

# 1998 年中国大洪水时期的水汽收支研究\*

丁汇 胡国权

(国家气候中心, 北京, 100081)

## 摘 要

文中首先通过水汽通量的势函数和流函数的计算, 分析了 1998 年中国大洪水时期的全球水汽背景, 然后从雨情分析入手, 将 1998 年 5~8 月长江、松花江流域洪水期分为 7 个降水阶段、11 个区域, 对各时段、各区域的水汽收支作了诊断分析, 得到中国大洪水时期部分水汽收支图像, 揭示了水汽循环的一些规律, 主要结果如下:

(1) 1998 年 5~8 月, 中国东部地区是全球最强的水汽汇区, 这与 1991 年夏季的情况相似。水汽通量的势函数极小值区(最大辐合区)对应强降水区, 并且暴雨区的水汽辐合是由半球尺度的水汽输送造成, 这表明, 即使对于区域性大洪水, 它必须从极大范围地区获得水汽供应。分析还表明, 南海季风的爆发及其区域内西南方向水汽流的增强与印度洋势函数(水汽辐散)的增强关系密切。

(2) 大气的水汽收支表明, 降水主要来自水汽的辐合项, 辐合主要发生在大气低层; 用余差法计算出的局地蒸发项一般为降水量的  $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$ , 因而水汽的再循环过程也十分重要; 垂直输送项把低层的水汽向上层输送, 增加高层的水汽积累, 为积云的发展和潜热释放提供条件。

(3) 南海地区的水汽输送情况与中国强降水密切相关, 南海季风爆发后, 其强劲南风气流输送水汽的区域往往是强降水发生区。对于整个中国东部大陆区而言, 来自南部边界(南海)的水汽大于来自西部边界的水汽。

(4) 南海季风爆发之后, 由西边界经中印半岛输入南海地区的水汽明显增加, 成为主要的水汽来源, 并在南海地区形成一个明显的水汽源区, 在此积累的大量水汽再进一步折向北输送到华南和长江流域, 为那里的强降水提供必要的水汽供应条件。

(5) 长江流域大洪水期的强降水过程与水汽辐合的极大值密切相关。降水的强弱与水汽辐合的强弱变化一致, 这表明后者是前者的一个必要条件。

关键词: 1998 年大洪水, 势函数, 流函数, 水汽收支。

## 1 引 言

1998 年主汛期(6~8 月), 长江全流域性的大洪水及嫩江、松花江特大洪水为世人瞩目。强降水是造成洪水的直接原因。对于强降水形成的原因, 丁一汇等<sup>[1,2]</sup>从亚洲季风条件和天气形势特点进行了分析: 鄂霍茨克海与贝加尔湖阻塞型的建立, 西南涡的异常活跃以及西南急流所形成的强水汽输送带, 加强并维持了锋区的降水活动, 使江西北部与江淮地区始终处在南北气流的汇合带里; 国家气候中心的专家们<sup>[3,4]</sup>认为前期强厄尔尼诺年及青藏高原多积雪对长江流域的降水分布与东亚夏季风环流变化有重大影响, 特别是对夏季从贝加尔湖到鄂霍茨克

海地区阻塞高压的形成有重要贡献, 两因子的共同作用对夏季副热带高压持续偏南也有重要作用, 这种环流形势可能是导致强降水的基本气候背景; 陆尔等<sup>[5]</sup>则从东亚夏季风的角度进行了探讨。但至今还没有人研究过 1998 年大洪水时期的水汽收支及其与持续性大暴雨的关系, 这是研究 1998 年大洪水成因中不可缺少的一个方向, 因而文中在强调厄尔尼诺、高原积雪、鄂霍茨克海阻高、太平洋副热带高压、西南涡等因素的同时, 应关注水汽的收支状况。众所周知, 水汽是形成降水的最基本的必要条件之一。任何一场大暴雨, 尤其是持续性大暴雨, 必须有水汽的明显集中, 以提供源源不断的水汽供应。

应该指出, 水汽的输送是一个大尺度甚至全球

\* 初稿时间: 2001 年 12 月 6 日; 修改稿时间: 2002 年 10 月 20 日。  
资助课题: 《国家重点基础研究发展规划》(G1998040900) 项目第一部分和国家自然科学基金项目(49794030)。

性的问题, Chen<sup>[6]</sup>利用 1979 年 FGGE 资料研究了全球水汽通量的输送和维持。他把水汽通量向量  $Q$  用流函数和速度势分解成无辐散部分和辐散部分。观测表明大部分水汽存在在热带地区, 特别在以下 3 个地区: 冬季(12~ 2月)在赤道非洲、南美北部、赤道西太平洋; 夏季(6~ 8月)在赤道非洲, 美洲中部和美洲北部以及季风区。Chen 在该文的水汽分析中揭示出这些地区的高水汽含量是如何被大气环流维持的。

区域水汽输送和收支是水汽收支研究的另一个问题, 在这方面也有不少研究, 水汽输送可造成区域的水汽变化即引起区域水汽收支的变化。过去丁一汇等<sup>[7]</sup>曾对海洋上的重要系统——台风的水汽收支进行过分析, 结果表明: 对降水贡献最大的项是由辐散风造成的质量场辐合, 垂直输送项把低层的水汽向中上层输送, 增加该处的水汽积累, 蒸发项对降水也起重要作用, 约占总降水的 13%, 占水汽辐合项的 23%。

根据上面的思路, 本文首先通过水汽通量的势函数和流函数的分解, 对 1998 年 5~ 8 月全球范围的水汽背景和各分区降水过程的水汽收支进行了分析, 以加深对强降水机制的了解, 希望能从水汽供应的条件方面对以后暴雨和洪水的预报提供有用的预报依据。

## 2 资料和计算方法

降水资料为南海季风与淮河流域能量与水分循环试验(SCSMEX 和 HUBEX)所提供的气象观测资料集的每日 4 次的降水资料(区域: 10°S~ 45°N, 90~ 130°E), 其他资料为 NCEP 资料(每日 4 次平均, 水平格距为 2.5° × 2.5°,  $h, t, u, v$  为垂直 17 层 1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10 hPa 的位势高度、温度、纬向风分量和经向风分量, 比湿  $q$  为 8 层(1000~ 300 hPa), 垂直速度为 12 层(1000~ 100 hPa)。

计算方案:

(1) 水汽通量的势函数和流函数<sup>[6,8]</sup>

将水汽通量通过其流和势函数的求取, 最终得到其非辐散(旋转)分量和辐散(非旋转)分量。

$$Q = k \times \nabla^2 \Psi + (-\nabla^2 x) = Q_\Psi + Q_x \quad (1)$$

$$\begin{cases} \nabla^2 \Psi = k \cdot \nabla \times Q \\ -\nabla^2 x = \nabla \cdot Q \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} Q_\Psi = k \times \nabla^2 \Psi \\ Q_x = -\nabla^2 x \end{cases} \quad (3)$$

第 1 步, 根据格点上的  $q, u, v$  值, 计算出  $Q$  及其散度和涡度场。

第 2 步, 求解泊松方程。用超张弛法数值求解式(2)得到流函数和势函数。

第 3 步, 由式(3)得到水汽通量的辐散部分和旋转部分。

将式(1), (2)垂直积分, 得到单位面积空气柱的势和流函数, 水汽通量的辐散和非辐散分量。

(2) 水汽收支<sup>[5,6]</sup>

水汽收支方程为:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \nabla \cdot vq + \frac{\partial \omega q}{\partial p} = -m \quad (4)$$

(a)          (b)          (c)

上式中  $m$  是水汽的凝结量。

设  $P_b$  和  $P_t$  别代表气层底部和顶部气压, 对水汽方程从地面到顶层积分, 并对一研究区  $\sigma$  取平均, 则有:

$$P - E_s = - \frac{1}{\sigma g} \int_{P_t}^{P_b} \int_{\sigma} \left( \frac{\partial q}{\partial t} + \nabla \cdot vq + \frac{\partial \omega q}{\partial p} \right) dp d\sigma \quad (5)$$

(A)          (B)          (C)

式中  $P$  是此气层产生的降水量,  $E_s$  为蒸发量。

式(4)中 a 项是水汽含量的局部变化项, 可用时间中央差求之, 对于一天两次的观测而言这一项一般较小。b 项是水汽通量辐合项, 它在水汽收支中是最重要的一项, 一般可以化成线积分计算

$$\begin{aligned} \nabla \cdot vq &= \frac{1}{\sigma} C \int v_n q dl = \frac{1}{\sigma} \cdot \\ & \left( \sum_{i=1}^m (-\bar{v}_i \bar{q}_i) \cdot \Delta l_s + \sum_{j=1}^n \bar{u}_j \bar{q}_j \cdot \Delta l_e + \right. \\ & \qquad \qquad \qquad \text{下边界} \qquad \qquad \qquad \text{右边界} \\ & \left. \sum_{i=1}^m \bar{v}_i \bar{q}_i \cdot \Delta l_n + \sum_{j=1}^n (-\bar{u}_j \bar{q}_j) \cdot \Delta l_w \right) \\ & \qquad \qquad \qquad \text{上边界} \qquad \qquad \qquad \text{左边界} \end{aligned}$$

式中  $v_n q$  是垂直于边界的法向分量,  $m, n$  分别是计算区内沿  $x$  和  $y$  方向的格点数, 带“ $-$ ”的量为每一空间步长内的平均值,  $\Delta l_s, \Delta l_e, \Delta l_n, \Delta l_w$  是各边界上的格距。c 项为水汽的垂直输送项, 由直接差分求得。

求得以上各项后, 垂直积分 a, b, c 项, 得 A, B, C 各项, 然后代入式(4)和垂直积分式(5), 则可求出上述水汽方程的余差项  $E_s$ 。

### 3 雨情分析

#### 3.1 区域的划分

从 1998 年 5~8 月总降水量分布(图 1a)可见,降水范围相对较广,长江流域、华南、东北地区降水

都非常强,在 1000 mm 以上。为了使文中讨论更有针对性,将中国中南部、南海地区、东北地区共划为 11 个区域来加以分析(见图 1b)。6 和 7 月份梅雨期间,主要的暴雨区位于 VII 与 VIII 雨区,即两湖和江南北部地区,II 与 IV 区分别代表南海南部与北部地区。

