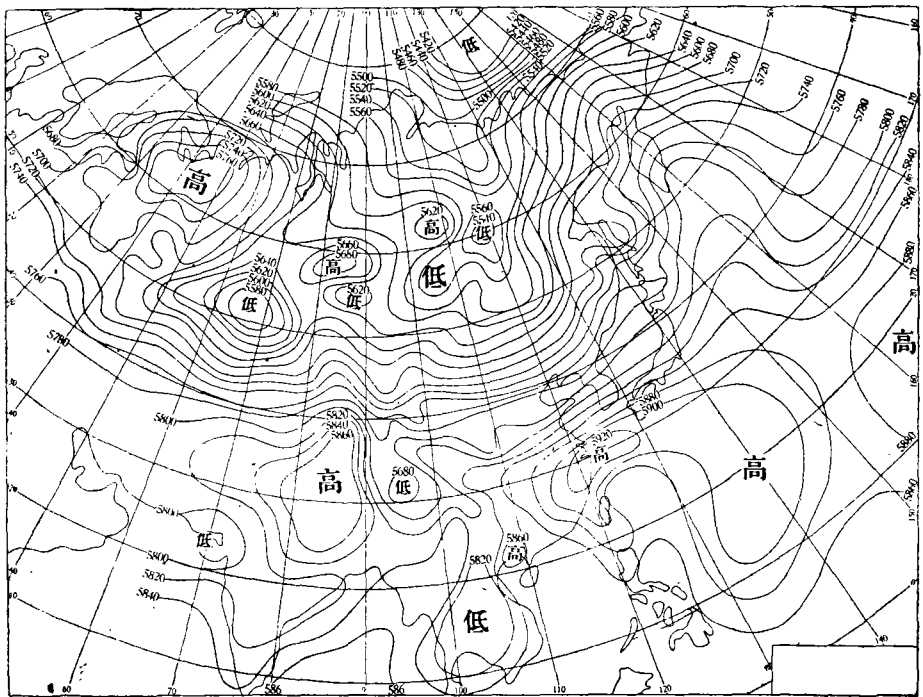


圖 3. 1967 年 7 月 11 日到 20 日 08 北京时, 500 毫巴等压面形势图, 等高线间隔 20 米。

西藏地区的高压并不完全可靠)。500毫巴面这地区出现比较平直的西风。印度北部与中印半岛上空各有一低压。在这种气压形势场情况下,水汽由广大洋面流向我国显然遵循两条路径,第一条是从太平洋高压南沿以南风及东南风形式进入我国内陆,在我国西南部与中印半岛低压槽的东方折向北方。第二条是在印度低压的东南方,以西南风形式,进入我

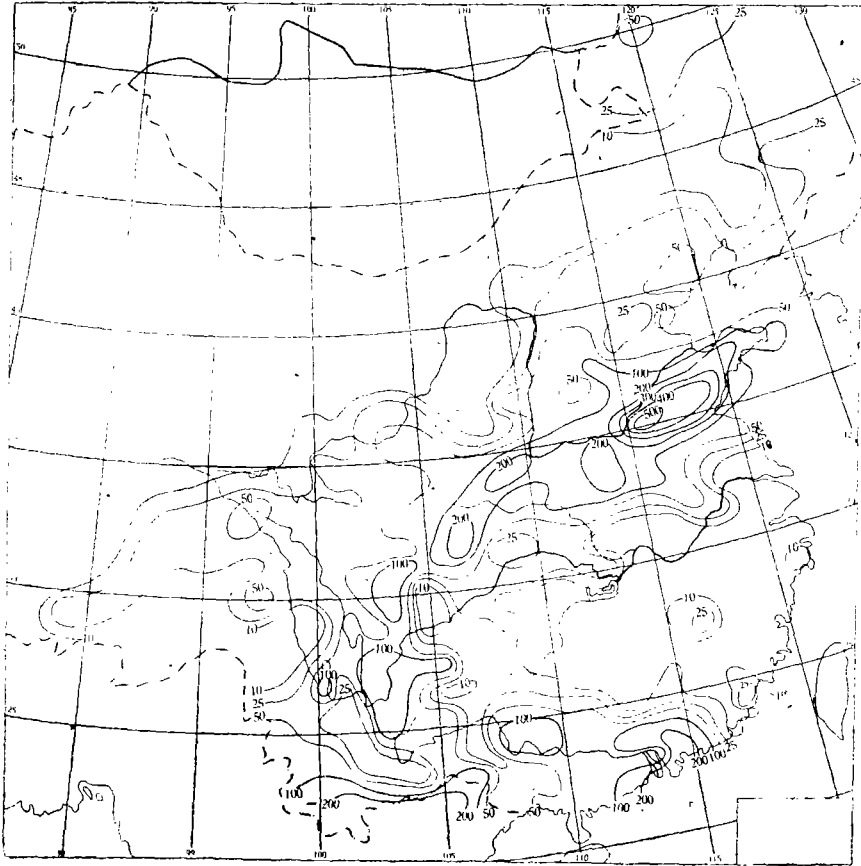


图4. 1957年7月11日08北京时到20日北京时,十天内降水总量分布图,单位毫米。

国西南部。由于北方流场的影响,两股潮湿气流会合后,在黄河、淮河间地区出海。这十天中总雨量分布如图4。大雨区出现在西江流域、西南山地与黄河南岸地区。长江南五岭北的东南各省基本无雨。由于高空纪录的限制,水汽输送的计算,以北纬26°与42°间,东经105°与120°间地区为重点。图5是所选六个剖面的位置。

