

任伟,任燕,李兰兰.基于 HYSPLIT 模式的济南机场一次暴雨过程的水汽输送特征分析[J].海洋气象学报,2019,39(1): 116-122.

REN Wei, REN Yan, LI Lanlan. Analysis of water vapor transport characteristics during a torrential rain at Jinan Airport based on the HYSPLIT model[J]. Journal of Marine Meteorology, 2019, 39(1): 116-122. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.01.012. (in Chinese)

基于 HYSPLIT 模式的济南机场一次暴雨过程的水汽输送特征分析

任伟¹,任燕²,李兰兰³

(1.民航山东空管分局气象台,山东 济南 250107;2.山东省气象局大气探测技术保障中心,山东 济南 250031;3.山东省气象服务中心,山东 济南 250031)

摘要: 利用 NCEP 再分析资料,结合 HYSPLIT 轨迹模式对 2018 年 6 月 25 日发生在济南遥墙国际机场的一次大暴雨过程的水汽条件及输送过程进行分析。结果表明:此次大暴雨的水汽输送通道主要有 3 支,一支是源自对流层中层的西北气流输送,另一支是西太平洋上副热带高压边缘东南气流输送,第三支是南海上空向北的气流输送,三支通道中,西太平洋通道和南海通道对暴雨的水汽贡献最大,分别为 46% 和 42%,来自西北通道的水汽输送相对较少,它对暴雨的水汽贡献仅为 12%;进一步的分析表明,在 850 hPa 以下的对流层底部,来自西太平洋通道的水汽输送占据主导地位,而在 700 hPa 以上的对流层中层,则是来自南海通道的水汽输送占据主导地位。

关键词: 暴雨;水汽通量;拉格朗日轨迹;水汽贡献

中图分类号: P458.121.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2019)01-0116-07

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.01.012

Analysis of water vapor transport characteristics during a torrential rain at Jinan Airport based on the HYSPLIT model

REN Wei¹, REN Yan², LI Lanlan³

(1. Meteorological Observatory of Shandong Air Traffic Management Sub-bureau CAAC, Jinan 250107, China;
2. Atmospheric Sounding and Technical Support Center of Shandong Meteorological Bureau, Jinan 250031, China;
3. Shandong Provincial Meteorological Service Center, Jinan 250031, China)

Abstract Using NCEP reanalysis data and the HYSPLIT model, the water vapor transport characteristics during a torrential rain on 25 June 2018 at Jinan Yaoqiang International Airport are analyzed. The results show that there are three major water vapor channels for this torrential rain. One is the northwestern air flow in the middle troposphere, another is the southeastern air flow near the western Pacific subtropical high, and the other is the northward air flow from the South China Sea. The water vapor mainly comes from the western Pacific and the South China Sea, and the contribution rate to the torrential rain is 46% and 42%, respectively. The water vapor from the northwestern channel is less, and its contribution rate is only 12%. Further analysis indicates that the water vapor transport by the western Pacific channel dominates at the bottom of the troposphere below 850 hPa, while the water vapor transport by the South China Sea channel dominates in the middle troposphere above 700 hPa.

Key words torrential rain; water vapor flux; Lagrange trajectory model; contribution rate of water vapor

收稿日期:2018-08-29; 修订日期:2018-10-12

基金项目:山东省气象局科研项目(SDYBY2017-03)

