

2005 年 7 月 4—11 日淮河流域强降水 过程的水汽收支分析

陈晓红 余金龙 邱学兴 张 娇

(安徽省气象台,合肥 230031)

提 要:通过对水汽通量向量的势函数和流函数分解以及水汽方程的诊断计算,分析了 2005 年 7 月 4—11 日淮河流域强降水过程水汽收支情况。结果表明,此次强降水过程主要水汽来源于菲律宾经南海向北转向流入我国中东部地区的较强盛的水汽输送带。这条水汽输送带由两部分组成:起重要作用的是强中心位于太平洋上,沿热带赤道以南地区一致向西到达菲律宾的水气流,另一部分是沿赤道南侧的东风气流,在非洲东岸索马里附近越赤道向东北方向经孟加拉湾北部到达菲律宾的水气流;水汽汇合区内,淮河流域附近存在东南与西北水汽汇集辐合,这可能是造成淮河流域持续出现强降水重要原因之一;水汽强辐合区域与强降水发生的区域相对应,降水发生区域的总体水汽收支和平均面降雨量的变化趋势相吻合,随着水汽收入的增加,降水量开始加大;中低层的水汽垂直输送与降水过程的平均面降雨量的变化具有较好的对应关系。

关键词:强降水过程 势函数 流函数 水汽收支

Vapor Investigation of a Heavy Rainfall Event in the Huaihe River Basin in 2005

Chen Xiaohong Yu Jinlong Qiu Xuexing Zhang Jiao

(Anhui Observatory, Hefei 230031)

Abstract: The stream function and potential function of water vapor transport vector during a heavy rainfall in the Huaihe River valley in the summer of 2005 is studied and the averaged water vapor budget is computed and diagnosed during the event period. The results indicate that the main water vapor source of the event is the strong vapour transportation band coming from Philippines

基金项目:中国气象局气象新技术推广项目(编号:CMATG2005M34)和安徽省气象局《灰色预测模型在淮河流域雨量预报中的应用》课题共同资助

收稿日期:2006 年 6 月 27 日; 修定稿日期:2006 年 12 月 14 日

and across South China Sea and arriving to the middle-east China. This strong vapor transportation was composed of two branches. The first one was from Pacific vapor transport center and it moved westward along the south region of equator. The other one was coming from the easterly trade wind in the southern hemisphere which got across the equator at Africa's Somalia peninsula and then arrived to the north of Bangal Gulf, and finally reaching to Philippines. The area of severe vapor transport vector converge corresponds with the area of the heavy rainfall. The total water vapor budget corresponds with the average rainfall, the average rainfall increases with the increasing total water vapor converge. On the other hand, the water vapor vertical transport at low level corresponds well with the average area-rainfall.

Key Words: heavy rainfall stream function potential water vapor budget

引 言

淮河流域是长江和黄河流域之间的过渡带,地处副热带季风区域,季节变化显著,暴雨是该地夏季较为多发的灾害性天气,近年来许多研究均发现季风区域内降水变化同水汽输送和收支有密切关系。丁一汇^[1]指出:水汽输送是一个大尺度甚至是全球性的问题;水汽输送可以造成区域的水汽变化。谢义炳^[2]、Murakami 等人^[3]早就指出中国夏季降水有两个水汽来源:一是从西太平洋高压南沿以南风及东南风的形式进入我国内陆,二是从印度低压东南方以西南风形式进入我国西南部。沈如桂^[4]发现长江中下游的水汽大多数起源于西太平洋和南海,少数起源于孟加拉湾。葛朝霞等人^[5]对 2003 年夏季江淮特大暴雨成因分析后指出:江淮暴雨区的水汽来源于阿拉伯海至孟加拉湾及北太平洋至中国南海地区。以上研究表明,不同年份的雨带分布和降水的多寡同水汽输送和收支有着密切的关系,水汽来源也存在着很大差异。目前对于淮河流域夏季强降水过程同水汽输送和收支的关系尚未弄清,有待于进一步研究。

