

戴竹君, 王黎娟, 管兆勇, 等. 2015. 热带风暴“Bilis”(0604)暴雨增幅前后的水汽输送轨迹路径模拟 [J]. 大气科学, 39 (2): 422–432, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1404.13340. Dai Zhujun, Wang Lijuan, Guan Zhaoyong, et al. 2015. Simulation of water vapor transport paths before and after increased rainstorms from tropical storm Bilis (0604) [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (2): 422–432.

热带风暴“Bilis”(0604)暴雨增幅前后的 水汽输送轨迹路径模拟

戴竹君^{1,2} 王黎娟¹ 管兆勇¹ 任晨平³ 李业进⁴

1 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

2 南京市气象局, 南京 210009

3 中国人民解放军 94754 部队气象台, 嘉兴 314013

4 嘉兴市气象局, 嘉兴 314000

摘 要 采用水平分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 NCEP 再分析资料、 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 NCEP GDAS 资料和 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的 NOAA 大气环流资料, 结合 NOAA HYSPLIT v4.8 轨迹模式对 0604 号热带风暴“Bilis”整个生命史的水汽输送特征进行模拟分析, 并分析了“Bilis”暴雨增幅前和增幅后的水汽输送轨迹及不同来源的水汽贡献。结果表明, “Bilis”整个活动过程中主要有四支水汽输送通道, 分别是源自索马里、孟加拉湾、 120°E 越赤道气流和东太平洋的水汽, 其中源自索马里和孟加拉湾的西南水汽输送(偏南水汽通道)占主导地位, 120°E 越赤道气流和东太平洋的水汽是西南水汽随着“Bilis”环流逆时针旋转, 自环流中心东北侧进入雨区(东北水汽通道), 是低压环流与偏南风相互作用的结果。其中, 偏南通道水汽大部分输送到 850 hPa 以下的低层, 自环流北侧输入的水汽则主要输送到暴雨区上空 850 hPa 以上。对比暴雨增幅前后各通道的水汽贡献率发现, 孟加拉湾西南气流输送的低纬水汽对此次暴雨增幅的形成、发展起重要作用。

关键词 热带风暴“Bilis” 暴雨增幅 水汽输送 HYSPLIT 模式

文章编号 1006-9895(2015)02-0422-11

中图分类号 P445

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1404.13340

Simulation of Water Vapor Transport Paths before and after Increased Rainstorms from Tropical Storm Bilis (0604)

DAI Zhujun^{1,2}, WANG Lijuan¹, GUAN Zhaoyong¹, REN Chenping³, and LI Yejin⁴

1 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 Nanjing Meteorological Bureau, Nanjing 210009

3 Meteorological Observatory, Troops 94754 of PLA, Jiaxing 314013

4 Jiaxing Meteorological Bureau, Jiaxing 314000

Abstract Using the HYSPLIT v4.8 model and the NOAA atmospheric circulation ($2.5^\circ \times 2.5^\circ$) and NCEP GDAS ($1.0^\circ \times 1.0^\circ$) data, the authors investigated variations in water vapor transportation features and the contribution of water vapor to their major pathways from Tropical Storm Bilis (0604). The authors classified the data into two phases:

收稿日期 2013-12-27; **网络预出版日期** 2014-05-23

资助项目 国家重点基础研究发展计划 2009CB421505, 江苏省自然科学基金项目 BK20131432, 江苏省高校自然科学研究重大项目 14KJA170004, 江苏省“青蓝工程”

作者简介 戴竹君, 女, 1989 年出生, 硕士, 主要从事热带气旋数值模拟研究。E-mail: daizhujun99@163.com

通讯作者 王黎娟, E-mail: wljfw@163.com

pre-rainstorm and post-rainstorm. The results indicate that the entire Bilis life cycle has four major water channels: Somalia, the Bay of Bengal, a cross-equatorial flow at 120°E, and the eastern Pacific water vapor. The data was then further classified into two reversed categories: the first is the southward water vapor transported from Somalia and the Bay of Bengal, which plays a key role in moisture transportation; the second is the cross-equatorial airflow at 120°E and the flow from the eastern Pacific, which results from the interaction between the cyclone and the southwest monsoon and enters a rain belt northeast of the circulation center. The southern water vapor channel from the Somali jet and the Bay of Bengal is related to the southwest monsoon and transports moisture up to levels of 850 hPa. The South China Sea and the western Pacific transports moisture to levels greater than 850 hPa. Comparing the water vapor contribution rate of each channel before and after increased rainstorms, it is observed that the low latitude water vapor, formed due to increased rainstorms in the Bay of Bengal, plays a significant role in the formation and development of the increased moisture during torrential rain.

Keywords Tropical storm “Bilis”, Rainfall increase, Vapor transportation, HYSPLIT model

1 引言

众所周知,暴雨维持的基本条件之一是有源源不断的水汽供应,没有充足的水汽输送就不可能有热带气旋(TC)的生成和发展。TC若脱离水汽辐合带,不再获得水汽,则很快衰亡(王黎娟等, 2011)。可见,大范围的水汽输送和集中是TC暴雨形成的重要条件。因此,分析TC暴雨的水汽来源和水汽输送轨迹对于研究暴雨增幅的成因及其机理非常重要。目前,国内外学者对降雨水汽输送的研究已有很多。Tao and Chen (1987)指出南海、孟加拉湾的水汽输送对于我国夏季强降水的发生很重要。孙建华和赵思雄(2000)指出除了孟加拉湾的水汽输送,南海和西太平洋的水汽输送对华北和东北的降水也很重要。丁一汇和胡国权(2003)通过对水汽通量流函数、势函数的分解,指出半球尺度范围的水汽输送引发了强降水区的水汽辐合,水汽输送是全球范围内的大尺度问题,来自南海和孟加拉湾的水汽输送与我国大陆的强降水关系密切,南边界(南海)的水汽对我国东部降水的影响强于西边界。周玉淑等(2005)研究水汽的输送发现,夏季南海夏季风和印度季风环流输送的水汽是江淮流域降雨的主要来源。

上述研究大多是基于欧拉方法,但是欧拉方法无法客观分离出降水的主要水汽输送轨迹,亦无法定量不同水汽来源对降水的贡献率。因此近年来,很多学者开始采用拉格朗日分析方法来研究降雨区的水汽来源。Makra等(2011)指出在轨迹追踪研究中,HYSPLIT模式较其他模式有更好的性能。Stohl and James (2004)利用HYSPLIT轨迹模式研究2002年8月发生在中欧的一次极端降水事件,发现水汽的来源是地中海及地表蒸发。Brimelow

and Reuter (2005)研究了三次极端降水过程,指出低层的水汽主要来源于墨西哥湾。马京津和高晓清(2007)采用HYSPLIT模式对华北地区近几十年来的水汽输送特征进行了研究。江志红等(2011)对HYSPLIT模式的可靠性进行了验证,模拟出的前向和后向轨迹在水平和垂直方向上都很接近,误差较小,进一步证明HYSPLIT模式可以用于模拟气流来向。

