

于腾飞,李春,石剑.郑州“7·20”极端暴雨的水汽输送特征[J].海洋气象学报,2022,42(3):69-76.  
YU Tengfei, LI Chun, SHI Jian. Analysis on water vapor transport characteristics of “7·20” extreme rainstorm in Zhengzhou[J].  
Journal of Marine Meteorology, 2022, 42(3): 69-76. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.03.007. (in Chinese)

## 郑州“7·20”极端暴雨的水汽输送特征

于腾飞<sup>1</sup>,李春<sup>1,2</sup>,石剑<sup>1</sup>

(1.中国海洋大学海洋与大气学院,山东 青岛 266100; 2.中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室,山东 青岛 266100)

**摘要:** 在亚洲中高纬度“两槽一脊”的稳定环流形势下,西北太平洋副热带高压和台风“烟花”“查帕卡”等共同作用,引导水汽在郑州地区辐合,导致2021年7月19—21日郑州地区出现降水极值超过800 mm的罕见极端暴雨(以下简称为“郑州“7·20”极端暴雨”),造成重大人员伤亡和财产损失。针对此次郑州“7·20”极端暴雨过程,采用HYSPLIT模式追踪其水汽来源和输送特征。结果表明:郑州“7·20”极端暴雨的水汽主要来自北太平洋西部和南海北部,北太平洋西部的水汽受西北太平洋副热带高压和台风“烟花”的共同影响,南海北部的水汽受台风“查帕卡”和“烟花”的共同影响。水汽主要在850 hPa以下高度输送,而来自南海北部的水汽在向北输送的过程中逐渐抬升,临近郑州地区时接近700 hPa。基于HYSPLIT后向追踪的水汽轨迹进行定量计算,得到来自北太平洋西部和南海北部的水汽贡献分别约占73%和27%。

**关键词:** 郑州暴雨;水汽输送;HYSPLIT;台风;水汽轨迹追踪

中图分类号: P458.121.1; P426 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2022)03-0069-08  
DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.03.007

## Analysis on water vapor transport characteristics of “7·20” extreme rainstorm in Zhengzhou

YU Tengfei<sup>1</sup>, LI Chun<sup>1,2</sup>, SHI Jian<sup>1</sup>

(1. College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Physical Oceanography (Ocean University of China), Ministry of Education, Qingdao 266100, China)

**Abstract** Under the stable circulation of two troughs and one ridge in middle and high latitudes of Asia, the western North Pacific subtropical high and Typhoon In-fa and Cempaka lead the water vapor to converge in Zhengzhou, resulting in a rare extreme rainstorm with precipitation extremum more than 800 mm there from 19 to 21 July 2021 (hereinafter referred to as “7·20” extreme rainstorm in Zhengzhou), causing heavy casualties and property losses. The HYSPLIT model is used to track the water vapor source and transport characteristics of this extreme rainstorm process. The results show that the water vapor of “7·20” extreme rainstorm in Zhengzhou mainly comes from the west of the North Pacific and the north of the South China Sea, which are affected by the joint action of the western North Pacific subtropical high and Typhoon In-fa and the synergistic effect of Typhoon Cempaka and In-fa, respectively. The water vapor is mainly transported below 850 hPa, while the water vapor from the north of the South China Sea rises gradually in the process of northward transport and is close to 700 hPa near

收稿日期:2022-05-24; 修订日期:2022-07-06

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFA0607002)

第一作者:于腾飞,男,硕士研究生,主要从事极端降水方面的研究,ytf@stu.ouc.edu.cn。

通信作者:李春,男,博士,教授,从事海气相互作用、东亚季风气候及其可预测性、极端天气气候等方面的研究,lichun7603@ouc.edu.cn。

Zhengzhou. Based on the quantitative calculation of the water vapor trajectory by HYSPLIT backward tracking, it is found that the water vapor contributions from the west of the North Pacific and the north of the South China Sea account for about 73% and 27%, respectively.

**Key words** rainstorm in Zhengzhou; water vapor transport; HYSPLIT; typhoon; water vapor trajectory tracking

## 引言

2021年7月19—21日,郑州地区出现了历史以来极为罕见的极端暴雨天气(以下简称为“郑州‘7·20’极端暴雨”)。郑州地区8个国家级地面气象观测站(以下简称“国家站”)日降水量全部突破建站以来的最大值<sup>[1]</sup>。最大降水量出现在新密市的白寨,达到860.8 mm(19日08时—21日08时),远超新密站的年平均降水量(666.0 mm)<sup>[2]</sup>。郑州站最大1 h降水量达到201.9 mm,突破我国大陆气象站小时降水量的记录,单日降水量达624.1 mm(20日),已接近郑州地区年平均降水量(640.8 mm),极端暴雨引发了严重的城市内涝、河道溃堤、交通瘫痪,造成380人死亡失踪,直接经济损失达到人民币409亿元<sup>[3]</sup>。