作者简介:任伟,男,硕士,工程师,主要从事天气分析预报工作,qixiang20090909@163.com。

引言

水汽输送及其来源作为形成降水的重要条件,一直是气象工作关注的重点。早在 1934 年竺可桢^[1]就提出中国夏季降水与亚洲夏季风的水汽输送有密切关系。吕梅等^[2]发现来自南海和孟加拉湾的水汽输送对华南暴雨的形成有重要影响。梁萍等^[3]指出华北夏季暴雨的水汽主要来自西太平洋和中高纬西风气流的输送。石文静和肖子牛^[4]探讨了近 60 年来索马里急流越赤道水汽输送与我国初夏降水的关系,发现当索马里急流越赤道水汽输送减弱时,华北地区 6 月份降水明显偏少,而同时期华南南部的降水则明显增多。苗长明等^[5]研究认为江南南部初夏雨季的直接水汽源位于青藏高原南侧的水汽辐散区,经向水汽输送和纬向水汽输送的演变对雨季的起讫有重要意义。钱正安等^[6]梳理总结了西北干旱区暴雨水汽输送的研究进展。杨柳等^[7]讨论了中国东部季风区夏季四类雨型的水汽输送特征及差异。需要注意的是上述研究大多是通过水汽通量的分析方法得出水汽输送路径,由于大气风场和水汽通量具有瞬变特征,因此上述方法在研究水汽输送过程中气团的空间位置和物理量随时间的变化时会比较困难,另外该方法也无法定量分析各水汽源地对降水的水汽输送贡献^[8-9]。

近年来,随着拉格朗日气流轨迹模式(HYSPLIT)的发展,应用拉格朗日方法诊断分析水汽输送的工作正逐渐增多。STOHL and JAMES^[10]、BERTÒ et al.^[11]、BRIMELOW and REUTER^[12]利用拉格朗日方法分别诊断分析了欧洲中部、特伦蒂诺地区和马更些河流域极端降水的水汽来源。江志红等^[13]和 杨浩等^[14]利用拉格朗日轨迹模式 HYSPLIT 分析了江淮梅雨和淮北雨季的水汽输送特征,并对比了两者的差异。江志红等^[15]还利用该模式全面分析了 1998 年长江流域大洪涝期间的水汽输送情况,发现此次长江流域夏季强降水的水汽主要来源于印度洋、南海—孟加拉湾和太平洋。李莹等^[16]使用拉格朗日方法研究了华南前汛期异常年水汽输送特征,发现锋面降水阶段来自西太平洋的水汽总是偏多,来自阿拉伯海和孟加拉湾的水汽总是偏少。孙力等^[17]通过轨迹模式 HYSPLIT 发现东北暴雨的主要水汽输送通道有三支,三支通道中来自太平洋的水汽输送最为重要。

暴雨是影响民航飞行安全的重要天气之一,暴

雨期间的强降水往往导致机场跑道湿滑,道面摩擦系数减小,严重威胁飞机的起飞和着陆安全,此外暴雨所伴随的低云、低能见度及低空下沉气流也是影响飞行安全的重要天气要素。济南遥墙国际机场(以下简称“济南机场”)地处中纬度地区,属暖温带大陆性季风气候,夏季受副热带高压影响,多暴雨天气,全年近 30% 的降水量由暴雨造成。充沛的水汽是形成暴雨的必要条件,源源不断的水汽输送是暴雨的重要条件之一,因此探讨暴雨的水汽源地及水汽输送路径对暴雨的分析和预报就显得特别重要。2018 年 6 月 25 日济南机场出现一次大暴雨天气过程,本文拟引入 NOAA 开发的拉格朗日气流轨迹模式(HYSPLIT)对此次大暴雨过程的水汽输送条件进行定量分析,以期加深对此大暴雨的认识。

1 资料与方法

1.1 资料

本文主要利用 NCEP 的 6 h 一次、水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的再分析资料,济南机场自动观测系统(AWOS)资料及 GDAS 资料(时间分辨率 3 h,水平分辨率 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$)。其中 GDAS 资料是利用全球资料同化系统将 NCEP 资料同化计算得到的结果,NOAA 的 ARL 将其处理为 HYSPLIT 模式可用格式作为模式的主要输入资料。

1.2 模式简介

HYSPLIT 轨迹模式^[18-19]是由 NOAA 和澳大利亚气象局联合开发,可以用来模拟计算气团的运动轨迹以及复杂的扩散和沉积。HYSPLIT 的分析思路是假定空气团是随着风场运动的,那么空气团的轨迹就是其在空间和时间上的积分。气团所在位置的矢量速度在空间上和时间上都是通过线性插值得出,具体计算公式如下:

