

江志红, 梁卓然, 刘征宇, 等. 2011. 2007 年淮河流域强降水过程的水汽输送特征分析 [J]. 大气科学, 35 (2): 361–372. Jiang Zhihong, Liang Zhuoran, Liu Zhengyu, et al. 2011. A diagnostic study of water vapor transport and budget during heavy precipitation over the Huaihe River basin in 2007 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (2): 361–372.

2007 年淮河流域强降水过程的水汽输送特征分析

江志红¹ 梁卓然^{1,4} 刘征宇^{2,1} 朱云来³

1 气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京信息工程大学, 南京 210044

2 Center for Climatic Research, and Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, University of Wisconsin-Madison, USA

3 中国国际金融有限公司, 北京 100004

4 上海市气候中心, 上海 200030

摘 要 利用 NCEP 再分析资料, 引入基于拉格朗日方法的气流轨迹模式 (HYSPLITv4.9), 将 2007 年 6 月 19 日~7 月 26 日期间淮河流域强降雨分为三个阶段, 分析不同阶段水汽输送轨迹、主要通道及其不同源地的水汽贡献。结果表明, 影响此次强降水过程的水汽通道主要有三支: 一支是西太平洋上副高边缘东南气流输送, 另一支是南海南部越赤道气流的北向输送, 第三支是沿索马里急流经阿拉伯海和孟加拉湾北部的水汽输送。降水第一阶段来自西太平洋洋面的水汽输送最强, 占总水汽输送的 69%, 降水后两个阶段南海南部越赤道气流的水汽输送占优势, 分别占总水汽输送的 52% 和 57%。另外, 通过轨迹分析可知本次降水过程中索马里至孟加拉湾通道的水汽输送到淮河流域上空 750 hPa 以上大气, 南海及西太平洋的水汽主要输送到淮河流域 850 hPa 以下的低层大气。

关键词 淮河流域 水汽输送 水汽收支 拉格朗日轨迹

文章编号 1006-9895 (2011) 02-0361-12

中图分类号 P426

文献标识码 A

A Diagnostic Study of Water Vapor Transport and Budget during Heavy Precipitation over the Huaihe River Basin in 2007

JIANG Zhihong¹, LIANG Zhuoran^{1,4}, LIU Zhengyu^{2,1}, and ZHU Yunlai³

1 Nanjing University of Information Science and Technology, Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Nanjing 210044

2 Center for Climatic Research, and Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, University of Wisconsin-Madison, USA

3 China International Capital Corporation Limited, Beijing 100004

4 Shanghai Climate Center, Shanghai 200030

Abstract By using the NCAR/NCEP reanalysis data and the HYSPLITv4.9 mode, the variation features of the water vapor transportation and the contribution of vapor for major passages are analyzed during the heavy precipitation over the Huaihe River basin from 19 June to 26 July in 2007 which is divided into three stages. The results show that there are three major vapor inflow corridors to the Huaihe River basin. One of them is the southeast flow around the western Pacific subtropical high, another is northward vapor transport from cross-equatorial flow in the southern South China Sea, the last is from Somali jet via the Arabian Sea and the northern Bay of Bengal. During the first stage, the transportation of vapor originating from the western Pacific is most important and accounts for 69% of the total transportation. During the second and third stages, the cross-equatorial flow in the southern South China

收稿日期 2010-03-02, 2010-11-10 收修定稿

资助项目 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY200906016, 江苏省高校自然科学重大基础 07KJA7020, 国家科技支撑计划 2009BAC51B01

作者简介 江志红, 女, 教授, 博导, 研究领域: 气候学. E-mail: zhjiang@nuist.edu.cn

Sea is dominant and accounts for 52% and 57% of total moisture transportation, respectively. Somali jet via the Bay of Bengal transports moisture to the levels above 750 hPa, and the South China Sea and the subtropical high moisture transports to the levels under 850hPa.

Key words Huaihe River basin, vapor transportation, water vapor budget, Lagrange trajectory

1 引言

充沛的水汽输送是持续性强降水形成的必要条件,因此分析降水的水汽来源及输送状况对于研究降水成因和机理有重要的意义。有关我国夏季降水水汽输送及来源的研究一直受到国内外气象界高度关注。早在 1980 年代,金祖辉(1981)、沈如桂和黄更生(1981)、陈世训等(1982)研究指出,我国夏季降水主要有孟加拉湾、南海和西太平洋三条水汽通道。Tao 和 Chen(1987)认为孟加拉湾和南海的西南风水汽输送是中国夏季强降水发生的重要条件。Simmonds et al.(1999)、Ninomiya and Kobayashi(1999)、谢安等(2002)、丁一汇和胡国权(2003)、胡国权和丁一汇(2003)、徐祥德等(2003)、苗秋菊等(2005)研究指出,来自孟加拉湾的水汽输送对中国东南部及江淮地区夏季降水有重要影响。周玉淑等(2005)研究发现,从水汽的输送来看,夏季印度季风环流和南海夏季风是向江淮流域输送水汽的主要通道。上述有关水汽输送及来源的研究大多基于欧拉方法,而欧拉方法存在无法定量区分各水汽来源对降水贡献的局限性,特别是在暴雨个例的水汽分析中,欧拉流场与气团的真实运动轨迹存在一定的差异。近年来,一些学者开始应用拉格朗日方法研究区域降水的水汽来源及收支状况,Stohl and James(2004)利用轨迹模式研究了 2002 年欧洲中部致洪暴雨的水汽来源及收支状况,发现此次暴雨水汽的来源除了地中海以外,还有一部分来自于地表蒸发。Bertò et al.(2004)利用拉格朗日轨迹模式研究了意大利 Trentino 地区 2002 年 11 月 24~27 日一次暴雨过程的水汽来源,通过计算各个水汽通道的水汽贡献率,指出此次暴雨的主要水汽通道是从副热带非洲地区经地中海输送入 Trentino 地区。

近期,NOAA 空气资源实验室持续开发了基于拉格朗日方法的的气流轨迹模式 HYSPLITv4.9 (Draxler and Hess, 1998),目前该模式主要应用于模拟空气中污染物的扩散和传输,而用于诊断水

汽输送的研究还较少。Brimelow and Reuter(2005)利用该模式研究了 Mackenzie 河流域的三次极端降水,并指出低层水汽的来源为墨西哥湾。马京津等(2008)通过 HYSPLIT 模式对华北地区降水偏多年和偏少年的气团轨迹模拟比较显示,降水偏多年水汽大部分来自南海,并且输送轨迹较长,华北上空存在明显的上升运动,偏干年反之。但这些研究中都没有对降水中不同来源的水汽贡献做定量分析。

2007 年 6 月 19 日~7 月 26 日淮河流域再次出现特大暴雨,并爆发了 1954 年以来最大的洪水。矫梅燕等(2008)研究了 2007 年淮河流域暴雨的气象水文特征。赵琳娜等(2007)对此次致洪暴雨的雨情和水情特征进行了分析。本文在了解 2007 年淮河暴雨大尺度水汽输送背景及淮河流域水汽收支状况的基础上,利用美国 NOAA 的空气资源实验室开发的轨迹模式(HYSPLIT),模拟暴雨时期气团的运动轨迹,引入模式自带的簇分析方法进行轨迹聚类(Draxler et al., 2009),得出该阶段淮河流域降水的主要水汽通道,同时对各通道的水汽贡献进行定量分析,并与传统欧拉方法对比,以期加深对淮河流域大暴雨水汽输送特征的认识,为实时暴雨预报业务提供参考依据。

2 资料与计算方法

2.1 资料

本文使用的降水资料是 Xie et al.(2007)提供的分辨率 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的 2007 年 6~7 月逐日格点资料[降水资料的取值区域: $(30^\circ\text{N} \sim 35^\circ\text{N}, 110^\circ\text{E} \sim 120^\circ\text{E})$],其它资料为同期 NCEP 的 6 小时一次,水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的大气环流资料[包括 1000~10 hPa 共 17 层上的位势高度(h)、温度(t)、纬向风(u)和经向风(v), 1000~300 hPa 各层比湿(q)及 1000~100 hPa 的各层垂直速度(ω)]。