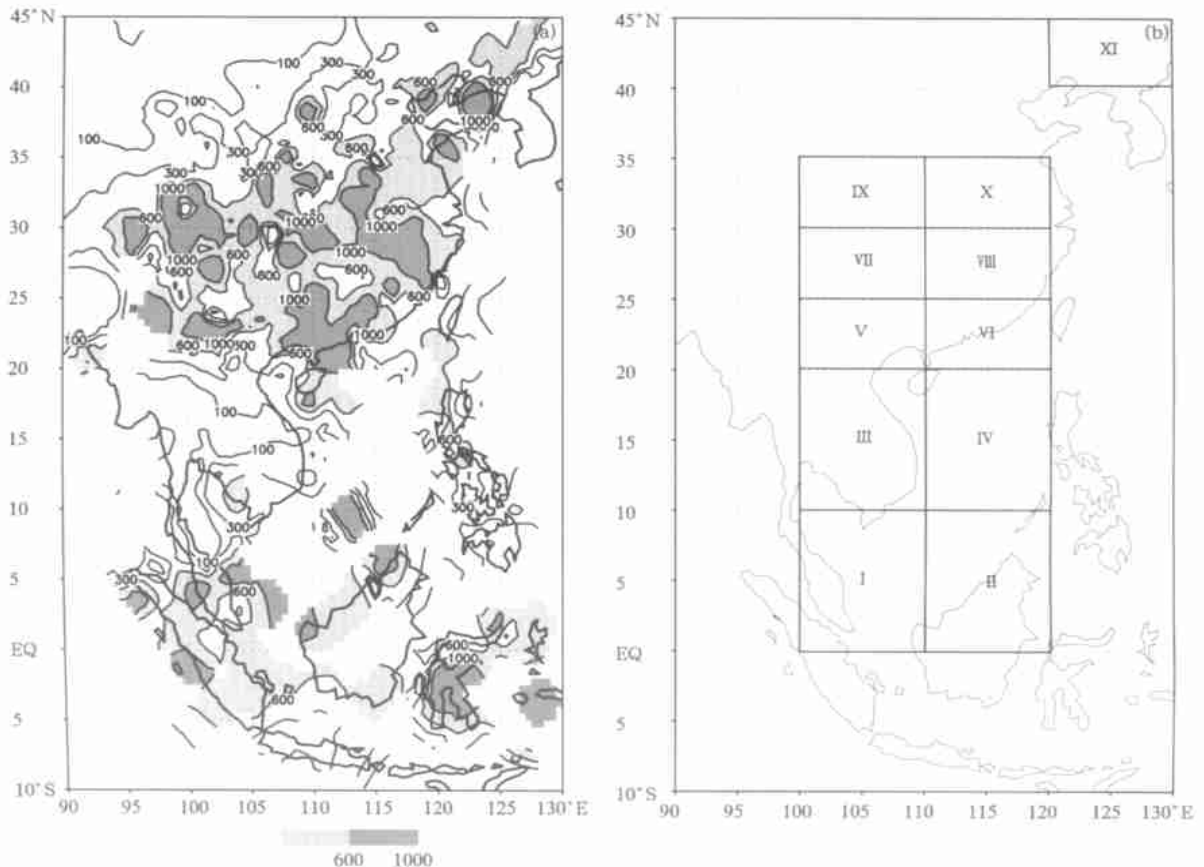


图 1 1998 年 5~8 月总降水量分布  
(a, 单位: mm) 及区域划分(b)

#### 3.2 降水阶段的划分

根据强降水出现时段,文中将整个汛期的降水期划分为 7 个阶段(图 2),在这 7 个阶段中,强降水出现的位置是不同的。

(1) 降水第 1 阶段: 5 月 1~16 日,南海季风爆发前的降水时段,其中 5 月 8~15 日为长江流域第一阶段降水期,雨带主要位于长江流域及华南地区(图 2a)。

(2) 降水第 2 阶段: 5 月 17~25 日,南海季风爆发期,雨带主要呈南北走向,从华南西部到华北地区局地均有 100 mm 降水出现(图 2b)。

(3) 降水第 3 阶段: 5 月 26 日~6 月 11 日,华

南前汛期,南海季风全面爆发后,雨带主要维持在华南(图 2c)。

(4) 降水第 4 阶段: 6 月 12~27 日,长江流域第 2 阶段降水集中期,雨带主要位于江南北部,华南西部。这相应于江淮流域的前期梅雨(图 2d)。

(5) 降水第 5 阶段: 6 月 28 日~7 月 17 日,长江中下游降水很小,雨带随副热带高压向北、向西推移。此期间,形成长江第 1 次洪峰并于 7 月 2 日通过宜昌;形成的长江第 2 次洪峰于 7 月 18 日通过宜昌。在 6 月 28 日~7 月 3 日在雨带北推过程中,在淮河流域形成了显著的降水过程(图 2e)。

(6) 降水第 6 阶段: 7 月 18~31 日,长江流域第

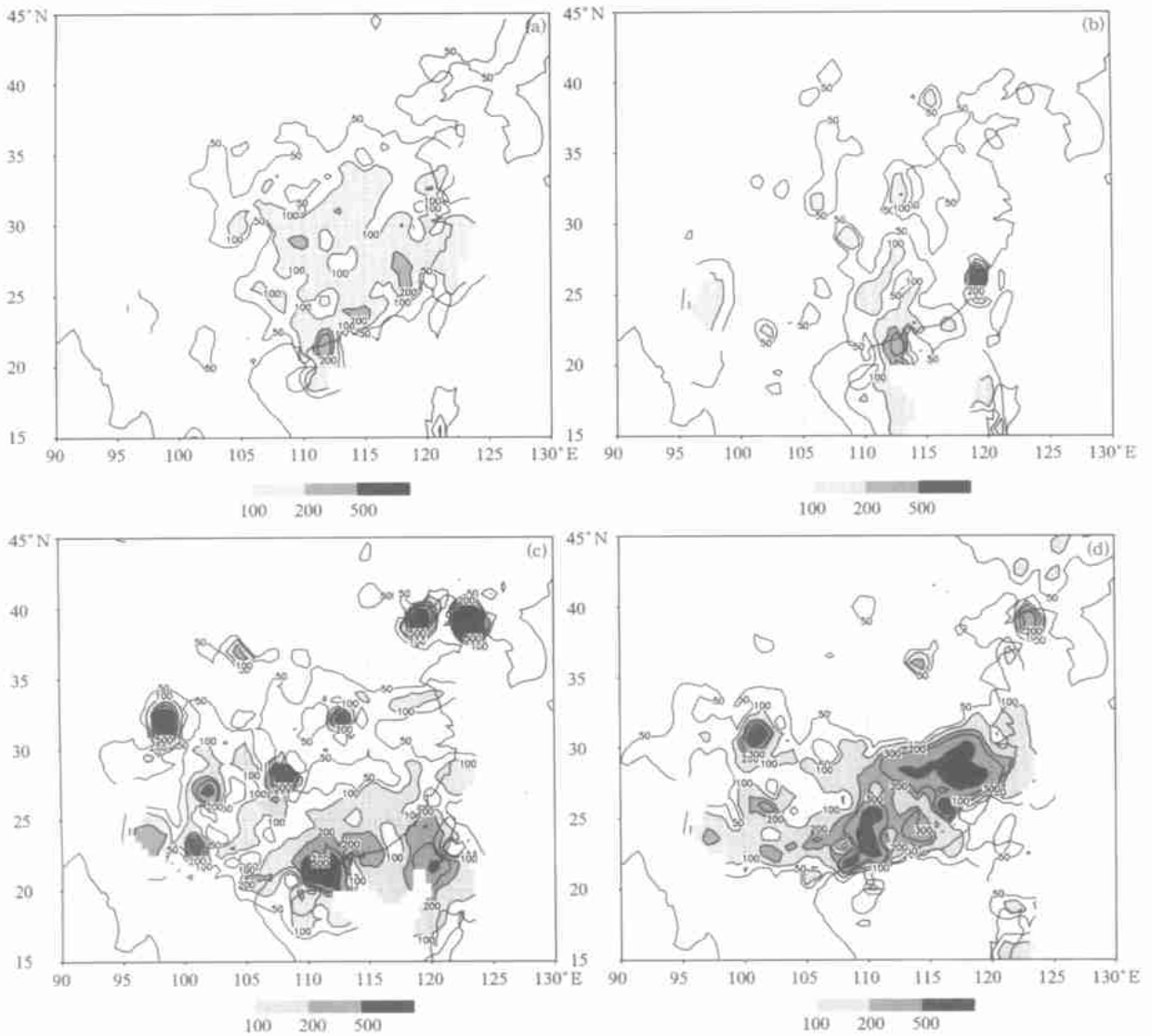


图2 各阶段的总降水量分布

(a~g 分别为降水第1至第7阶段, 单位: mm)