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

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

式中 Δt 是积分时间步长,其大小是变化的(1 min ~ 1 h),满足公式 $\Delta t < 0.75 U_{\max}$, U_{\max} 为最大风速。

1.3 轨迹聚类

对模拟产生的三维运动轨迹进行聚类分析,可以更直观地看出轨迹的空间分布,轨迹聚类的主要思路是按照轨迹路径最接近的原则进行多条轨迹合并分组。即假设开始阶段所有轨迹自成一类,空间方差为 0,然后每次缩小一类,每缩小一类,空间

方差(TSV)就会增大,选择使空间方差增加最小的两类合并。有研究表明轨迹聚类的初始阶段空间方差增加得会比较快,之后空间方差增加变得缓慢,当所有轨迹分成一定数量的组后再进一步合并,空间方差增加又会再次变大,我们把空间方差增加再次变大的点作为轨迹聚类分析过程的结束点。轨迹聚类更详细的方法介绍参见文献[20-21]。

1.4 水汽贡献定义

计算水汽输送贡献率^[12]定义如下:

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^m q_{last}}{\sum_{i=1}^n q_{last}} \times 100\% \quad (3)$$

式中, Q 表示某一类轨迹的水汽输送贡献率, q_{last} 表示空气团的绝对湿度, m 表示某一类轨迹包含的轨迹条数, n 表示总轨迹数。

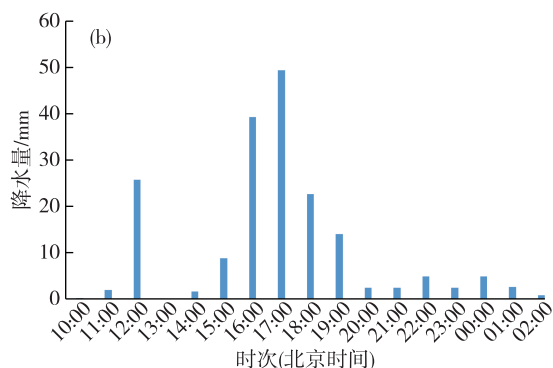
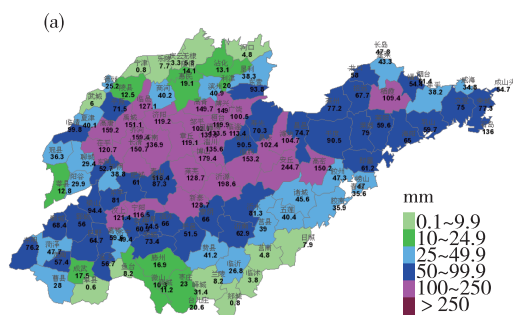


图1 2018年6月25日08时—26日08时山东地区累积降水量分布(a;单位:mm)和济南机场2018年6月25日10时—26日02时逐小时降水量(b;单位:mm)

Fig.1 Accumulated precipitation (a; units: mm) from 08:00 BST on 25 to 08:00 BST on 26 in Shandong Province and hourly precipitation (b; units: mm) from 10:00 BST on 25 to 02:00 BST on 26 June 2018 at Jinan Airport

分析6月25日的高空天气形势可知,在500 hPa天气图(图2a)上,高纬地区为稳定的两槽一脊的环流形势,中低纬地区副高西伸至中国东部沿海,脊线位于长江流域,济南受冷涡底部和副高外围气流的共同影响。由风场资料(图2b)来看,在低层存在一支明显的西南风低空急流(低空风速 $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 定义为急流)从南海北部一直延伸到山东南部,济南地区有明显的风速辐合。另外在垂直速度场上,济南上空850~150 hPa为深厚的垂直上升运动区(图略)。综上分析此次大暴雨是高空冷涡、副高外围气流、低空西南急流和深厚的垂直上升运动共同影响造成的。