充沛的水汽供应是持续性暴雨发生的必要条件。水汽输送的强度、影响范围和持续性对极端暴雨过程极其重要<sup>[4]</sup>。郑州“7·20”暴雨如此极端,其水汽来源和输送特征很值得研究。前人常用欧拉方法研究水汽输送特征,主要分析影响空间范围内流场和比湿的时空分布与变化。学者们基于欧拉方法,通过分析水汽通量、水汽收支等要素对郑州“7·20”极端暴雨进行了深入的研究。苏爱芳等<sup>[1]</sup>指出,暴雨期间西北太平洋副热带高压南侧的东南气流、台风“烟花”北侧的东南气流和黄淮东风切变线东侧的东南气流相叠加,形成连贯的水汽通道,有利于水汽向郑州输送。张霞等<sup>[2]</sup>研究表明,水汽的输送与地形有着密切的关系,太行山、伏牛山沿山一带的水汽辐合最强,显著超过气候态。YIN et al.<sup>[5]</sup>认为,对流系统内部云微物理过程产生的雨水与对流系统上升流区水平输送的雨水相叠加,从而产生地面极端降水。齐道日娜等<sup>[6]</sup>指出来自华东近海海洋属性的气团不断侵入河南地区与大陆暖性气团在河南中北部交汇,两股气团长期对峙有利于暴雨的维持。

除广泛使用欧拉方法外,学者们还开发出多个基于拉格朗日方法重点关注流体质点运动状态的轨迹追踪模式,为水汽输送的研究提供了新的思

路。SODEMANN et al.<sup>[7]</sup>在对格陵兰冬季降水年际变化的研究中,提出了通过蒸发与降水定量分析水汽得失的方法。ZHAO et al.<sup>[8]</sup>采用FLEXPART模式,对2020年7月日本的特大暴雨进行分析并定量计算了各水汽源地的贡献。此外,有学者<sup>[9-15]</sup>采用HYSPLIT、FLEXPART等模式,对我国降水的水汽输送特征做过广泛且深刻的研究,并取得了许多理想的成果。王军等<sup>[16]</sup>通过HYSPLIT模式对郑州7月20日20时的水汽来源及路径进行分析,并指出降水前期3 000 m高度水汽来自我国南部,1 500 m高度水汽来自东南沿海,700 m高度水汽来自日本以南洋面。相较于王军等<sup>[16]</sup>的研究,本文采用HYSPLIT模式并结合欧拉方法对7月19—21日的水汽来源及输送轨迹进行分析,进一步得到气块运动过程中相应物理量随时间的变化,并定量计算出各源地的水汽贡献。

## 1 数据和方法

### 1.1 数据

采用的资料包括:国家气象科学数据中心提供的2021年7月10—30日郑州市8个国家站(郑州、新密、新郑、中牟、荥阳、巩义、登封、嵩山)的逐日降水资料和FY-2气象卫星逐日格点降水资料(水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ );美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)提供的GDAS1资料(水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ ,时间分辨率为3 h)用于输入HYSPLIT模式进行轨迹追踪;欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)提供的ERA5逐小时再分析资料(水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ )用于环流形势的分析;中央气象台台风网提供的台风中心位置和强度资料。

### 1.2 轨迹追踪方案

由7月19—21日累计降水量空间分布(图1a)来看,郑州绝大多数地区的降水量已达到400 mm以上,降水中心在郑州中部,最大降水量出现在新密市的白寨镇。时间分布(图1b)上,8个国家站平均日降水量在20日达到最大,19日和21日的平均日降水量

虽明显小于 20 日,但仍已超过 100 mm,达到大暴雨级别。因此,以累计降水量最大的新密市白寨镇为终点,自 2021 年 7 月 19 日 00 时(世界时,下同)至 2021 年 7 月 21 日 23 时,在 500 m、1 500 m、3 000 m 三层高度上,每隔 1 h 进行一次后向轨迹追踪,追踪时间

为 144 h,得到后向轨迹 216 条。每 1 h 输出一条轨迹点的位置,并插值得到相应位置上的物理属性。因轨迹数目庞大,为了更清晰地看出轨迹的分布,确定水汽的源地,从而引入 HYSPLIT 模式自带的簇分析方法对得到的轨迹进行聚类<sup>[17]</sup>。