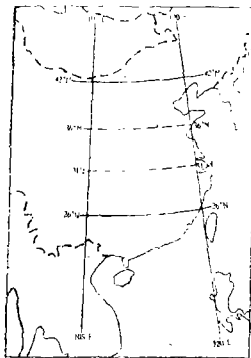


图5. 本文中所用采用剖面位置图。

图6是从马尼刺到海拉尔,基本上是沿东经120°的剖面。福州和台北以南,处于太平洋高压南沿,由地面往上,整层水汽自东向西输送,但量很小,最大值稍超过3克/厘米·毫巴·秒。在这地区以北,除青岛大连间,处于低层小高压的东方,低层有小量由东方输入水汽外,其他都是由大陆向海洋输出。水汽输出最强中心在南京附近上空约850毫巴处,强度超过16克/厘米·毫巴·秒。最大输出轴线,由下向上,倾向北方,是太平洋高

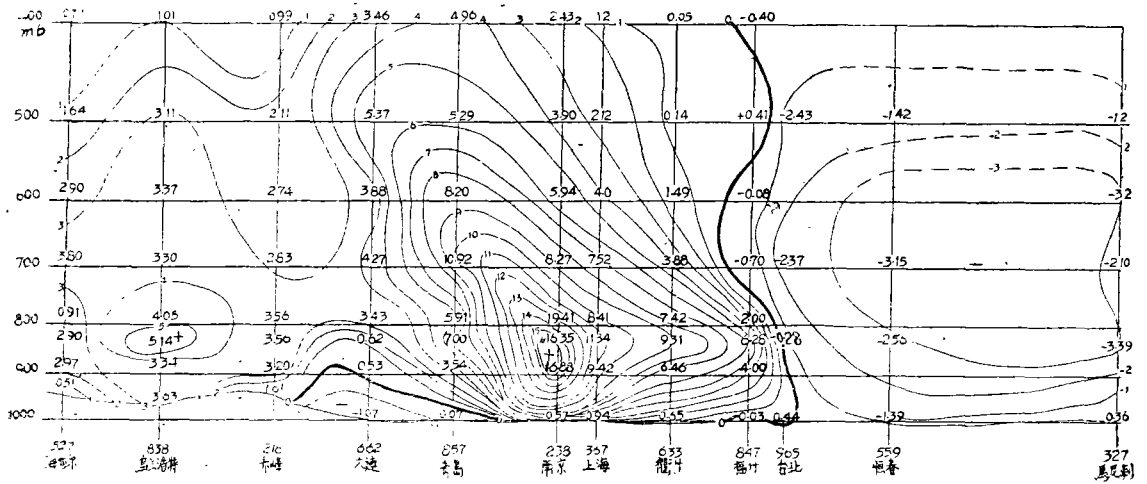


圖 6. 1957 年 7 月 11 日到 20 日 08 北京时, 經過东經 120° 剖面水汽通量分布圖。  
 “+”向东輸送, “-”向西輸送。單位克/厘米·毫巴·秒。粗黑線是水汽輸送为零的綫。

压随高度西北伸展的結果。

圖 7 是沿东經 105° 由河口到烏兰巴托的南北剖面, 低層水汽有些地方向东輸送, 有些地方相互輸送, 决定于气流方向(參看圖 1—2)。高層基本是向东輸送, 强度不大。最大向东輸送中心在宜賓貴阳地区上空 700 毫巴附近, 距地面約两公里, 最大值只 8 克/厘米·毫巴·秒。由 700 毫巴面平均圖(圖 2)可看出这股水汽显然是由孟加拉灣越过西南山地到达中国内陆的。在烏兰浩特地区上空也有一較弱的向东水汽輸送中心, 最大值仅約 3 克/厘米·毫巴·秒, 中心在 820 毫巴附近, 距地面約一公里。由前述平均等压面圖可看出这股水汽来自付極地内陆与極地海洋, 面前一股較强的水汽則来自热带海洋与中国南部大陆。