2 降水实况与天气形势分析

2018年6月25日,受高空冷涡、副热带高压(以下简称“副高”)和低空急流的共同影响,山东地区普遍出现大到暴雨,部分地区大暴雨,局部地区特大暴雨的灾害性天气,此次暴雨累积雨量之大、影响范围之广,为历史罕见(图1a)。整个降水期间,济南机场累积降雨量为186 mm,达到大暴雨量级,降水时间从25日上午10时一直持续至26日02时,累计降水时间16 h。由逐小时降水量(图1b)来看,小时降雨量呈现出中间多,两头少的分布,强降雨时段主要集中在25日16时至19时,其中最强降雨出现在17时,小时累积降雨量近50 mm,此外受强降水影响,济南机场主导能见度由10 km急剧下降至1 km以下(图略),导致机场出现了短时低能见度天气,对机场进出港航班的正常起降造成了严重影响。

3 水汽输送特征

3.1 水汽通量与水汽通量散度

产生暴雨必须有源源不断的水汽输送,分析暴雨发生期间的水汽输送特征是研究暴雨形成机制的一个重要方法。由于大气中的水汽大部分集中在对流层低层,因此图3主要给出了暴雨期间850 hPa和925 hPa的水汽通量的分布(700 hPa图略)。可以看到,暴雨期间进入山东地区的水汽流主要有两支:一支是热带西南季风气流经孟加拉湾和中南半岛进入中国南海,并继续向北输送进入山东地区,另一支是西太平洋上副高外围的东南风气流,先向西扩展至中国东南沿海再向北输送至山东

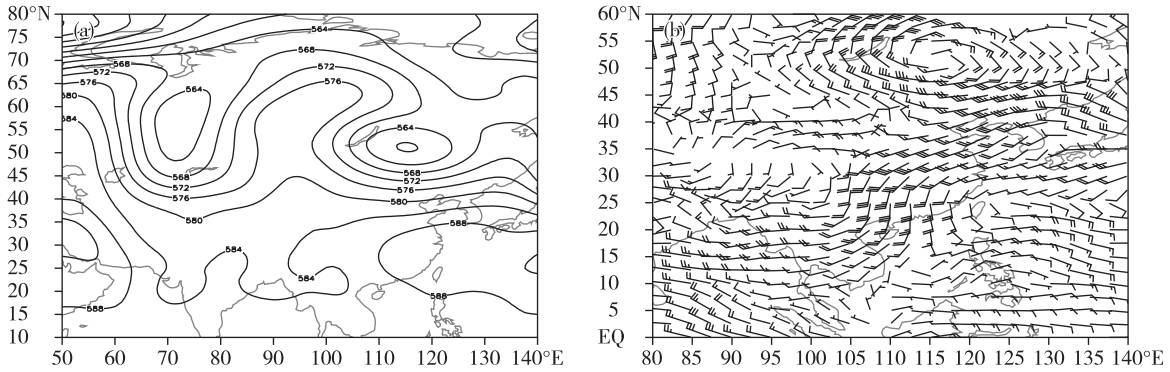


图 2 2018 年 6 月 25 日 500 hPa 平均位势高度 (a; 单位: dagpm) 和 700 hPa 平均风场 (b; 单位: $m \cdot s^{-1}$)
 Fig.2 Mean geopotential height (a; units: dagpm) at 500 hPa and mean wind field (b; units: $m \cdot s^{-1}$) at 700 hPa on 25 June 2018