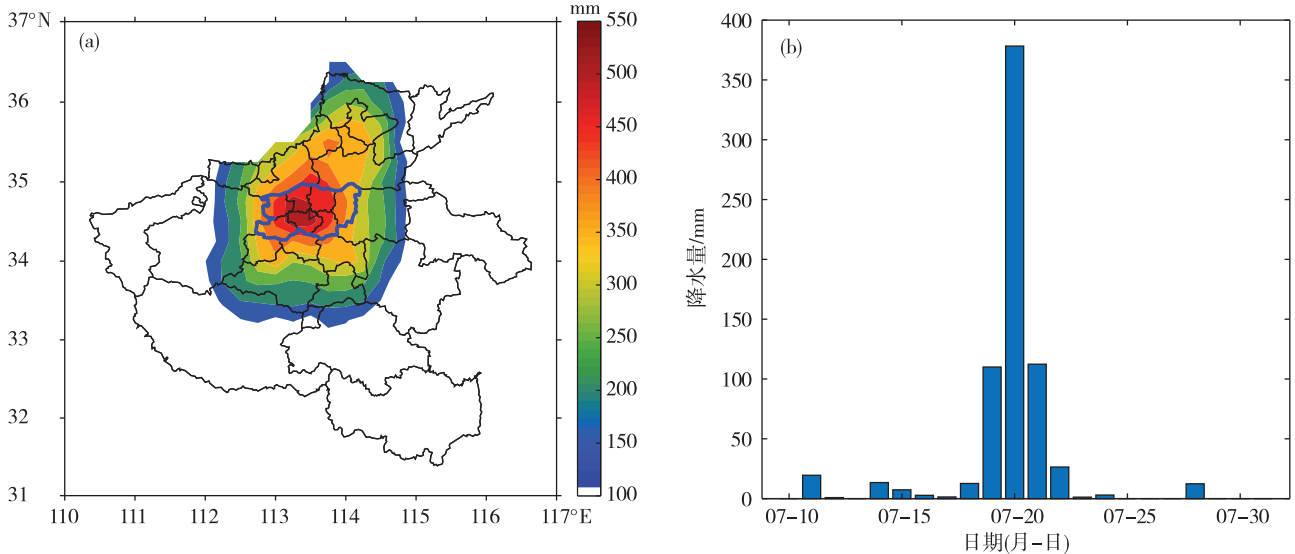


图 1 2021 年 7 月 19—21 日河南累计降水量(a; 色阶,单位:mm,郑州地区界用蓝色实线标出)的空间分布和 7 月 10—30 日郑州 8 个国家级地面气象观测站的平均日降水量时间序列(b)

Fig.1 Spatial distribution of cumulative precipitation in Henan Province (a; color scale, units; mm, the boundary of Zhengzhou is marked with blue solid line) from 19 to 21 July and time series of daily mean precipitation (b) of 8 national meteorological stations in Zhengzhou from 10 to 30 July 2021

### 1.3 某通道水汽贡献的定义

某通道水汽贡献的定义<sup>[18]</sup>:

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

其中  $Q_s$  表示水汽的贡献率; $m$  表示某通道所包含的轨迹数, $n$  表示总轨迹数,本文中  $n = 216$ ,  $q_{\text{last}}$  表示轨迹到达终点(白寨镇)时的比湿。

## 2 环流形势和水汽通量分析

### 2.1 环流概况

暴雨期间(7 月 19—21 日)500 hPa 平均等压面图(图 2a)上,欧亚大陆中高纬度总体呈“两槽一脊”的形势,我国东北部至鄂霍次克海有一较强的阻塞高压。西北太平洋副热带高压(以下简称“副高”)较气候态显著偏北、偏强,588 dagpm 线闭合。850 hPa 平均等压面图(图 2b)上,我国东北部至鄂霍次克海的阻塞高压依然较强,高压深厚,副高较气候态显著西伸,且偏北、偏强,水汽沿副高南部边

缘向河南输送。台风“烟花”和“查帕卡”于 7 月 18 日分别在西太平洋和南海生成,并向西移动(图 2 蓝线)。环流形势总体较为稳定,在台风“烟花”“查帕卡”和副高的共同作用下,向河南输送水汽,有利于暴雨的产生。

### 2.2 水汽通量分析

图 3 给出了 700 hPa、850 hPa 和 925 hPa 三个不同层水汽通量逐日演变情况。暴雨期间,两台风“烟花”和“查帕卡”持续向西移动,由于“烟花”的移动速度小于“查帕卡”,两台风之间的距离逐渐缩小。“烟花”的强度不断增强,而“查帕卡”的强度在 20 日达到最强后登陆减弱。7 月 19 日,700 hPa(图 3a)和 850 hPa(图 3d)上,受副高和台风“烟花”的共同作用,郑州上空的水汽来源为东南方向。而 20—21 日,由于“烟花”和“查帕卡”的位置更加接近而产生共同影响,“烟花”西北部的东北风与“查帕卡”东北部的西南风相辐合,郑州上空的水汽来源转为偏南方(图 3b、c、e、f)。925 hPa(图 3g—i)上,水汽来源始终为东南方向。而由水汽通量散度来看,700 hPa 无明显的水汽辐合区,925 hPa 的辐