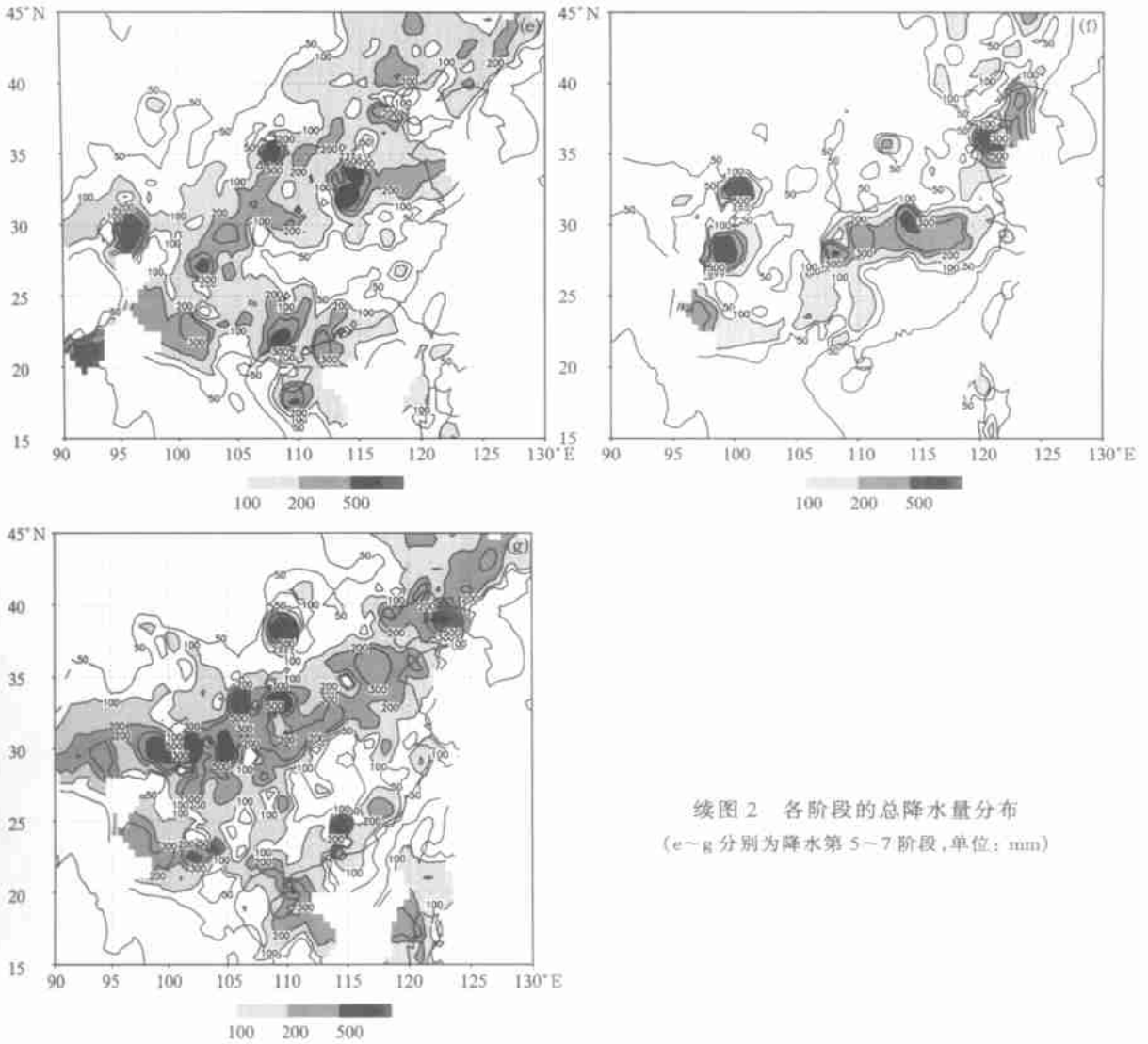
3次降水集中期开始, 也可称第2次梅雨期, 雨带又回到江南。其间, 7月25日, 长江第3次洪峰通过宜昌(图2f)。

(7) 降水第7阶段: 8月1~31日, 降雨频繁, 雨带主要位于长江流域上游、汉水流域以及东北地区。此间, 长江流域形成5次洪峰下泄, 分别出现在8月7, 13, 17, 26和31日(图2g)。

### 3.3 降水与洪涝的关系<sup>[4,9]</sup>

南方大部地区1997年11月中旬至1998年3月上旬期间持续阴雨天气, 使部分江河水位超过警戒水位, 出现多年罕见的冬汛, 尽管4, 5月间, 雨水只是接近常年, 但江河、湖泊、水库水位较高, 一直维持土壤含水量多的局面。6月中下旬强降雨带位于

江南北部和华南, 由于长江中下游地区前期江湖水位较高, 受此段强降水的影响后, 江河、湖泊、水库水位迅速上涨并出现超警戒水位, 在降水的第5阶段形成了长江的第1和2次洪峰, 这样在长江中下游区域本身及其水库、湖泊的水位较高的情况下, 自上游来的洪峰下泄, 使得长江流域出现了罕见的洪涝灾害。接着7月下旬长江中下游地区再次出现持续性强降水, 这次降水使得长江中下游流域内水系水位猛涨。8月份尽管长江中下游降水量减少, 但上游地区降水频繁, 洪峰迭起, 这样, 在前期长江中下游水系水位居高不下的情况下, 上游的多次洪峰下泄, 与中下游洪水不断遭遇, 使得洪涝持续下去。嫩江流域的水情也较为类似。



续图 2 各阶段的总降水量分布  
(e-g 分别为降水第 5-7 阶段, 单位: mm)

与 1991 年洪涝成因的比较有共同之处, 即汛期前的连阴雨, 使得土壤含水量大, 流域内水系水位偏高, 汛期内持续的强降水使得洪涝发生。不同之处在于: (1) 汛期前连阴雨发生的时间不同: 1991 年汛期前的连阴雨在 3~4 月, 而 1998 年则在 1997 年 11 月至 1998 年 3 月上旬, 发生的时间更早。(2) 汛期雨带范围不同: 1991 年降水主要集中在江淮流域, 洪涝主要是流域内强降水造成, 而 1998 年降水分布较广, 整个长江流域均有强降水发生, 洪涝的形成与维持, 除了流域内的强降水外, 上游降水形成的洪峰下泄也是其重要原因, 8 月份更是如此。

#### 4 水汽通量的势函数和流函数

通过水汽通量的势函数和流函数的分解, 来讨

论全球范围的水汽输送状况对中国降水的影响。将水汽输送通过势函数和流函数的求取, 最终分解为非辐散(旋转)部分和辐散部分。

##### 4.1 1998 年 5~8 月全球水汽输送的平均状况

图 3 为 1998 年 5~8 月单位面积空气柱积分的水汽输送的流函数与势函数平均图。从图 3a 来看, 对于流函数, 在北半球, 有 3 个高值中心: 太平洋、大西洋和印度季风区。在热带地区, 尤其是赤道以南地区存在着一致的向西水汽输送, 当这支水汽输送到达非洲东岸索马里地区时, 转向北半球后经印度、中印半岛和南海输送到中国的长江洪水区。由于这支气流长时间流经印度洋地区, 通过向上蒸发, 使气流十分潮湿, 因而含有丰富的水汽供应。另一方面, 太平洋中心的存在使得热带向西的水汽流在西太平洋和南海地区向北转向流入中国的洪水区, 但其重

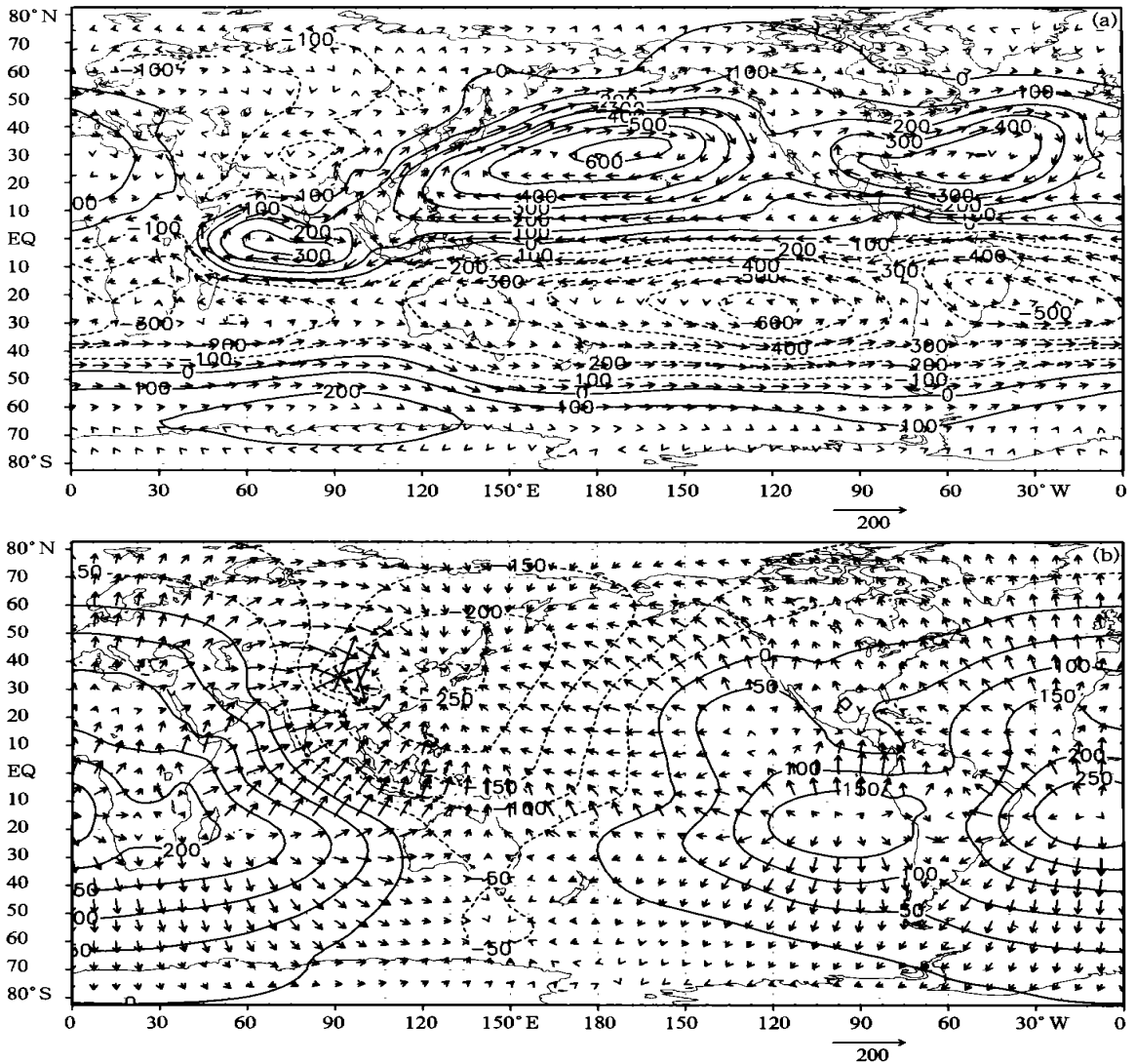


图3 1998年5~8月单位面积空气柱水汽输送的流函数及非辐散分量(a)、势函数及辐散分量(b)平均分布  
(等值线为流函数和势函数值, 单位:  $10^6 \text{ kg/s}$ , 箭头为非辐散分量和辐散分量, 单位:  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )

要性是第2位的。

流函数的分析并不能解释个别地区高水汽含量是如何维持的, 所以, 把注意力转向势函数分析。对于(3)式垂直积分可得:

$$\frac{1}{g} \int_{p_u}^{p_1} (-\nabla^2 \psi) dp = \frac{1}{g} \int_{p_u}^{p_1} (\nabla^2 \psi) Q dp$$

$$= E - P \quad (6)$$

$E$  为水汽蒸发量,  $P$  为降水量。

流函数揭示水汽的输送, 势函数则可解释高水汽的维持。由式(6)可知: 对于势函数的极小值中心, 其水汽通量散度小于零, 水汽在该地区辐合,  $E - P < 0$ , 水汽的蒸发量小于降水量, 该区域为水汽汇区; 反之, 对于势函数的极大值中心, 为水汽源区。