丁一汇^[1]等人利用水汽通量分解方法分析了 1998 年长江流域大洪水期间的水汽收

支,揭示了该年此流域强降水过程与大尺度水汽辐合的极大值紧密相连,水汽通量势函数的极小值对应强降水区。本文利用流函数和速度势将水汽通量向量分解为无辐散部分和辐散部分,分别表示无辐散风的水汽平流和辐散风的水汽辐合^[6],以便更清楚地了解水汽的输送和聚集状况。同时对水汽方程进行了计算,着重诊断分析 2005 年 7 月 4—11 日淮河流域一次强降水过程的水汽收支情况,探讨强降水形成的机理,希望从水汽收支的角度给实时暴雨预报业务提供预报参考依据。

1 资料和计算方法

1.1 资 料

本文使用的降水资料是国家气象中心下发的每日 08 时到 08 时全国雨量、每日 08、14、20 时地面填图和每小时自动站雨量资料(降水资料的取值区域:29~35°N、110~120°E),其它资料为 NCEP 资料(每日 4 次平均,水平格距为 2.5°×2.5°,位势高度(h),温度(t),纬向风(u)和经向风(v)为 1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10hPa 垂直 17 层,比湿(q)为(1000~300hPa)8 层,垂直速度(ω)为(1000~100hPa)12 层。

1.2 计算方案

(1) 水汽通量的势函数和流函数^[6]

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

$$\mathbf{Q} = \mathbf{k} \times \nabla \Psi + (-\nabla \chi) = \mathbf{Q}_\Psi + \mathbf{Q}_\chi \quad (1)$$

$$\nabla^2 \Psi = \mathbf{k} \nabla \times \mathbf{Q} \quad (2)$$

$$-\nabla^2 \chi = \nabla \cdot \mathbf{Q} \quad (3)$$

其中:

$$\mathbf{Q}_\Psi = \mathbf{k} \times \nabla \Psi \quad \mathbf{Q}_\chi = -\nabla \chi \quad (4)$$

第 1 步,根据格点上的 q, u, v 值,计算出 \mathbf{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)、(3)得到流函数和势函数。

第 3 步,由式(4)式得到水汽通量的辐散部分和旋转部分。

将式(1)、(2)、(3)式垂直积分,得到单位面积空气柱的势函数和流函数,水汽通量的辐散和非辐散分量。

(2) 水汽收支

水汽收支方程^[7]为:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{w}q + \frac{\partial \omega q}{\partial p} = -m + E_s \quad (5)$$

(A) (B) (C)

上式中 m 和 E_s 分别是水汽的凝结率和蒸发率。上式中(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求得,(C)项为水汽的垂直输送项,由直接差分求得。式(5)左边三项对面积为 σ 的气柱进行积分,得到如下式子:

$$P - E_s = -\frac{1}{\sigma} \int_{p_t}^{p_s} \left(\frac{\partial q}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{w}q + \frac{\partial \omega q}{\partial p} \right) dp d\sigma \quad (6)$$

(A) (B) (C)

式中 P 是此气层产生的降水量, E_s 为蒸发

量。一般降水区域空气接近饱和,蒸发量和湿度局地变化很小,降水量主要由水汽辐合决定。

2 淮河流域强降水和环流形势特征分析

2.1 强降水特征

2005 年 7 月 4—11 日,淮河流域出现了持续性强降水天气过程,从过程总降水量(图 1)可看出,全流域(29°~35°N, 110°~120°E)均产生降水,较强的降水出现在安徽淮北和河南,降水量均在 200mm 以上,其中安徽淮北西部超过 500mm。强降水大多数集中出现在晚上 20 时至次日凌晨 02 时,其次是上午 08 时到下午 14 时,表明强降水持续时间较短,日变化明显。由于强降雨时间长、影响范围广、强度大、来势凶猛,仅安徽省即有 8 市 35 县遭受严重洪涝灾害,农作物受灾面积 82.57 万公顷,倒塌房屋 2.54 万间,受灾人口 15.18 万,直接经济损失达 24.56 亿元。