比較圖 6 与圖 7, 可以看出經過东經 105° 向东輸送到中国东部的水汽远較經過东經

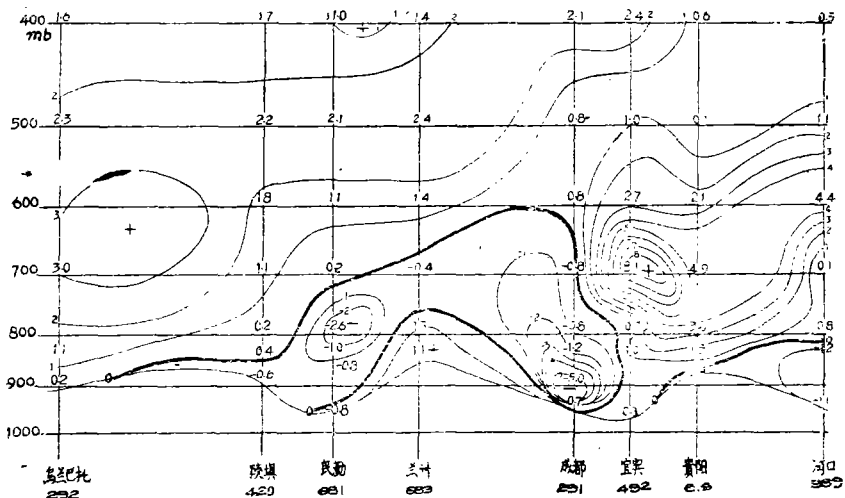


圖 7. 1957 年 7 月 11 日到 20 日 08 北京时, 經過东經 105° 剖面水汽通量分布圖, 其他說明同圖 6。

120° 由中国輸出到海外的水份为小。中国东部大量降水的水汽必須另有其他来源，不能完全归之于越过我国西南山地的西南季風。圖 8—9 分別沿北緯 26° 与 42° 的东西剖面。圖 8 中全部是由南向北輸送水汽。圖 9 因西北高空西風气流微微偏北，因而也有微弱的向南水汽輸送，其他都是向北輸送。經過北緯 26° 东西剖面向北輸送的水汽較大，因此由南中国海来的水汽，是这次中国东部降水的重要泉源。

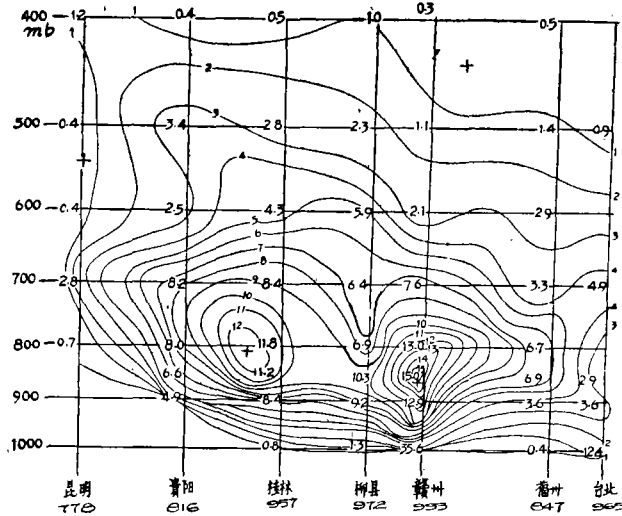


圖 8. 1957 年 7 月 11 日到 20 日 08 北京时，經過北緯 26° 剖面水汽通量分布圖。  
“+”水汽向北輸送，其他說明同圖 6。

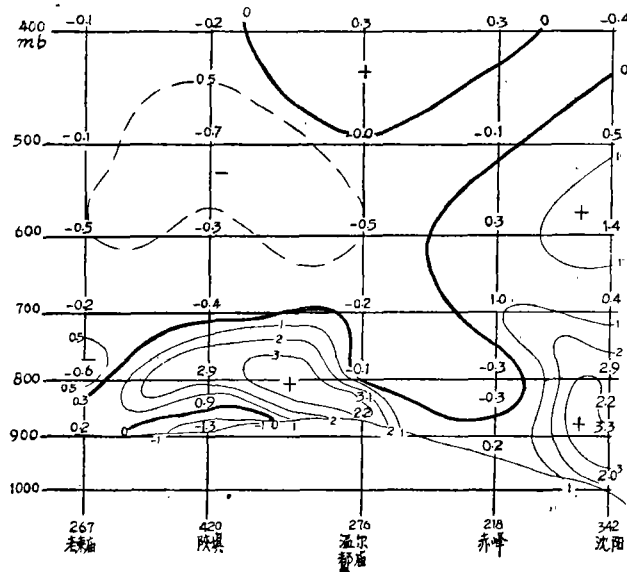


圖 9. 1957 年 7 月 11 日到 20 日 08 北京时，經過北緯 42° 剖面水汽通量分布圖。  
“+”水汽向北輸送，“-”水汽向南輸送，其他說明同圖 6。