2.2 轨迹模式简介

NOAA 开发的气流轨迹模式 HYSPLITv4.9 (Draxler and Hess, 1998) 模拟分析气流路径的思

路是假设空气中的粒子随风飘动, 那么它的移动轨迹就是其在时间和空间上位置矢量的积分。最终的位置由初始位置 (P) 和第一猜测位置 (P') 的平均速率计算得到,

$$P'(t + \Delta t) = P(t) + V(P, t)\Delta t, \quad (1)$$

$$P(t + \Delta t) = P(t) + 0.5 \times [V(P, t) + V(P', t + \Delta t)]\Delta t, \quad (2)$$

式中, Δt 为时间步长, 本文 Δt 选取为 6 小时。

气象数据在水平坐标保持其原来格式, 而垂直方向被内插到地形追随坐标系:

$$\sigma = \frac{(z_{\text{top}} - z_{\text{mst}})}{(z_{\text{top}} - z_{\text{gl}})}, \quad (3)$$

其中, z_{top} 为轨迹模式坐标系统的顶部, z_{gl} 为地形高度, z_{mst} 为坐标下边界高度。

2.3 轨迹模拟方案

模拟区域选取淮河流域 ($30^\circ\text{N} \sim 35^\circ\text{N}$, $110^\circ\text{E} \sim 120^\circ\text{E}$) $5^\circ \times 10^\circ$ 的区域, 水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, 垂直方向上选取 500 m、1500 m、3000 m 三个高度层次作为模拟的初始高度。整个模拟空间的轨迹初始点为 45 个, 模拟其后向追踪 14 天的三维运动轨迹, 每 6 小时输出一次轨迹点的位置, 并插值得到相应位置上的物理属性 (如温度、高度、气压、相对湿度), 每隔 6 小时所有轨迹初始点重新后向追踪模拟 14 天。

2.4 轨迹聚类分析

由于模拟出的轨迹数量较大, 为了能够更直观地看出轨迹的分布, 本文引入簇分析的方法对轨迹进行聚类, 其基本思想是按照轨迹路径最接近的原则进行多条轨迹合并分组。即假设有 N 条轨迹, 定义每个簇的空间方差为簇内每条轨迹与簇平均轨迹对应点的距离平方和, 每条轨迹在起始时刻分别定义空间方差为零, 且各自为独立的一个簇, 算出所有可能组合的两个簇的空间方差, 任选两个簇合并为一个新簇, 以使得合并后所有簇的空间方差之和 (total spatial variance, 简称 TSV) 比合并前增加最小, 一直进行到所有轨迹合并成为一个簇。研究表明, 最初几步 TSV 迅速增加, 然后 TSV 增加缓慢, 但当分成一定数量的簇后, 再进一步合并时, 则 TSV 又迅速增大, 说明此时将要合并的两个簇已经很不相似。把 TSV 再次迅速增大的点作为分簇过程的结束点, 在 TSV 迅速增大之前分出的各个簇即为所得到的最终簇, 计算可得到这几个

簇的平均轨迹。

2.5 通道水汽输送贡献率的计算

定义

$$Q_s = \frac{\sum_1^m q_{\text{last}}}{\sum_1^n q_{\text{last}}} \times 100\%, \quad (4)$$

其中, Q_s 表示通道水汽贡献率, q_{last} 表示通道上最终位置的比湿, m 表示通道所包含轨迹条数, n 表示轨迹总数。

2.6 欧拉方法的水汽收支计算

单位边长整层大气水汽输送通量矢量 Q 的计算式为:

$$Q = -\frac{1}{g} \times \int qV dp, \quad (5)$$

式中, q 为比湿 (单位: g/kg), V 为水平风速矢 (单位: m/s), g 为重力加速度 (单位: m/s^2)。

各方向上水汽通量收支的计算式为:

$$Q_L = \int \left(-\frac{1}{g} \times \int qV_n dp \right) dl, \quad (6)$$

其中, l 为计算区域的周长, V_n 是风沿区域周线的法向分量。

3 淮河流域强降水

2007 年 6 月 19 日起, 我国主要降水雨带从华南、江南南部北跳到淮河流域, 并在该地区持续了 30 余天。由图 1 可知, 自 2007 年 6 月下旬至 7 月下旬, 淮河流域连续出现了致洪暴雨天气过程, 淮

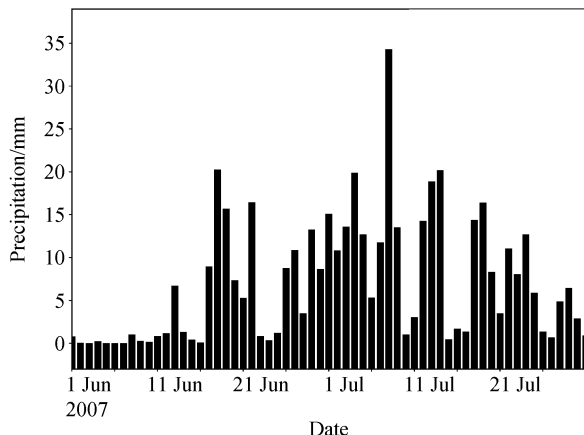


图 1 2007 年 6 月 1 日~7 月 30 日淮河流域日平均降水量 (单位: mm)

Fig. 1 Daily precipitation in the Huaihe River basin from 19 Jun to 26 Jul, 2007

河流域范围内累计雨量超过 500 mm, 淮河上游和中游是该次过程中降水较集中的区域。赵思雄等 (2007) 按照雨带的位置和集中降水时段, 将 6 月 19 日~7 月 26 日期间的降水分为 3 个阶段: 第 1 阶段 (6 月 19~28 日) (图 2a) 雨带偏于淮河以北; 第 2 阶段 (6 月 29 日~7 月 10 日) (图 2b) 雨带集中于淮河干流, 以持续性强降水为主, 强度最强雨

带也最为稳定。第 3 阶段 (7 月 11~26 日) (图 2c) 雨带位置与第二阶段相似, 但以过程降水为主。

4 欧拉方法的暴雨期水汽收支分析

4.1 水汽通量的流函数和势函数分析

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。分析 2007 年该降水期的水汽输送流函数、势函数的分布, 了解大尺度空间范围的水汽输送和水汽在淮河流域的持续性的辐合, 对于理解 2007 年淮河流域暴雨的形成和维持是必要的。

图 3 给出了暴雨时期水汽输送的流函数及非辐散分量的平均分布, 可以看到, 在北半球水汽通量流函数有 3 个高值中心: 分别为太平洋、大西洋和印度季风区。在大西洋中心与印度洋中心之间赤道东风带上有一条明显的向西的水汽输送带, 该水汽流经西北太平洋中心南端, 受其影响, 一部分水汽向北到达南海, 继续向西输送的水汽在索马里附近越过赤道, 转向流经孟加拉湾, 其中一部分向东北方向输送进入淮河流域, 另一部分流经南海上空与此前受太平洋中心影响的水汽流汇合, 向北输送进入淮河流域。