从5~8月势函数图3b来看, 势函数数值比流函数数值要小, 即辐散流场比非辐散流场要小, 辐散流场的纬向和经向分量在数值上基本相当, 而非辐散流场则以纬向分量为主。在图(3b)中, 可以看到, 中国东部地区为势函数的极小值区, 其值小于 $-250 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 为全球最明显的极小值区, 这就表明这个地区为5~8月全球最明显的水汽汇区; 另外, 在南半球 $20^\circ\text{S}$ 附近有两个极大值中心, 一个位于大西洋, 一个在东太平洋, 这些都是全球的水汽源区。早期的研究<sup>[10]</sup>表明, 热带地区纬向平均的水汽经向传递是靠低层的Hadley环流完成的, Salstein等<sup>[11]</sup>指出水汽通量的辐散分量的纬向传递与Walker环流有关。Chen<sup>[6]</sup>进一步指出, 在北半球夏季, 中美洲、

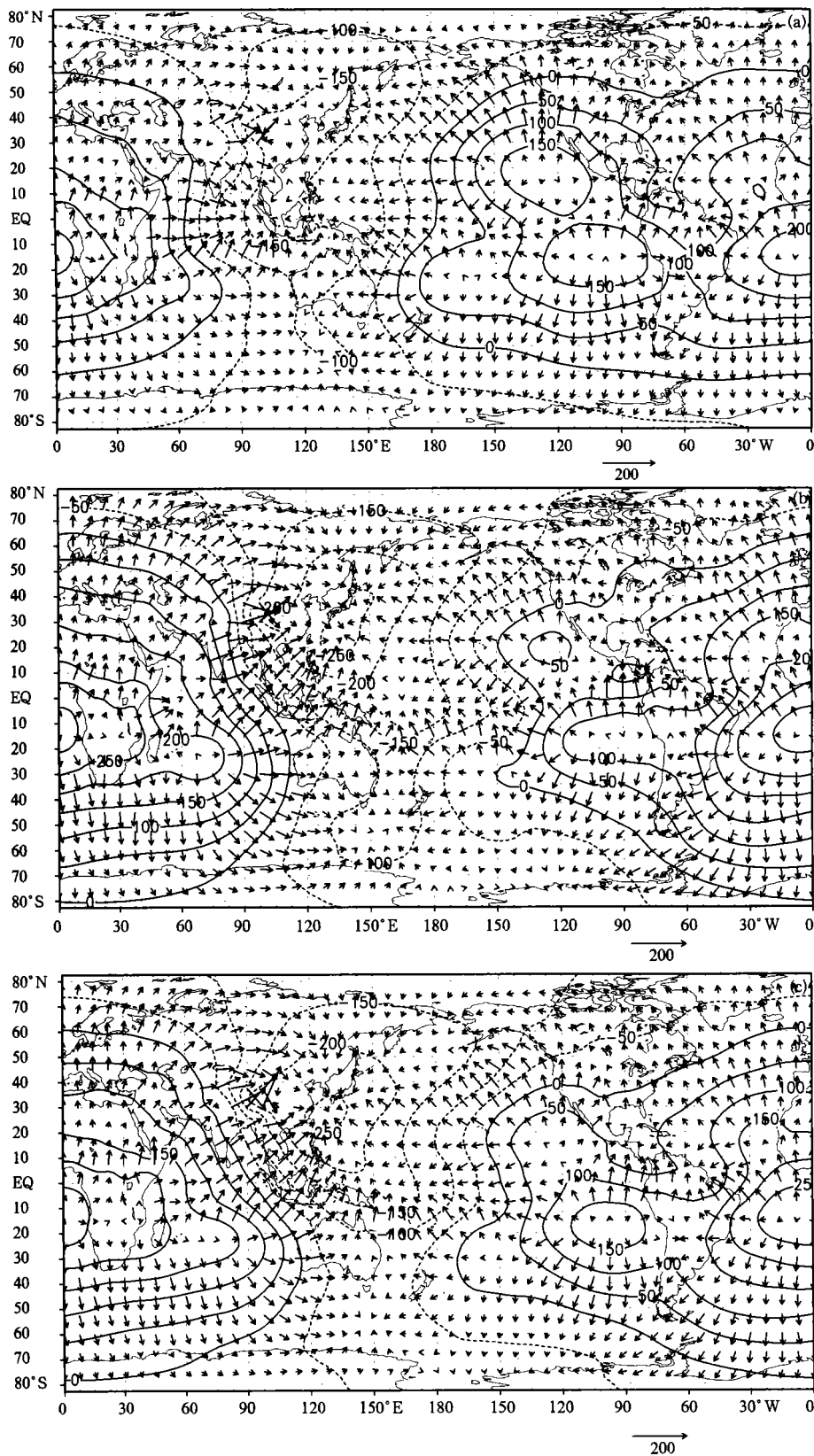
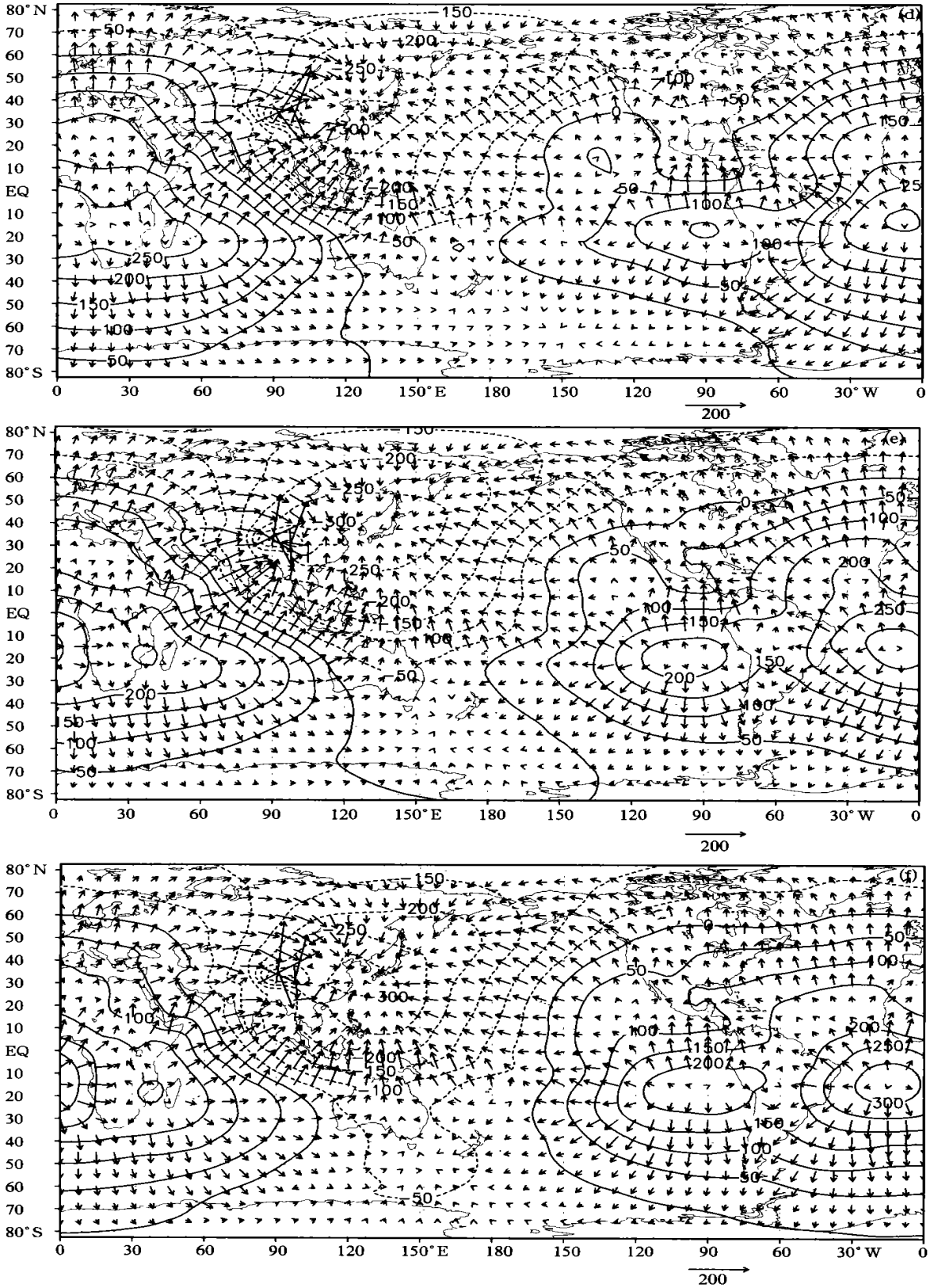


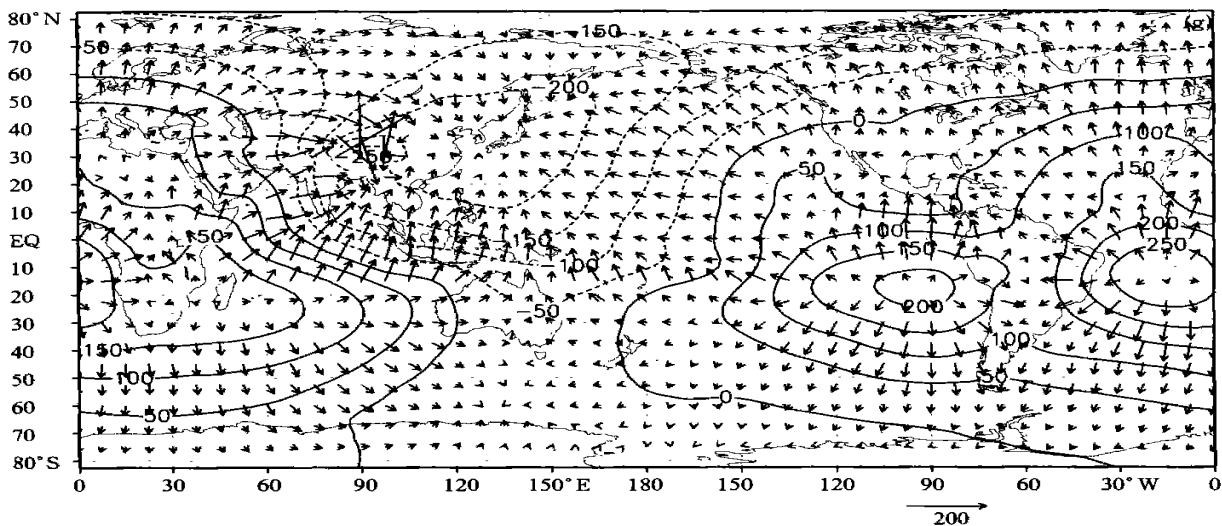
图 4 7 个降水阶段单位面积空气柱水汽输送的势函数及辐散分量平均分布  
 (a~c 为降水第 1~3 阶段; 等值线为势函数数值, 单位:  $10^6 \text{ kg/s}$ ; 箭头为非辐散分量和辐散分量, 单位:  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )



续图 4 7 个降水阶段单位面积空气柱水汽输送的势函数及辐散分量平均分布

(d-f 为降水第 4~6 阶段; 等值线为势函数值, 单位:  $10^6 \text{ kg/s}$ ; 箭头为非辐散分量和辐散分量, 单位:  $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ )





续图 4 第 7 降水阶段单位面积空气柱水汽输送的势函数及辐散分量平均分布  
(g 为降水第 7 阶段; 等值线为势函数值, 单位:  $10^6 \text{ kg/s}$ , 箭头为非辐散分量和辐散分量, 单位:  $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ )

南美洲、赤道西非和季风区的高水汽含量的维持是靠水汽通量的辐散分量来完成的, 确切地来讲, 就是靠纬向 Walker 环流和经向的 Hadley 环流携带水汽使之在以上地区辐合而成的。在图(3b)中, 可以看到 Chen 所描绘的情形, 看到四方的水汽是如何汇集到中国东部这个中心的, 而其中最主要的为来自南非东面印度洋的水汽经孟加拉湾、南海流入中国东部区域。

#### 4.2 7 个降水阶段全球的水汽输送状况

从水汽通量的辐散分量的演变来看(图 4), 势函数的极小值区(水汽汇)的位置演变与强降水区十分对应, 这表明强降水所需的水汽从四周向强降水区汇集并随大尺度环流的改变而变化。第 1 阶段(图 4a), 势函数的极小值区主要位于南海, 数值较小, 为  $-150 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ , 水汽主要汇集在南海南部地区, 中国东部地区水汽的辐合较弱, 此阶段中国长江流域及华南地区有较弱降水发生; 第 2 阶段(图 4b)为南海季风爆发期, 可以看到南海地区的西南水汽流迅猛增强, 此时势函数的极小值区位于东海及日本海, 强度增强为  $-250 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ , 大西洋区的势函数极大值的强度增强(中心值由 200 增至 300 单位), 范围扩大, 使得印度洋至南海区域的势函数等值线密集, 即梯度增大, 从而使得南海地区的水汽输送增强, 而此时东太平洋的极大值区中心值虽有所减小, 但输送到辐合中心的水汽流变化不大; 第 3 阶段(图 4c), 华南前汛期, 降水主要位于华南, 势函数极小值(中心值  $-250$  单位)位于中国东南地区及东

海; 第 4 阶段(图 4d), 江南梅雨期, 降水主要位于江南、华南, 势函数极小值(中心值  $-300$  单位)位于中国东部地区及东海; 第 5 阶段(图 4e), 雨带西北移, 势函数极小值(中心值  $-300$  单位)位于长江以北及长江上游地区, 与雨带位置相吻合; 第 6 阶段(图 4f), 江南二度梅雨期, 势函数极小值(中心值  $-300$  单位)区域东南移至中国东部及东海; 第 7 阶段(图 4g), 势函数极小值(中心值  $-200$ )减弱, 水汽主要汇合在中国东部  $30^\circ\text{N}$  以北区域。

从以上的分析可以得出这样的结论: 势函数极小值区及其变化很好地对应强降水区位置及其变化, 中国区域为全球 5~8 月最强的水汽汇区, 这表明, 即使对于一个区域性持续性降水区, 也需从大范围地区, 乃至北半球聚集水汽。南海季风的爆发及其区域内西南水汽流的增强与印度洋势函数的增强关系密切。

#### 5 南海地区水汽输送与中国东部水汽供应的关系

为了更好地反映中国大陆区域(C 区:  $20 \sim 35^\circ\text{N}$ ,  $100 \sim 120^\circ\text{E}$ , 包括 V~X 区)与南海地区(S 区:  $0 \sim 20^\circ\text{N}$ ,  $100 \sim 120^\circ\text{E}$ , 包括 II~V 区)的水汽输送状况及关联, 文中给出图 5, 从中可看到:

对于中国大陆区域水汽的流入来说, 不同的降水阶段水汽输送的主要来源不同, 在降水的第 1, 2, 3 阶段(图 5a~c), 来自西边界的水汽明显大于来自南边界(南海)的水汽, 而降水较强的第 4, 5, 6 阶段

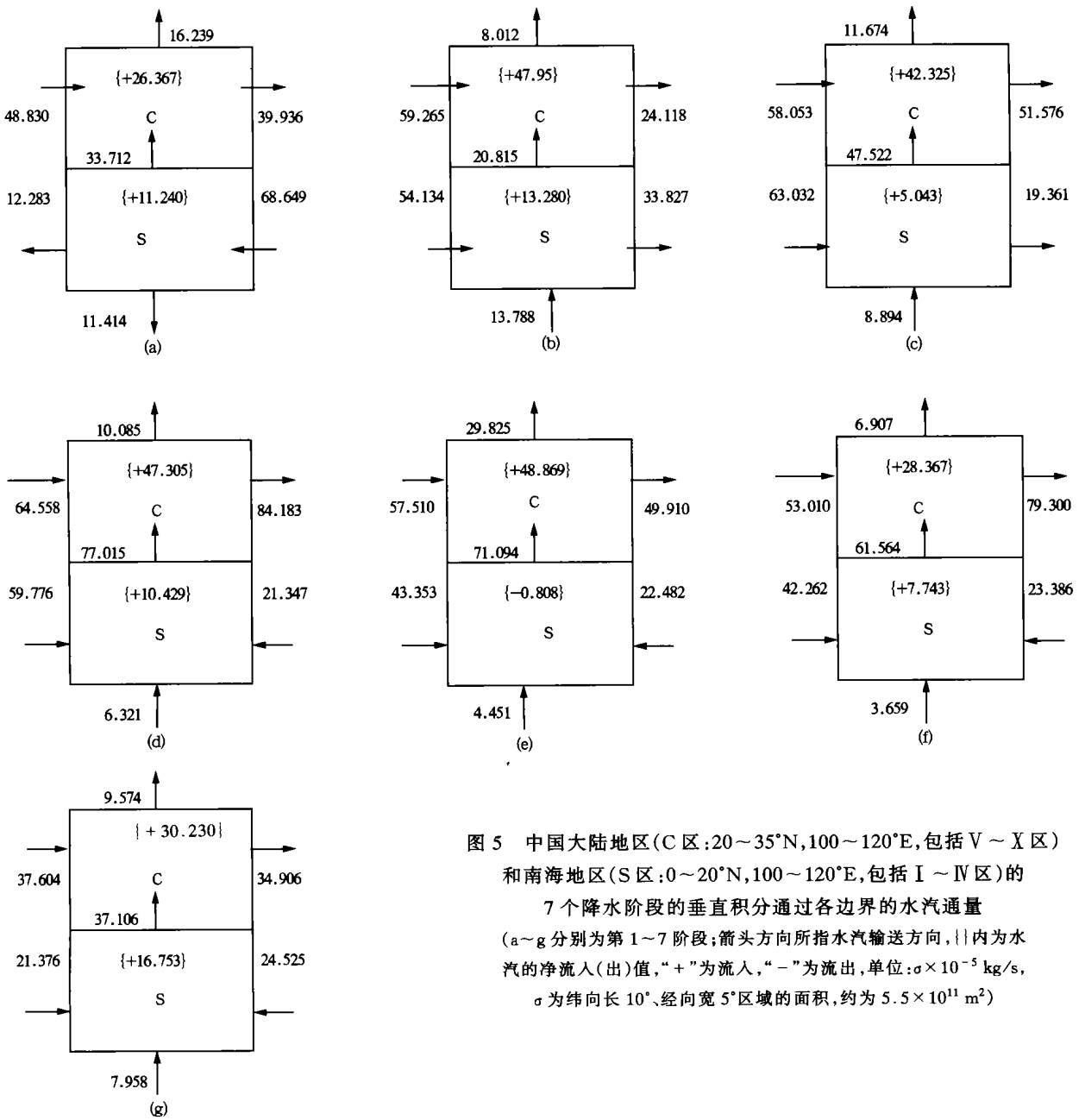


图5 中国大陆地区(C区:20~35°N,100~120°E,包括V~X区)和南海地区(S区:0~20°N,100~120°E,包括I~IV区)的7个降水阶段的垂直积分通过各边界的水汽通量(a~g分别为第1~7阶段;箭头方向所指水汽输送方向,{}内为水汽的净流入(出)值,“+”为流入,“-”为流出,单位: $\sigma \times 10^{-5}$  kg/s,  $\sigma$ 为纬向长10°、经向宽5°区域的面积,约为 $5.5 \times 10^{11}$  m<sup>2</sup>)

(图5d~f),来自南边界的水汽大于来自西边界的水汽,在降水的第7阶段(图5g),来自南边界的水汽与来自西边界的水汽大致相当;对于南边界水汽输入,不同降水阶段水汽输送的强度不同,强降水基本对应强的水汽输送,在江南梅雨前的降水第1~3阶段,水汽输送较弱,为20~47单位值,而在梅雨期(及间歇期)的降水第4~6阶段,水汽输送较强,为61~77单位值,梅雨结束后的降水第7阶段,水汽则减弱为37,而对于西边界水汽流入,水汽输送在第1阶段和第7阶段最弱,在第2~6阶段基本变化不大。对于水汽的流出,东边界的水汽流出远大于