比較圖 6—9 四个剖面，有几点值得注意：

(1) 虽然一般大气中下層風速随高度增加，但水汽最大輸送中心还在距地面 2 公里

以下,可見下層水汽輸送的重要性,这在另文<sup>[3]</sup>中已有闡述。

(2)圖 6 中,虽然輸送中心在下層,高空仍有相当大的值。如 6 克/厘米·毫巴·秒綫向上延伸达 500 毫巴面,圖 9 上水汽輸送值小,沒有这条等值綫。圖 7 圖 8 則都在 600 毫巴下。圖 6 中水汽上層較大輸送处是雨区。由这些剖面上水汽輸送的分布,也可以查覺水汽下層輸入雨区輻合抬升,上層也有輸出的循环过程。但圖 7 圖 8 剖面也通过一些比較弱的雨区(參看圖 4),所以这种循环过程还不清楚。

(3)經過东經 105—120°,北緯 26—42° 間地区的边界的水汽通量数值如下(單位万吨/秒):

	向东	向西
北緯 26—42°(剖面 6)	54.6	2.8
北緯 26—42°(剖面 7)	8.5	2.7
	向北	向南
东經 105—120°(剖面 8)	36.6	0
东經 105—120°(剖面 9)	6.9	13.1

根据長江宜昌站水文紀錄,最大洪水流量約每秒 10 万吨,則通过东經 120° 剖面北緯 26—42° 区間的水汽傳送量約为宜昌站最大流量的 5 倍。黄河山东地区的一般洪水約为每秒万吨,仅約为这剖面上水汽通量的 2%。这个数字是惊人的。但如設上海大連間的雨区为 1000 公里,每平方厘米上的空气柱中有 5 克的水汽,即最大可能降水量是 50 毫米,則只需要平均吹向海洋的風速每秒 10 米,水汽通量即达每秒 50 万吨。因此这种計算結果是完全现实的。

(4)上述四个剖面的水汽通量計算部分是封閉的,因此可以計算閉合区里的水汽平衡。在北緯 26—42°,东經 105—120° 間地区水汽輸出約每秒 59 万吨,輸入約每秒 46 万吨。一部份水汽尚需取自陆地。这一点下面还要討論。

为了进一步了解各地水份出入情况,根据合成風向与風速繪成等風速風向綫,再考虑比湿,按三角点法計算水汽通量的輻散輻合,三角形边長取 200 公里,并忽略地形的影响。圖 10 是 400 毫巴面水汽通量的总輻散分布圖。將圖 10 与圖 5 中降水分布比較,是可看出水汽通量輻合区与降水区是相当符合的。最大水汽通量輻合中心在徐州附近地区,中心值約  $-60 \times 10^{-6}$  克/厘米·秒。如这些水份都降落,則十天里可降水 500 毫米,与最大降水量值相近。但注意水汽通量輻合中心似比降水中心偏南。

長江南岭間是水汽輻散中心。如取該区的平均水汽通量輻散值为  $20 \times 10^{-6}$  克/厘米<sup>2</sup>·秒,則十日中水汽总輸出为 6 万吨。設这些水汽取自蒸發,則这区域里十日內各地平均所需要的总蒸發量是 170 毫米/厘米<sup>2</sup>。这个数字不包括空中增减的水汽与經過 400 毫巴面向上向下傳遞的水汽,

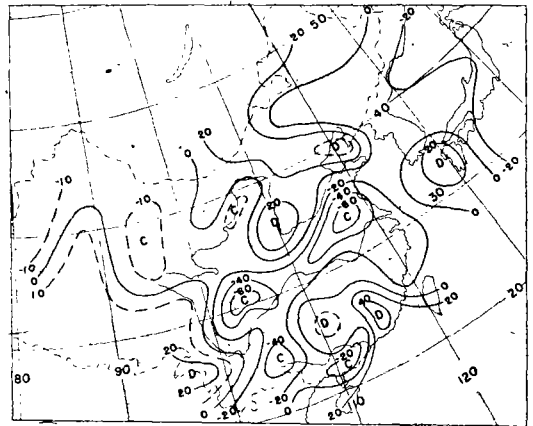


圖 10. 1957 年 7 月 11 日到 20 日整層水汽通量輻散分布圖,單位克/厘米<sup>2</sup>·秒。D 代表輻散中心,C 輻合中心。

实际总蒸發量或大于此数。

通过前四个剖面輸入东經 105—120° 北緯 26—42° 地区的水汽比輸出少每秒 13 万吨。除長江南岸地区的蒸發形式提供每秒 6 万吨外,华北地区尚有一水汽通量輻散区,可提供一部份。因此空气中的水汽輸入与輸出相互接近。由于通过剖面的水汽通量与各地水汽通量輻散的計算是相互独立的,两者相互接近,則計算結果似可認為是基本正确的。