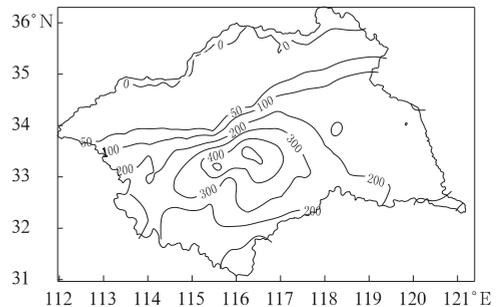


图 1 2005 年 7 月 4—11 日淮河流域总降水量分布图(单位:mm)

2.2 环流形势特征

在东亚季风区域内,雨带季节性的南北移动与西太平洋副高的变化密切相关,但能否产生强降水,却依据于中高纬度环流系统相互配置^[8-9]。这次强降水发生前在 500hPa 上(图略)欧亚中高纬度以纬向环流为主,虽

然冷空气活动频繁,但势力偏北,锋区位于我国东北地区南部至华北。7月4日,环流开始调整,由于青藏高原加强,致使贝加尔湖和鄂霍茨克海两低槽区之间的高压脊经向发展,并与高纬地区的高压脊同位相叠置,构成一新的高压脊。7日,该脊发展成为阻塞高压,建立了单阻型降水形势(图2)。长波槽东退至我国东北地区到日本国一带,其槽后西北气流所携带的冷空气同位于日本国南部洋面上带状副热带高压西北侧的暖湿气流恰好交汇于淮河流域,引发该地强降水的发生发展。据经验,5840gpm和5880gpm线在淮河流域呈准东西走向,有利于强降水维持,5840gpm线的平均位置位于 32.7°N ,与强降水有较好对应关系。这种形势一直稳定维持到11日。然后,位于我国东北地区的低涡伴随着阻高脊前西北气流的加强往南加深,高空锋区也随之南移,其结果深厚的长波槽东移到华东沿海及其以东地区,使得淮河流域持续8天的强降水过程结束。

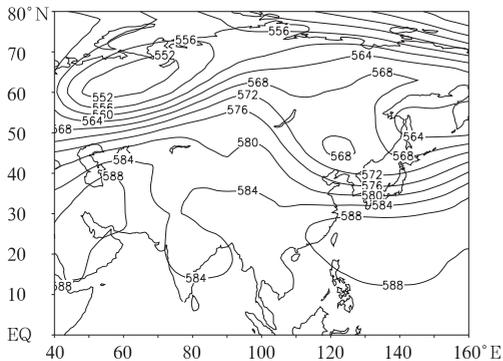


图2 2005年淮河流域7月4—11日强降水过程500hPa平均高度场

3 水汽通量势函数和流函数分析

3.1 水汽通量流函数分析

经对水汽通量势函数和流函数的分解,来讨论全球范围的水汽输送对淮河流域降水的影响。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。

图3是2005年7月4—11日单位面积空气柱积分的水汽输送流函数平均图。在图中北半球有4个水汽输送高值区,分别位于北太平洋、西太平洋、印度季风区和大西洋。前三个高值中心对准河流域降水造成了影响。其中北太平洋上空非辐散分量最大,中心值达 $1000 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 、其次是台湾东部附近西太平洋的高中心,它虽然范围不大,但强度较强,中心值达 $800 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 、印度季风区上空的高中心最弱,只有 $400 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。淮河流域强降水主要的水汽来自菲律宾到南海向北流进我国中东部地区的较强水汽输送带。这条输送带由两部分组成,其中起主要作用的是在赤道两侧的信风带中存在着一致向西的水汽输送。因北太平洋和西太平洋各有一强中心,使得热带地区向西的水汽流能抵达菲律宾;另一部分是赤道南侧的东风气流在非洲东岸索马里附近越过赤道后,向东北方向经孟加拉湾北部到达菲律宾与上述到此的水汽输送带汇合后再流向我国淮河流域。