地区。850 hPa(图 3a)上两支气流在山东西南侧汇聚加强形成一个水汽通量的显著大值带,与 850 hPa

相比,925 hPa(图 3b)上水汽通量显著大值带的位置要明显偏东一些。

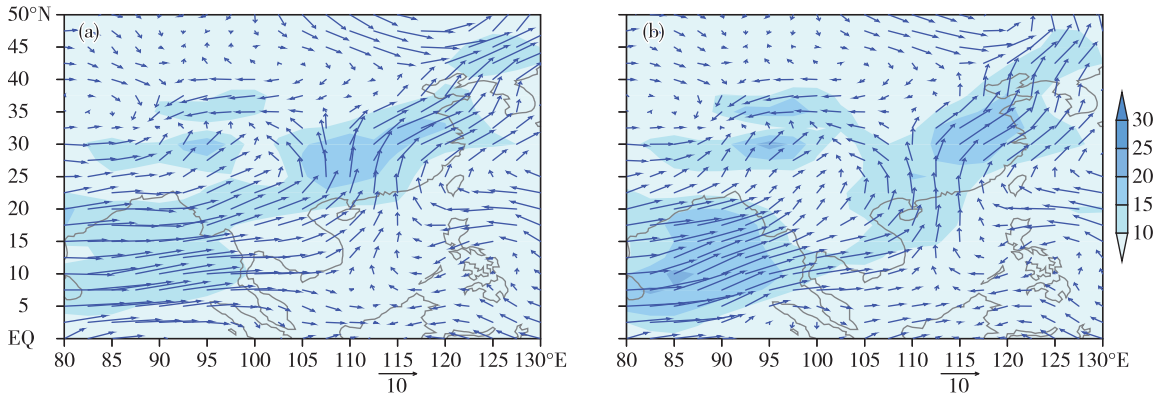


图 3 2018 年 6 月 25 日平均水汽通量(a. 850 hPa, b. 925 hPa; 单位: $g \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$)
 Fig.3 Mean water vapor flux on 25 June 2018(a. 850 hPa, b. 925 hPa; units: $g \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$)

图 4 是大暴雨期间的水汽通量散度,由图中可以看到,山东及其以东洋面在暴雨期间是一个明显的水汽通量散度负值中心,即存在水汽辐合中心,因此该区域是水汽“汇区”,并且随着高度层的降低,水汽辐合的大值中心明显向山东西部扩展。另外大暴雨期间,在低纬度的孟加拉湾东部也存在一个明显的水汽辐合中心,该水汽辐合中心的出现在一定程度上抑制了孟加拉湾地区对外的水汽输送,并且这种抑制作用在对流层底部(图 4b)可能更强。

3.2 水汽输送的轨迹分析

为进一步定量分析大暴雨的水汽输送条件,引入拉格朗日轨迹模式(HYSPLIT),在济南机场($37^{\circ}N, 117^{\circ}E$)上空选取 925 hPa、850 hPa、700 hPa 和 500 hPa 作为气团后向轨迹模拟的起始高度。对大暴雨期间的水汽输送轨迹进行 96 h 后向模拟,通过轨迹聚类分析方法,可以比较清晰地确定大暴雨

的水汽来源。图 5a 是轨迹聚类过程的空间方差增长率,可以看到轨迹聚类的空间方差增长率在聚类结果小于 3 条后迅速增长,故确定模拟出的轨迹最终聚类为 3 条。图 5b 是大暴雨期间济南机场上空的 3 条水汽输送通道,通道 1(西北输送通道)主要来自我国西北地区,三支通道中该通道所占的轨迹数最少,仅占总轨迹数的 19%;通道 2(南海输送通道)起源于南海北部,途经华南、华中并向北输送至济南机场,南海通道包含的轨迹数占总轨迹数的 47%,是所有输送通道中轨迹数最多的一支;通道 3(西太平洋输送通道)是西太平洋上副高边缘的东南气流,向西输送至长江流域,然后再向北到达济南机场上空,该通道的轨迹数占总轨迹数的 34%。