0604号热带风暴“Bilis”所造成的强降水有两个主要特点:(1)登陆之后的降雨强度、范围都强于登陆以前,“Bilis”深入内陆维持时间之长,雨强之大,影响范围之广,历史少见;(2)最强的降水出现在低压环流的南侧和地表辐合线附近,而一般TC暴雨主要分布在低压中心附近(许映龙等, 2005)。那么,这样的暴雨分布是否与“Bilis”的水汽场分布特征相关呢?其水汽场又是如何影响暴雨强度及范围?本文将利用HYSPLIT模式对“Bilis”整个生命史的水汽输送特征进行模拟分析,深入分析低纬水汽输送对此次暴雨增幅的影响,以期台风暴雨预报业务提供更多参考依据。

2 资料与方法

2.1 资料

本文采用美国国家环境预测中心(NCEP)和国家大气研究中心(NCAR)2006年7月9~18日每日四次 $1^\circ \times 1^\circ$ FNL(Final)全球再分析资料,全国地面加密自动站每日四次的观测资料来诊断登陆热带气旋“Bilis”的降水分布特征。首先利用NOAA水平分辨率 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的大气环流资料和HYSPLIT轨迹模式,模拟“Bilis”从生成至消失的整个活动过程,关注低纬不同通道的水汽输送对“Bilis”降水的影响;然后,采用NCEP GDAS水

分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$ 的数据对热带风暴“Bilis”暴雨增幅前、后的水汽输送状况进行更加细致、深入地分析。

2.2 拉格朗日轨迹模式 (HYSPLIT) 简介

HYSPLIT v4.8 是美国国家海洋大气局 (NOAA) 等机构联合开发的能够处理不同气象数据输入, 不同物理过程及不同排放源的一种包含输送、扩散、沉降过程的模式系统 (Draxler and Hess, 1997)。模式采用地形 σ 坐标, 本文可变的时间步长 (Δt) 选取 6 h。模式在垂直方向上分为 28 层, 将不同的气象要素线性内插到 σ 层上, 水平网格则与输入气象场相同 (Draxler and Hess, 1998)。

由于输出轨迹较多, 为了更直观清晰地看出各条轨迹路径, 模式采用了簇分析方法对大量轨迹路径进行聚类, 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。聚类标准是每簇的空间方差 (Spatial Variance, 简称 SV) 为簇内每条轨迹与簇平均轨迹对应点的距离平方和, 总空间方差 (Total Spatial Variance, 简称 TSV) 为各簇方差之和。总空间方差增加最小时对应的簇分类就是最后结果。

最初, 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。

2.3 水汽通道输送贡献率的计算

通道水汽贡献率计算公式为

$$Q_s = \frac{\sum_1^o q_{\text{last}}}{\sum_1^n q_{\text{last}}} \times 100\%, \quad (1)$$

其中, q_{last} 代表通道上最终位置处的比湿, o 是通道中包含的轨迹条数, n 表示模拟轨迹总数。

2.4 水汽收支方程的计算

通过计算暴雨增幅区 (湘赣粤交界处) 的区域平均水汽收支方程来分析水汽方程中的各项输送及收支状况, 计算区域范围为 ($24^\circ \sim 27^\circ \text{N}$, $112^\circ \sim 114^\circ \text{E}$)。

区域平均水汽收支方程 (丁一汇和王笑芳, 1988; 丁一汇, 2005; Chen, 1985) 为

$$\frac{1}{\sigma g} \int_{p_s}^{p_a} \iint_{\sigma} \left(\frac{\partial q}{\partial t} + \nabla \cdot q\mathbf{v} + \frac{\partial q\varpi}{\partial p} \right) dp d\sigma = -m + E_s, \quad (2)$$

其中, p_s 是地面气压, p_a 是模式顶气压, σ 是选定区域, $(1/g)(\partial q/\partial t)$ 是水汽局地变化项, $[1/(\sigma g)](\nabla \cdot q\mathbf{v})$ 是水汽通量散度, $[1/(\sigma g)](\partial q\varpi/\partial p)$ 是水汽垂直输送项, m 为水汽凝结项, E_s 为蒸发项。通过计算区域平均的水汽收支方程左侧各项来分析“Bilis”活跃期间的水汽输送情况。

3 “Bilis”降水增幅及水汽收支

“Bilis” (0604) 于 2006 年 7 月 9 日生成在菲律宾以东洋面, 13 日晚 23 时 (北京时, 下同) 在台湾宜兰登陆, 14 日 12 时 50 分在闽北再次登陆, 登陆时中心最大风力达 11 级, 登陆后“Bilis”西北偏西行, 14 日 16 时在福建省闽侯县减弱为热带风暴, 15 日 14 时在赣西南减弱为热带低压, 17 日逐渐填塞, 18 日晚在滇东减弱消失 (图略)。“Bilis”在陆上持续 5 天之久, 受其影响, 浙南、闽东、闽南、湘南、赣南、粤北和粤东等地出现了大暴雨和特大暴雨 (图略)。一般来说 TC 登陆之后易在中心附近或其北侧及 TC 东北侧的倒槽中产生暴雨 (许映龙等, 2005), 然而“Bilis”登陆之后暴雨中心却主要位于其南侧。

在“Bilis”登陆台湾以前, 大陆上基本没有降水 (图略)。叶成志和李昀英 (2011) 对“Bilis”的逐时降雨量进行了分析, 发现降水在 15 日 02 时出现了峰值, 即 15 日 02 时开始出现暴雨增幅。图 1a 是暴雨增幅前 (7 月 9 日 20 时至 14 日 20 时) 降水量, 图 1b 是暴雨增幅后 (15 日 02 时至 19 日 02 时) 降水量。由图 1a, 在“Bilis”越过台湾海峡直到登陆福建前, 浙南沿海, 福建东南沿海出现了明显降水, 浙闽沿海交界一带出现了暴雨, 降水量为 40~80 mm, 中心值还达到 140 mm 以上, 局部出现了大暴雨, 雨带主要出现在风暴中心的北侧; 二次登陆福建之后, 降水的强度明显增强, 最强的降水中心主要出现在粤赣湘交界和粤东, 中心值达到了 220 mm 以上, 出现大暴雨及特大暴雨, 降水中心从风暴中心北侧转移到风暴中心的南侧 (图 1b)。因此可以将此次降水分为两个阶段: 第一阶段是暴雨增幅前 (7 月 9 日 20 时至 14 日 20 时) 出现的降水; 第二阶段是暴雨增幅之后 (7 月 15 日 02 时至 19 日 02 时) 出现的降水。

为了分析不同来向的水汽在暴雨增幅过程中所起的作用, 选取暴雨增幅前 7 月 9 日 20 时至 14 日 20 时 ($25^\circ \sim 29^\circ \text{N}$, $118^\circ \sim 122^\circ \text{E}$) 和暴雨增幅后

7月15日02时至19日02时($23^{\circ}\sim 26^{\circ}\text{N}$, $112^{\circ}\sim 116^{\circ}\text{E}$), 这与图1中的时间和降雨区相对应, 分别考察四条侧边界(见图1中方框)上的水汽通量垂直分布特征(图2)。在暴雨增幅之前(图2a), 西、南、北边界自地面至100 hPa均为负值, 在800 hPa达到极小值, 即西、南、北侧是水汽主要的流出方

