

# Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Disturbance Energy in “7·20” Precipitation Process in North China

Xiaoqing Liu, Tiangui Xiao\*, Wei Wei, Shuang Liang

School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan  
Email: \*xiaotiangui@cuit.edu.cn

Received: May 19<sup>th</sup>, 2018; accepted: Jun. 6<sup>th</sup>, 2018; published: Jun. 13<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

In this paper, we use the precipitation data of the National Climate Center Station and the reanalysis data from the ECMWF. Morlet wavelet analysis, Butterworth bandpass filter and Wave packet propagation diagnosis method are used to analyze the disturbance energy of the “7·20” precipitation in North China. The results show that the temporal and spatial distribution of wind disturbance energy can basically correspond to the development characteristics of the “7·20” heavy precipitation process in North China. During heavy rainfall, the perturbation energy of zonal and meridional winds not only represents the transport of cold and warm air and water vapor, but also reflects the transport of unstable energy (kinetic energy). The distribution of perturbation energy of meridional wind field has a good corresponding relationship with the distribution of kinetic energy. The strong precipitation fall area is basically the high value area of disturbance energy of the wind field. The precipitation fall area mainly distributes along the contour of the strong disturbance energy contour and moves along the distribution shape of the isoline, and the perturbation energy of the meridional wind field and the zonal wind field. The trend of distribution contours can reflect the strength of water vapor and cold and warm air. The characteristics of dispersion energy accumulation in the wind field can basically represent the process of energy accumulation and release during periods of heavy rainfall.

## Keywords

Disturbance Energy, Strong Precipitation, North China Precipitation, Kinetic Energy, Wave Energy Transmission Diagnosis

---

# 华北地区“7·20”强降水过程扰动能量时空分布特征研究

柳晓庆, 肖天贵\*, 魏薇, 梁爽

\*通讯作者。

成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都  
Email: xiaotianguai@cuit.edu.cn

收稿日期: 2018年5月19日; 录用日期: 2018年6月6日; 发布日期: 2018年6月13日

## 摘要

本文利用国家气候中心台站降水数据及欧洲中期天气预报中心(ECMWF)再分析格点资料, 使用Morlet小波分析、巴特沃斯带通滤波及波包传播诊断方法主要对华北地区“7·20”强降水过程进行扰动能量的分析。结果表明风场扰动能量时空分布特征基本上可以对应华北地区“7·20”强降水过程的发展特征。强降水期间纬向、经向风场的扰动能量不仅代表冷暖空气和水汽的输送, 也一定程度上反映了不稳定能量(动能)的输送, 经向风场的扰动能量分布与动能的分布有很好的对应关系。强降水落区基本上为风场扰动能量高值区, 降水落区主要沿强扰动能量等值线形状分布并沿等值线的分布形状移动, 经向风场及纬向风场的扰动能量分布等值线走向可以反映水汽、冷暖空气的输送强弱, 风场的扰动能量积累频散特征基本可以代表强降水期间能量的积累释放过程。

## 关键词

扰动能量, 强降水, 华北降水, 动能, 波能传播诊断

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

华北地区属暖温带半干旱半湿润季风气候, 冬季寒冷干燥, 夏季潮湿多雨, 雨量变化大, 雨季和干季明显, 易发旱涝灾害[1]。华北降水主要集中于夏季, 在全球变暖背景下, 华北地区夏季降水减少, 水资源匮乏, 干旱天气出现频率持续增长[2], 而在这种情况下出现的极端降水天气极易造成当地巨大的经济损失, 2016年7月18~20日, 华北出现北方入汛以来最强的一次降水过程, 其中北京大兴(242毫米)、武安(374.3毫米)等26站超过历史极值, 据统计, 此次天气过程共造成河北、河南、山西、京津等15个省(区、市)2200多万人受灾, 300多人死亡失踪, 直接经济损失938.7亿元[3][4][5]。

目前针对此次天气过程的研究多是从动力角度[6][7][8][9]展开, 很少有从扰动能量传播的角度切入, 而扰动传播对天气系统的影响一直是气象科学研究中的重要内容, 1940年叶笃正[10]提出正压Rossby波的能量频散理论。1985年曾庆存[11]使用WKB方法研究Rossby波包发展、传播和结构演变。2002年缪锦海、肖天贵[12]等提出使用实测资料分析波包传播的波包传播诊断方法(WPD), 以后的研究多从波包传播诊断方法展开。WPD方法目前已经有了很多的科学研究成果: 葛非, 肖天贵, 金荣花等[13]利用NCEP/NCAR位势高度场 $1.0 \times 1.0$ 再分析资料, 运用波包传播诊断方法对“2008-1月”我国南方4次雨雪天气分析表明700 hPa和500 hPa高度场波包爆发消亡特征可以很好对应雨雪天气的起止过程。陈伟斌[14]等分析了2007年7月16~20日重庆暴雨过程高频波波包分布和传播特征与降水的关系, 研究表明降水发生前, 波包值增大, 降水发生后, 波包值减弱, 降水结束, 波包值减弱为正常值, 波包能明显反映出降水过程的发生、维持和结束特征。肖天贵, 孙照渤, 葛非[15]利用NCEP/NCAR的纬向经向风场气

象观测资料,运用波包传播诊断方法计算风场波包值,分析2008年9月22~27日四川强降水期间波动能量积累和传播特征,研究表明500 hPa风场波能传播可以很好反映降水过程的分布,风场波动能量大值区可以基本对应强降水区,风场波动能量的经向和纬向传播特征可以基本对应此次降水发展特征,风场扰动能量的积累、频散与沙氏指数和K指数代表的不稳定能量发展、释放也有比较好的对应。郭胜利,葛非,马荣等[16]研究分析了2005年3月24~25日发生在西藏中东部地区的强降雪过程中波包的传播和积累特征进行分析,研究发现500 hPa高度场波包分布特征与强降雪产生的地区有着较好的对应关系。故本文从扰动能量传播角度,将WPD方法应用于华北地区“7·20”强降水过程的个例研究中,分析扰动能量传播对降水天气系统的影响,希望可以取得一定的研究成果,为今后利用扰动能量传播预报强降水天气提供指示作用。

## 2. 使用资料及研究方法

### 2.1. 研究资料

1) 2016年5~9月全国2000多个站点的逐日20~20累计降水量观测资料,单位0.1毫米。

2) 2016年6~8月欧洲中期天气预报中心(ECMWF)全球北京08时900 hPa~200 hPa逐日再分析格点资料,其中包括:位势高度( $m^2/s^2$ )、纬向风速(m/s)、经向风速(m/s)、垂直速度(pa/s)、相对湿度(kg/kg),资料水平分辨率为 $0.75 \times 0.75$ 。