由该时期水汽输送的势函数及辐散分量的平

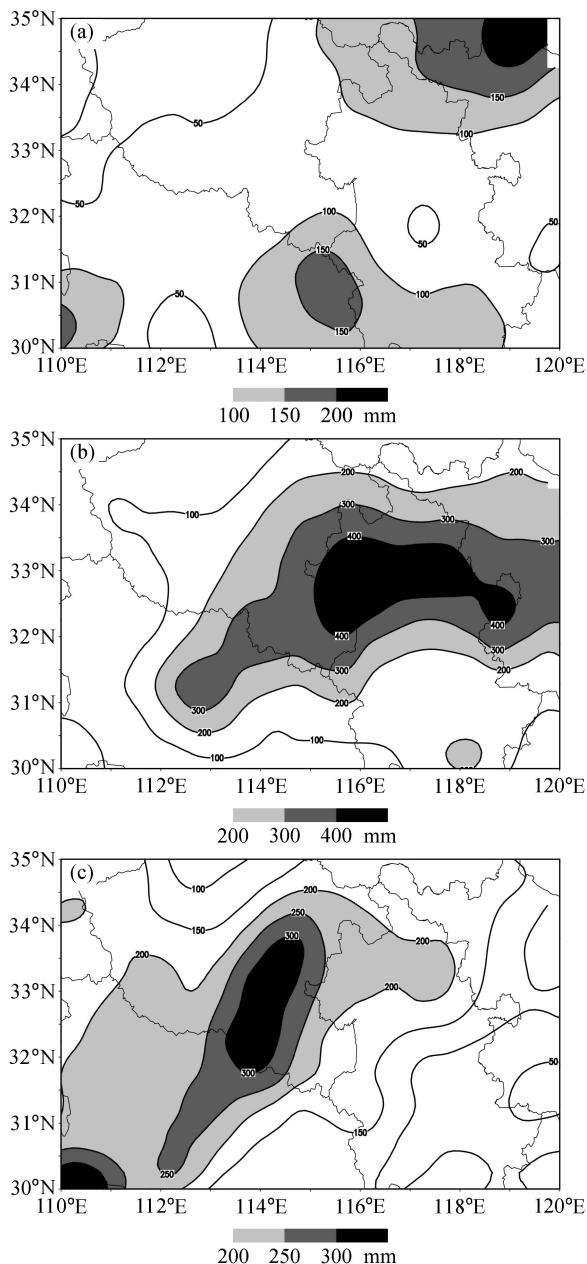


图 2 2007 年淮河流域累计降水量 (单位: mm): (a) 6 月 19~28 日; (b) 6 月 29 日~7 月 10 日; (c) 7 月 11~26 日

Fig. 2 Accumulated precipitation in 2007: (a) From 19 Jun to 28 Jun; (b) from 29 Jun to 10 Jul; (c) from 11 Jul to 26 Jul

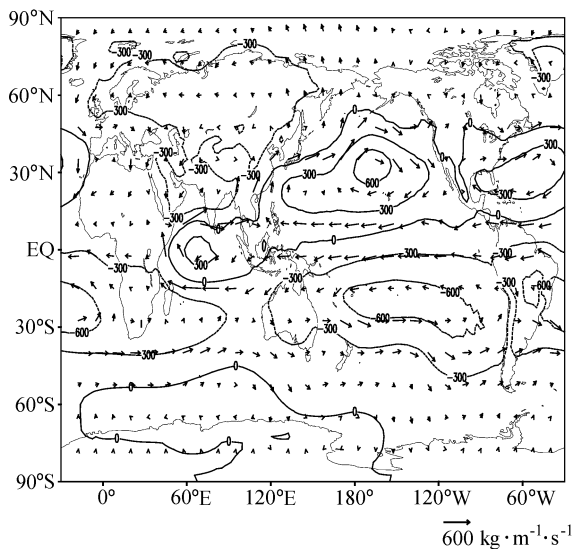


图 3 2007 年 6 月 19 日~7 月 26 日平均淮河流域暴雨期整层水汽流函数 (等值线, 单位: 10^6 kg/s) 及非辐散分量 (矢量, 单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 分布

Fig. 3 The distribution of integrated stream function (isoline, units: 10^6 kg/s) and nondivergent component (vector) of the water vapor transport in the Huaihe River basin averaged from 19 Jun to 26 Jul of 2007

均分布(图 4), 可以看到中国东部到日本一带为全球势函数最大的负值中心, 表明该阶段这个区域是全球水汽输送最显著的汇区。汇集到中国东部中心的水汽, 主要来自于南非东面的印度洋, 途经孟加拉湾、南海。在负值中心内部, 淮河流域上空有西北、西南和东南气流的辐合, 且辐合趋于经向型。

4.2 淮河流域水汽收支

图 5 给出了 6~7 月淮河流域各边界 1000~300 hPa 垂直积分的逐日水汽收支情况, 可以发现南边界和西边界为输入边界, 而南边界的水汽输入

是淮河流域主要的水汽来源。北边界和东边界为流出边界, 其中东边界是水汽的主要输出边界。根据前述降水的三个阶段, 在第一阶段(6 月 19 日到 6 月 28 日), 随着西南季风和南海季风显著增强, 水汽输入迅速增加, 该阶段南边界和西边界流入的水汽相当。第二阶段(6 月 28 日到 7 月 10 日), 南边界的水汽输入量显著增加, 并稳定维持在较高水平, 对暴雨期降水的维持有重要作用, 西边界的水汽输入比较稳定, 但输入量较南边界小得多, 该阶段北边界和东边界的水汽输出和南边界输入呈反位相, 而北边界水汽流出很小, 说明在流域内有较强的径向辐合。第三阶段(7 月 11 日到 26 日), 北边界的水汽输出开始增大, 东边界仍然维持高水汽输出, 流域内径向辐合减弱, 这也是第三阶段降水显著小于第二阶段的原因之一。

表 1 给出了 6 月 19 日至 7 月 26 日淮河流域暴雨过程中各层平均水汽收支。不同方向上水汽输送在各层分布有明显差异, 南边界水汽输入最强, 占水汽总输入的 90% 以上, 其输入层次主要集中在 1000 hPa 到 700 hPa 上。东边界的水汽输出最强, 其输出层次主要集中在 850 hPa 到 500 hPa 上。1000 hPa 是水汽净流入最多的层次, 因为虽然在 1000 hPa 上南边界的水汽输入小于 850 hPa, 但 1000 hPa 上的东边界也为输入边界, 同时西边界虽然为输出边界, 却只有少量的水汽流出, 因此在此层次上水汽的流入要远大于水汽的流出。在 300 hPa 以下, 四周水汽通量之和都是正值, 说明淮河流域在暴雨期是一个水汽汇区, 且水汽辐合层相当深厚, 整个区域的平均水汽收支达 4.29×10^7 kg/s。

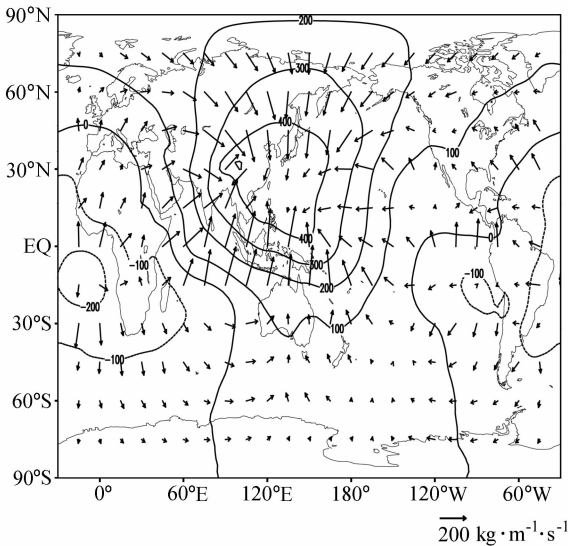


图 4 同图 3, 但为整层水汽势函数(等值线, 单位: 10^6 kg/s)及辐散分量(矢量, 单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)分布

Fig. 4 As in Fig. 3, except for integrated potential function (isoline, units: 10^6 kg/s) and divergent component (vector) of the water vapor transport