向; 唯有东边界整层都维持较强的水汽流入, 即东侧是主要的流入方向, 且东侧的水汽输入明显强于西、南、北侧的水汽输出, 由此可知, 初期降水的水汽主要来源于东边界, TC环流东侧的水汽输送对此时的降水贡献较大。在暴雨增幅后(图2b), 西、南边界上水汽通量整层为正值, 尤其是在850

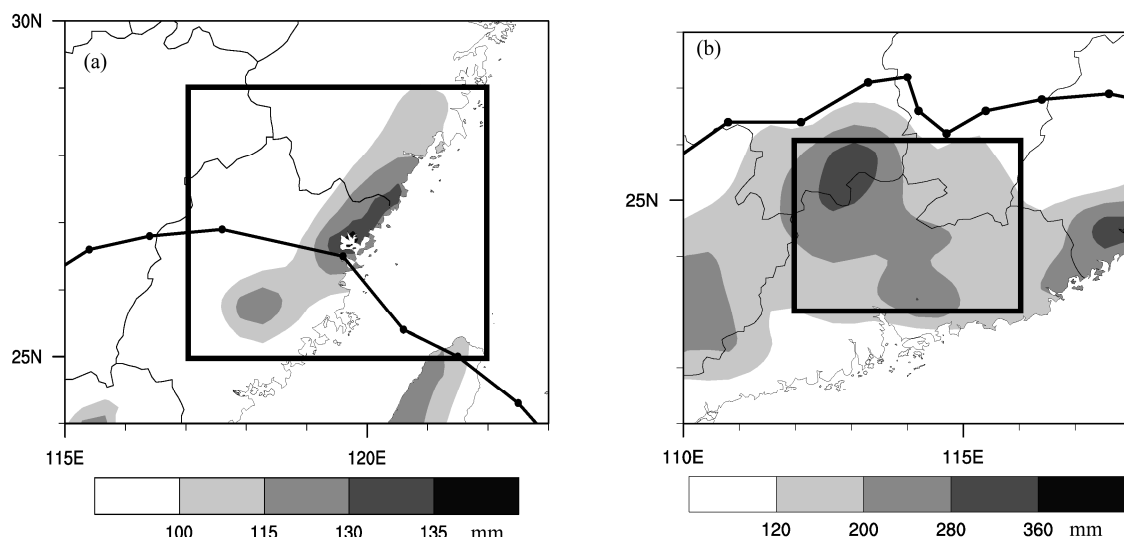


图1 2006年7月(a)9日20时(北京时间,下同)至14日20时、(b)15日02时至19日02时累计降水量(单位: mm), 实线显示的是TC移动路径
Fig. 1 Cumulative rainfall (mm) (a) from 0000 BT 9 to 0000 Beijing time (BT) 14 July and (b) from 0200 BT 15 to 0200 BT 19 July 2006, the solid line is for the moving path of Bilis

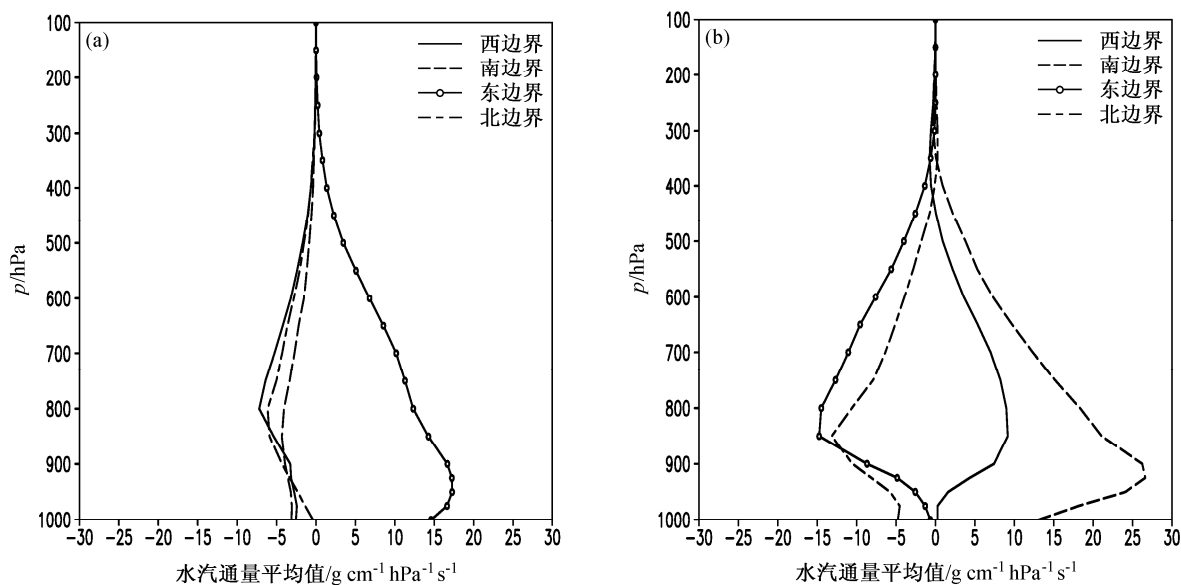


图2 各侧边界水汽通量平均值的垂直变化曲线: (a) 7月9日20时至14日20时($25^{\circ}\sim 29^{\circ}\text{N}$, $118^{\circ}\sim 122^{\circ}\text{E}$), 如图1a方框所示区域; (b) 7月15日02时至19日02时($23^{\circ}\sim 26^{\circ}\text{N}$, $112^{\circ}\sim 116^{\circ}\text{E}$), 如图1b方框所示区域。实线表示西边界, 长虚线表示南边界, 实线空心圆表示东边界, 长短虚线表示北边界; 正值为流入, 负值为流出; 单位: $\text{g cm}^{-1} \text{hPa}^{-1} \text{s}^{-1}$

Fig. 2 Vertical profiles of the moisture fluxes through each of the boundaries of the areas (the solid line is for the west boundary, long dashed line is for the south, solid hollowed line is for the east, and the long to short dashed line is for the north, and the positive value stands for the input while the negative for the output; units: $\text{g cm}^{-1} \text{hPa}^{-1} \text{s}^{-1}$): (a) For time (2000 BT 9 to 2000 BT 14 July) and area ($25^{\circ}\sim 29^{\circ}\text{N}$, $118^{\circ}\sim 122^{\circ}\text{E}$); (b) for time (0200 BT 15 to 0200 BT 19 July) and area ($23^{\circ}\sim 26^{\circ}\text{N}$, $112^{\circ}\sim 116^{\circ}\text{E}$)

hPa 以下维持强的水汽输送;东、北边界水汽通量垂直分布相类似,整层全为负值,即东、北侧是主要的水汽流出方向,并且西、南边界上水汽输送的强度显著强于东、北侧的水汽输出强度。由此可知,后期西南季风、越赤道气流的增强,西、南边界的水汽输送随之增大,这是造成此次暴雨增幅的重要原因,后期水汽主要来源于西、南边界。