### 2.2. 研究方法

本文主要使用Morlet小波分析[17][18]华北地区5~9月降水量主要周期,然后用巴特沃斯带通滤波方法[19][20]提取隐含在华北地区“7·20”强降水期间的风场波动,然后使用波包传播诊断[12]方法计算扰动能量用于分析。

小波分析是将信号分解为一系列小波函数,用这些不同的小波函数逐次逼近非稳态信号中突变的部分,提取原始信号高频或低频时间尺度变化特征,Morlet小波函数 $\psi(t)$ 主要原理如下:

$$\psi(t) = e^{ikt} \left( e^{-\frac{t^2}{2}} - 2e^{-\frac{k^2}{4}} e^{-x^2} \right) \quad (1)$$

$k$ 值较大( $k \geq 5$ )一般省略第二项:

$$\psi(t) = e^{ikt} e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (2)$$

小波变换连续形式:

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int f(t) \bar{\psi}_{ab} \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (3)$$

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi \left( \frac{t-b}{a} \right) \quad (4)$$

$W(a,b)$ 是小波系数, $a$ 是频率(尺度伸缩因子),反映小波周期长度, $b$ 是时间参数(时间平移因子),反映时间上的平移, $\psi(t)$ 为基小波或母小波,本文中使用Morlet小波函数作为基小波, $\psi_{ab}(t)$ 是小波簇函数(子小波), $\bar{\psi}_{ab}(t)$ 是 $\psi_{ab}(t)$ 的复数共轭函数, $f(t)$ 为降水量,实际研究中,最主要的就是要由小波变换方程得到小波系数,然后通过这些小波系数 $W(a,b)$ 计算得到实部、模及方差等,分析气象时间序列资料的时频变化特征。

### 3. 华北地区“7·20”强降水过程及环流特征

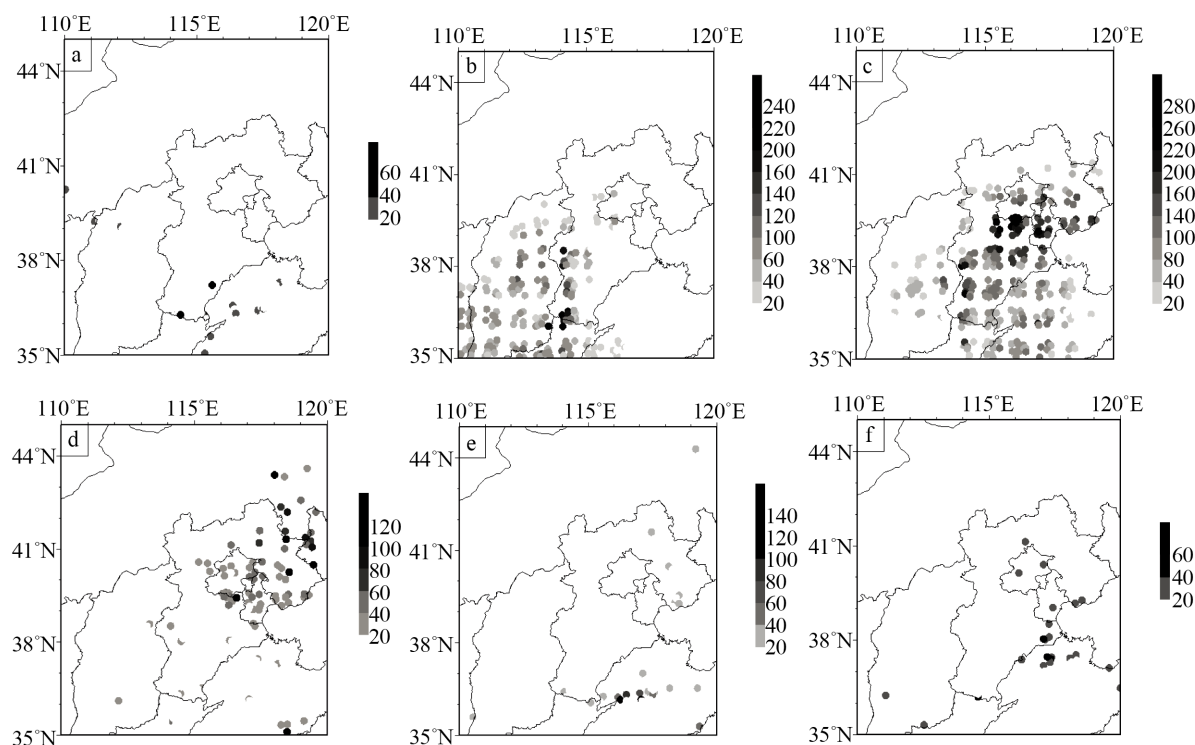
#### 3.1. “7·20”强降水过程特征

7月19~21日,华北出现入汛以来最强的一次强降水过程,京津地区、河北大部、山西东部、河南北部、山东西北部等地有100~300毫米,局部地区超过300毫米,其中北京大兴(242毫米)及武安(374.3毫米)等26站超过历史极值;受强降水影响,北京、天津、石家庄、太原、郑州等部分城市出现城市内涝;海河部分支流发生洪水;多处遭受山洪及泥石流、滑坡等地质灾害。据统计,共造成河北、河南、山西、京津等15个省(区、市)2278.8万人受灾,383人死亡失踪,农作物受灾面积190万公顷,直接经济损失938.7亿元,其中河北灾情最重。此次强降水过程中北京全市平均降水量为212.6毫米,最大门头沟东山村453.7毫米,降水持续55个小时[5]。

图1显示华北地区于19日出现强降水天气,强降水覆盖山西、河北、河南北部等,20日降水强度增强,雨带向东北方向移动,强降水覆盖河北大部,山西中部、山东大部等。21日雨带持续向东北方向移动,强降水出现在河北北部,北京及天津,22~23日华北强降水过程基本结束。