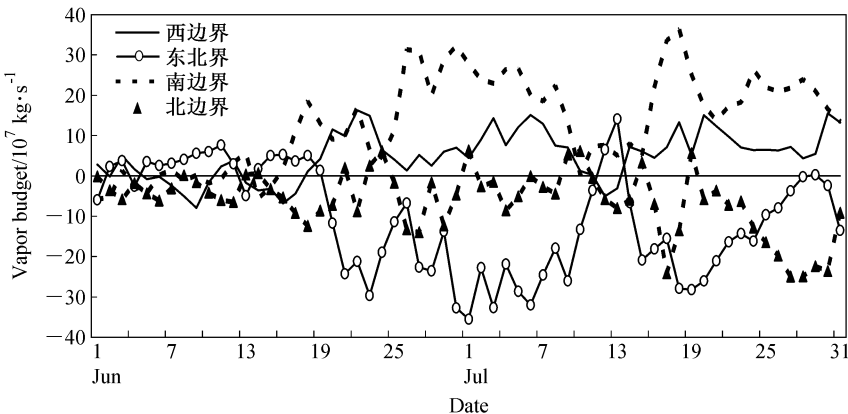


图 5 2007 年 6 月 19 日~7 月 26 日淮河流域各边界整层水汽收支的逐日变化(单位: 10^7 kg/s)

Fig. 5 Daily change of vertically integrated vapor budget on the boundaries of the Huaihe River basin from 19 Jun to 26 Jul

表 1 2007 年 6 月 19 日~7 月 26 日淮河流域四边界平均水汽收支

Table 1 The average vapor budget on the four boundaries of the Huaihe River basin from 19 Jun to 26 Jul 2007

	水汽通量/ $10^7 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$					整层水汽 通量/ 10^7 $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
	1000 hPa	850 hPa	700 hPa	500 hPa	300 hPa	
东边界	6.14	-35.42	-36.55	-19.87	-5.94	-17.54
西边界	-1.91	7.41	14.45	14.03	5.87	7.15
南边界	35.11	45.1	28.82	10.57	1.08	18.43
北边界	-6.33	-8.3	-2.4	-3.13	-2.03	-3.75
合计	33.01	8.79	4.32	1.6	-1.02	4.29

从淮河流域的水汽收支情况可以定量地了解流域边界上从低层到高层的水汽来向,但水汽究竟是通过何种途径从洋面输送入淮河流域,不同洋面区域输送到淮河流域的水汽占总水汽输入的比例都无法知道,而这些都可以通过气团拉格朗日轨迹追踪的方法得到解决。

5 暴雨期水汽来源的轨迹分析

5.1 轨迹模式计算误差分析

鉴于没有轨迹的观测资料,无法通过计算轨迹与观测对比进行误差分析。为考察轨迹模式的计算精度,我们对模式自身的计算误差进行了分析。模式的计算误差分为两类,即积分误差和分辨率误差。积分误差主要是由气象数据在模式中的截断而产生的。分辨率误差是由格点气象数据有限的时空分辨率产生的。积分误差可以通过用前向轨迹的终点计算同样时间长度的后向轨迹进行估计,误差的大小等于后向轨迹终点与前向轨迹起点之间距离的 1/2。选取模拟区域(淮河流域)的中心点 $[(32.5^{\circ}\text{N}, 115^{\circ}\text{E}), 1500 \text{ m 高度}]$,按照需要模拟的轨迹时间长度(336 小时)进行前向追踪模拟,将模拟最终位置的三维坐标输入模式,进行相同时间长度的后向模拟,比较前后向模拟的两条轨迹的一致程度,如图 6 可知轨迹的水平空间位置和垂直高度位置(用气压高度 hPa 表示),可以看到后向轨迹无论是从水平尺度上还是垂直尺度上与前向轨迹都十分接近,说明在轨迹模式的模拟中积分误差很小。

分辨率误差可以通过初始点的水平和垂直方向上偏移所模拟出的轨迹进行估计。取模拟区域中心点 $[(32.5^{\circ}\text{N}, 115^{\circ}\text{E}), 1500 \text{ m 高度}]$,将该点的气

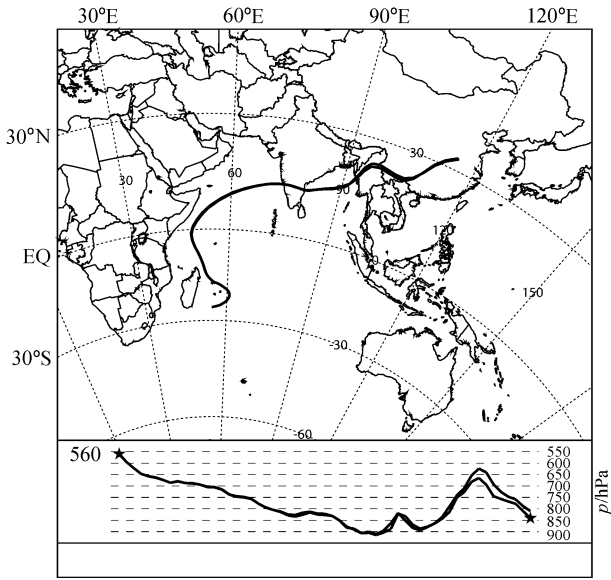


图 6 Hysplit 轨迹模式积分误差
Fig. 6 Integration error of Hysplit model

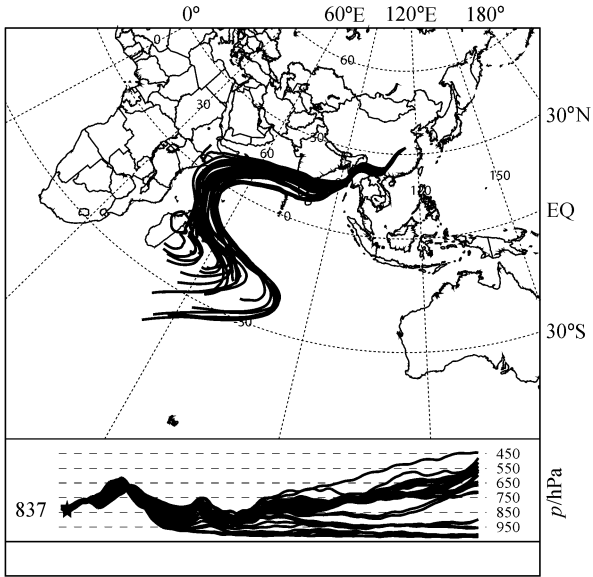


图 7 Hysplit 轨迹模式分辨率误差(图中线条为 27 条 336 小时的后向轨迹)
Fig. 7 Resolution error of Hysplit model (the lines are 27 back-word trajectories for 336 hours)

象数据在 x 、 y 方向上偏移 0.5 个格距, z 方向上偏移 0.01 (σ 值),进行 336 小时的后向模拟。比较这些轨迹的一致性,可见无论是水平还是垂直方向,轨迹间的偏离随模拟时间的延长而增大(如图 7),分辨率误差与积分误差相比要大得多,但仍可以较为一致地表征气流的来向和高度变化。

5.2 暴雨水汽来源的轨迹簇分析

利用流函数分析这一时期对应的全球范围的水汽输送特征, 寻找主要的水汽通道, 对了解 2007 淮河暴雨的形成与维持十分必要。但这些水汽通道究竟哪些对所研究区域的降水起主要作用, 哪些的作用相对次要, 在水汽通量流函数的欧拉场中很难精确地分离出来, 特别是遇到水汽通道汇合的情况, 分离出不同水汽通道的信息就更加困难。气团轨迹的优点在于, 基于准确资料的基础上可以反映出气团真实的运动路径, 通过对选择研究区域的气团进行前向或后向追踪, 排除了其他区域信息的干扰, 可以追踪水汽来源, 准确确定水汽输送通道。

参照前述该次降水三个阶段的划分, 轨迹模拟也分为三个阶段。通过聚类分析, 并按照公式 (4) 计算得到不同阶段各输送通道水汽的贡献率 (见表 2)。

第一阶段 (6 月 19 日~28 日) 的模拟共得到 1800 条轨迹, 根据簇分析的方法对所得轨迹进行聚类, 通过分析空间方差的增长率 (如图 8a), 可见轨迹在聚类过程中的空间方差增长率在聚类结果小于 5 条以后迅速增长, 故确定第一阶段模拟出的轨迹最终聚类为 5 条。图 8b 给出了此阶段淮河流域水汽来源的 5 条通道。南海—孟加拉湾通道 (记为通道 3-4) 由 40°E~60°E 的东非索马里急流和 70°E~90°E 两支越赤道气流聚类而成, 两支气流在孟加拉湾南部汇合, 并经孟加拉湾及中南半岛向东北方向输入淮河流域。通道 2A 为自西太平洋的东海和黄海洋面上向淮河流域输送的东风气流, 通道 2B 为沿西太平洋副热带高压边缘的东南气流, 同时包含了一部分南海海域输送的水汽。西北通道 (分别记为通道 1A 和通道 1B) 分别源于北大西洋和中亚西西伯利亚地区的西北方向冷空气输送。