根据上述水汽收支分析可以定量地了解此次降水过程低层至高层水汽方程中各项分布及水汽的大致来向,然而无法得知水汽是通过怎样的途径输送进入华南流域,更无法得知不同洋面输入水汽占全部输入水汽的比重。

为了能够更加定量地分析这次 TC 暴雨过程的水汽输送状况,揭示强降雨的水汽来源和具体的水汽输送通道,下面将采用拉格朗日分析方法来追踪“Bilis”活动期间及暴雨增幅前后的气团运动轨迹。首先分析“Bilis”整个生命过程(7月9~18日)的水汽输送状况,再进一步模拟出暴雨增幅前后的气团运动轨迹,得出增幅前后的主要水汽通道及各通道的水汽贡献率。

4 “Bilis”活动期间水汽输送轨迹分析

4.1 轨迹模式模拟方案

选取2006年7月9日08时至7月19日02时“Bilis”降水大值区(22.5°~30°N,110°~122.5°E)作为模拟区域,水平分辨率为2.5°×2.5°,垂直方向上分别选取500 m、1500 m、3000 m三个高度层次作为模拟初始高度。所用资料是NOAA的6小时一次,水平分辨率2.5°×2.5°的大气环流资料。整个模拟空间的轨迹初始点为72个,模拟其后向追踪9天的运动轨迹,每隔6小时输出一一次轨迹点位置,并且每6小时全部初始点重新后向追踪模拟9天。

500 m、1500 m、3000 m三个高度模拟都得到960条轨迹,轨迹模式输出的轨迹路径数量较多,因此根据簇分析方法对所得轨迹进行聚类能够更直观清晰地看出轨迹分布。下面将分别讨论500 m、1500 m、3000 m三个高度层次上的水汽输送情况。

4.2 水汽输送轨迹模拟结果

整个模拟空间的轨迹初始点为72个,模拟起始时间是7月18日08时,终止时间是9日08时,即模拟其后向追踪9天的运动轨迹,每隔6小时输出一一次轨迹点位置,并且每6小时全部初始点重新

后向追踪模拟9天。

以1500 m(约850 hPa)高度为例来说明,1500 m高度上模拟共得到960条轨迹,根据簇分析方法对所得轨迹进行聚类,分析总空间方差的变化(图3a),发现轨迹在聚类过程中的总空间方差在4条以内迅速增长,因此确定这一阶段模拟出的轨迹最终聚类为4条。聚类以后,采用公式(1)计算出TC活跃期间各个通道上的水汽输送贡献率(表1)。

表1 TC 登陆后三个高度层各水汽通道的水汽贡献
Table 1 The contribution of vapor passages to three stages after Bilis coming ashore

高度层	水汽贡献			
	索马里通道	孟加拉湾通道	120°~130°E 越赤道气流通道	东太平洋通道
500 m	52.6% (孟加拉湾通道) 30.2% (南海通道)		16.0%	1.2%
1500 m	48.3%	23.6%	19.5%	8.6%
3000 m	46.0%	42.4%	9.4%	2.2%

图3b给出水汽来源的3条通道:一是40°~60°E索马里越赤道气流向东跨过阿拉伯海、孟加拉湾、中南半岛和南海北部,最后输送进入华南流域,这是此次暴雨的最主要水汽输送通道,占该层水汽贡献的48.3%(表1);二是80°~100°E孟加拉湾气流经中南半岛向北输送,占23.6%(表1);三是120°E越赤道气流和130°E越赤道气流汇合,从低压环流的东北侧输送进入暴雨区。

而在500 m和3000 m高度上,TSV(图略)都在4条以内迅速增长,因此轨迹均聚类为4条。500 m高度上的路径为孟加拉湾、南海、130°E越赤道气流和东太平洋(图略);而3000 m高度上是索马里、孟加拉湾、130°E越赤道气流和东太平洋(图略)。

根据上述分析,可以将此次台风暴雨过程的水汽通道分为两类基本反向的水汽输送通道,一条是与西南季风相联系的偏南水汽通道,该水汽输送高值区有两个主要来源:(1)来源于索马里越赤道气流的偏西水汽输送,(2)来源于孟加拉湾的西南水汽输送;另一条是与TC环流相联系的源自西太平洋的东北水汽通道。而西南季风输送的低纬水汽对暴雨起了主要水汽输送作用,在500 m、1500 m、3000 m三个高度层上的水汽贡献分别达到了82.8%、71.9%、88.4%(表1),占据了绝对优势,而来自西太平洋的北支水汽输送对此次TC暴雨的贡献不大。由此说明,“Bilis”低压环流南侧的西南

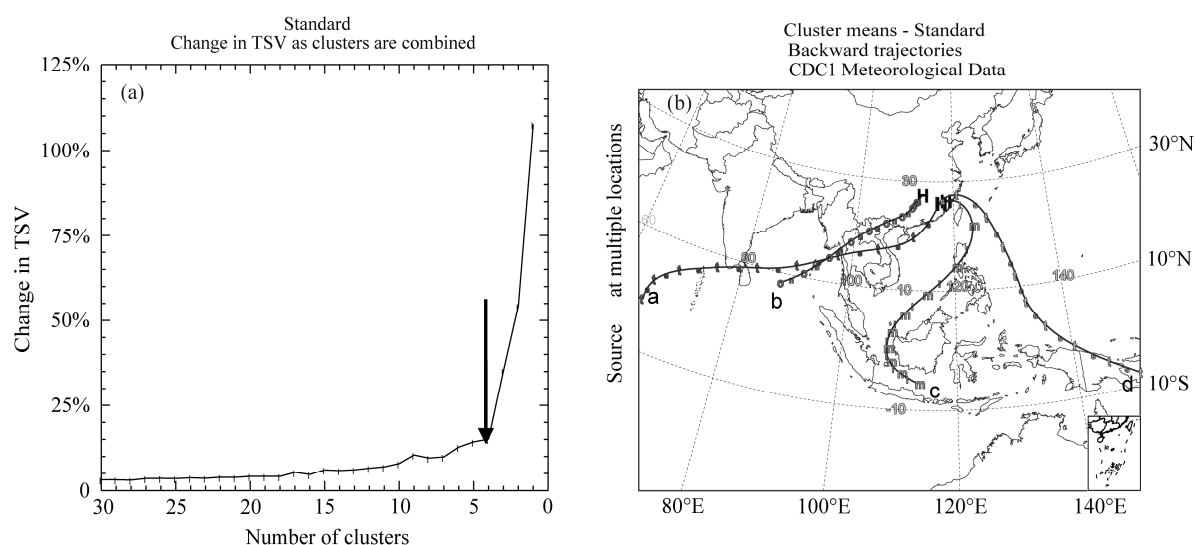


图3 “Bilis”活动期间 1500 m 高度上 (a) 轨迹聚类空间方差增长率(横坐标表示聚类条数,纵坐标表示空间方差增长率)和 (b) 水汽通道空间分布
Fig. 3 (a) Change in TSV (total spatial variance) as clusters combined and (b) the spatial distribution of water vapor passages for the level at 1500 m during the entire life of Bilis