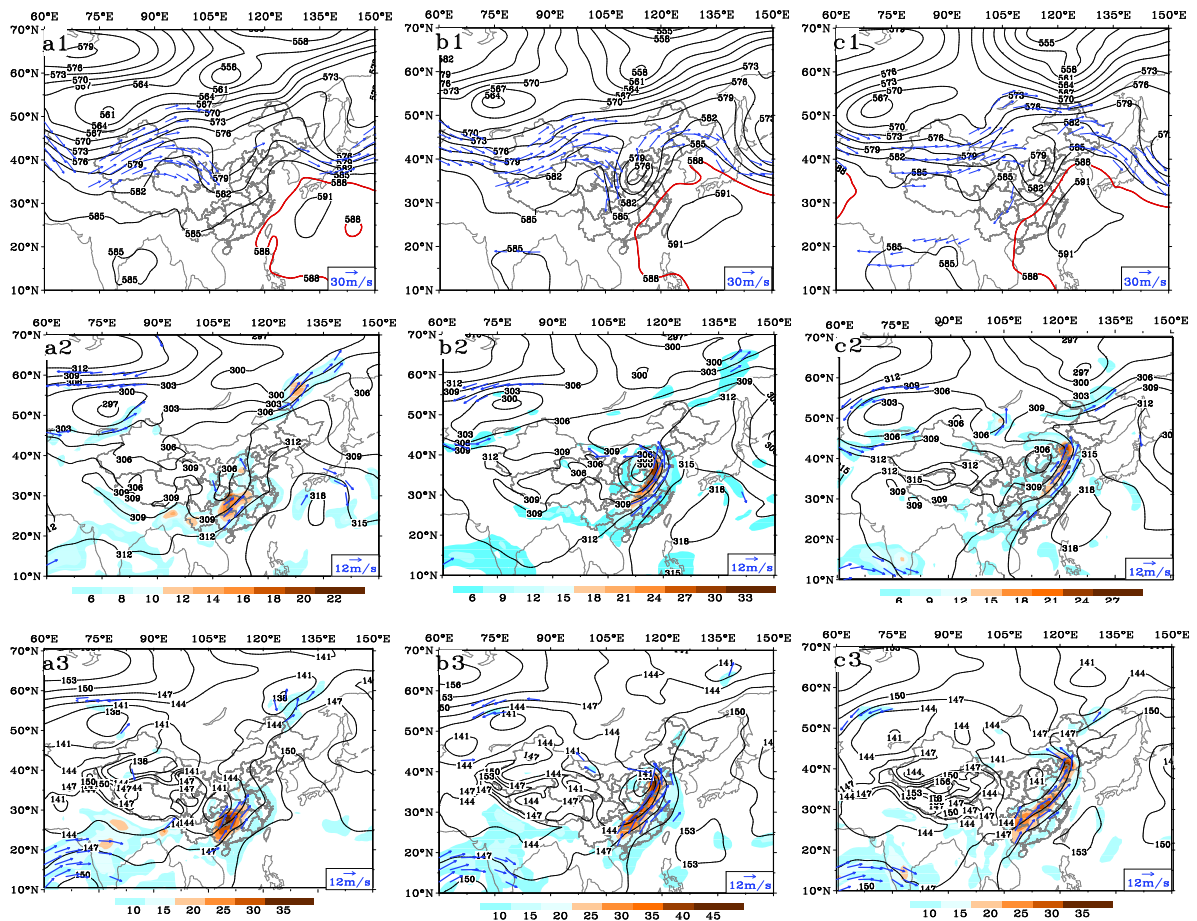
#### 3.2. 强降水过程的环流特征

分析以上3个层次的环流形势图(图2)可知,19日,受高空槽东移影响,华北等地产生强降水天气,200 hPa风场显示高空槽不断向华北地区输送冷空气;20日副高西伸控制广东东部、福建、浙江等地区,脊线北跳至40°N左右,高空槽与北上的西南涡切断生成华北气旋。21日副高略有西伸,华北上空低涡缓慢北移并填塞减弱,强降水落区北移至辽宁大部、河北北部、北京及天津地区。



**Figure 1.** The Meteorological Station's accumulated precipitation chart ( $\geq 20$  mm) from 20~20 hours in North China on July 18-23, a: 18<sup>th</sup> b: 19<sup>th</sup> c: 20<sup>th</sup> d: 21<sup>st</sup> e: 22<sup>nd</sup> f: 23<sup>rd</sup>

**图 1.** 7月18~23日华北地区气象台站20~20时累计降水图( $\geq 20$  mm) a: 18日, b: 19日, c: 20日, d: 21日, e: 22日, f: 23日



**Figure 2.** a1~c1: Synthetic chart of 500 hPa geopotential height field and 200 hPa wind field from July 19th to 21st (wind speed  $\geq 30$  m/s), a2~c2: Synthetic chart of 700 hPa geopotential height field, wind field (wind speed  $\geq 12$  m/s), and water vapor flux ( $\geq 5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ) from July 19th to 21st, a3~c3: Synthesis chart of 850 hPa geopotential height field, wind field, and water vapor flux ( $\geq 10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ) from July 19th to 21st (height field unit: dagpm, water vapor flux unit:  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )

**图 2.** a1~c1: 7月 19~21 日 500 hPa 高度场及 200 hPa 风场合成图(风速  $\geq 30$  m/s), a2~c2: 7月 19~21 日 700 hPa 高度场、风场(风速  $\geq 12$  m/s)及水汽通量合成图( $\geq 5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ), a3~c3: 7月 19~21 日 850 hPa 高度场、风场及水汽通量( $\geq 10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )合成图(高度场单位 dagpm, 水汽通量单位  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )

综合来看, 19~21 日副高持续西伸北进, 促使雨带不断向东、向北移动, 从 19~21 日的华北地区低层 850 hPa 及 700 hPa 可以看出华北气旋东侧建立西南风急流和偏东风急流, 促使水汽和不稳定能量的输送, 两支急流在 19~21 日剧烈的为华北地区输送水汽, 其中 20 日最为强烈, 华北气旋和副热带高压形成两条水汽输送通道, 气旋东北侧的东南风将渤海、黄海水汽输送至华北, 副高外围西南风把南海的水汽输送至湖南、湖北以及华北等地, 此次天气过程生成的华北气旋较为深厚, 850~500 hPa 均有反映。

### 3.3. 华北地区降水量的主振荡周期

降水序列是不稳定序列, 且具有突发性, 随机性, 多尺度等特征, 时域分析可以直观的确定时间, 而傅里叶变换相对应的频域分析可以很好确定频率, 但仅限于平稳序列, 对于降水这类不平稳序列, 两种方法均无能为力, 因此我们选用时频分析方法小波变换, 选取 Morlet 小波函数, 为降低小波分析的边界效应影响, 选取 2016 年 5~9 月华北地区(山西、河北、北京、天津)降水序列展开分析, 提取隐含在时间序列中的周期, 用于扰动能量分析。