对比不同通道输送过程中高度和湿度演变情况(图 6a、b),可以发现,南海通道(通道 2)和西太平洋通道(通道 3)主要来自 850 hPa 以下的行星边

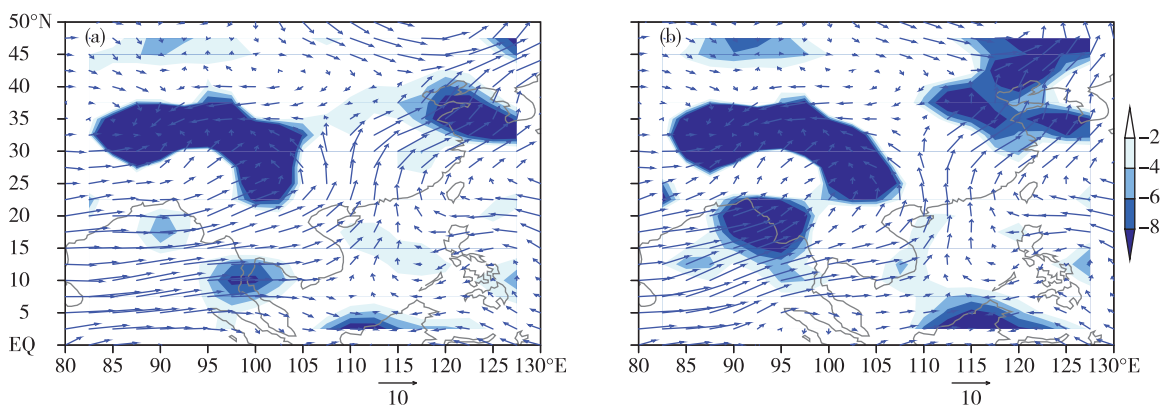


图4 2018年6月25日平均水汽通量散度(a. 850 hPa, b. 925 hPa; 单位: $10^{-6} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
 Fig.4 Mean water vapor flux divergence on 25 June 2018 (a. 850 hPa, b. 925 hPa; units: $10^{-6} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

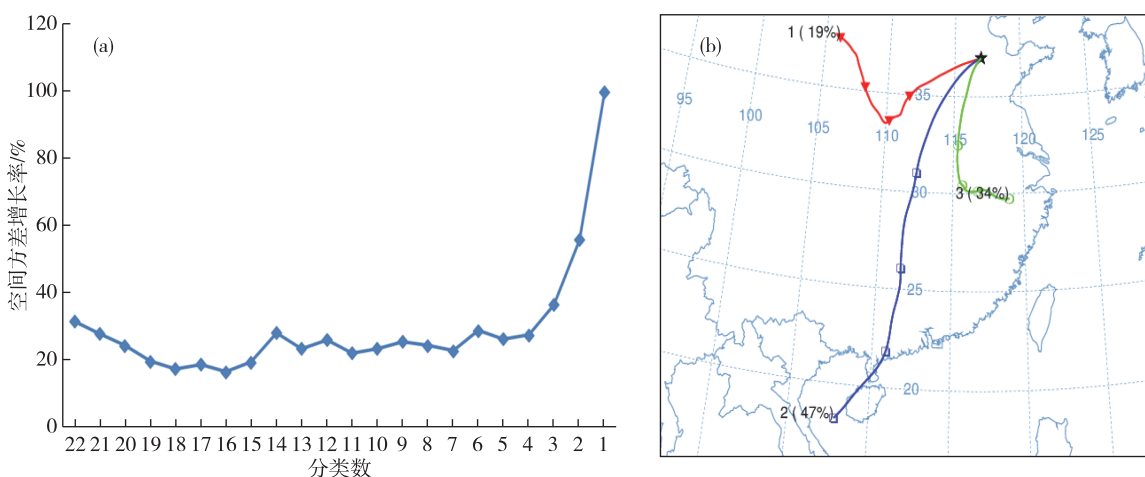


图5 暴雨水汽轨迹聚类空间方差增长率(a)和水汽输送通道空间分布(b)
 Fig.5 Growth rate of TSV (total spatial variance) (a) and main water vapor channels (b)

界层,由于近地层的蒸发旺盛,因此通道上所携带的水汽要远多于源自对流层中层的西北通道(通道1)。南海通道在输送过程中由于下垫面地形的强迫抬升,气团的高度有明显的抬升,湿度有明显的下降;西太平洋通道由于输送过程中途经的地形较为平坦,所以其高度和湿度的变化比较平缓;西北