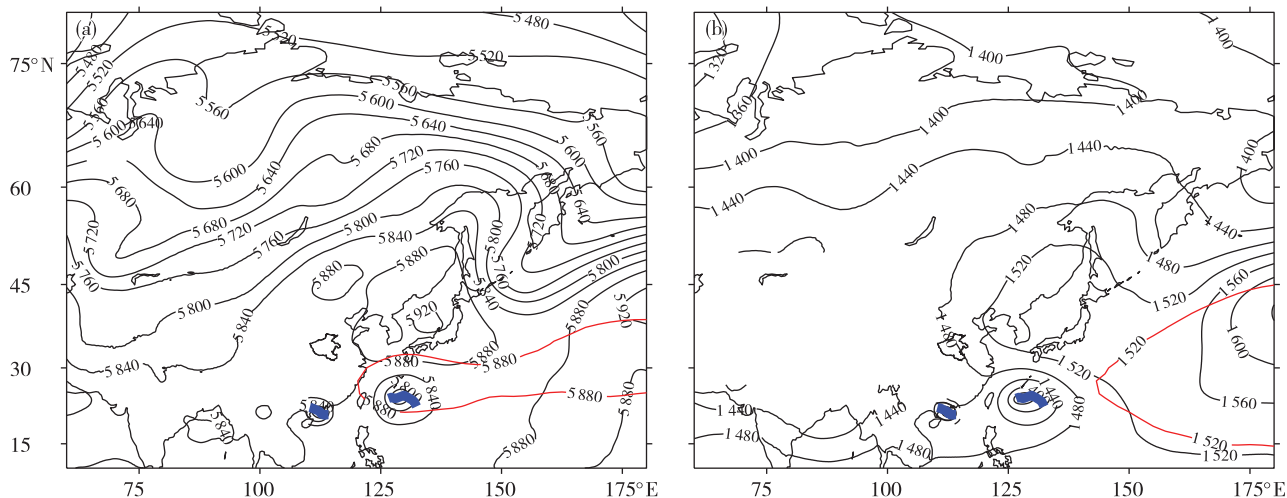


图2 2021年7月19—21日500 hPa(a)和850 hPa(b)平均高度场(黑色实线为等高线,红色实线为气候态5 880、1 520线,单位:gpm,以1981—2010年为气候态;蓝色实线为台风“烟花”“查帕卡”7月18—21日的路径)

Fig.2 Mean geopotential height at 500 hPa (a) and 850 hPa (b) from 19 to 21 July 2021 (black solid line is contour line and red solid line is 5 880 and 1 520 gpm of climatological state with the units of gpm, taking 1981—2010 as the climatological state; blue solid line is path of Typhoon In-fa and Cempaka from 18 to 21 July)

合要强于850 hPa。20日,水汽辐合中心位于郑州上空,对应20日最大降水。21日,水汽辐合中心移出河南,降水过程减弱。

### 3 轨迹追踪

#### 3.1 水汽输送轨迹分析

为准确得到水汽输送过程中气块的空间位置和比湿随时间的变化,对各源地的水汽贡献进行定量分析,按照2.2节中提到的方案进行后向轨迹追踪。

图4为水汽输送轨迹的空间分布,由于轨迹数量较多(216条),为便于观察,每两条轨迹绘制一条,共绘制出108条轨迹。由图可见,轨迹主要来自北太平洋西部和南海北部,其中来自北太平洋西部的轨迹有160条,占总轨迹数的74.07%,来自南海北部的轨迹有56条,占总轨迹数的25.93%。相较于来自北太平洋西部的气块,来源于南海北部的气块到达郑州时,其比湿更小、高度更高(图4b、c),因此北太平洋西部可能是此次降水过程的主要水汽源地。

来自北太平洋西部的气块,其输送轨迹大都与平均副高的南部边缘较为吻合,且随着副高的南北移动,轨迹也相应地变化(图4a)。例如由图4a、图5可见,7月14—15日,副高脊线显著北跳,轨迹(偏蓝色到偏绿色)随之向北延伸;而16—18日,副高脊线缓慢向南移动,轨迹(偏绿色到偏黄色)也向

南回落;20—21日,副高脊线再次北跳,轨迹(深红色到黑红色)再次向北抬伸。副高与轨迹变化的一致性,说明来自北太平洋西部的水汽在输送的过程中持续受到副高的影响。来自南海北部的气块,其轨迹在输送前期(13—14日)与850 hPa高度上1 500 gpm等高线相吻合,在输送中期(15—16日)与850 hPa高度上1 480 gpm等高线相吻合,而随着气块的不断抬升(图4c),在到达郑州前(18日之后),沿着700 hPa高度上3 120 gpm等高线输送。以上说明,来自南海北部的气块在输送过程中也持续受大尺度环流的影响。来自北太平洋西部沿副高边缘的气块主要位于对流层中下部,且在海上输送了较长距离,大部分气块的水汽含量不断增加;而来自南海北部的气块在登陆后不断抬升,在输送过程中持续损失水分(图4b、c)。

由图4a可见,来自北太平洋西部的气块中,受到副高14日大幅北跳并在北方维持的影响(图5),15日从源地出发的气块其轨迹整体更为偏北。而东西方向上较晚出发的气块,其源地更加偏东。13、14日出发的气块,其源地最远接近150°E左右,而15日出发的气块有多条轨迹接近165°E。自18日“烟花”生成以来,其强度不断增加,外围风力逐渐增大。因此,较晚出发的气块在其输送过程中受台风的影响更大,同时输送速度相应加快。由于追踪的时间相同,输送速度的加快导致输送距离的增长,气块的源地也随之更加偏东。