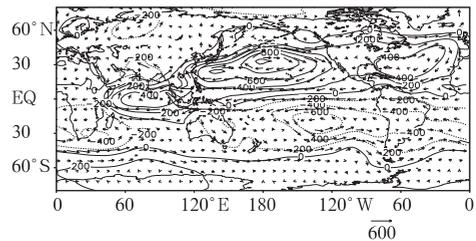


图3 7月4—11日单位面积空气柱水汽输送流函数及非辐散分量的平均分布
等值线为流函数,单位: $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$;箭矢为
非辐散分量,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

3.2 水汽通量的势函数分析

流函数表示水汽的输送,势函数则能解释高水汽含量维持的状况。对于式(5)垂直积分可得到势函数表达式为:

$$\frac{1}{g} \int_{p_0}^{p_1} (-\nabla^2 \chi) dp = \frac{1}{g} \int_{p_0}^{p_1} (\nabla \cdot Q) dp = E - P \quad (7)$$

由式(7)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, $(E - P) < 0$,降水量大于水汽的蒸发量,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。

就平均势函数(图 4)和流函数(图 3)来看,势函数数值较之流函数明显偏小,表明水汽辐散比水汽输送要小得多。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。在南半球 20°S 附近有三个极大值中心,一个在东太平洋,另两个在南美洲以东大西洋和非洲以东印度洋上,这些是全球的水汽源区。我国东南部势函数为全球最明显的低值区,其值小于 $-350 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$,淮河流域至日本国一带的势函数小于 $-400 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$,表明这个地区在 7 月 4 日 08 时至 11 日 08 时是全球最明显的水汽汇合区,为淮河流域强降水的发生发展提供了有利的水汽条件。同时,还可看到水汽最主要经孟加拉湾、南海汇集到我国中南部地区。在水汽汇合低值区 $-350 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 的范围内,淮河流域(31~36°N, 112

122°E)存在西北和西西南风向、风速辐合,

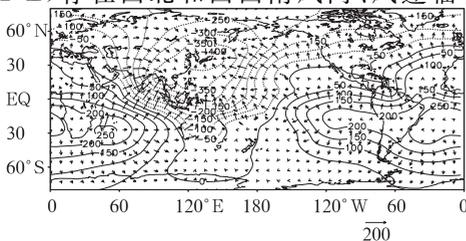


图 4 7 月 4 日 08 时至 11 日 08 时单位面积空气柱水汽输送的势函数及辐散分量平均分布

等值线为势函数值,单位: $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$;

箭矢为辐散分量,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

并且偏北分量远大于偏南分量,说明有冷空气侵入,对降水的加强和维持有一定作用。总之,在强降水发生期间,有利的水汽辐合条件配合北方冷空气入侵,可能是造成淮河流域出现持续强降水的重要原因之一。

4 淮河流域水汽收支分析

图 5 为 2005 年 7 月 4 日 08 时至 11 日 08 时每 6 小时一次的淮河流域平均降水量和流域上空水汽的水平收支,图中的水汽水平收支表示单位面积气柱水平方向上的水汽收支。由图 5 可见,淮河流域上空的水汽收支和降水量增大或减小有较好的对应关系,随着水汽收入的增加,降水量开始加大,反之,则减小。7 日 08 时和 10 日 08 时前后分别出现两次降水量峰值,与之对应的在总体水汽辐合量曲线上也出现了两个较大值。

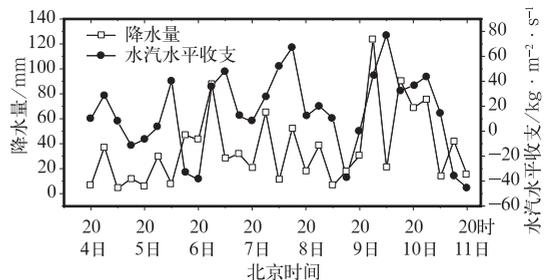


图 5 2005 年 7 月 4 日 08 时至 11 日 20 时每 6 小时一次淮河流域平均降水量和区域上空水汽的水平收支

为了解垂直方向上的水汽输送,把区域内各点的垂直水汽通量求线性平均,得到各层的水汽垂直输送量,如图 6 所示,图中水汽垂直输送量表示该等压面上单位面积单位时间内输送的水汽质量。由图 6 可见,在降水发生期间,850hPa、700hPa 和 500hPa 上三层的水汽垂直输送量都是以向上输送为主,850hPa 和 700hPa 上垂直输送量基本相当,500hPa 上输送较弱。比较图 5 和图 6 可知,