北边界的水汽流出。

对于南海地区,南海季风爆发前后水汽的输送情况不同,季风爆发前(图5a),东边界为水汽流入,其他边界为水汽流出;季风爆发期(图5b),西、南边界为水汽流入,北、东边界为水汽流出;季风爆发后,在第3阶段,情形同第2阶段,在第4~7阶段,除北边界为水汽流出外,其他边界均为水汽流入,即水汽由西南东3方汇集南海由北边界输送到中国大陆,为其提供充沛的水汽。南海地区的水汽来源,西边界的最大,其次为东边界,南边界的最小,这表明输入到南海地区的水汽主要来自印度洋,至少对1998

年的情况是如此。南海地区的水汽主要由北边界流出, 输送到中国大陆, 为其降水提供了充沛的水汽。

### 6 区域水汽收支的分析

表 1 给出 1998 年 5~ 8 月区域 VI, VIII, X, XI 的几次较强降水过程的水汽收支结果, 从中可得到如下结论:

(1) 强降水对应强水汽辐合, 降水主要来自水汽的辐合项, 水汽的辐合主要在低层( 1000~ 700 hPa), 约占整层水汽辐合的 80%~ 90%。对于各区域, 降水越强其水汽辐合亦越强。对于东北地区, 与中国东部

地区相比, 降水更主要的是来自水汽的辐合。

(2) 对于中国东部区域, 局地蒸发项数值一般为降水量的  $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$  (蒸发项的计算因其为收支方程的余差求得, 包含有水汽收支的所有计算误差)。对于东北地区( 区域 XI), 其蒸发项很小。

(3) 水汽的局部变化项同水汽的辐合项相比往往很小, 常可忽略不计。

(4) 水汽的垂直输送项表现出的主要特点是, 低层失去水汽, 中高层得到低层输送来的水汽, 因而水汽在中高层积累, 有利于水汽的凝结从而有利于降水的发生。区域 VI, VIII 的垂直输送要大于区域 X,

表 1 降水各阶段各区域的水汽收支 (单位:  $10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )

时段	区域	层次 (hPa)	局部变化项 $-\frac{1}{g} \int_{p_1}^{p_b} \frac{\partial q}{\partial t} dp$	辐合项 $-\frac{1}{g} \int_{p_1}^{p_b} \nabla \cdot qv dp$	垂直输送项 $-\frac{1}{g} \int_{p_1}^{p_b} \frac{\partial q\omega}{\partial p} dp$	降水量 $P$	蒸发量 $E_s$
第 3	VI	400~ 300	- 0. 015	- 0. 216	1. 270	15. 278	8. 420
		700~ 400	- 0. 024	- 0. 115	4. 572		
		1000~ 700	- 0. 367	6. 039	- 4. 286		
		1000~ 300	- 0. 406	5. 708	1. 556		
第 4	VIII	400~ 300	- 0. 016	- 0. 415	2. 400	25. 556	12. 312
		700~ 400	0. 029	0. 115	5. 983		
		1000~ 700	0. 067	12. 117	- 7. 038		
		1000~ 300	0. 081	11. 818	1. 345		
第 6	VIII	400~ 300	- 0. 012	- 0. 184	1. 127	12. 136	4. 886
		700~ 400	- 0. 038	0. 015	3. 589		
		1000~ 700	0. 202	8. 653	- 6. 098		
		1000~ 300	0. 152	8. 483	- 1. 385		
第 5	X	400~ 300	0. 005	- 0. 193	0. 922	12. 983	6. 805
		700~ 400	- 0. 022	1. 792	1. 624		
		1000~ 700	- 0. 198	5. 713	- 3. 463		
		1000~ 300	- 0. 215	7. 311	- 0. 918		
第 7	X	400~ 300	0. 028	- 0. 129	0. 658	7. 258	3. 535
		700~ 400	0. 527	0. 686	1. 093		
		1000~ 700	1. 111	2. 987	- 3. 237		
		1000~ 300	1. 666	3. 543	- 1. 486		
第 5	XI	400~ 300	- 0. 039	- 0. 095	0. 425	6. 353	0. 525
		700~ 400	- 0. 094	0. 300	1. 608		
		1000~ 700	- 0. 075	3. 897	- 0. 100		
		1000~ 300	- 0. 208	4. 102	1. 934		
第 6	XI	400~ 300	0. 004	- 0. 051	0. 553	4. 841	- 1. 484
		700~ 400	- 0. 203	0. 890	1. 896		
		1000~ 700	- 0. 406	4. 506	- 0. 864		
		1000~ 300	- 0. 605	5. 345	1. 585		
第 7	XI	400~ 300	0. 055	- 0. 245	0. 476	5. 726	- 2. 772
		700~ 400	0. 538	- 0. 009	1. 531		
		1000~ 700	0. 912	6. 575	- 1. 335		
		1000~ 300	1. 505	6. 320	0. 673		

而区域 X 的垂直输送大于区域 XI, 这表现出水汽的垂直输送南部区域要大于北部区域; 强的降水区, 其

水汽的垂直输送量很大。

### 7 水汽通量的分析

为了解降水区的水汽来源, 计算了通过 11 区域各边界面的水汽通量 ( $\frac{1}{g} \iint qv dldp$ , 单位:  $\sigma \times 10^{-5} \text{ kg/s}$ ,  $\sigma = \iint dx dy$ ,  $\sigma$  为纬向长  $10^\circ$ , 经向宽  $5^\circ$  区域的面积, 约为  $5.5 \times 10^{11} \text{ m}^2$ ) 从各个阶段的垂直

积分的水汽通量的计算分析(图 6)来看:

对降水第 1 阶段(图 6a), 降水主要在区域 V, VII VIII 即长江流域和华南地区, 此时这 3 个地区为水汽辐合区, 水汽来自西边界和南边界, 东边界和北边界为水汽流出。东北地区(区域 XI)为水汽辐散区。这时南海地区主要表现为向西的水气流, 辐合区在区域 I (南海西南区)和区域 III (中印半岛) 这与该地区更早的雨季开始有关。

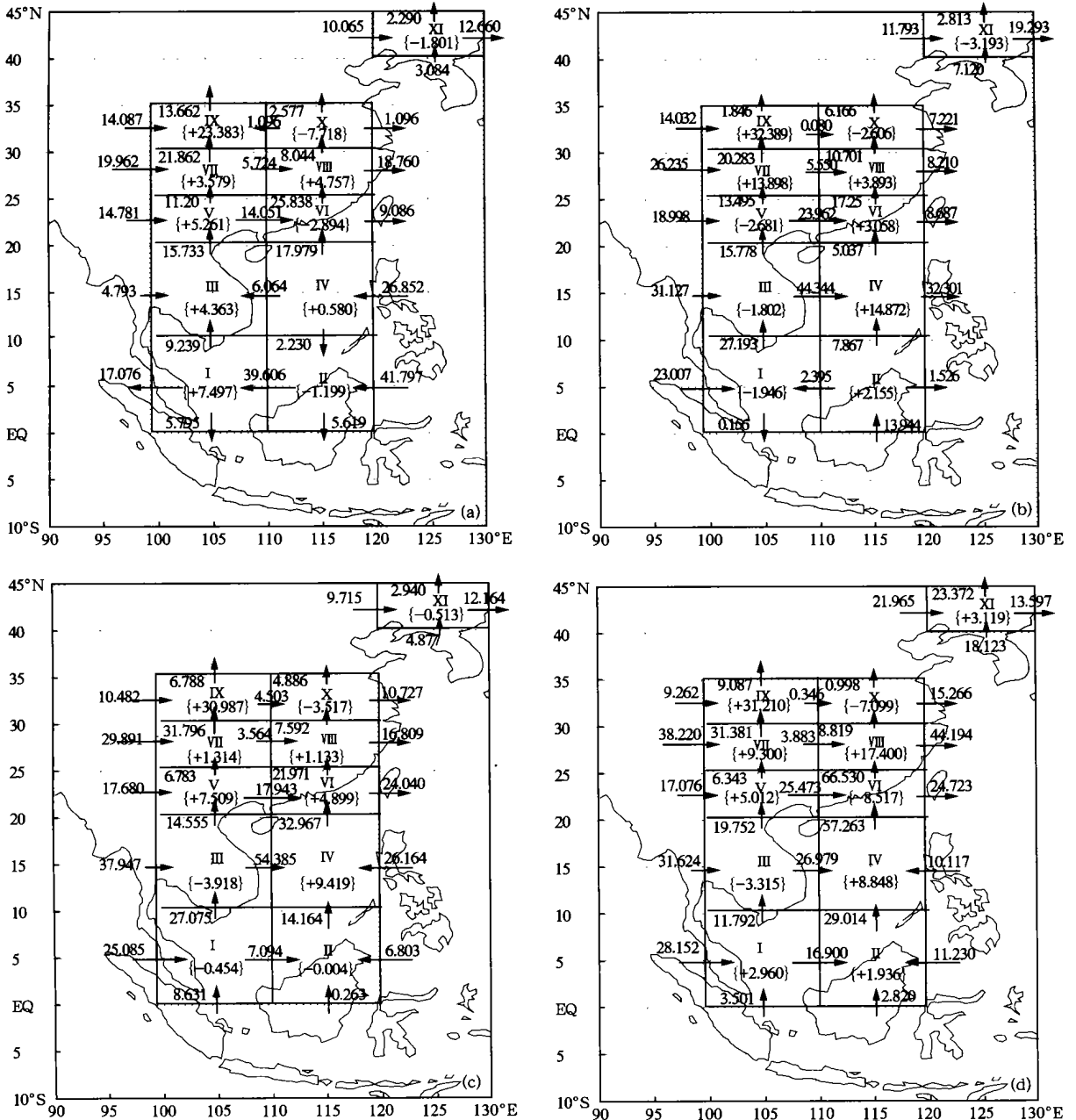
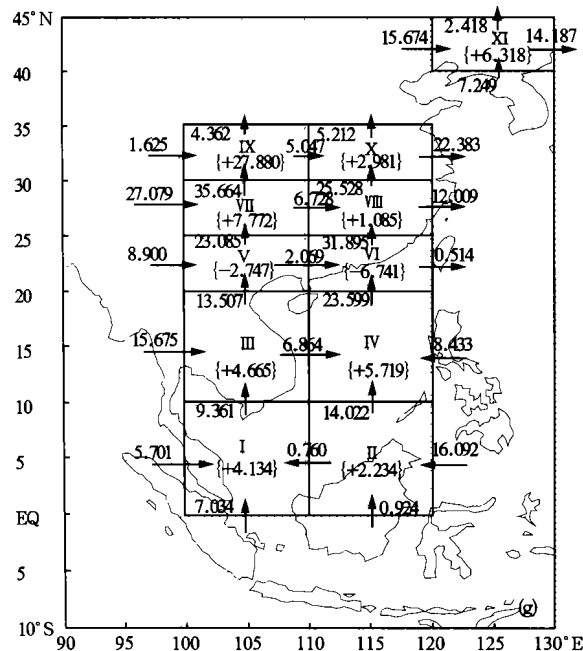
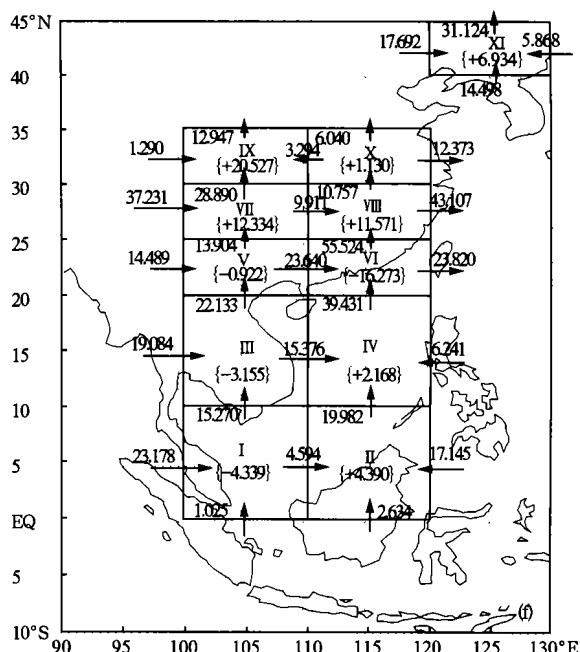
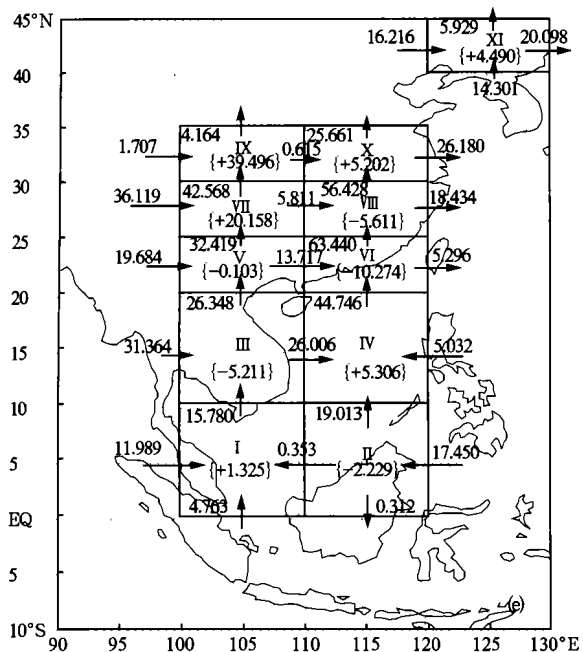