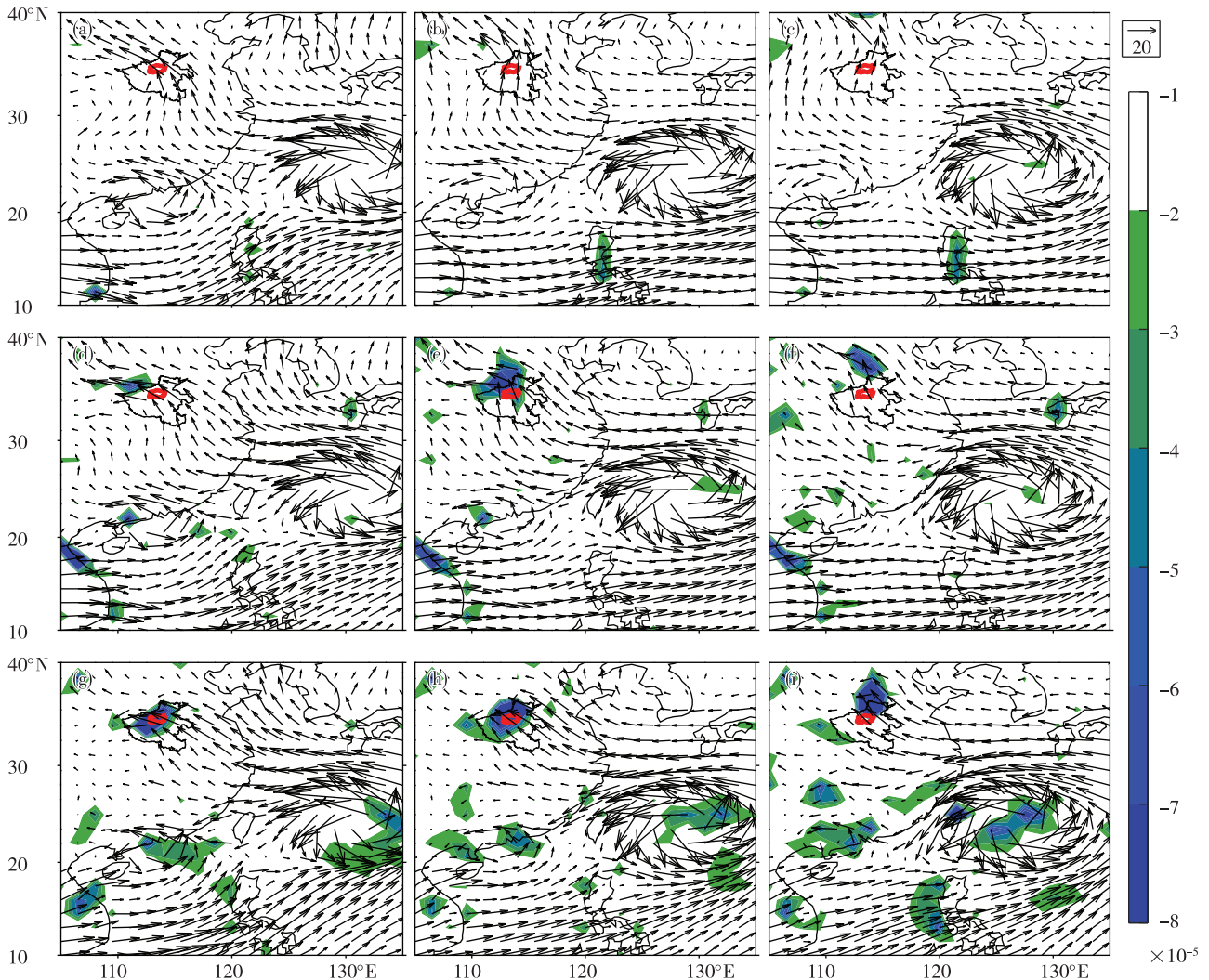


图3 2021年7月19日(a、d、g)、20日(b、e、h)和21日(c、f、i)700 hPa(a—c)、850 hPa(d—f)、925 hPa(g—i)的日均水汽通量(箭头,单位: $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )和水汽通量散度(色阶,单位: $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )

Fig.3 Daily mean water vapor flux (arrow, units:  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ) and its divergence (color scale, units:  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ) at 700 hPa (a—c), 850 hPa (d—f), and 925 hPa (g—i) on 19 (a/d/g), 20 (b/e/h), and 21 (c/f/i) July 2021

### 3.2 轨迹聚类分析

由于轨迹数目较大,为了更清晰地确定水汽通道,并定量计算各水汽源地的贡献,采用簇分析法对216条轨迹进行聚类,最终得到3条水汽通道(图6)。其中通道1和通道2来自北太平洋西部,通道3来自南海北部。通道1有轨迹39条,占总轨迹数的18.06%;通道2有轨迹110条,占总轨迹数的50.92%;二者加起来占总轨迹数的近70%。通道3有轨迹67条,占总轨迹数的31.02%。

每隔12 h对通道标记一次,由于时间间隔相同,故“标记”之间的距离越大,代表着气块的输送速度越快。由此可见,各通道在抵达郑州前,其所含气块的输送速度并不均匀。通道1在水汽源地(北太平洋西部)附近时的输送速度相对较慢。而