由图 8c 和 8d (横坐标为后向追踪天数) 可知, 南海—西太平洋通道 (通道 2B) 和南海—孟加拉湾

通道 (通道 3-4) 都来自 900 hPa 以下贴近中低纬海平面的高度, 由于热带洋面蒸发旺盛, 因此通道上携带的水汽要多于源自较高纬度洋面的西太平洋通道北支 (通道 2A)。各通道气流登陆后, 由于地形的影响都有不同程度的抬升, 其中南海—孟加拉湾通道 (通道 3-4) 的气流由于受中南半岛西部山地及云贵高原的影响, 登陆后抬升最为强烈, 从赤道洋面及孟加拉湾携带的水汽在气流行进过程中降下, 通道上比湿显著减小。南海—西太平洋通道 (通道 2B) 与南海—孟加拉湾通道 (通道 3-4) 气流登陆后情况类似, 但由于西太平洋通道的南支气流登陆后途经的地形较为平缓, 行进距离也较短, 所以水汽的损失不如南海—孟加拉湾通道上的气流强烈。西太平洋通道北支 (通道 2A) 上的气流由于登陆后直接进入淮河流域, 水汽几乎没有沿途损失。西北方向的冷空气通道分别来自不同的高度, 其中一支 (通道 1A) 源自北大西洋冷空气来自于 500 hPa 的对流层中层, 另一支 (通道 1B) 源自西西伯利亚的冷空气来自 750 hPa 的低层, 两股冷空气沿途下沉侵入淮河流域上空。进一步对比不同通道的水汽贡献 (表 2) 可以看到, 在降水的第一阶段副高边缘东南气流的输送最为强盛, 占该阶段水汽输送量的 47%。

第二阶段的模拟共得到 2160 条轨迹, 类似通过簇分析的方法, 分析空间方差增长率 (图 9a), 最终聚类得到 4 条轨迹簇。由图 9b 可知, 孟加拉湾通道 (记为通道 4) 代表 40°E~70°E 索马里越赤道气流途径阿拉伯海及孟加拉湾, 向东进入中南半岛和南海北部, 最后向北和东北方向输送入淮河流域。南海通道 (记为通道 3) 为 90°E~120°E 越赤道气流经孟加拉湾东部及南海的向北输送, 作为该阶段最主要的水汽通道占总水汽输送量的 52% (见表 2)。孟加拉湾通道为索马里急流经阿拉伯海和孟加拉湾的西南方向的输送。由于副高在该阶段的

表 2 淮河流域降水三个阶段各水汽通道的水汽贡献
Table 2 The contribution of vapor passages to three stages of rainfall in the Huaihe River basin

	孟加拉湾通道	南海通道	西太平洋通道	西北通道
阶段一	20% (通道 3-4)	20% (通道 3-4)	22% (通道 2A) 47% (通道 2B)	6% (通道 1A) 5% (通道 1B)
阶段二	11% (通道 4)	52% (通道 3)	35% (通道 2)	3% (通道 1)
阶段三	19% (通道 4)	57% (通道 3)	15% (通道 2)	9% (通道 1)

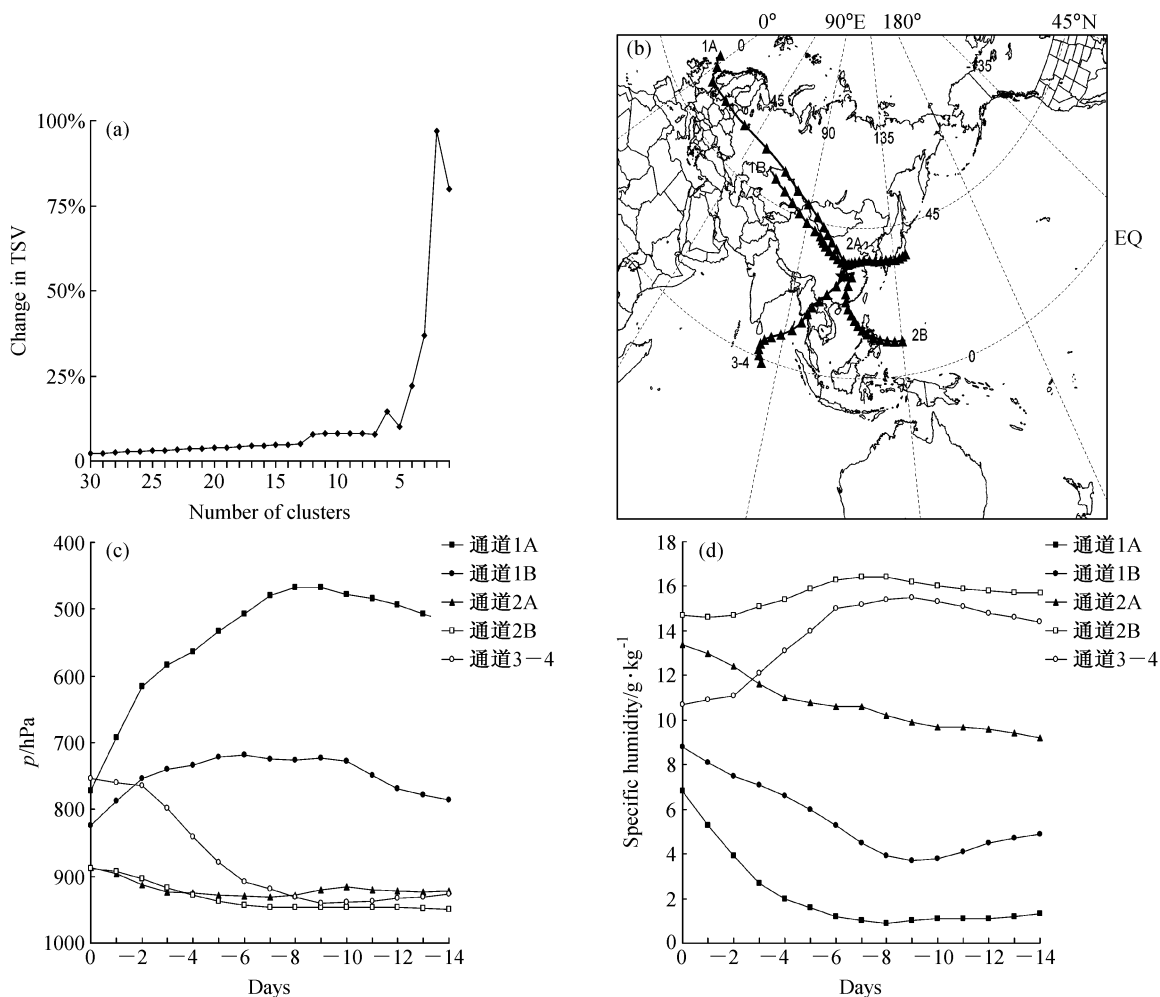


图8 降水第一阶段 (a) 轨迹聚类空间方差增长率、(b) 水汽通道空间分布、(c) 水汽通道的高度变化和 (d) 水汽通道的比湿变化

Fig. 8 (a) Change in TSV (total spatial variance) as clusters combined, (b) the spatial distribution of water vapor passages, (c) change in height of vapor passages, and (d) change in specific humidity of vapor passages in stage one of rainfall