图 6 降水 7 个阶段的垂直积分的通过各边界的平均水汽通量

(a~d 为降水第 1~7 阶段, 箭头方向所至水汽输送方向, {} 内为水汽的净流入(出)值, “+”为流入,

“-”为流出, 单位:  $\sigma \times 10^{-5} \text{ kg/s}$ ,  $\sigma$  为纬向长  $10^\circ$ 、经向宽  $5^\circ$  区域的面积, 约为  $5.5 \times 10^{11} \text{ m}^2$ )



续图 6 7 个阶段降水的垂直积分的通过各边界的平均水汽通量

(e~g 为降水第 5~7 阶段, 箭头方向所至水汽输送方向, {} 内为水汽的净流入(出)值, “+”为流入, “-”为流出, 单位:  $\sigma \times 10^{-5} \text{ kg/s}$ ,  $\sigma$  为纬向长  $10^\circ$ , 经向宽  $5^\circ$  区域的面积, 约为  $5.5 \times 10^{11} \text{ m}^2$ )

降水第 2 阶段(图 6b), 南海季风爆发期, 降水主要位于区域 VI(华南)和区域 VIII(江南), 水汽辐合区亦与之对应, 对于区域 V 水汽主要来于西边界, 而区域 VIII 则主要来于南边界。东北地区为水汽辐散区。南海地区, 水汽流主要表现为由以前的向西转为向东输送, 且水汽的输送量在北部区域(区域 III, IV) 猛增, 辐合区位于 IV 和区域 II, 即南海的东部地区, 区域 IV 的辐合达到 14.872 个单位, 水汽辐合较强。

降水第 3 阶段(图 6c), 华南前汛期, 南海季风全面爆发后, 雨带主要维持在华南, 对应区域亦为水汽辐合区, 对于区域 V 来自西部边界的水汽略大于来自南部边界的水汽, 而区域 VI 则以来自南部边界的水汽为主。东北地区为弱辐散区。对南海地区, 水汽主要为自西向东输送, 区域 IV 为辐合区, 为 9.419 单位值, 其北边界输出值达 32.967, 表明南海季风爆发后, 自南海输送至中国大陆的水汽迅猛增强。降水第 4 阶段(图 6d), 雨带主要位于江南北部

和华南西部,此为江南梅雨期,此时水汽的辐合区也主要集中在这几个地区,对于东部区域(区域 VIII) 其水汽输入以南边界为主,输入量达 66.530,这表明强劲的南风水汽流已自南向北移至江南地区,对于西部区域(区域 VII) 水汽输入以西边界为主,西南区域(区域 V) 南部边界水汽输入略大于西部边界。东北地区为水汽辐合区,自西边界的水汽输入略大于自南边界的水汽输入。南海地区,区域 IV 为最主要的水汽辐合区,区域 I, II 也为辐合区,但辐合较弱,此时区域 IV 自北边界输送到中国大陆的水汽输送继续增加已达 57.263,为江南的强降水提供了充沛的水汽。

降水第 5 阶段(图 6e),长江中下游流域降水很小(被副热带高压控制),雨带随副热带高压向北、向西推移至江淮地区和长江上游地区,此时区域 VII, IX, X 为水汽辐合区,对于区域 VII 自西边界流入的要略高于自东边界流入的水汽,对于区域 IX, X 则以南边界输入为主。此时,东北地区也有降水发生,为水汽辐合区,自西边界的水汽输入略大于自南边界的水汽输入。南海地区,此时区域 IV 仍为最主要的辐合区,自北边界向北水汽输出减少至 44.746,随着副热带高压的北抬,强劲的南风水汽流的前沿已由第 4 阶段的  $25^{\circ}\text{N}$  北移至目前的  $30^{\circ}\text{N}$ 。

降水第 6 阶段(图 6f),控制长江中下游地区的副热带高压减弱南落东退,江南二度入梅,降水主要在长江南部区域,与之对应水汽辐合区位于区域 VII, VIII 对于区域 VII 水汽主要来自西部边界,对于区域 VIII 水汽主要来自南部边界。东北地区,有降水发生,水汽辐合为 6.934,西部流入略大于南部流入。南海地区,此时区域 I, II, IV 均为辐合区,自南海地区向北输送的水汽流大值前沿南落至  $25^{\circ}\text{N}$ 。

降水第 7 阶段(图 6g),降雨频繁,雨带主要位于长江流域以西、以北地区及东北地区、华南地区,以上区域在水汽收支上亦表现为辐合区,对于区域 VII 自西边界流入的水汽略大于南边界流入值,对于区域 VIII, IX, X 以南边界流入为主。对于东北区域(区域 XI),为水汽辐合区,西边界流入值大于南边界流入值。南海地区,4 个有关区域均表现为水汽辐合区,自北边界向中国大陆输出的水汽量继续减弱,南风水汽流最大值前沿位于  $30^{\circ}\text{N}$ 。

从以上 11 个区域、7 个降水阶段的水汽输送的分析表明:

(1) 强降水基本对应强的水汽辐合。如对区域

VII 的水汽辐合而言,两次持续大暴雨期都是发生在区域水汽辐合强烈增加的时段(表 2)。

表 2 7 个降水阶段区域 VIII 的水汽辐合与降水对应关系

$(10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$		
降水阶段	水汽辐合	降水量
1	4.757	9.416
2	3.893	9.393
3	1.133	5.726
4	17.400	25.556
5	-5.611	2.796
6	11.571	12.136
7	1.085	3.268

(2) 对于中国地区的 7 个区域(区域 V~ XI),水汽基本是从西边界和南边界流入,从东边界和北边界流出。

(3) 水汽流入表现出区域性差异:中国东部地区(区域 VI, VIII, X)以南风水汽流入为主,南风水汽流入远大于西风水汽流入;西部地区情况则较为复杂,对于其南部区域(区域 V)来自西部和南部的水汽输入基本相当,对于其中部区域(区域 VII)来自西部的水汽输入要大于来自南部的水汽,对于其北部区域(区域 IX)来自南部的水汽输入为主;中国东北地区(区域 XI),来自西边界的水汽输入要大于来自南边界的水汽输入。

(4) 水汽的流出也体现出地域性差异:对于东部地区(区域 VI, VIII, X),自东边界流出的水汽大于自北边界流出的水汽(当该区域为辐散区时除外);对于西部地区,其南部地区(区域 V)自东边界流出值大于自北边界流出值(第 5、第 7 阶段除外),此时副热带高压控制江南,区域 V 此时主要处于副热带高压外围的南风气流中,其东边界流出值小于自北边界流出值,中北部地区(区域 VII, IX)自北边界流出值大于自东边界流出值。

(5) 水汽输送与副热带高压的关系:随着季节的变化,副热带高压有南北向的移动,南风水汽流的大值前沿所指的北部区域为较强的水汽辐合区,故强水汽辐合区也随副热带高压位置的移动而变动。

(6) 南海地区水汽状况与中国降水的关系:南海季风爆发前(降水第 1 阶段),水汽辐合主要在南海西部区域(区域 I, III),水汽输送以东风气流为主,此时中国地区降水较弱,主要在华南及长江流域;南海季风爆发期(降水第 2 阶段),水汽辐合主要位于南海东部地区(区域 II, IX),此时水汽输送由东

风气流转为西风气流为主, 此时强劲的南风气流仍未建立, 中国地区降水较弱; 南海季风爆发后, 随着强劲的南风水汽流的建立并北进, 强降水也随之由华南—江南和江淮推移, 这反映出南海水汽的输出对中国强降水的贡献。