但除以蒸發形式补充水汽輸出大于輸入的損失外,雨水降落也使空中損失一部份水汽。如設这十天内空中水汽含量基本上无大变化,則这些降落的水份,也要取自蒸發。如設这十日内本区里降落的水份,相当于在三分之一地区(近于 600,000 平方公里内)里平均降落 50 毫米雨量,則共降落  $3 \times 10^{10}$  吨水,每秒約降落 35000 吨水。由于降水而損失的空中水份,約为輸出大于輸入所損失的四分之一。这些損失的水汽也必须取自蒸發,降水区如不是連續降水,也有一定蒸發量。所以設这些蒸發量分布在全区,則平均各地十日内的蒸發量为 17 毫米。这使水汽通量輻散区的蒸發量增加 10%。这是这十天里黄河地区虽然暴雨洪水为患,而江南地区則有干旱現象的原因。

#### 1957年7月14日的水汽輸送情况

前节討論的为十天里的平均情况,为了更进一步了解水汽輸送过程,特选出与平均情况相当近似的 7 月 14 日作类似的計算。

圖 11 是 7 月 14 日 00 世界时的 700 毫巴形势場,圖 12 是 7 月 14 日 00 世界时到 7 月 15 日 00 世界时的雨量分布圖,圖 13 是由地面到 400 毫巴水汽通量总輻散圖。如将水汽通量圖与降水分布圖相互比較,可看出与平均情况相似,即量級吻合,虽水汽通量輻合中心在降水中心偏东南的地方。

为了研究水汽的輸出輸入情况,作了沿东經 105°, 120°, 北緯 26°, 31°, 36°, 42° 的六个剖面圖(圖 14—19),将东經 105—120°, 北緯 26—42° 間地区划分为三个閉合区間(參看圖 5),其中北緯 31—36° 是降水区。利用这六个剖面圖,計算了通过这三个閉合区間边界鉛直面的水汽通量,結果如下:

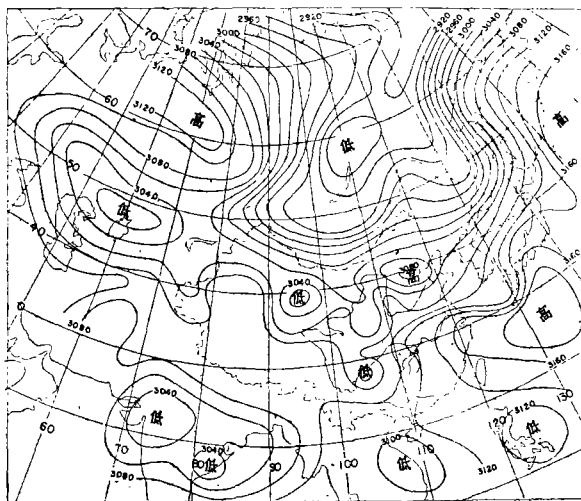


圖 11. 1957年7月14日 08 北京时, 700 毫巴等压面形势圖, 等高綫間隔 20 米。



北緯 36—42°, 东經 104—120° 区間	
輸入	20.8 万吨/秒
輸出	22.5 万吨/秒
淨輸出	1.7 万吨/秒
北緯 31—36°, 东經 104—120° 区間	
輸入	53.5 万吨/秒
輸出	15.8 万吨/秒
淨輸入	37.7 万吨/秒
北緯 26—31°, 东經 104—120° 区間	
輸入	53.6 万吨/秒
輸出	46.9 万吨/秒
淨輸入	6.7 万吨/秒