东撤和强度的减弱, 西太平洋通道 (记为通道 2) 副高边缘的输送较第一阶段显著减弱, 水汽贡献下降到 35% (见表 2)。由于该阶段印度低压减弱的影响, 孟加拉湾通道的水汽流经孟加拉湾北部, 向东输送进入南海北部和南海通道的水汽汇合。同时可以看到在第二阶段后向追踪 14 天的气流轨迹显著增长, 表明孟加拉湾急流和越赤道气流显著增强, 孟加拉湾急流和越赤道气流在第一阶段内经 8 天和 14 天左右输送到淮河流域, 而在第二阶段内缩短到 6 天和 10 天左右, 水汽通道上气流的增强使水汽输送增强, 因此第二阶段的降水强度较第一阶段大, 西北通道 (通道 1) 维持了西北方向对流层中层冷空气的侵入。

由图 9c 和 9d 所示, 副高边缘的西太平洋通道

(通道 2) 和南海通道 (通道 3) 仍是源自贴洋面的低层, 携带水汽丰富, 而孟加拉湾通道 (通道 4) 由于源自 850 hPa 以上的较高层次, 加上登陆后运行路径较长及地形的抬升作用, 携带的水汽量要小于另外两条海洋水汽通道。

第三阶段通道空间分布和第二阶段近似 (如图 10a 和 10b), 根据轨迹运行速度的统计分析, 南海及索马里越赤道气流经过 10~12 天, 阿拉伯海、孟加拉湾北部的急流经过 6~8 天进入淮河流域, 副高边缘的水汽输送进一步减小, 南海越赤道气流的输送进一步增强 (通道 3), 索马里至孟加拉湾的水汽输送也有所增强。但由于该通道上的水汽在输入淮河流域前两天有持续的下沉过程 (见图 10c 和 10d), 可以推断该通道上的占 19% 水汽输送对淮河

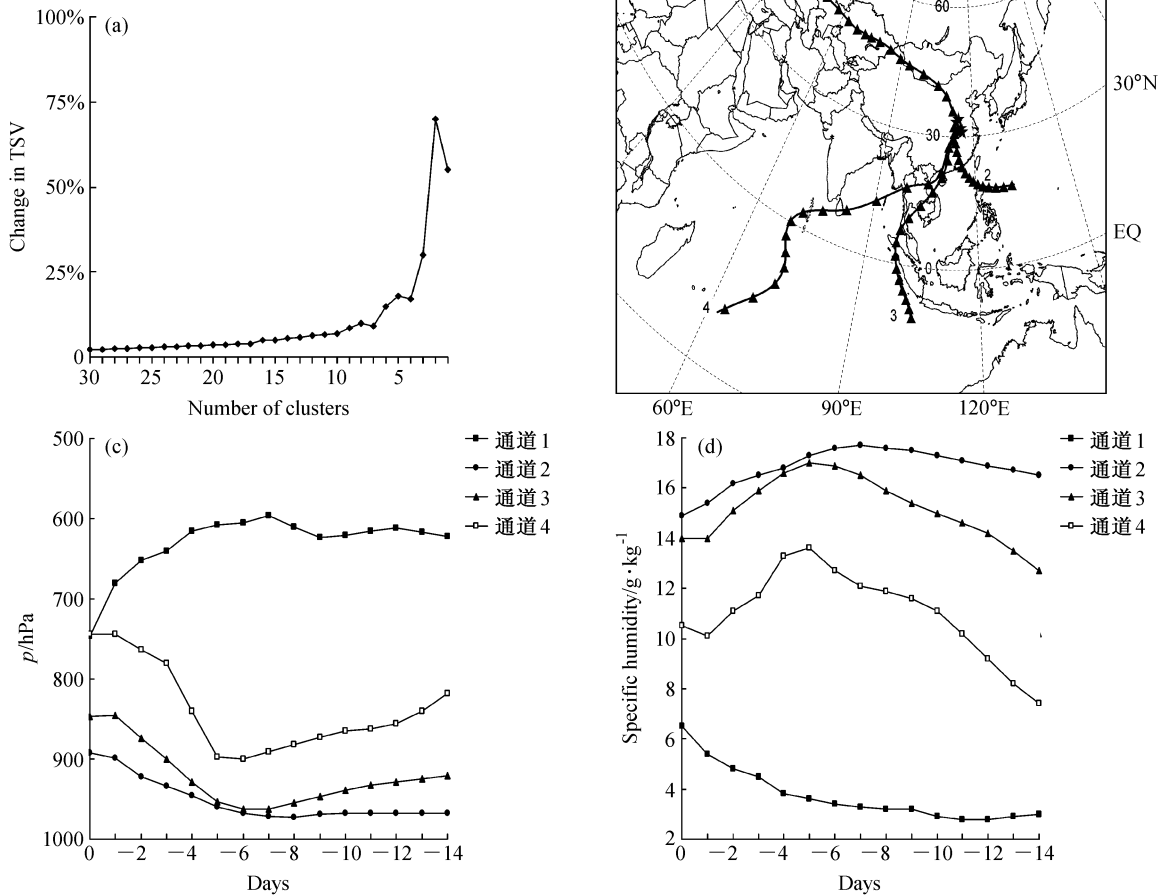


图 9 同图 8, 但为降水第二阶段

Fig. 9 As in Fig. 8, except for stage two of rainfall

流域第三阶段的降水可能没有贡献。

综上, 通过轨迹分析 2007 年淮河流域暴雨第一阶段的水汽主要来自西太平洋洋面, 占第一阶段总水汽输送的 69%, 第二和第三阶段的水汽则主要来自于南海, 分别占到阶段总水汽输送的 52% 和 57%, 从降水的第二到第三阶段, 来自孟加拉湾方向的水汽贡献增加, 由 11% 增加到 19%。而源自西太平洋洋面的水汽贡献则在降水的三个阶段逐步减小, 从第一阶段的 69% 减少到第二阶段的 35%, 在第三阶段只有 15%。通过对降水三个阶段各主要水汽通道输送过程中的高度 (图 8c、图 9c、图 10c) 和相应比湿变化 (图 8d、图 9d、图 10d) 的分析可以看出, 本次淮河流域降水的水汽多起源于热带洋面上空且比较接近海面, 在洋面上空水汽输送比较平缓, 而登陆后会有比较明显的抬升过程。索

马里至孟加拉湾通道的水汽大部分输送到淮河流域上空 750 hPa 以上, 南海及西太平洋的水汽主要输送到淮河流域 850 hPa 以下的低层, 且输送高度越高, 其输送路径就越长, 位置也越偏西。进一步分析该次暴雨不同阶段水汽来源及贡献差异的可能原因, 可以看到 2007 年淮河流域暴雨期间, 中高纬度为典型的阻塞形势, 经历双阻型向单阻型转变过程, 副热带高压稳定在 23°N~26°N 附近 (矫梅燕等, 2008), 850 hPa 上印度热低压在降水的第二阶段强度明显减弱, 阿拉伯与孟加拉湾急流以及越赤道气流在此阶段开始增强 (张瑜和汤燕冰, 2009)。因此, 副高、印度低压及越赤道气流的变化是造成三条水汽通道在降水过程中贡献率变化的主要原因。