图3中可以看到7月下旬存在一个通过红噪声检验的振荡周期能量最强、周期最显著且明显的2~10天时间尺度左右的振荡,其中4~8天左右的波动最为显著,但是周期变化具有局部性,仅覆盖7月下旬。同时也存在小波模方值相对小一些的15~30天时间尺度的低频振荡和2~3天左右的高频振荡通过显著性检验,从图上可见2~3天左右的波动出现两次,覆盖2016年的夏季两个月份,但是振荡周期能量不如4~8天时间尺度的振荡,4~8天的振荡更为显著,因此选取4~8天左右的波动做滤波,探讨4~8天左右的扰动能量传播与华北降水天气的关系。

### 3.4. 小结

通过分析华北地区“7·20”强降水期间雨情和环流形势分布特征,发现华北地区“7·20”强降水过程主要出现在7月19~21日,其中20日是降水天气强度最强的一天,环流特征主要表现为副热带高压持续北上,东移的高空槽和北上的西南涡切断生成华北气旋。2016年5~9月Morlet小波功率谱分析发现华北地区区域平均降水量主要存在4~8天左右的波动。

## 4. 纬向风场扰动能量分布特征

纬向风场主要反映西风风场的扰动能量传播,我们首先选取此次强降水过程具有代表性的一个点:河北武安市(如图4所示),分析其上空900~200 hPa扰动能量分布特征,然后讨论华北地区强降水期间不同层次上波能的时间空间分布特征与降水之间存在的关系。

图5显示7月5日左右高层300 hPa存在一个扰动能量高值区,6~7日消失后又重新出现,此后高层能量不断向中低层传播,15日350 hPa出现中心为0.9的强扰动能量区域,15日以后开始减弱,并于19日消失,而19日武安市则产生了特大暴雨天气过程。9日~18日,中低层出现扰动能量大值区持续向高层传播加强,扰动能量最强中心于18日出现在700 hPa,16~19日向低层传播,500 hPa以下的扰动能量在19~24日不断减弱并于24日消失。

综合以上特征我们知道高层8~15日为扰动能量积累过程,15~19日为能量释放过程。中低层9~19日为一次能量积累过程,所积累的能量于19~24日完全释放,其中19~21日华北强降水过程处于中低层能量释放的过程中。

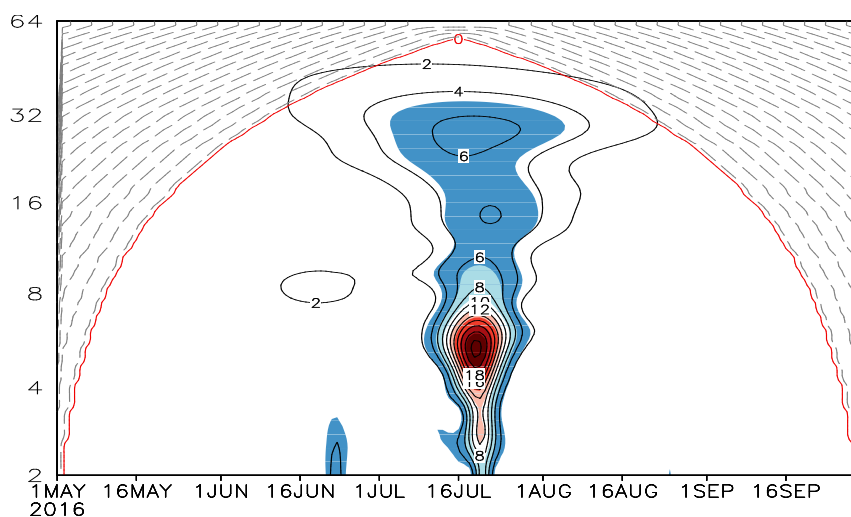


Figure 3. Morlet wavelet power spectrum analysis of regional precipitation from May to September in North China

图3. 华北地区5~9月区域平均降水Morlet小波功率谱分析

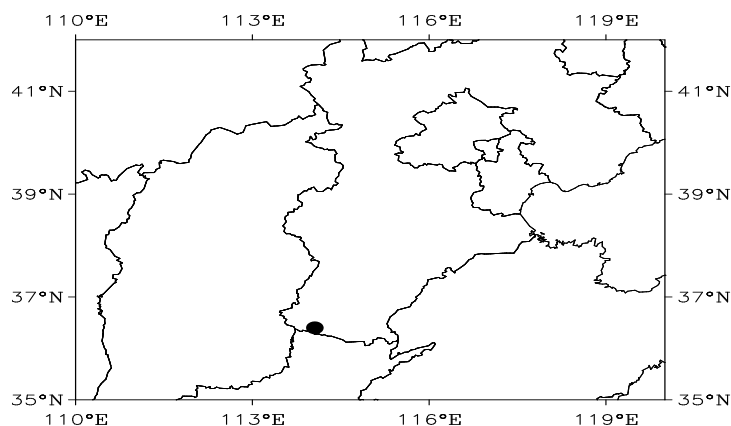


Figure 4. Location of Wu'an City, Hebei Province

图 4. 河北省武安市地理位置

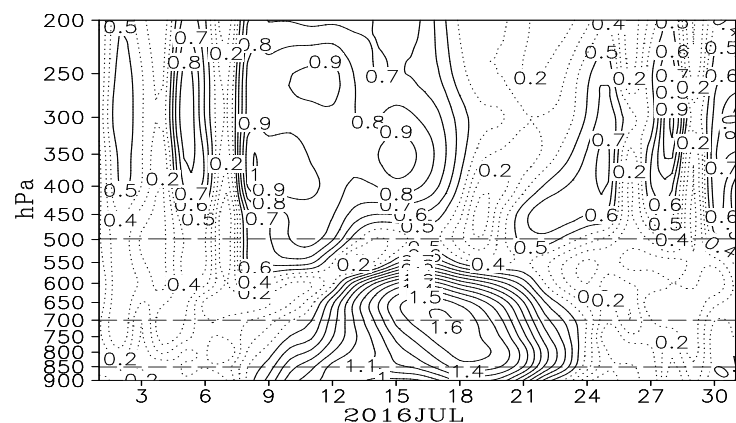


Figure 5. Time-height profile of disturbance energy in the zonal wind field in Wu'an City, Hebei Province (dotted line  $\leq 0.4$ )