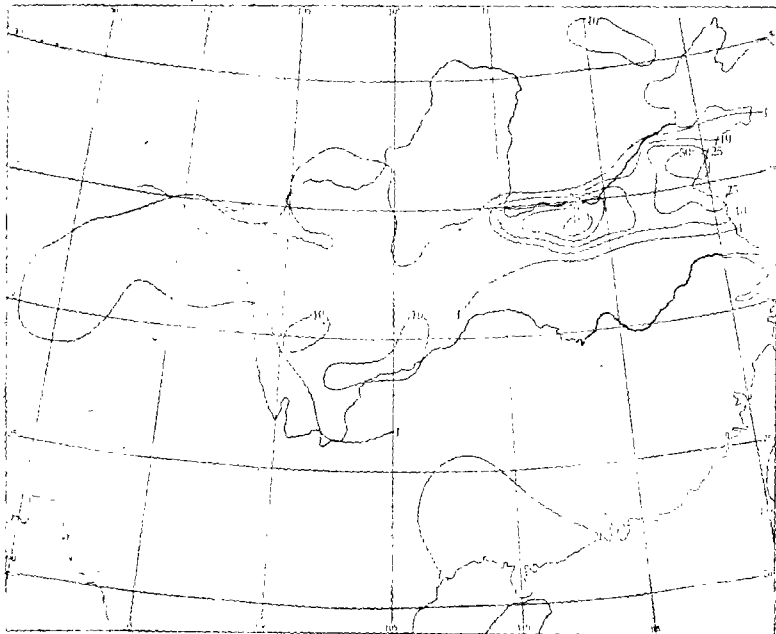


圖 12. 1957 年 7 月 14 日 08 北京时到 7 月 15 日 08 北京时, 24 小时內降水量分布圖, 單位毫米。

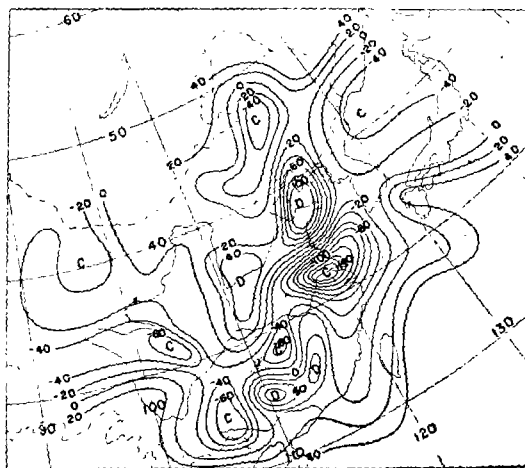


圖 13. 1957 年 7 月 14 日 08 北京时, 整層水汽通量輻散分布圖, 其他說明同圖 10。

所以在这一天中南方及北方两个区间，水汽出入基本是平衡的。中间雨区的一个区间，则每秒净输入近 40 万吨，一天达  $32 \times 10^9$  吨，除以这区间面积，则如这些水汽全部降落，各地平均日降水量当为 45 毫米，这可能大一些。如观测与计算的误差计算，则其中约半数存于空气中作为水汽含量的增加值；估计观测与计算误差在 20% 以上，而 400 毫巴面以上的输送尚未计算，所以自量级说，这还是正确的。