当气块接近135°E后,台风“烟花”于18日在132°E左右生成,此时气块处于“烟花”的北部外围,受外围大风的影响,通道1“标记”间的距离大幅增加,气块的输送速度明显提高。而气块经过120°E在东部沿海登陆后,由于距离“烟花”较远,台风的影响减弱,气块的输送速度降低,但仍显著大于源地附近的速度。由于前面提到的副高北跳与台风增强的原因,通道1较通道2更为靠北而当通道2的气块达到135°E左右时“烟花”尚未在海上生成,因此通道2的输送速度并未像通道1一样大幅加快。当“烟花”于18日在海上生成时,通道2已经在东部沿海登陆,距离台风较远,且此时台风强度较弱,受“烟花”的影响程度要弱于通道1。通道1、2虽然位置与方向基本相同,但输送过程中由于台风的生成

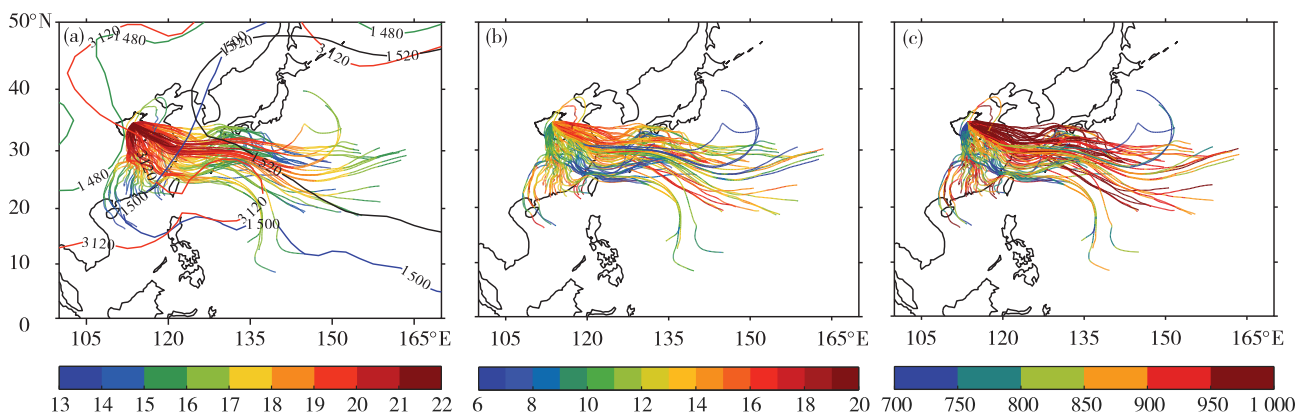


图4 轨迹的空间分布(a中轨迹颜色代表气块到达相应位置时的日期,黑色实线代表7月13—21日850 hPa平均等1 520 gpm线,蓝色实线、绿色实线分别代表13、16日850 hPa日均等1 500、1 480 gpm线,红色实线代表19日750 hPa日均等3 120线;b中轨迹颜色代表气块比湿,单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;c中轨迹颜色代表气块距离地面高度,单位:hPa)

Fig.4 Spatial distribution of track (in Fig.4a, the color of the track represents the corresponding date when the air parcel reaches a specific position, black solid line represents average 1 520 gpm line at 850 hPa from 13 to 21 July, blue and green solid lines represent daily average 1 500 and 1 480 gpm lines at 850 hPa on 13 and 16 July, respectively, and red solid line represents daily average 3 120 gpm line at 750 hPa on 19 July; in Fig.4b, the color of the track represents specific humidity of air parcel, units:  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; in Fig.4c, the color of the track represents height of air parcel, units: hPa)

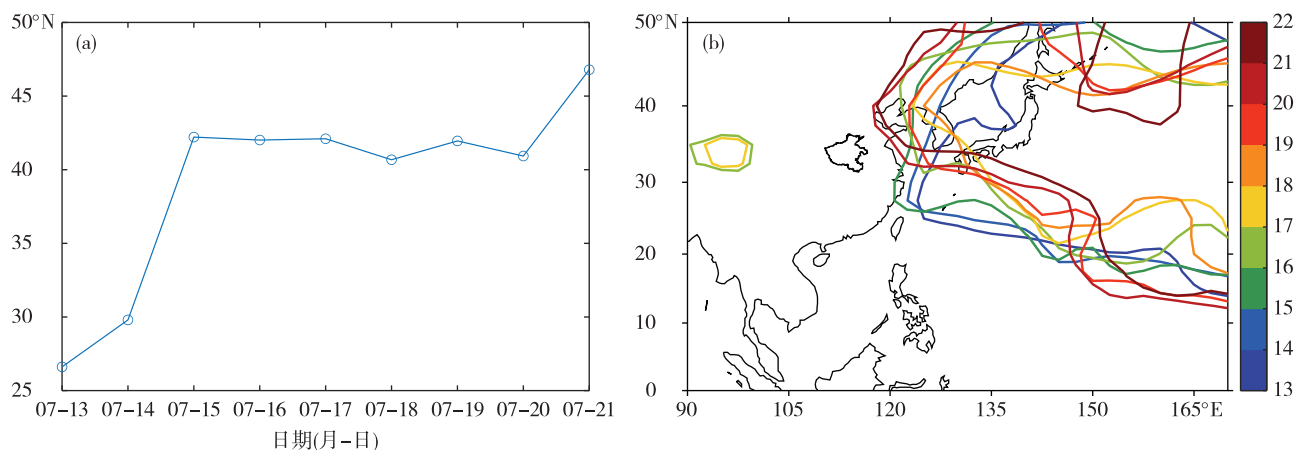


图5 7月13—21日副高随时间的变化(a. 500 hPa副高脊线位置的时间序列;b. 7月13—21日850 hPa高度日均等1 520 gpm线,不同颜色代表不同日期)