风是更为直接和重要的水汽输送,对暴雨落区、强度影响很大,东北侧的水汽其实也是西南侧水汽随着“Bilis”低压环流逆时针旋转行进,沿着环流中心东侧的强风速带夹卷到环流北侧聚集而成的,是该低压环流与西南季风相互作用的结果。这南北两支主要水汽通道在华南长时间交汇,形成了深厚的湿层和强水汽辐合,对“Bilis”低压环流较长时间的维持及对南方特大暴雨的形成和发展有重要的作用。

众所周知,索马里急流是最强的一支越赤道气流,水汽贡献较大可以理解;但通过表1还发现,孟加拉湾的贡献亦不容忽视,那么孟加拉湾的水汽输送对此次暴雨增幅起怎样的作用呢?下面将采用更细致的 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 资料来研究孟加拉湾水汽输送对于暴雨增幅的影响。

5 暴雨增幅前后水汽输送轨迹分析

为了更加细致、深入地分析热带风暴“Bilis”引发的暴雨增幅前、后的水汽输送状况,进一步采用NCEP GDAS的全球 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 数据(GDAS资料按每个月的5个星期进行保存),结合HYSPLIT轨迹模式,将此次降水分为两个阶段:第一阶段是暴雨增幅前(7月9日20时至14日20时)出现的降水;第二阶段是暴雨增幅之后(7月15日02时至19日02时)出现的暴雨过程,模拟出暴雨增幅前后的气团运动轨迹,得出引发此次暴雨增幅的主要水汽通

道及各通道的水汽贡献率,以期为实时的台风暴雨预报业务提供更多的参考依据。

5.1 暴雨增幅前水汽输送轨迹

5.1.1 轨迹模式模拟方案

暴雨增幅前(7月9日20时至14日20时),选取模拟区域如图1a($25^{\circ} \sim 29^{\circ} \text{N}$, $118^{\circ} \sim 122^{\circ} \text{E}$) $4^{\circ} \times 4^{\circ}$,水平分辨率为 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$,垂直方向上分别选取500 m、1500 m、3000 m三个高度层次作为模拟初始高度。暴雨增幅前整个空间的轨迹初始点为75个,模拟其后向追踪5天的运动轨迹。

500 m、1500 m、3000 m三个高度模拟都得到600条轨迹,采用簇分析方法对所得轨迹进行聚类以便能更直观清晰地看出轨迹分布。下面将分别讨论500 m、1500 m、3000 m三个高度层次上的水汽输送情况。

5.1.2 模拟轨迹路径分析

以1500 m和3000 m高度为例来详细说明,通过分析TSV(图4a和图4c)发现,都在3条以内迅速增长,因此1500 m和3000 m高度上模拟出的轨迹都聚类为3条。1500 m高度上的3条路径:一是孟加拉湾水汽经中南半岛、南海输送进入我国,二是南海南部水汽向东输送并与第三条 130°E 赤道气流合并,从低压环流的东北侧进入(图4b)。图4c可见,聚类条数少于3条时,TSV迅速增加;若聚类为4条时,TSV又有所增大,说明此时将要合并的两个簇已不太相似,因此3000 m高度上的

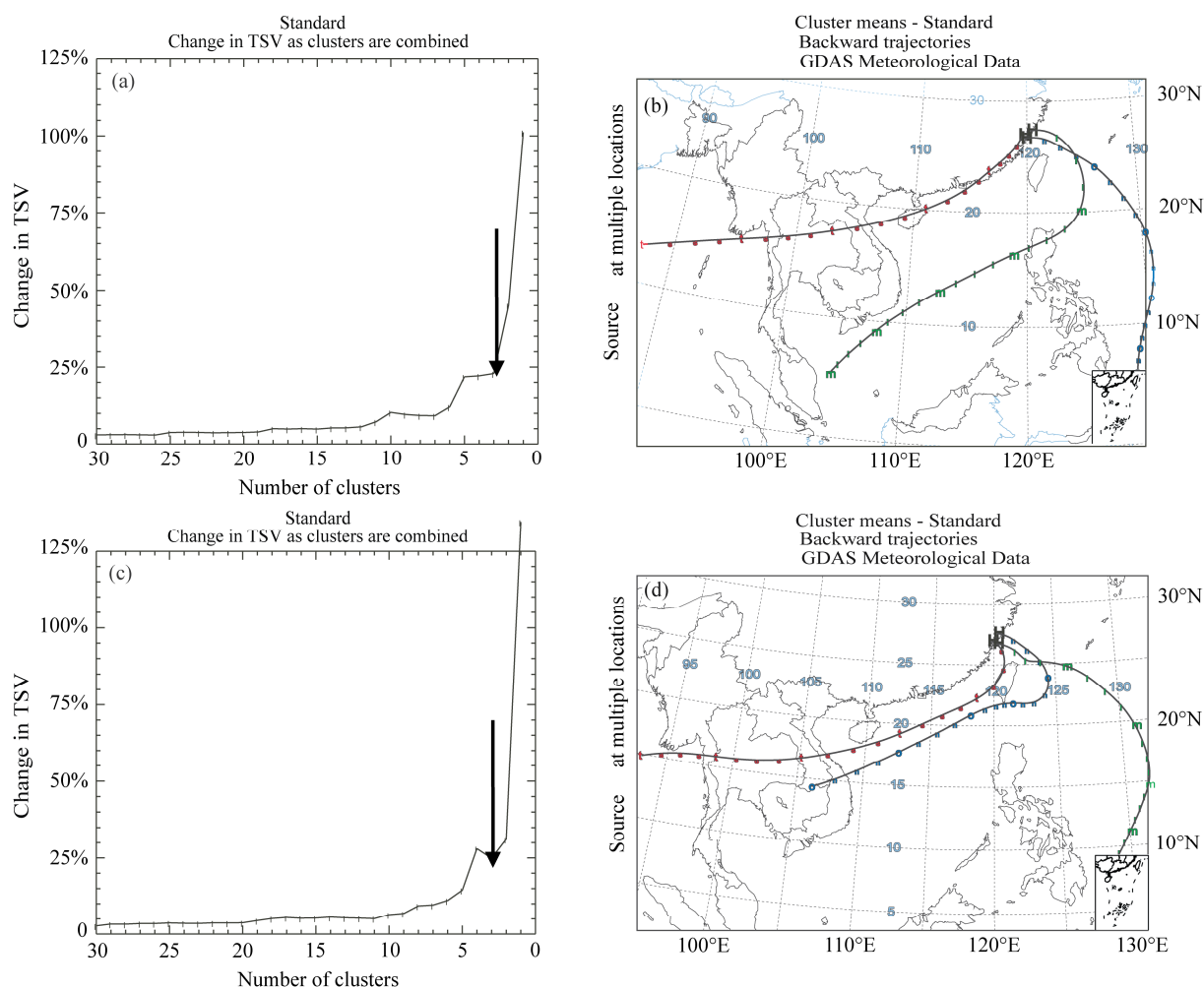


图4 暴雨增幅前各高度上 (a、c) 轨迹聚类空间方差增长率 (横坐标表示聚类条数, 纵坐标表示空间方差增长率) 和 (b、d) 水汽通道空间分布: (a、b) 1500 m; (c、d) 3000 m