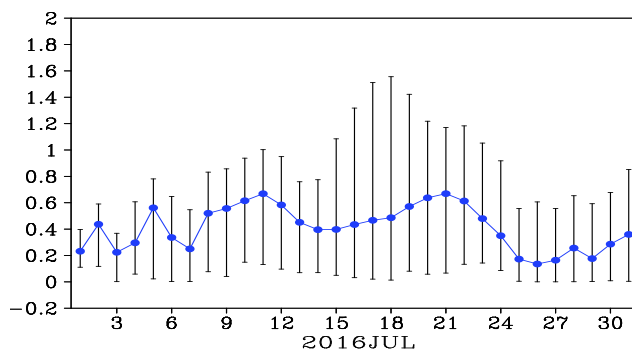
图 5. 河北省武安市纬向风场扰动能量时间高度剖面图(虚线  $\leq 0.4$ )

#### 4.1. 500 pa 纬向风场扰动能量分布特征

首先分析华北区域( $35^{\circ}\sim 42^{\circ}\text{N}$ ,  $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ )平均扰动能量随时间的变化情况:

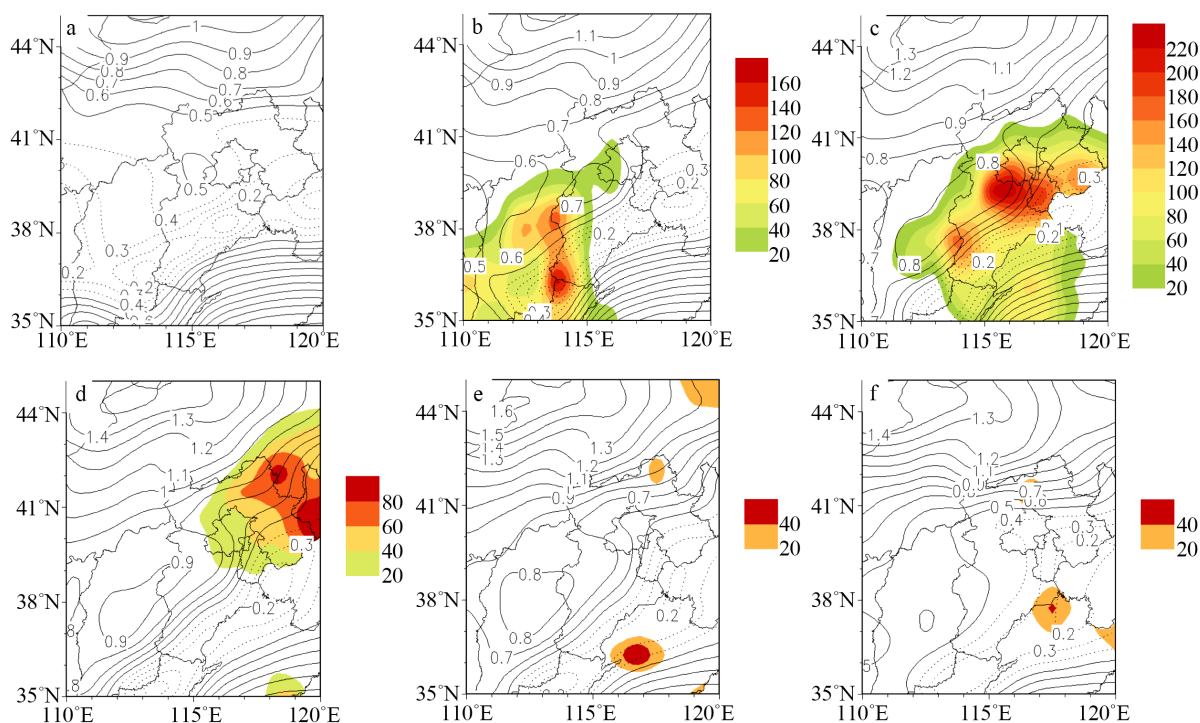
从图 6 可以看到 5 个波动, 分别出现于 1~3 日、3~7 日、7~14 日、14~26 日及 26~29 日。华北地区 19~21 日出现强降水天气, 位于 14~26 日的波动范围内。我们从图上可以看出 19~21 日华北地区扰动能量不断变强, 3 天平均扰动能量约为 0.6 左右, 此次天气过程华北地区扰动能量最低为 0.1、最高值为 1.4, 21 日华北地区强降水天气过程基本结束后, 扰动能量开始减小, 到 26 日达最低值 0.18 左右。

华北地区 19 日出现强降水, 图 7 可以看出 19 日华北上空扰动能量明显大于 18 日, 强降水覆盖范围基本处于扰动能量大值区内。20 日降水强度增大, 华北中部的扰动能量大值中心也相应增大, 21 日扰动能量值持续增大, 22 日开始减小, 内蒙古地区扰动能量持续增大至 1.5, 23 日扰动能量整体减小且华北中部扰动能量高值中心消失。从整个过程来看扰动能量分布为南北高、中部低, 从 18 日开始至 19 日可以看到内蒙古地区的扰动能量开始向河北和山西地区传播, 20~21 日华北中部扰动能量持续增强, 22~23 日强降水过程基本结束也对应着扰动能量减弱消失。综合以上特征并对比 500 hPa 环流图可知, 内蒙古地区的扰动能量大值区域代表高纬度的冷空气输送, 强扰动能量向华北地区的传播反映内蒙古地区及其以北的冷空气向华北的输送, 随之而来的是华北地区强降水天气开始。



**Figure 6.** Regional average perturbation energy curve of 500 hPa zonal wind field in North China Curve

**图 6.** 华北地区 500 hPa 纬向风场区域平均扰动能量曲线图



**Figure 7.** Synthetic chart of 500 hPa zonal wind disturbance energy (dotted line  $\leq 0.4$ ) and 20~20 hours cumulative precipitation (shadow  $\geq 20$  mm) a: 18<sup>th</sup> b: 19<sup>th</sup> c: 20<sup>th</sup> d: 21<sup>st</sup> e: 22<sup>nd</sup> f: 23<sup>rd</sup>

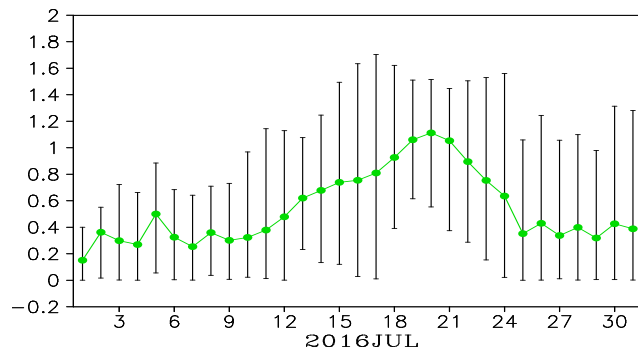
**图 7.** 500 hPa 纬向风场扰动能量(虚线  $\leq 0.4$ )与 20~20 时累积降水(阴影  $\geq 20$  mm)合成图 a: 18 日, b: 19 日, c: 20 日, d: 21 日, e: 22 日, f: 23 日