通道的气团主要来自对流层中层,气团携带的水汽较少,是一支明显的干冷空气,在输送过程中沿途下沉侵入济南机场上空。

为了进一步定量区分不同输送通道的水汽贡献,用公式3计算了各通道对暴雨的水汽输送贡献率(图6c)。从计算结果可以发现此次暴雨过程中,

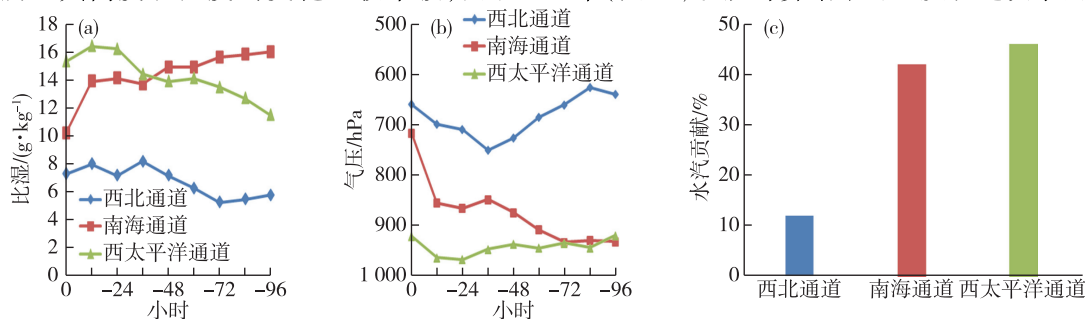


图6 气块输送过程中比湿变化(a)、高度变化(b)及不同通道水汽输送贡献率(c)
 Fig.6 Change in specific humidity (a) and height(b) in the process of air parcel transport and contribution rate of each water vapor channel (c)

西太平洋通道的水汽输送贡献最大,其输送的水汽占整个输送气流的 46%,其次是南海通道,其对暴雨的水汽输送贡献为 42%,西北通道的气团由于来自干冷的对流层中层,湿度较小,其对降水的水汽贡献仅有 12%。

进一步分析 3 条水汽输送通道在机场上空各层次的水汽输送贡献(表 1),可以发现机场上空 500 hPa 的水汽主要来自西北通道和南海通道,其中南海通道的水汽贡献高达 64.5%,700 hPa 和 850 hPa 的水汽虽然都是来自西北通道、南海通道和西太平洋通道,但需要注意的是,在 700 hPa 高度层上来自南海通道的水汽输送占据主导地位(水汽贡献 62%),而 850 hPa 高度层上则是来自西太平洋通道的水汽输送占据主导地位(水汽贡献 63%),925 hPa 层上 75% 的水汽来自西太平洋通道,25% 的水汽来自南海通道。

表 1 机场上空 500 hPa、700 hPa、850 hPa 和 925 hPa 层各水汽通道的水汽贡献

Table 1 Contribution rate of each water vapor channel at 500 hPa, 700 hPa, 850 hPa, and 925 hPa over the airport %

高度场/hPa	西北通道	南海通道	西太平洋通道
500	35.5	64.5	0
700	18.0	62.0	20.0
850	11.0	26.0	63.0
925	0	25.0	75.0

4 结论

使用 NCEP 再分析资料结合拉格朗日气流轨迹模式(HYSPLIT)对济南机场 2018 年 6 月 25 日大暴雨过程的水汽输送特征进行分析,得到以下结论:

1)2018 年 6 月 25 日济南机场大暴雨的水汽输送通道主要有 3 条:①来自对流层中层的西北通道;②源自孟加拉湾,向东传播至南海后再向北输送进入中国大陆的南海通道;③源自西太平洋的水汽输送,向西传播后向北伸展的西太平洋通道。其中南海通道和西太平洋通道的输送气流主要来自 850 hPa 以下的对流层低层,是明显的暖湿气流,气流在输送过程中由于下垫面地形的起伏出现了不同程度的抬升过程,西北通道的输送气流主要来自 600 hPa 左右的对流层中层,是一支干冷气流,在输送过程中沿途下沉侵入济南机场上空。