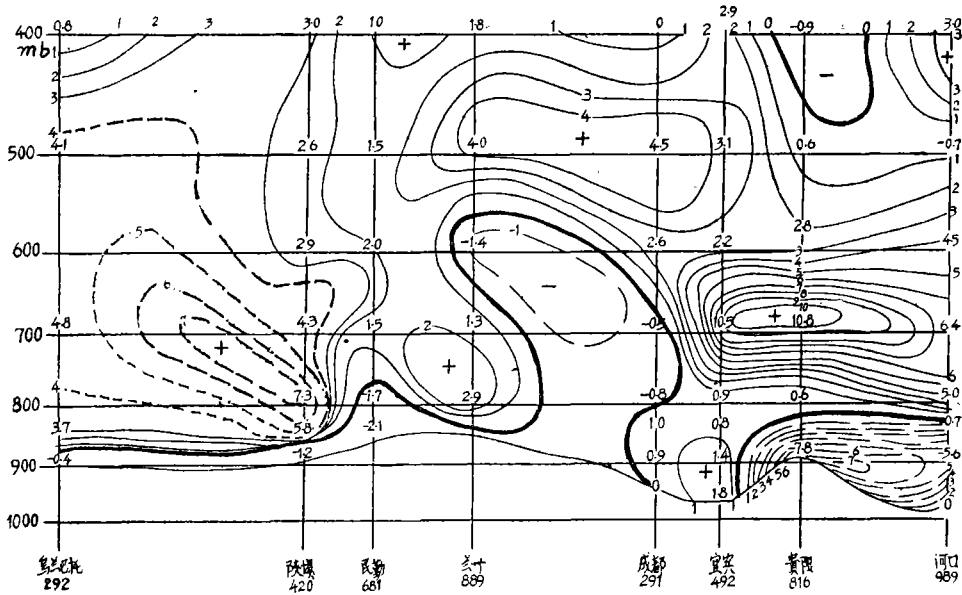


图 14. 1957 年 7 月 14 日 08 北京时，经过东经 105° 剖面的水汽通量分布图。其他说明同图 6。

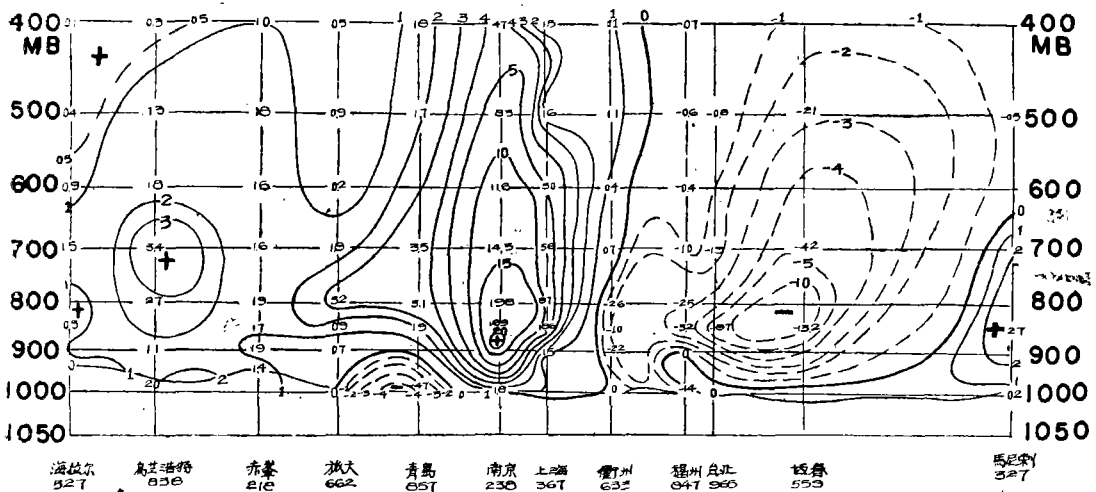


图 15. 1957 年 7 月 14 日 08 北京时，经过东经 120° 剖面水汽通量分布图。其他说明同图 6。

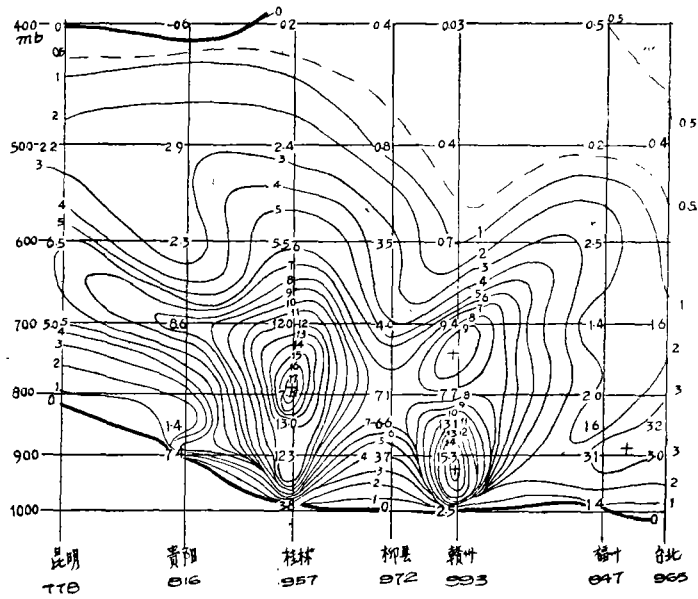


圖 16. 1957 年 7 月 14 日 08 北京时, 經过北緯 26° 剖面水汽通量分布圖. 其他說明同圖 8.

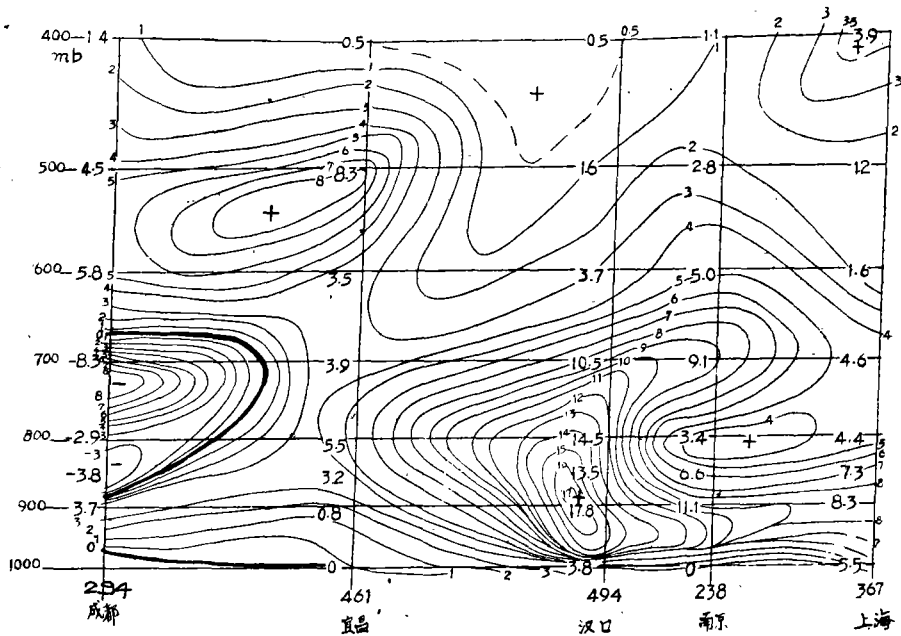


圖 17. 1957 年 7 月 14 日 08 北京时, 經过北緯 31° 剖面水汽通量分布圖. 其他說明同圖 8.