#### 4.2. 700 hPa 纬向风场波能分布特征

华北区域平均扰动能量曲线图(图 8)显示 7 月中旬左右有一个扰动能量峰值 1.1 左右, 7 月上旬和 7 月下旬扰动能量曲线变化表现为小的波动, 其中各有 3 次小波动。具体扰动能量变化日期为 1~4 日、4~7 日、7~9 日、9~25 日、25~27 日、27~29 日及 29~31 日。华北强降水过程处于 9~25 日的扰动能量变化过程中, 其中 19~20 日平均扰动能量增长, 20~21 日扰动能量开始减小。

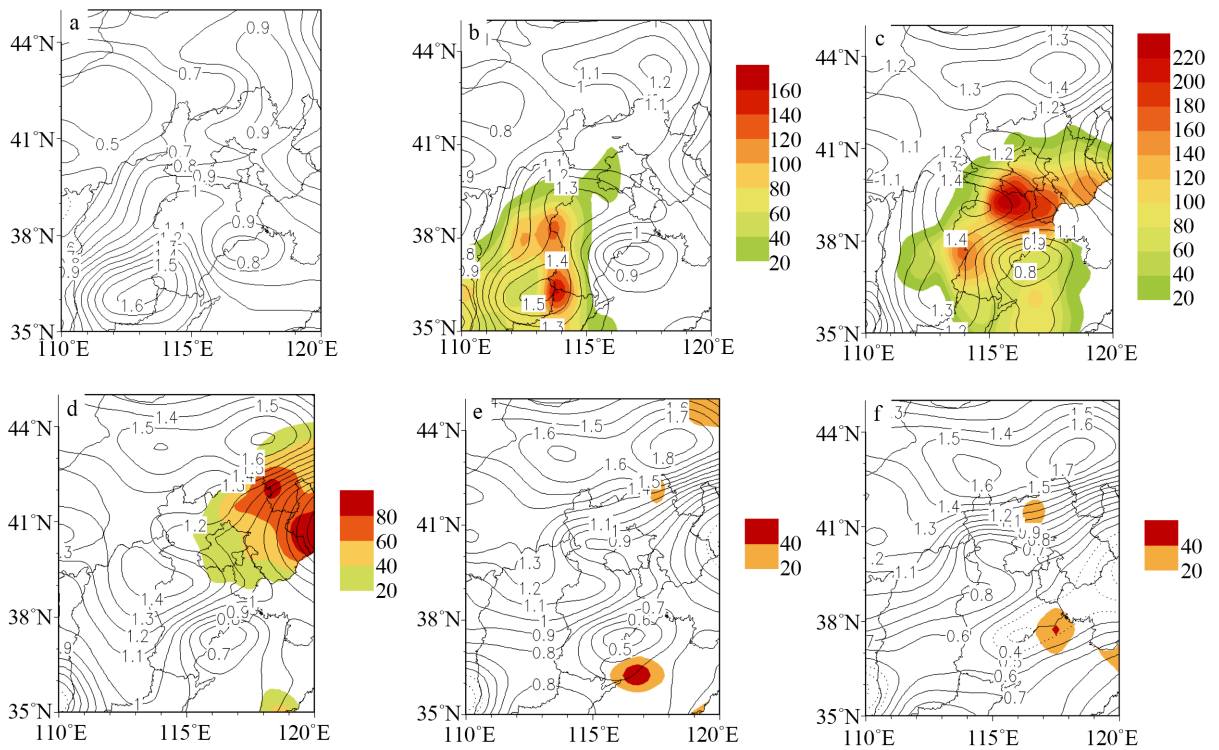
图 9 是 700 hPa 纬向风场扰动能量与降水合成图, 从图中可以看出 19~23 日 700 hPa 表现为华北南部的扰动能量高值区不断向东北方向传播, 强降水区域也随之移动, 基本上强降水区域为扰动能量大值区





**Figure 8.** The average perturbation energy curve of the 700 hPa zonal wind field in North China

**图 8.** 华北地区 700 hPa 纬向风场区域平均扰动能量曲线图



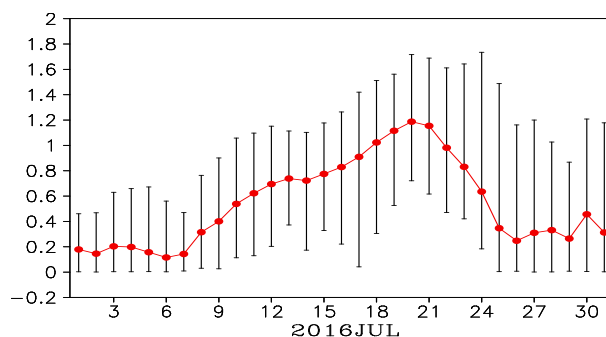
**Figure 9.** Synthetic chart of 700 hPa zonal wind disturbance energy (dotted line  $\leq 0.4$ ) and 20~20 h cumulative precipitation (shadow  $\geq 20\text{ mm}$ ) a: 18<sup>th</sup> b: 19<sup>th</sup> c: 20<sup>th</sup> d: 21<sup>st</sup> e: 22<sup>nd</sup> f: 23<sup>rd</sup>

**图 9.** 700 hPa 纬向风场扰动能量(虚线  $\leq 0.4$ )与 20~20 时累积降水(阴影  $\geq 20\text{ mm}$ )合成图 a: 18 日, b: 19 日, c: 20 日, d: 21 日, e: 22 日, f: 23 日

域。对比 700 hPa 环流形势可知华北南部的扰动能量高值区基本对应华北气旋的位置，扰动能量不断向华北强降水地区发展，基本可以反映暖湿气流的输送。

### 4.3. 850 hPa 纬向风场扰动能量分布特征

图 10 的区域平均曲线图显示 1~6 日及 26~31 日平均扰动能量表现为小幅升降、6~26 日平均扰动能量表现为一个大幅的振荡，扰动能量从 0.1 左右飙升至 1.2 左右。华北强降水过程 19~21 日处于图上 6~26 日扰动能量变化过程中，其中 20 日出现此次平均扰动能量最大值 1.2，21 日扰动能量减小。