2)大暴雨期间,来自南海通道和西太平洋通道

的水汽输送占据主导地位,两者的水汽输送分别占总水汽输送的 46% 和 42%,西北通道的水汽输送贡献相对较小,仅为 12%。

3)从不同层次的水汽输送情况来看,在 500 hPa 和 700 hPa 高度层上,来自南海通道的水汽输送占据主导地位(水汽贡献大于 60%),而 850 hPa 和 925 hPa 层则是来自西太平洋通道的水汽输送占据主导地位。

参考文献:

- [1] 竺可桢.东南季风与中国之雨量[J].地理学报,1934(1):1-28.
- [2] 吕梅,成新喜,陈中一,等.1994 年华南暴雨期间夏季风的特征及其对水汽的输送[J].热带气象学报,1998,14(2):135-141.
- [3] 梁萍,何金海,陈隆勋,等.华北夏季强降水的水汽来源[J].高原气象,2007,26(3):460-465.
- [4] 石文静,肖子牛.近 60 年索马里急流越赤道水汽输送的变化特征及对中国初夏降水的影响[J].气象,2013,39(1):39-45.
- [5] 苗长明,丁一汇,郭品文,等.水汽输送与江南南部初夏雨季及降水变化的联系[J].气象学报,2015,73(1):72-83.
- [6] 钱正安,蔡英,宋敏红,等.中国西北旱区暴雨水汽输送研究进展[J].高原气象,2018,37(3):577-590.
- [7] 杨柳,赵俊虎,封国林.中国东部季风区夏季四类雨型的水汽输送特征及差异[J].大气科学,2018,42(1):81-95.
- [8] 江志红,梁卓然,刘征宇,等.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,2011,35(2):361-372.
- [9] 任伟.拉格朗日气块追踪分析法在水汽输送研究中的应用[D].南京:南京信息工程大学,2012.
- [10] STOHL A, JAMES P. 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].J Hydrometeorol, 2004,5(4): 656-678.
- [11] BERTÒ A, BUZZI A, ZARDI D. Back-tracking water vapour contributing to a precipitation event over Trentino: a case study[J]. Meteor Z, 2004,13(3):189-200.
- [12] BRIMELOW J C, REUTER G W. Transport of atmospheric moisture during three extreme rainfall events over the Mackenzie River Basin[J]. J Hydrometeorol, 2005,6(4): 423-440.
- [13] 江志红,任伟,刘征宇,等.基于拉格朗日方法的江淮梅雨水汽输送特征分析[J].气象学报,2013,71(2):

- 295-304.
- [14] 杨浩,江志红,刘征宇,等.基于拉格朗日法的水汽输送气候特征分析——江淮梅雨和淮北雨季的对比[J].大气科学,2014,38(5):965-973.
- [15] 江志红,浦建,杨浩,等.1998年长江流域特大洪涝期水汽输送过程的诊断分析[J].大气科学学报,2017,40(3):289-298.
- [16] 李莹,原文杰,徐倩倩,等.华南前汛期降水异常年水汽输送特征分析[J].高原气象,2017,36(2):501-509.
- [17] 孙力,马梁臣,沈柏竹,等.2010年7~8月东北地区暴雨过程的水汽输送特征分析[J].大气科学,2016,40(3):630-646.
- [18] DRAXLER R R, HESS G D. Description of the HYSPLIT_4 modeling system: NOAA Technical Memorandum ERL ARL-224 [R]. Silver Spring, Maryland: Air Resources Laboratory, 1997:1-22.
- [19] DRAXLER R R, HESS G D. An overview of HYSPLIT_4 modeling system for trajectories dispersion, and deposition [J]. Aust Meteor Mag, 1998, 47(4): 295-308.
- [20] 王佳津,王春学,陈朝平,等.基于 HYSPLIT4 的一次四川盆地夏季暴雨水汽路径和源地分析[J].气象,2015,41(11):1315-1327.
- [21] 江志红,梁卓然,刘征宇.拉格朗日气流轨迹模式在气候诊断中的初步应用[C]//中国气象学会.中国气象学会 2011 年年会论文集.厦门:中国气象学会,2011:963.