Fig. 4 As in Fig. 3, except for stage before the increase in torrential rains from Bilis. (a, b) 1500 m; (c, d) 3000 m

轨迹最终聚类为 3 条, 分别来自于孟加拉湾、南海和 130°E 越赤道气流, 特别引起注意的是, 这三条水汽均未从 TC 南部经过, 而是随着“Bilis”低压环流逆时针旋转行进从 TC 北侧进入 (图 4d), 这是较强的 TC 低压环流与大尺度的偏南气流相互作用的结果。

500 m 高度上, 轨迹在聚类过程中的总空间方差在 4 条以内迅速增长 (图略), 因此确定轨迹最终聚类为 4 条 (图略)。一是孟加拉湾水汽经过南海向东北输送进入雨区; 二是南海水汽向北输送入暴雨区; 三是 130°E 越赤道气流; 四是 140°E 越赤道气流。其中, 130°E 和 140°E 越赤道气流汇合, 从“Bilis”低压环流的东北侧输送进入雨区。

因此, 在暴雨增幅之前, 主要有两类反向的水汽输送通道, 分别是来源于孟加拉湾的西南水汽以

及与 TC 环流相联系的源自西太平洋和南海的东北水汽通道, 尤其是在 3000 m (约 700 hPa) 高度上, 由于此时 TC 仍然维持强盛, 随着“Bilis”逆时针旋转, 西南气流、东南气流输送的水汽都沿着环流中心的强风速带夹卷到环流东北侧。

5.2 暴雨增幅后水汽输送轨迹

5.2.1 轨迹模式模拟方案

暴雨增幅后 (7 月 15 日 02 时至 19 日 02 时), 选取模拟区域如图 1b 所示 (23°~26°N, 112°~116°E) 3.0°×4.0°, 水平分辨率为 1°×1°, 垂直方向上分别选取 500 m、1500 m、3000 m 三个高度层次作为模拟初始高度。暴雨增幅后, 整个空间的轨迹初始点有 60 个, 模拟其后向追踪 4 天的运动轨迹, 每隔 6 小时输出一次轨迹点位置, 并且每 6 小时全部初始点重新后向追踪模拟 4 天。

500 m、1500 m、3000 m 三个高度模拟都得到 400 条轨迹。聚类分析之后再采用公式 (1) 计算出暴雨增幅前、后各个通道上的水汽输送贡献率 (表 2)。下面将分别讨论 500 m、1500 m、3000 m 三个高度层次上的水汽输送情况。

5.2.2 模拟轨迹路径分析

以 1500 m 和 3000 m 高度为例来详细说明, 通过分析总空间方差的变化 (图 5a 和图 5c) 发现 1500 m 和 3000 m 高度上分别在 3 条和 4 条以内迅速增长。但进一步分析 3000 m 高度上对应的拉格朗日全轨迹分布图 (图略), 该高度上的 4 支水汽通道中有一支仅由 6 条轨迹聚类形成, 与 400 条轨迹相比个数较少, 可以考虑忽略, 因此 1500 m 和 3000 m 高度上模拟出的轨迹都聚类为 3 条。1500 m 高度上的 3 条路径: 一是孟加拉湾水汽经中南半

岛、南海输送进入我国, 是主要的水汽来源, 占 58.4% (表 2); 二是南海北部; 三是 130°E 越赤道气流, 来自南海南部和 130°E 越赤道气流的水汽顺着 TC 逆时针旋转, 从低压环流的西北侧汇入暴雨区 (图 5b)。3000 m 高度上也有 3 条路径, 分别来自于孟加拉湾、125°E 和 130°E 越赤道气流, 其中孟加拉湾水汽是该层最主要的水汽输送来源, 占 44.4% (表 2), 来自西太平洋的两支水汽也是随着“Bilis”环流逆时针旋转进入 (图 5d)。

500 m 高度上模拟共得到 400 条轨迹, 通过分析总空间方差的变化 (图略), TSV 在 2 条以内迅速增长, 因此确定第一阶段模拟出的轨迹最终聚类为 2 条。500 m 高度上在暴雨增幅阶段的水汽来源有 2 条: 一是孟加拉湾水汽途径中南半岛和南海, 最后输送进入华南地区, 这是此次暴雨的最主要水