5.3 与欧拉水汽输送分析方法对比

这里我们选取降水第二阶段的欧拉水汽输送分

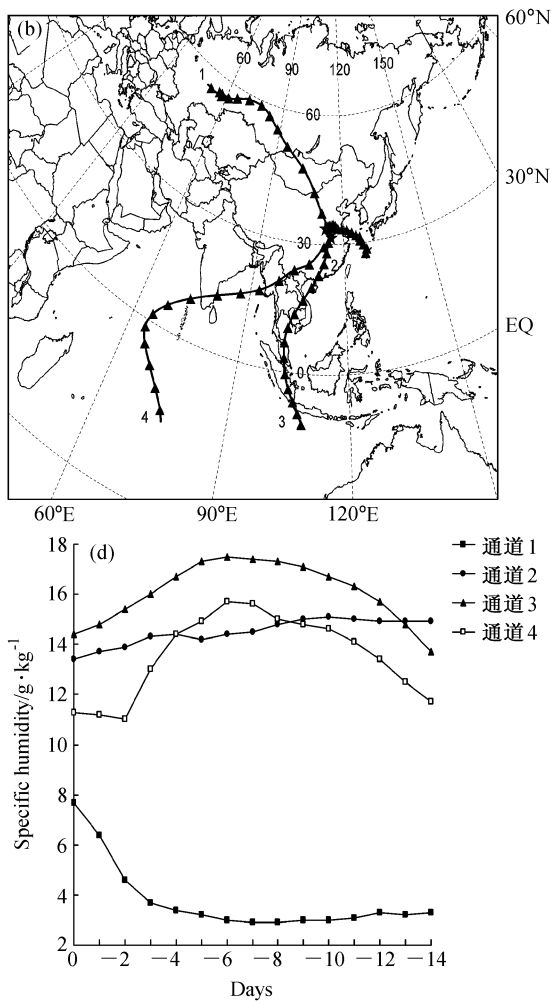
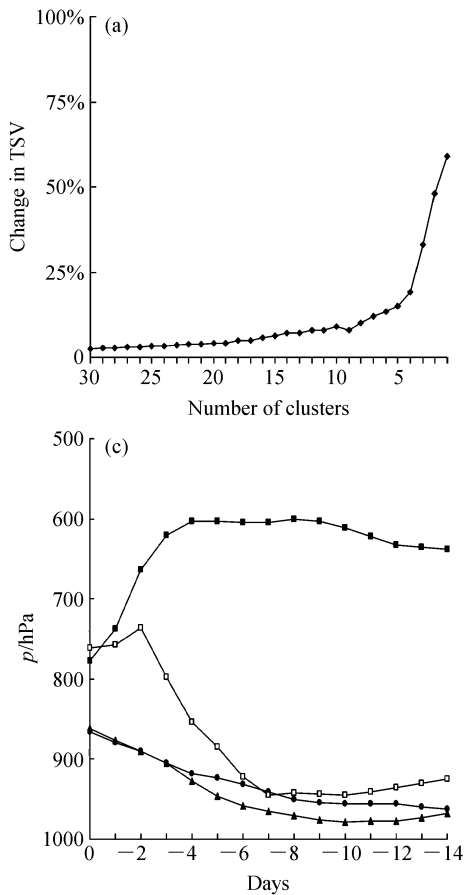


图 10 同图 8, 但为降水第三阶段

Fig. 10 As in Fig. 8, except for stage three of rainfall

析方法与拉格朗日方法比较。图 11 给出了淮河流域第二降水阶段, 从地面积分到 700 hPa 的水汽通量分布, 在欧拉流场中, 我国淮河流域处在一条显著的水汽输送带上, 水汽自索马里经阿拉伯海和孟加拉湾到南海北部继而向北输送进入我国东部, 南海北部水汽的多少主要是受孟加拉湾水汽向东输送的影响。然而, 在对应的拉格朗日全轨迹分布图(图 12)上可以看出, 南海北部水汽的富集是由于孟加拉湾的向东输送, 南海南部越赤道气流的向北输送, 副高东南气流的向北输送三支气流在南海北部汇集, 继而共同进入我国东部的结果。并且, 其中水汽贡献最大的一支并不是欧拉场上显示的孟加拉湾气流的东输(只占水汽贡献的 11%), 而是南海南部越赤道气流的向北输送, 占到该阶段水汽贡献的 52%。第一和第三降水阶段的欧拉场上最强

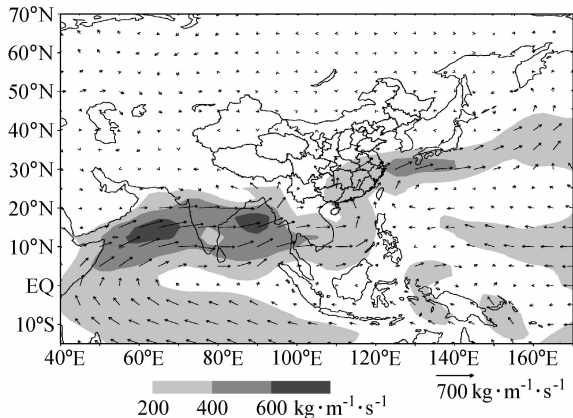


图 11 降水第二阶段地面到 700 hPa 积分的水汽通量 (单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 11 Integrated vapor flux from ground to 700 hPa in stage two of rainfall

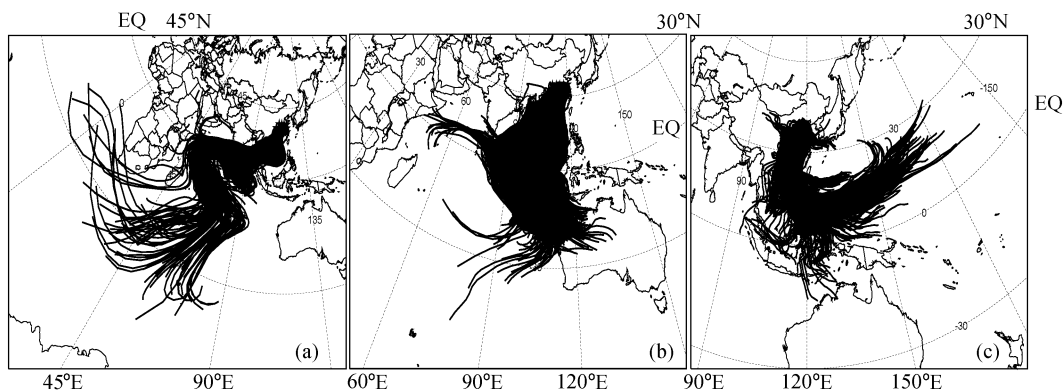


图 12 降水第二阶段 (a) 通道 4 轨迹、(b) 通道 3 轨迹 和 (c) 通道 2 轨迹

Fig. 12 (a) Trajectories of passage 4, (b) trajectories of passage 3, and (c) trajectories of passage 2 in stage two of rainfall

的水汽输送带同样为自索马里经阿拉伯海和孟加拉湾到南海北部,继而向北输送进入我国东部的(图略),但拉格朗日分析可以看出第一和第三降水阶段的最强水汽来源分别为西太平洋(69%)和南海(57%)。可见,欧拉方法常用水汽通量的二维流场来分析水汽输送的空间特征,而水汽通量流场的二维定常性无法真实准确反映气流的在输送过程中的三维变化,拉格朗日后向三维轨迹追踪的方法可以克服这一缺点,因此,拉格朗日轨迹方法可以更加客观定量地分析出各个来向水汽的比重。

6 结论

本文在了解 2007 年淮河暴雨时段大尺度水汽输送背景及淮河流域水汽收支状况的基础上,利用美国 NOAA 轨迹模式(HYSPLIT)模拟暴雨阶段气团轨迹,就该阶段影响淮河流域降水的水汽输送特征做定量分析,并与传统欧拉方法对比,以期加深对淮河流域暴雨水汽输送特征的认识,为实时暴雨业务预报提供参考依据。主要结论如下:

(1) 2007 年淮河流域持续性强降水的水汽输送通道主要有三条:① 索马里急流附近的越赤道气流经阿拉伯海、孟加拉湾北部跨越中南半岛和南海北部向北和东北方向输送入淮河流域;② 孟加拉湾东南部和南海南部的越赤道气流向北输送入淮河流域;③ 西太平洋洋面上副热带高压西南边缘的气流自南方或东南方输入淮河流域。

(2) 本次降水的第一阶段,源自西太平洋洋面的水汽输送占主导地位,其水汽输送占阶段总水汽输送的 69%;在降水的后两个阶段,南海及孟加拉

湾西南方向的水汽输送所占的比重逐渐增加,其中源自南海的分别占阶段总水汽输送的 52%和 57%,孟加拉湾方向占 11%和 19%,主要的水汽通道有一个自东向西的演变过程,这与副高面积的变化以及印度低压的减弱有密切的关系。