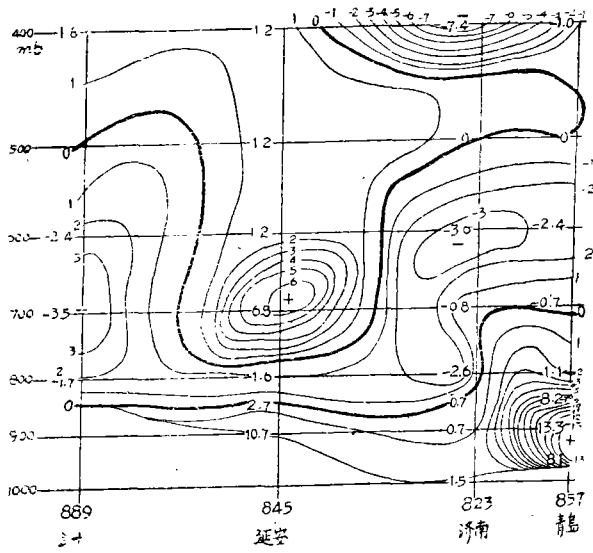


圖 18. 1957年7月14日08北京时,經過北緯 36° 剖面水汽通量分布圖.其他說明同圖 8.

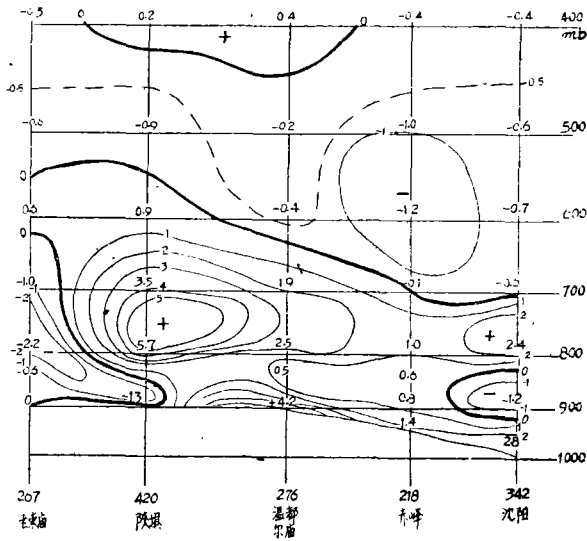


圖 19. 1957年7月14日08北京时,經過北緯 42° 剖面水汽通量分布圖.其他說明同圖 8.

### 4. 总 結

由上述計算夏季降水时空中水汽的輸出輸入量是很大的,个别日間相差也大,在某一定时期內,大陆上一部份地区也可以蒸發型式提供一部份水汽,而成为水汽源地. 本文还不能对水汽內外循环,作清晰的划分,但內循环显然远小于外循环.

## 参 考 文 献

- [1] Montgomery, R. B., Report on the work of G. T. Walker. *Monthly Weather Review*, Supplement № 39 (1940), 1—24.
- [2] 楊鑑初：运用气象要素历史演变的规律性作一年以上的长期预告. *气象学报* 24 (1953), 100—117.
- [3] 中央气象局气象科学研究所天气研究室与北京大学天气学教研室：大气环流的季节变化与中国夏季降水, 中央气象局中长期予报文集(1950).
- [4] Smagorinsky, J. and Callins, G. O., On the numerical prediction of precipitation. *Monthly Weather Review*, 83 (1955), 53—68.
- [5] 章淹：中国地区大范围定量降水数值预告图解法的试验, *气象学报* 29 (1958), 7—15.
- [6] Byers, H. R. and Braham, R. R., *The thunderstorm*, Washington, D. C., p. 232 (1949).
- [7] Benton, G. S. and Estoque, M. A., Water vapour transfer over north American Continent. *Jour. Meteor.*, 11 (1954), 462—477.
- [8] 徐淑英：我国水汽输送和平衡, *气象学报* 29 (1958), 33—43.
- [9] 謝义炳, 曾庆存：盛夏亚洲及西太平洋大型天气与中国降水, 中央气象局气象论文集, 第3号(1957).

**CERTAIN COMPUTATIONAL RESULTS OF WATER VAPOUR  
TRANSPORT OVER EASTERN CHINA FOR A  
SELECTED SYNOPTIC CASE**

HSIEH YI-PING

(*Peking University*)

TAI WU-JA

(*Central Institute of Meteorology, Central Weather Bureau*)

ABSTRACT

In this paper, the synoptic case of July 11—14, 1957 is selected for computation of water vapour transport over Eastern China. During this period heavy precipitation has caused flood over lower Yellow River area. The flux of water through the cross sections along the 105° and 120° meridians and 26°, 31°, 36° and 42° latitudes are computed. The triangle method, with side length of 200 km, is used for the computation of convergence and divergence of water vapour flux. The results are checked with the observed precipitation distribution. It is found that the accuracy of computation is reasonable.

Same computations are also conducted for daily situations.

From these computations, it is seen that even if the wind velocity increases rapidly with height in the troposphere, the water transport in the lower levels is still of much more importance. It shows also that the land is a source of water vapour for the atmosphere.