Fig.5 Variation of subtropical high from 13 to 21 July (a. time series of position of subtropical high ridge line at 500 hPa; b. daily average 1 520 gpm line at 850 hPa from 13 to 21 July, color scale for date)

和加强以及副高的北跳,导致二者受副高与台风的影响不同,因此不能合并为一个通道。通道3在“烟花”和“查帕卡”生成时已到达 $30^{\circ}\text{N}$ 左右,随后其输送速度显著加快。

图7为各通道比湿和高度随时间的变化。通道1、2由于长时间在海上输送,在登陆前(-24 h前)高度变化不大,始终处于900 hPa左右。登陆后(-24 h后)高度略有下降,在达到郑州前(-12 h后),由于河南西南部伏牛山的抬升作用,高度剧烈上升。在“烟花”生成前(-48 h前),通道1、2的比湿变化较为缓慢,而18日台风生成后(-48 h后),

由于台风的水汽输送,两通道的比湿迅速增大,通道1由于受台风的影响程度更大,比湿的增加更为明显,增幅接近40%。在到达郑州前(-12 h后),两个通道的比湿都因高度抬升而迅速减小。通道3在登陆前(-80 h前)的比湿与高度变化都不大,且比湿达近 $15 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,显著高于通道1、2。但登陆后(-80 h后),通道3的高度持续升高,最终抬升至750 hPa以上;比湿也随之逐渐减小到 $10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下。

最终计算各通道的水汽贡献率,如表1所示。其中通道2的水汽贡献最大,达到50%以上。

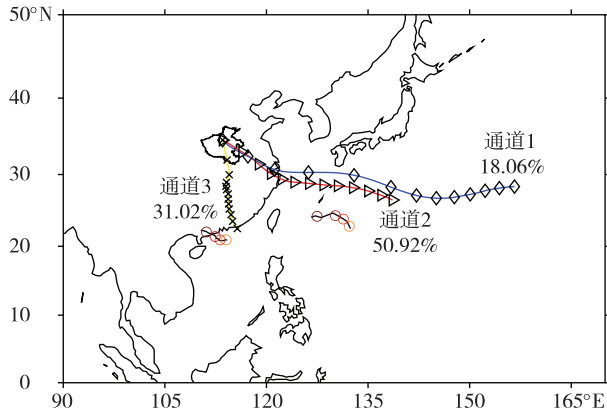


图6 水汽通道的空间分布(黑色实线和“○”代表台风“烟花”“查帕卡”18—21日的轨迹和日均中心位置,蓝色实线、红色实线、黄色实线分别代表通道1、通道2、通道3三条水汽通道,“▷”“◇”和“×”分别代表每隔12 h对相应水汽通道的气块位置的标记)

Fig.6 Spatial distribution of water vapor channel (black solid line and ○ represent track and position of daily average center of Typhoon In-fa and Cempaka from 18 to 21 July; blue, red, and yellow lines represent Channel 1, 2, and 3, respectively; ▷, ◇, and × represent position of air parcel every 12 hours in each channel)

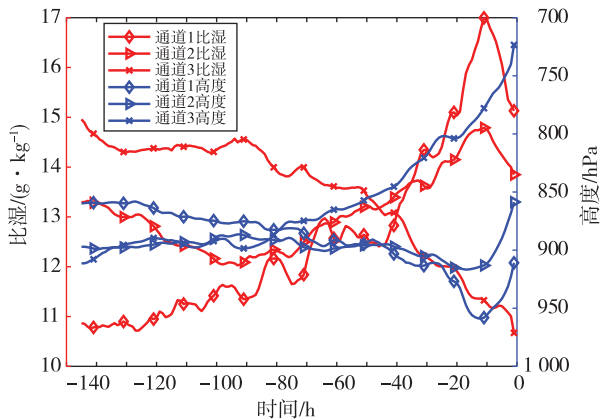


图7 台风“烟花”和“查帕卡”影响前后各水汽通道比湿(a)和高度(b)随时间的变化

Fig.7 Variation of specific humidity (a) and height (b) of each water vapor channel with time before and after the effect of Typhoon In-fa and Cempaka

通道1的比湿虽然最大,但由于轨迹数目较少,水汽贡献率仅占21.34%。通道1和通道2的贡献之和达到70%以上,可见北太平洋西部是此次暴雨的主要水汽源地。由于输送过程中水汽的不断损耗,通道3的水汽贡献仅为27.03%,较北太平洋西部的水汽贡献明显偏低。这里的计算重点考虑各通道到达终点时的相对水汽含量,并未考虑沿途的水汽损