**Figure 10.** The average perturbation energy curve of the 850 hPa zonal wind field in North China

**图 10.** 华北地区 850 hPa 纬向风场区域平均扰动能量曲线图

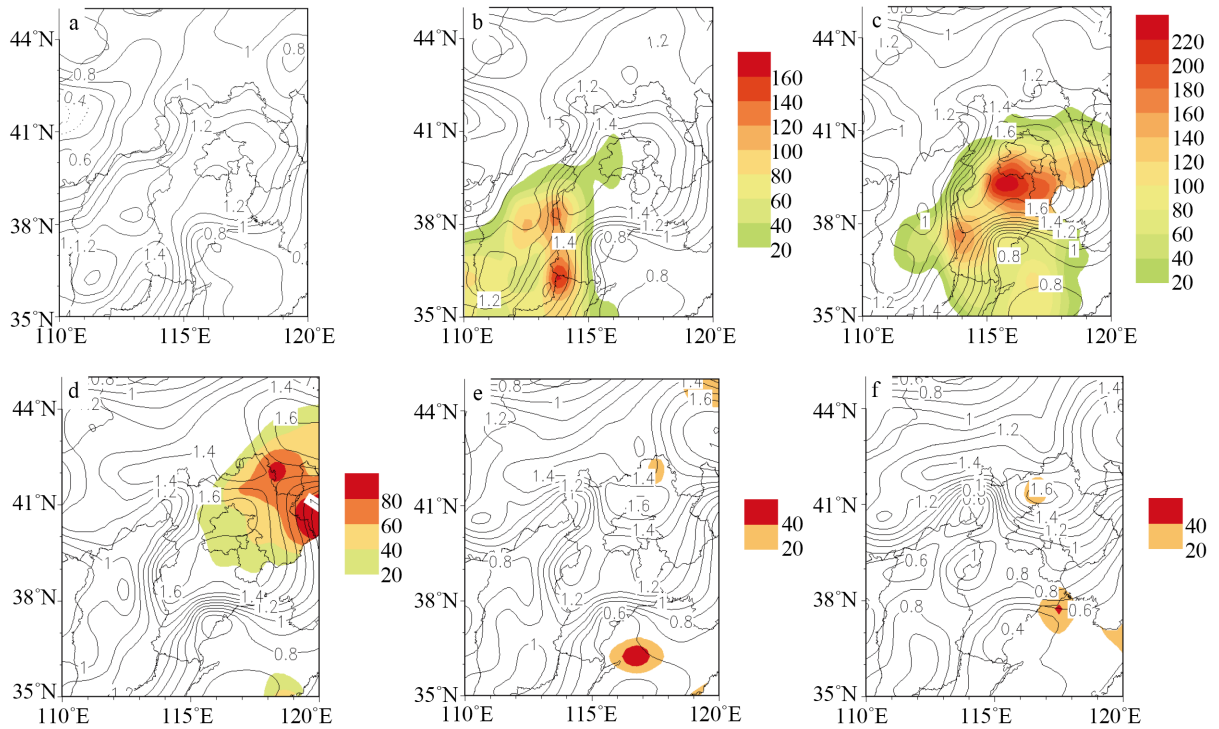
分析图 11 可知 18 日华北的西北和东南方向为扰动能量小值区域，华北地区有一呈东北西南走向的带状强扰动能量区域，19 日华北强降水出现于带状强扰动能量范围内，随着强降水向东北方向移动，扰动能量也随强降水区域移动并增强。22 日可以看到位于华北西南方向的地区扰动能量明显减弱至 0.9 左右，22~23 日的图上可以看出强扰动能量区域向华北北部地区移动，23 日大部分华北南部原先产生降水的地区扰动能量迅速减小。

#### 4.4. 小结

综合以上 3 个层次的分析我们可以知道，850 hPa 纬向风场扰动能量分布可以很好对应强降水雨带，扰动能量随强降水移动增强，发生强降水的区域，扰动能量一直维持比较强的状态，而强降水过程结束后，扰动能量迅速减少，而 500 hPa 和 700 hPa 的降水落区基本上在扰动能量大值区域偏东的位置。19~21 日华北强降水期间，500 hPa 平均扰动能量持续增强，在强降水天气消失后，22 日扰动能量开始减小，从扰动能量与降水合成图上可以看出 18~21 日扰动能量持续增强，22 日扰动能量开始减小，图上扰动能量高值中心闭合等值线数值开始减少。850 hPa、700 hPa 的平均扰动能量在 19~20 日逐渐增大，21 日开始减小，22 日迅速减弱，22 日扰动能量与降水合成图上可以看出华北西南角的扰动能量相比 21 日迅速减弱。从表 1 看出华北强降水期间纬向风场 500 hPa 扰动能量传播具有滞后性，比低层晚一些频散。

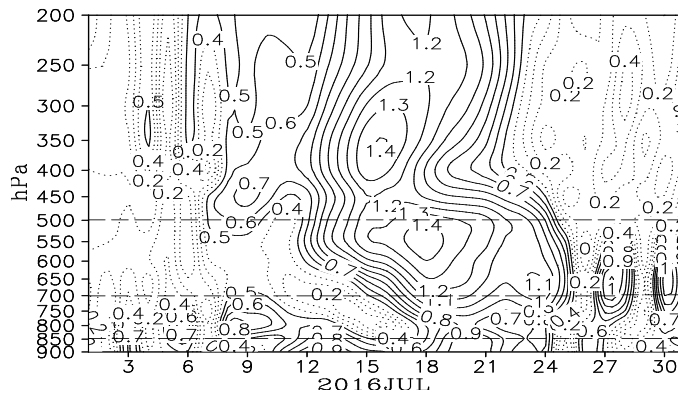
### 5. 经向风场扰动能量分布特征

经向风场扰动能量主要反映南北方向的扰动能量传播特征，与水汽输送有关。由图 12 可知 3 日和 6 日低层 850 hPa 扰动能量大于其他层次，并有向高层传递的趋势。9 日低层(850~700 hPa)和高层 500 hPa 均出现强扰动能量区域。15 日高层 400 hPa 扰动能量达最强，18 日 500 hPa 扰动能量达最强，从这两个特征可以知道 15 日强扰动能量中心向低层传播，18 日传至 500 hPa。18~21 日低层(850 hPa)也出现强扰动能量区，而中高层扰动能量逐渐减弱。21 日以后 900~200 hPa 整个层次的扰动能量均逐渐减弱，在 26 日到达至 0.4 左右，恢复至平稳状态。这一特征说明 15~26 日存在一次能量积累和释放过程，高层能量释放先于低层，高层能量中心传至中低层(700~500 hPa)而后开始减弱，这时候低层(850 hPa)开始出现强扰动能量区域，强降水天气开始出现，20 日低层扰动能量发展最强而后开始减弱，基本对应华北地区“7·20”强降水过程水汽和雨量变化特征，我们可以利用这一特征进行强降水天气预报。26 日低层 850 hPa 开始出现扰动，然后向高层传播，27 日 700 hPa 出现强扰动能量中心，28 日~29 日减弱，30 日又重新出现，31 日开始减弱，预示 26~31 日存在两次能量释放过程。查阅河北武安市降水资料知道其 29 日(3.4 毫米)和 31 日(49.7 毫米)各有一次降水过程。