水汽的水平输送量要远大于垂直输送,并且低层水汽的垂直输送变化与平均降水量变化有很好的对应关系。说明中低层水汽向上输送对这次暴雨过程起了重要作用。

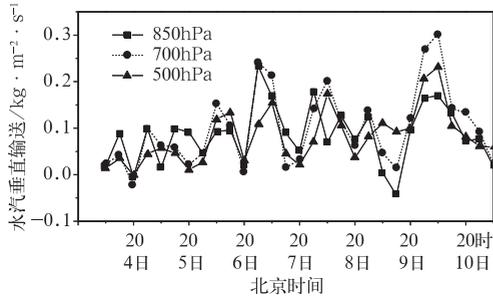


图 6 2005 年 7 月 4 日 08 时至 11 日 20 时每 6 小时一次流域 850hPa、700hPa、500hPa 的水汽的垂直输送

5 小 结

经对 2005 年 7 月 4—11 日淮河流域持续性强降水天气过程的水汽收支诊断分析,得到以下一些主要结果:

(1) 这次持续性强降雨过程产生在欧亚中高纬度从纬向调整为单阻型经向环流形势下,西风槽是主要的影响天气系统。5840gpm 和 5880gpm 线呈准东西走向位于淮河流域,有利于强降水维持,5840gpm 线平均位置与强降水有较好的对应关系。

(2) 本次强降水的水汽主要来源于菲律宾经南海向北流入我国中东部地区较强的水汽输送带,水汽输送由两部分组成,水汽输送起重要作用的中心在太平洋上沿赤道信风带向西到达菲律宾的水气流,另一支沿赤道南侧的东风气流在非洲东岸索马里附近越过赤道

后向东北方向经孟加拉湾北部到达菲律宾。

(3) 在强降水发生发展期间,淮河流域至日本国是全球最明显的水汽辐合区,配合北方冷空气的向南侵入,是造成淮河流域持续强降水的重要原因之一。淮河流域上空的水汽水平辐合、中低层水汽的垂直输送与降水量的变化有很好的对应关系,随着水汽水平辐合和垂直输送加强,降水量加大,反之则减小,可为降水量变化的预报提供一定的预报参考线索。

参 考 文 献

- [1] 丁一汇,胡国权. 1998 年中国大洪水时期的水汽收支研究[J]. 气象学报, 2003, 61(2):129-145.
- [2] 谢义炳,戴武杰. 中国东部地区夏季水汽输送个例计算. 气象学报[J], 1959, 30(2):171-185.
- [3] Murakami, T, et al. The general circulation and water vapor balance over the Far East during the rainy season. Geophys Magazine, 1959, 29(2):137-171.
- [4] 沈如桂,罗绍华,陈隆勋. 盛夏季风环流与我国降水的关系[J]. 热带天气会议文集, 北京:科学出版社, 1980. 102-111.
- [5] 葛朝霞,曹丽青. 2003 年夏季江淮特大暴雨成因分析[J]. 河海河海大学学报(自然科学版), 2003, 33(1): 11-14.
- [6] 丁一汇,刘月贞. 7507 号台风中水汽收支的研究[J]. 海洋学报, 1986, 8(3):291-301.
- [7] 丁一汇. 天气动力学中的诊断分析方法[J]. 北京:科学出版社, 1989. 293pp
- [8] 鲍媛媛,李锋,矫梅燕. 2003 年淮河流域特大暴雨期间低纬环流分析气象[J]. 气象, 30(2):25-29.
- [9] 程华琼,陈菊英. 2003 年淮河流域致洪暴雨过程的环流背景及其前兆信号[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(2):465-473.
- [10] 章国材,毕宝贵,鲍媛媛,等. 2003 年淮河流域强降水大尺度环流特征及成因分析[J]. 地理研究, 2004, 23(2):795-804.