失,因此计算结果会有一些的误差,但对结论不会有重要影响。

表1 各通道的水汽贡献率

Table 1 Contribution rate of each water vapor channel

通道	水汽贡献率/%
通道1	21.34
通道2	51.63
通道3	27.03

#### 4 结论与讨论

(1)暴雨期间(7月19—21日)大气环流形势稳定,副高西伸且显著偏北、偏强。郑州上空有明显的水汽辐合区,水汽输送与辐合在20日达到最强。

(2)水汽有北太平洋西部和南海北部两个源地。来自北太平洋西部的水汽主要位于850 hPa以下,受副高和台风“烟花”共同作用的影响,从东南方向往郑州输送,且水汽的源地随时间逐渐向东移动。在输送的中后期,受到台风“烟花”增强的影响,输送速度加快,且水汽含量得到大幅补充。

(3)来自南海北部的水汽在19日受台风“查帕卡”的影响从东南方向往郑州输送;而20—21日由于两台风间距离不断缩小产生共同作用,输送方向转为偏南方。输送过程中气块不断抬升,逐渐损失水汽。因高度较高且离台风较远,受台风影响后,水汽含量并未得到较好的补充。

(4)来自北太平洋西部的水汽在此次极端暴雨过程中占据主导地位,来自南海北部的水汽因输送过程中水汽的较多损失而导致贡献偏低。

在计算水汽贡献时重点考虑了各通道水汽来源对终点处降水的水汽相对贡献,沿途中水汽的损失可能不会改变对降水的影响,因此未考虑沿途中由于降水造成的水汽损失。计算结果可能存在一定的误差,但对本文的结论不会有重要影响。在日后的研究中,将进一步改进水汽贡献的计算方法,从而减小计算误差。

#### 参考文献:

[1] 苏爱芳,吕晓娜,崔丽曼,等.郑州“7.20”极端暴雨天气的基本观测分析[J].暴雨灾害,2021,40(5):445-454.  
 [2] 张霞,杨慧,王新敏,等.“21·7”河南极端强降水特征及环流异常性分析[J].大气科学学报,2021,44(5):672-687.

- [3] 国务院灾害调查组. 河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报告 [R/OL]. (2022-02-15) [2022-05-24]. [https://gxt.guizhou.gov.cn/ztl/aqsczxzsnxdjaqscyhd/jsjy\\_5653480/202202/t20220215\\_72553297.html](https://gxt.guizhou.gov.cn/ztl/aqsczxzsnxdjaqscyhd/jsjy_5653480/202202/t20220215_72553297.html).
- [4] 丁一汇, 柳艳菊, 宋亚芳. 东亚夏季风水汽输送带及其对中国大暴雨与洪涝灾害的影响 [J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 629-643.
- [5] YIN J F, GU H D, LIANG X D, et al. A possible dynamic mechanism for rapid production of the extreme hourly rainfall in Zhengzhou City on 20 July 2021 [J]. *J Meteor Res*, 2022, 36(1): 6-25.
- [6] 齐道日娜, 何立富, 王秀明, 等. “7·20”河南极端暴雨精细观测及热动力成因 [J]. 应用气象学报, 2022, 33(1): 1-15.
- [7] SODEMANN H, SCHWIERZ C, WERNLI H. Interannual variability of Greenland winter precipitation sources: Lagrangian moisture diagnostic and North Atlantic Oscillation influence [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 2008, 113(D3): D03107.
- [8] ZHAO N, MANDA A, GUO X, et al. A Lagrangian view of moisture transport related to the heavy rainfall of July 2020 in Japan: importance of the moistening over the subtropical regions [J]. *Geophys Res Lett*, 2021, 48(5): e2020GL091441.
- [9] CHU Q C, WANG Q G, FENG G L. Determination of the major moisture sources of cumulative effect of torrential rain events during the preflood season over South China using a Lagrangian particle model [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 2017, 122(16): 8369-8382.
- [10] SHI Y, JIANG Z H, LIU Z Y, et al. A Lagrangian analysis of water vapor sources and pathways for precipitation in East China in different stages of the East Asian Summer Monsoon [J]. *J Climate*, 2020, 33(3): 977-992.
- [11] ZHANG L X, ZHAO D, ZHOU T J, et al. Moisture origins and transport processes for the 2020 Yangtze River Valley record-breaking mei-yu rainfall [J]. *Adv Atmos Sci*, 2021, 38(12): 2125-2136.
- [12] 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.
- [13] 王美月, 王磊, 李谢辉, 等. 三江源地区暴雨的水汽输送源地及路径研究 [J]. 高原气象, 2022, 41(1): 68-78.
- [14] 马京津, 高晓清. 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, 2006, 25(5): 893-899.
- [15] 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.
- [16] 王军, 吴迪, 王超杰, 等. “21·7”河南极端降水的远距离台风作用分析 [J]. 气象与环境科学, 2022, 45(2): 75-85.
- [17] CUI L K, SONG X Q, ZHONG G Q. Comparative analysis of three methods for HYSPLIT atmospheric trajectories clustering [J]. *Atmosphere*, 2021, 12(6): 698.
- [18] 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.