最后给出几个代表性区域的水汽收支图像(图

7)。

### 7 结 论

通过对 1998 年大洪水时期的水汽收支分析可得出以下主要结论:

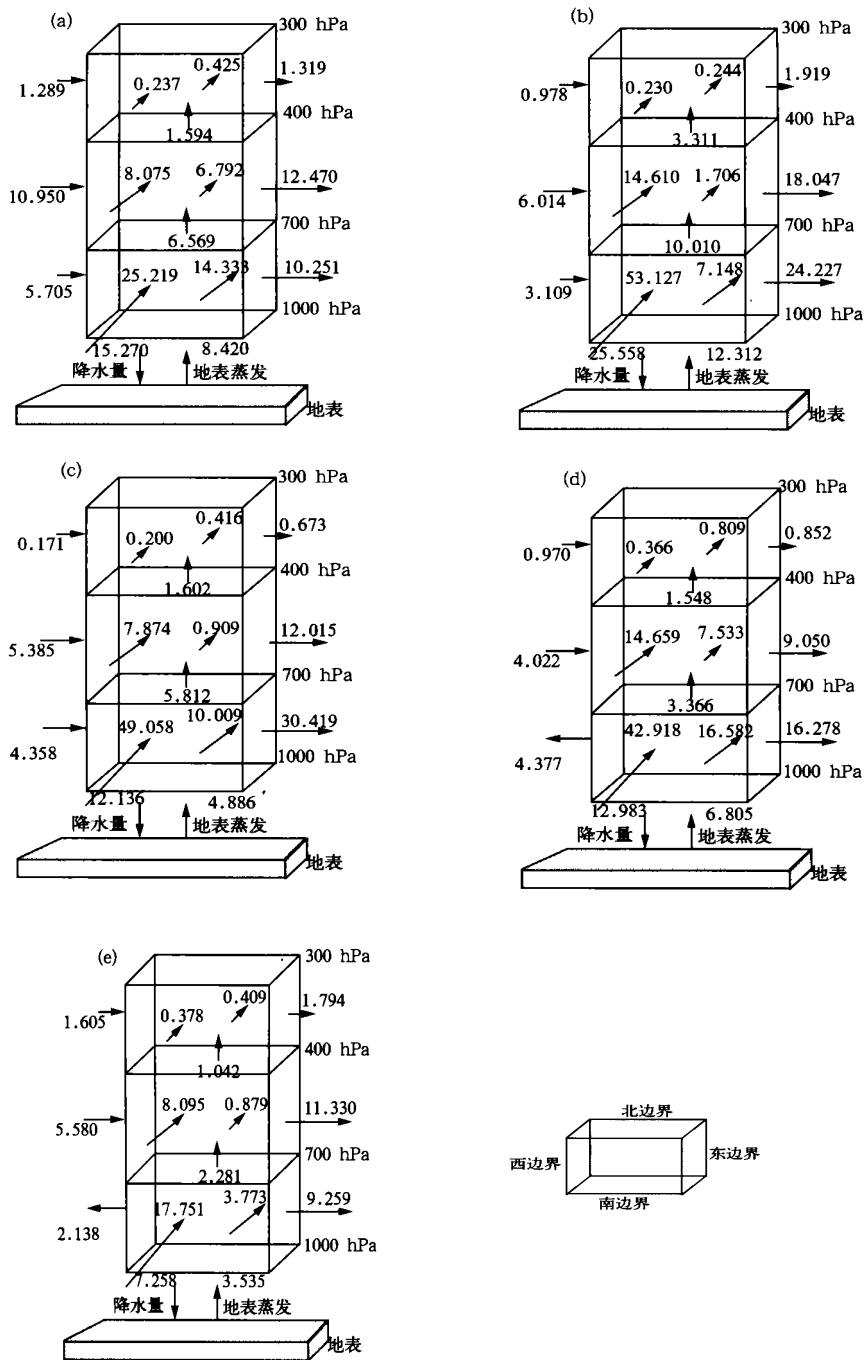


图 7 1998 年 5 至 8 月几次强降水过程水汽收支示意

(a~ e 分别为第 1 阶段降水 VI 区域, 第 4 和第 6 阶段降水 VIII 区域, 第 5 阶段和第 7 阶段 X 区域,

$$\frac{1}{g}q^{\omega} \text{ 为垂直输送, } \frac{1}{g\sigma} \iint qv dl dp \text{ 为水平输送, 单位: } 10^{-5} \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s), } \sigma \text{ 为区域面积}$$

(1) 1998年5~8月,中国东部地区是全球最强的水汽汇区。长江流域大洪水期的强降水过程与大尺度水汽辐合的极大值密切相关。降水的强弱与水汽辐合的强弱变化一致,这表明后者是前者的一个必要条件。

(2) 水汽通量的势函数极小值区对应强降水区,南海季风的爆发及其区域内西南水汽流的增强与印度洋地区势函数的增强关系密切。

(3) 大气的水汽收支表明,降水主要来自水汽的辐合项,辐合主要发生在大气低层;对中国东部地区,局地蒸发项一般为降水量的 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$ <sup>[12]</sup>,而东北地区则很小;垂直输送项把低层的水汽向中上层输

送,增加该处的水汽积累,使得水汽在高层凝结成降水。

(4) 南海季风的爆发及其水汽的向北输送与中国地区的强降水/洪水的形成关系密切,季风爆发后,南风水汽流大值前沿所指区域一般为强降水区,且强降水区位置随着南风水汽流大值前沿位置的南北移动而移动。

(5) 对于整个中国东部大陆区而言,主要降水期的水汽来自南部边界即南海地区,来自西部边界的水汽也是一个重要来源,但是次要的,因而为中国东部地区降水提供水汽的通道主要来自印度洋,经中印半岛到达南海,在该处汇集后再折向北输送到中国东部地区。

## 参考文献

- 1 丁一汇,张雁,马强等. 1998年夏淮河流域试验加密观测期间主要天气形势特点及其重要观测成果. 见:赵柏林,丁一汇编. 淮河流域能量与水分循环研究(一). 北京:气象出版社,1999. 273pp
- 2 丁一汇,薛纪善,王守荣等. 1998年亚洲季风活动与中国的暴雨/洪涝. 见:丁一江,李崇银主编. 南海季风爆发和温度及其海洋的相互作用. 北京:气象出版社,1999. 423pp
- 3 王亚非,沈文海,宋永加. 1998年长江淮河流域梅雨锋持续降水背景初探. 见:赵柏林,丁一汇编. 淮河流域能量与水分循环研究(一). 北京:气象出版社,1999. 20~27. 273pp
- 4 中国国家气候中心. '98中国大洪水与气候异常. 北京:气象出版社,1998. 152pp
- 5 陆尔,丁一汇,陈仲良. GAME/HUBEX 试验期的东亚夏季风. 见:赵柏林,丁一汇编. 淮河流域能量与水分循环研究(一). 北京:气象出版社,1999. 28~34
- 6 Chen T C. Global water vapor flux and maintenance during FGGE. *Mon Wea Rev*, 1985, 113: 1801~1819
- 7 丁一汇,刘月贞. 7507号台风中水汽收支的研究. *海洋学报*, 1986, 8(3): 291~301
- 8 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
- 9 丁一汇主编. 1991年江淮流域持续性特大暴雨研究. 北京:气象出版社,1993. 255pp
- 10 Rasmusson E M. Seasonal variation of tropical humidity parameters. In: *Atmospheric Water Vapor*. In: Deepak A, Wilkerson T D, Ruhnke L H. eds. *The General Circulation of the Tropical Atmosphere and Interactions with Extratropical Latitudes*, MIT Press, 1972, 1
- 11 Salstein D A, Rosen R D, Peixoto J. Hemispheric water vapor flux variability—streamfunction and potential fields. In: *Atmospheric Water Vapor*, In: Deepak A, Wilkerson T D, Ruhnke L H Eds, Academic Press, 1980. 557~574
- 12 丁一汇,胡国权. 1991年江淮暴雨时期的能量和水汽循环研究. *气象学报*, 2003, 61(2): 129~145



## A STUDY ON WATER VAPOR BUDGET OVER CHINA DURING THE 1998 SEVERE FLOOD PERIODS

Ding Yihui Hu Guoquan

(National Climate Center, Beijing 100081)

### Abstract

By decomposing the water vapor transport vector into the sum of its nondivergent (rotational) and divergent (irrotational) components in terms of the streamfunction and potential, the water vapor background of the 1998 severe flood is investigated over the globe. Then, based on precipitation analysis, 7 precipitation periods and 11 regions are divided during May– August 1998 the severe flood periods over Changjiang and Songhua River Valley. After water budgets of all precipitation periods and regions are diagnosed, some schematics of water vapor budget are gained, the main results are as follows:

(1) The East China is the strongest water vapor sink over the globe in May– August 1998. The minimum potential region (maximum convergent region) of water vapor transport vector corresponds to strong rainfall region, and the water vapor convergence of the heavy rain region is made by the hemisphere scale water vapor transportation, indicating that to regional severe flood it must gain water vapor from very large regions. The South China Sea monsoon breaking out and its southwest water vapor flux becoming stronger are related to the potential being stronger in Indian Ocean.

(2) Atmospheric water vapor budget indicates that precipitation comes mainly from the convergence of water vapor and the convergence mainly in the lower atmosphere; The local evaporation (calculated by the residual) is generally  $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$  of the precipitation, so the water vapor recycle is also important; The vertical advection of the water vapor transports the moisture from the low to the middle and high layers and increases the high level moisture content, thus provides condition for the cumulus development and latent heat release.

(3) The water vapor transportation in South China Sea is well related to the China strong rainfall. After South China Sea monsoon breaking out, the strong precipitation often occurs in the region whose water vapor gained by water vapor transportation from south. To East China, the water vapor from south boundary is more than from the west.

(4) After South China Sea monsoon breaking out, the water vapor from west boundary through Indo– China Peninsula to South China Sea increases and becomes main water vapor source, therefore an obvious source is formed in South China Sea and the accumulative water vapor turns to north and transports to South China and Changjiang River Valley and affords the water vapor condition for their strong rainfall.

(5) The strong precipitation process during the Changjiang River Valley severe flood is well related to the maximum water vapor convergence, and the strong or weak precipitation is consistent with water vapor convergence, and this indicates that the latter is a necessary condition of the former.

**Key words:** 1998 severe flood, Potential, Streamfunction, Water vapor budget.