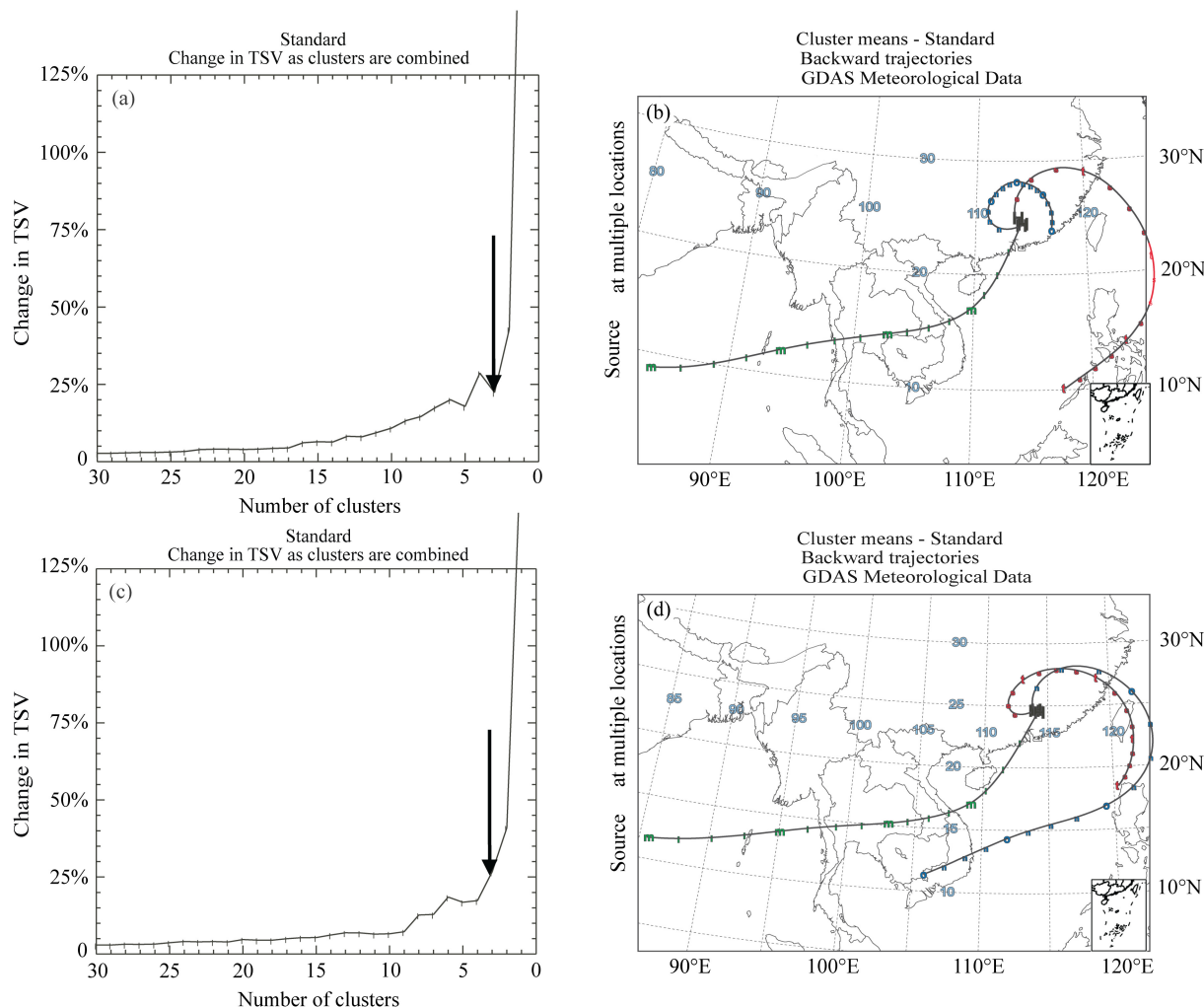


图5 暴雨增幅后各高度上 (a、c) 轨迹聚类空间方差增长率 (横坐标表示聚类条数, 纵坐标表示空间方差增长率) 和 (b、d) 水汽通道空间分布: (a、b) 1500 m; (c、d) 3000 m

Fig. 5 As in Fig. 3, except for stage after the increase in torrential rains from Bilis. (a, b) 1500 m; (c, d) 3000 m

汽输送通道, 占该层水汽贡献的 75.7% (表 2); 二是西太平洋水汽经台湾岛向西北输送, 沿着 TC 环流逆时针旋转行进, 从低压环流的北侧输入暴雨区, 这部分水汽较弱, 占该层水汽贡献的 24.3%。

进一步分析暴雨增幅前、后各通道的水汽贡献 (表 2) 可知, 暴雨增幅前, TC 环流东北侧的水汽输送较强, 且主要输送到 850 hPa 以上大气, 越往高处比重越大, 这主要是由于此时 TC 环流强度维持, 环流中心东侧的强风速带夹卷大量水汽聚集到环流北侧; 暴雨增幅后, 孟加拉湾西南气流输送的水汽比重逐渐增强, 在 500 m、1500 m 上分别由增幅前的 43.3%、41.9% 增加到 75.7%、58.4%, 因此源自孟加拉湾西南气流输送的低纬水汽对降水显著增幅起重要作用, 此次 TC 暴雨增幅与西南季风增强、季风涌的爆发关系密切。在 3000 m 高度, 虽然暴雨增幅之前孟加拉湾水汽贡献 (56.7%) 比暴雨增幅后 (44.4%) 略大, 但是在暴雨增幅之前, 源自孟加拉湾的水汽未从 TC 南部流入, 而是随着 “Bilis” 低压环流逆时针旋转进入环流中, 加上运行路径越长, 携带的水汽量明显减少。

表 2 暴雨增幅前、后三个高度层各通道的水汽贡献 (加粗字体表示该部分水汽是从 TC 环流北侧进入雨区, 其余表示该部分水汽是从 TC 环流偏南侧进入雨区)

Table 2 Water vapor contribution of each channel at three levels before and after rainstorm amplification respectively (Bold values indicate that water vapor enters the north of TC circulation, while the other enters the south)

	高度层	水汽贡献			
		孟加拉湾通道	南海	120°~130°E 越赤道气流	140°E 越赤道气流
暴雨增幅前	500 m	43.3%	13.7%	17.9%	25.0%
	1500 m	41.9%	35.8%	22.3%	/
	3000 m	56.7%	17.1%	26.2%	/
暴雨增幅后	500 m	75.7%	/	24.3%	/
	1500 m	58.4%	17.8%	23.8%	/
	3000 m	44.4%	23.0%	32.6%	/

因此, TC 环流北侧水汽输送对第一阶段 (暴雨增幅前) 的降水贡献较大, 且主要输送到 850 hPa 以上大气, 越往高处比重越大, 这主要是由于此时 “Bilis” 仍较为强盛, 强的气旋性环流与大尺度的偏南气流相互作用, 使得偏南气流输送的水汽随着 “Bilis” 环流中心的强风速带逆时针旋转由环流东北侧输入雨区, 是该低压环流与西南季风相互作用的结果, 各通道气流登陆后由于地形的影响有不同

程度抬升, 水汽损失较大。在第二阶段 (暴雨增幅后), 孟加拉湾西南气流输送的水汽比重逐渐增强, 在 850 hPa 以下尤为明显, 500 m 高度上由之前的 43.3% 增幅到 75.7%, 1500 m 高度上由 41.9% 增至 58.4%, 这是由于此时西南季风增强, 孟加拉湾西南气流输送的水汽比重增强, 输送充沛的水汽、潜热进入暴雨区, 有利于 TC 暴雨的维持和增强。可见, 低压环流南侧的西南风是更为直接和重要的水汽输送, 孟加拉湾气流在后期的增强对造成此次暴雨增幅的形成和发展起重要作用。

6 与欧拉水汽输送分析方法对比

选取 “Bilis” 活动期间 1500 m 层次上 (约 850 hPa) 的欧拉水汽输送分析方法与拉格朗日方法比较, 图 6 是 9~18 日 “Bilis” 活动期间 850 hPa 水汽通量分布, 欧拉流场 TC 环流一直与一条显著水汽输送带相联结, 水汽自索马里经阿拉伯海、孟加拉湾和南海输送到我国东南部, 汇入 TC 环流水汽的多少主要受索马里、孟加拉湾水汽向东输送的影响, 但无法看出水汽是通过何种途径从洋面输送进入暴雨区。然而, 由拉格朗日全轨迹分布图 (图略), 并结合水汽贡献 (表 1) 可以看出, 暴雨区水汽贡献最大的一支是索马里越赤道气流的向东输送, 占该层水汽贡献的 48.3%; 其次是孟加拉湾气流, 占 23.6%; 较弱的是 120°E 越赤道气流和西太平气流。

可见, 欧拉方法常用的水汽通量图无法准确确定水汽输送通道, 而拉格朗日后向轨迹追踪的方法可以克服这一缺点, 也可以更加客观定量地分析出各个来向水汽的比重 (表 1)。

7 主要结论

本文首先通过水汽收支方程和各边界水汽通量的计算, 分析了 0604 号热带风暴 “Bilis” 的水汽收支状况; 然后利用 NOAA 轨迹模式 HYSPLIT v4.8 模拟 TC 整个生命史及暴雨增幅前后的气团运动轨迹, 并对水汽输送的贡献做了定量分析, 主要结论如下:

(1) “Bilis” 暴雨增幅前的水汽主要来源于东边界; 后期西南季风、越赤道气流增强, 西、南边界的水汽输送随之增大, 这是造成此次暴雨增幅的重要原因, 后期水汽主要来源于西、南边界。