(3) 本次淮河流域降水的水汽多起源于热带洋面上空且比较接近海面,登陆后会有比较明显的抬升过程。索马里至孟加拉湾通道的水汽大部分输送到淮河流域上空 750 hPa 以上,南海及西太平洋的水汽主要输送到淮河流域 850 hPa 以下的低层,且输送高度越高,其输送路径就越长,位置也越偏西。

(4) 本次降水的第二阶段,孟加拉湾急流和越赤道气流显著增强,输送到淮河流域的时间由第一阶段的约 8 天和约 14 天,缩短到第二阶段的 6 天和 10 天左右,水汽通道上气流的增强使水汽的供应更加充沛,因此,第二阶段的降水的强度较第一阶段显著增强。

参考文献 (References)

- Bertò A, Buzzi A, Zardi D. 2004. Back-tracking water vapour contributing to a precipitation event over Trentino: A case study [J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 13 (3): 189–200.
- Brimelow J C, Reuter G W. 2005. Transport of atmospheric moisture during three extreme rainfall events over the Mackenzie River basin [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 6 (4): 423–440.
- 陈世训, 高绍风, 杨裕. 1982. 5~6 月我国南方降水的水汽来源及其异常[C]//全国热带夏季风学术会议文集. 昆明: 云南人民出版社, 97–100.
- Chen Shixun, Gao Shaofeng, Yang Yu. 1982. The source of the precipitation vapor in South China and its anomaly in May and June [C]//Collected Works of National Academic Conference on Tropical Summer Monsoon (in Chinese). Kun-

- ming; Yunnan People's Press, 97–100.
- 丁一汇, 胡国权. 2003. 1998 年中国大洪水时期的水汽收支研究 [J]. 气象学报, 61 (2): 129–145. Ding Yihui, Hu Guoquan. 2003. A study on water vapor budget over China during the 1998 severe flood periods [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61 (2): 129–145.
- Draxler R R, Hess G D. 1998. An overview of the HYSPLIT_4 modeling system for trajectories, dispersion and deposition [J]. Australian Meteorological Magazine, 47: 295–308.
- Draxler R R, Stunde B, Rolph G. 2009. Hysplit_4 User's Guide [R]. NOAA Technical Memorandum ERL ARL-224.
- 胡国权, 丁一汇. 2003. 1991 年江淮暴雨时期的能量和水汽循环研究 [J]. 气象学报, 61 (2): 146–163. Hu Guoquan, Ding Yihui. 2003. A study on the energy and water cycles over Changjiang–Huaihe River basins during the 1991 heavy rain periods [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61 (2): 146–163.
- 矫梅燕, 金荣花, 齐丹. 2008. 2007 年淮河暴雨洪涝的气象水文特征 [J]. 应用气象学报, 19 (3): 257–264. Jiao Meiyun, Jin Ronghua, Qi Dan. 2008. Meteorological and hydrological characteristics of flood related torrential rain over Huaihe River basin in 2007 [J]. J. Appl. Meteor. Sci., 19 (3): 257–264.
- 金祖辉. 1981. 1979 年夏季南海地区水汽收支 [C]//全国热带季风学术会议文集. 昆明: 云南人民出版社, 152–164. Jin Zuhui. 1981. The moisture budget of the South China Sea in the summer of 1979 [C]//Collected Works of National Academic Conference on Tropical Summer Monsoon (in Chinese). Kunming: Yunnan People's Press, 152–164.
- 马京津, 于波, 高晓清, 等. 2008. 大尺度环流变化对华北地区夏季水汽输送的影响 [J]. 高原气象, 27 (3): 517–523. Ma Jingjin, Yu Bo, Gao Xiaoqing, et al. 2008. Change of large scale circulation and its impact on the water vapor over North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27 (3): 517–523.
- 苗秋菊, 徐祥德, 张胜军. 2005. 长江流域水汽收支与高原水汽输送分量“转换”特征 [J]. 气象学报, 63 (1): 93–99. Miao Qiuju, Xu Xiangde, Zhang Shengjun. 2005. Whole layer water vapor budget of Yangtze River valley and moisture flux components transform in the key areas of the plateau [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 63 (1): 93–99.
- Ninomiya K, Kobayashi C. 1999. Precipitation and moisture balance of the Asian summer monsoon in 1991. Part II: Moisture transport and moisture balance [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 77 (1): 77–99.
- 沈如桂, 黄更生. 1981. 1980 年夏季热带季风环流与我国南方降水水汽输送关系 [M]//全国热带季风学术会议文集. 昆明: 云南人民出版社, 116–128. Shen Rugui, Huang Gengsheng. 1981. Correlations of tropical monsoon circulation in the summer of 1980 with precipitation vapor transport in South China [C]//Collected Works of National Academic Conference on Tropical Summer Monsoon (in Chinese). Kunming: Yunnan People's Press, 116–128.
- Simmonds I, Bi D, Hope P. 1999. Atmospheric water vapor flux and its association with rainfall over China in summer [J]. J. Climate, 12 (5): 1353–1367.
- Stohl A, James P. 2004. A Lagrangian analysis of the atmospheric branch of the global water cycle. Part I: Method description, validation, and demonstration for the August 2002 flooding in central Europe [J]. Journal of Hydrometeorology, 5 (4): 656–678.
- Tao S Y, Chen L X. 1987. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China [M]// Monsoon Meteorology. Oxford University Press, 60–92.
- 谢安, 毛江玉, 宋焱云, 等. 2002. 长江中下游地区水汽输送的气候特征 [J]. 应用气象学报, 13 (1): 67–77. Xie An, Mao Jiangyu, Song Yanyun, et al. 2002. Climatological characteristics of moisture transport over Yangtze River basin [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 13 (1): 67–77.
- Xie Pingping, Chen Mingyue, Yang Song, et al. 2007. A gauge-based analysis of daily precipitation over East Asia [J]. Journal of Hydrometeorology, 8 (3): 607–626.
- 徐祥德, 陈联寿, 王秀荣, 等. 2003. 长江流域梅雨带水汽输送源–汇结构 [J]. 科学通报, 48 (21): 2288–2294. Xu Xiangde, Chen Lianshou, Wang Xiurong, et al. 2003. Moisture transport source/sink structure of the Meiyu rain belt along the Yangtze River valley [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 48 (21): 2288–2294.
- 张瑜, 汤燕冰. 2009. 江淮流域持续性暴雨过程水汽输送状况初析 [J]. 浙江大学学报 (理学版), 36 (4): 470–476. Zhang Yu, Tang Yanbing. 2009. Primary analysis on vapor transport of persistent heavy rainfall events over the Yangtze and Huaihe River valley [J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition) (in Chinese), 36 (4): 470–476.
- 赵琳娜, 杨晓丹, 齐丹, 等. 2007. 2007 年汛期淮河流域致洪暴雨的雨情和水情特征分析 [J]. 气候与环境研究, 12 (6): 728–737. Zhao Linna, Yang Xiaodan, Qi Dan, et al. 2007. The analysis of precipitation and flooding features in the Huaihe River basin during the summer of 2007 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (6): 728–737.
- 赵思雄, 张立生, 孙建华. 2007. 2007 年淮河流域致洪暴雨及其中尺度系统特征的分析 [J]. 气候与环境研究, 12 (6): 713–727. Zhao Sixiong, Zhang Lisheng, Sun Jianhua. 2007. Study of heavy rainfall and related mesoscale systems causing severe flood in Huaihe River valley during summer of 2007 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (6): 713–727.
- 周玉淑, 高守亭, 邓国. 2005. 江淮流域 2003 年强梅雨期的水汽输送特征分析 [J]. 大气科学, 29 (2): 195–204. Zhou Yushu, Gao Shouting, Deng Guo. 2005. A diagnostic study of water vapor transport and budget during heavy precipitation over the Changjiang River and the Huaihe River basins in 2003 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (2): 195–204.