(2) “Bilis” 整个生命过程中主要有三条水汽输

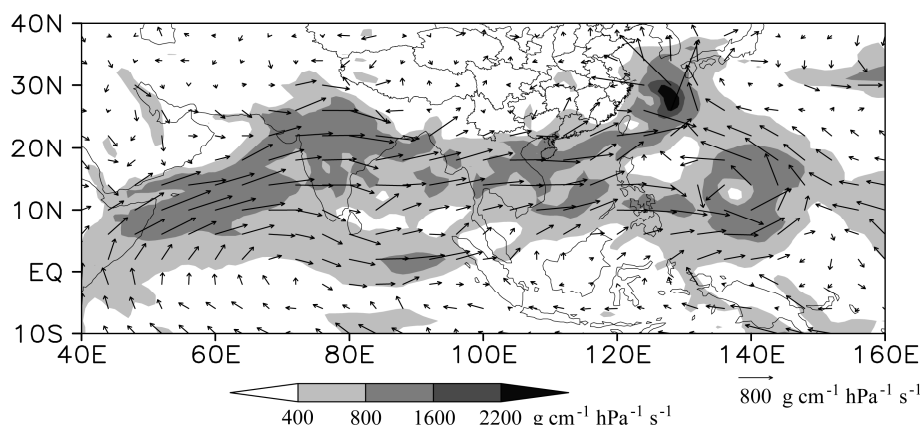


图6 9日08时至18日08时850 hPa水汽通量分布(单位: $\text{g cm}^{-1} \text{hPa}^{-1} \text{s}^{-1}$), 阴影表示水汽通量 $\geq 400 \text{ g cm}^{-1} \text{hPa}^{-1} \text{s}^{-1}$ 的区域

Fig. 6 Pentad-averaged 850-hPa vapor transportation flux from 0800 BT 9 to 0800 BT 18 Jul 2006 (units: $\text{g cm}^{-1} \text{hPa}^{-1} \text{s}^{-1}$). Shading: flux $\geq 400 \text{ g cm}^{-1} \text{hPa}^{-1} \text{s}^{-1}$

送通道: ① $40^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{E}$ 索马里急流通道, 经阿拉伯海、孟加拉湾, 跨越中南半岛和南海北部向东北方向输送进入暴雨区; ② $80^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$ 孟加拉湾通道, 跨越中南半岛输送进入我国南部; ③ 120°E 越赤道气流—东太平洋通道, 这部分水汽随着“Bilis”低压环流逆时针旋转行进, 沿着环流中心东侧的强风速带夹卷到气旋环流北侧, 进入暴雨区。其中源自索马里和孟加拉湾的水汽输送比重很大。

(3) 采用更细致地 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 资料分析“Bilis”暴雨增幅前后的主要水汽通道及水汽贡献率, 发现主要存在两类基本反向的水汽输送通道, 一条是与西南季风相联系的偏南水汽通道, 即孟加拉湾的水汽输送, 这是最主要的水汽来源; 另一条是与 TC 环流相联系的源自南海和西太平洋的东北水汽通道, 是偏南水汽随着 TC 逆时针旋转汇入的, 是低压环流与偏南风相互作用的结果。其中, 偏南水汽通道的水汽大部分输送到 850 hPa 以下的低层, 而南海和西太平洋的东北水汽主要输送到暴雨区上空 850 hPa 以上。

(4) 暴雨增幅前, 自 TC 环流东北侧进入的水汽对降水贡献较大, 且主要输送到 850 hPa 以上大气, 越往高处比重越大, 这可能是由于此时“Bilis”较为强盛, 强的气旋性环流与大尺度的偏南气流相互作用, 使偏南气流输送的水汽随着 TC 逆时针旋转由环流东北侧输入雨区; 暴雨增幅后, 中低层孟加拉湾的西南气流水汽输送比重显著增大, 这是由于西南季风增强, 季风涌爆发, 孟加拉湾西南气流增强, 输送充沛的水汽、潜热进入暴雨区, 有利于“Bilis”暴雨的维持和增强, 因此孟加拉湾西南气流输送的低纬水汽对此次 TC 暴雨增幅的形成、发

展起重要作用, 此次暴雨增幅与孟加拉湾气流增强、季风涌爆发有密切关系。

参考文献 (References)

- Brimelow J C, Reuter G W. 2005. Transport of atmospheric moisture during three extreme rainfall events over the Mackenzie River basin [J]. *J. Hydrometeor.*, 6 (4): 423–440.
- Chen T C. 1985. Global water vapor flux and maintenance during FGGE [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 113 (10): 1801–1819.
- 丁一汇, 王笑芳. 1988. 1983 年长江中游梅雨期的热源和热汇分析 [J]. *热带气象学报*, 4 (2): 134–145.
- Ding Yihui, Wang Xiaofang. 1988. An analysis of distribution of apparent heat sources and sinks over the middle reaches of the Yangtze River during the Meiyu season in 1983 [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 4 (2): 134–145.
- 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 Y H, Hu G Q. 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.
- 丁一汇. 2005. 高等天气学 [M]. 北京: 气象出版社, 585pp.
- Ding Yihui. 2005. *Advanced Synoptic Meteorology (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 585pp.
- 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 (2): 295–308.
- 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.
- 马京津, 高晓清. 2006. 华北地区夏季平均水汽输送通量和轨迹的分析 [J]. *高原气象*, 25 (5): 893–899.
- Ma Jingjin, Gao Xiaqing. 2006. The transportation paths of water vapor and its relation to climate change over North China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 25 (5): 893–899.
- Makra L, Matyasovszky I, Guba Z, et al. 2011. Monitoring the long-range

- transport effects on urban PM_{10} levels using 3D clusters of backward trajectories [J]. *Atmos. Environ.*, 45 (16): 2630–2641.
- 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.
- 孙建华, 赵思雄. 2000. 登陆台风引发的暴雨过程之诊断研究 [J]. *大气科学*, 24 (2): 223–237. Sun Jianhua, Zhao Sixiong. 2000. Diagnoses and simulations of typhoon (Tim) landing and producing heavy rainfall in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 24 (2): 223–237.
- Tao S Y, Chen L X. 1987. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China [M]. *Review of Monsoon Meteorology*, Oxford University Press, 60–92.
- 王黎娟, 高辉, 刘伟辉. 2011. 西南季风与登陆台风耦合的暴雨增幅诊断及其数值模拟 [J]. *大气科学学报*, 34 (6): 662–671. Wang Lijuan, Gao Hui, Liu Weihui. 2011. Diagnosis and numerical simulation of increased torrential rainfall associated with a landfalling typhoon coupled with southwest monsoon [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (6): 662–671.
- 许映龙, 高拴柱, 刘震坤. 2005. 台风云娜陆上维持原因浅析 [J]. *气象*, 31 (5): 32–36. Xu Yinglong, Gao Shuazhu, Liu Zhenkun. 2005. Cause analysis of maintenance of typhoon Ranim on land [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 31 (5): 32–36.
- 叶成志, 李昀英. 2011. 热带气旋“碧利斯”与南海季风相互作用的强水汽特征数值研究 [J]. *气象学报*, 69 (3): 496–507. Ye Chengzhi, Li Yunying. 2011. A numerical study of the characteristics of strong moisture transport as a result of the interaction of tropical storm Bilis with the South China Sea monsoon [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 69 (3): 496–507.
- 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.