**Figure 11.** Synthetic chart of 850 hPa zonal wind disturbance energy (dotted line  $\leq 0.4$ ) and 20–20 h cumulative precipitation (shadow  $\geq 20$  mm) a: 18<sup>th</sup> b: 19<sup>th</sup> c: 20<sup>th</sup> d: 21<sup>st</sup> e: 22<sup>nd</sup> f: 23<sup>rd</sup>

**图 11.** 850 hPa 纬向风场扰动能量(虚线  $\leq 0.4$ )与 20–20 时累积降水(阴影  $\geq 20$  mm)合成图 a: 18 日, b: 19 日, c: 20 日, d: 21 日, e: 22 日, f: 23 日



**Figure 12.** Time-height profile of disturbance energy in the meridional wind field in Wu'an City, Hebei Province (dotted line  $\leq 0.4$ )

**图 12.** 河北省武安市经向风场扰动能量时间高度剖面图(虚线  $\leq 0.4$ )

**Table 1.** Perturbation Energy Accumulation and Dispersion Period of zonal wind field in 500 hPa, 700 hPa and 850 hPa during Heavy Rainfall in North China

**表 1.** 华北地区强降水期间 500 hPa、700 hPa、850 hPa 纬向风场扰动能量积累及频散时间段

气压层次	华北强降水期间扰动能量积累时间段	华北强降水扰动能量频散开始时间
500 hPa	18–21 日	22 日开始减弱
700 hPa	18–20 日	21 日开始减弱
850 hPa	18–20 日	21 日开始减弱

通过与河北省武安市 7 月份实际降水资料对比,发现当发生降水过程的时候低层 850 hPa 扰动能量明显增大。其中 19~20 日河北省武安市发生 7 月份最强、影响最严重的强降水天气过程(其中 19 日 273.3 毫米,20 日 147.6 毫米),从图上分析可知此次降水过程是在低层产生扰动能量强中心的情况下,高层扰动能量向低层传播,表现为 900~200 hPa 整个层次均为强扰动区域,15 日 350 hPa 出现强扰动能量中心、18 日强扰动能量中心传至 500 hPa。低层 850 hPa、700 hPa 有 18~21 日为强水汽输送的时间段,基本上对应扰动能量大值区,18~20 日水汽输送越来越剧烈,图上的 2 个层次的扰动能量也越来越强,在水汽输送减弱后,图上的等值线也显示扰动能量开始减小,因此河北省武安市上空 900~200 hPa 的经向风场的时间高度剖面图在 18~21 处于扰动能量大值控制区,反映此期间有较强的暖湿空气输送。

### 5.1. 500 hPa 经向风场扰动能量分布特征

综合图 13 我们可知:9~26 日平均扰动能量存在一个大的波动,1~4 日和 4~7 日各有一个小波动,7 月下旬平均扰动能量曲线存在小幅度的波动。华北强降水过程发生在 9~26 日的大波动范围内,19 日达到此次波动的扰动能量最大值点,然后平均扰动能量开始减弱。经向风场反映水汽的输送,这一特征基本可以反映 19~21 日期间华北强降水过程水汽的累积和消散过程。

图 14 可以看出 18 日强降水发生之前整个华北地区的扰动能量比较强,19 日华北出现强降水天气,华北中部和北部扰动能量减弱,强降水落区基本处于强扰动区域,20 日华北北部扰动能量持续减弱,强降水向北移动,强降水覆盖区域扰动能量稳定维持。21 日强降水移至华北东部,华北北部扰动能量持续减弱,原先为降水落区的山西地区扰动能量开始减弱。22~23 日强降水基本消失,整个华北区域的扰动能量迅速减小。

19~21 日降水发生时华北东南部的扰动能量维持在 1.4 左右,西南部的强扰动能量维持在 1.8 左右,对比高度场和风场合成图,我们猜测华北东南部的扰动能量可能反映副高西侧的水汽输送,华北西南部的扰动能量可能反映华北气旋对水汽的输送。20 日处于华北北部的扰动能量低值中心有向南传播的趋势,随着降水的发展,北部扰动能量低值不断向南传播,而且发现北部低扰动能量的出现对应降水过程开始。综合以上特征我们可知道强降水发生之前华北地区扰动能量积累,强降水发生时扰动能量维持在一个较强的状态,强降水结束后,扰动能量迅速减小。整个过程中华北中西部的两高一低扰动能量分布形势较稳定,我们猜测扰动能量的稳定维持导致了此次华北地区强降水天气的产生。

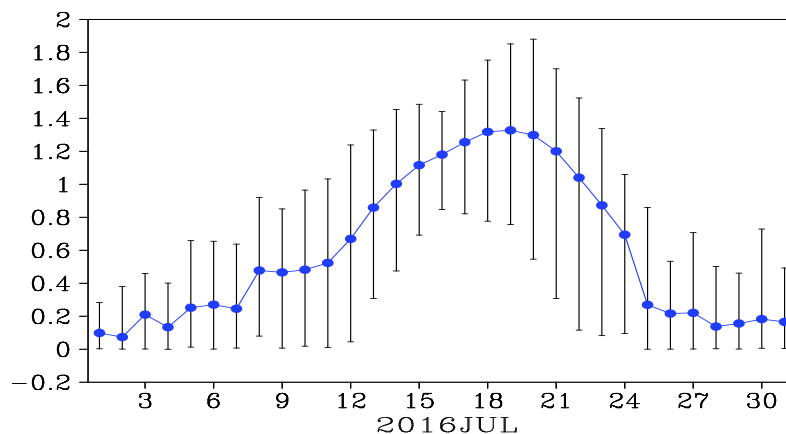
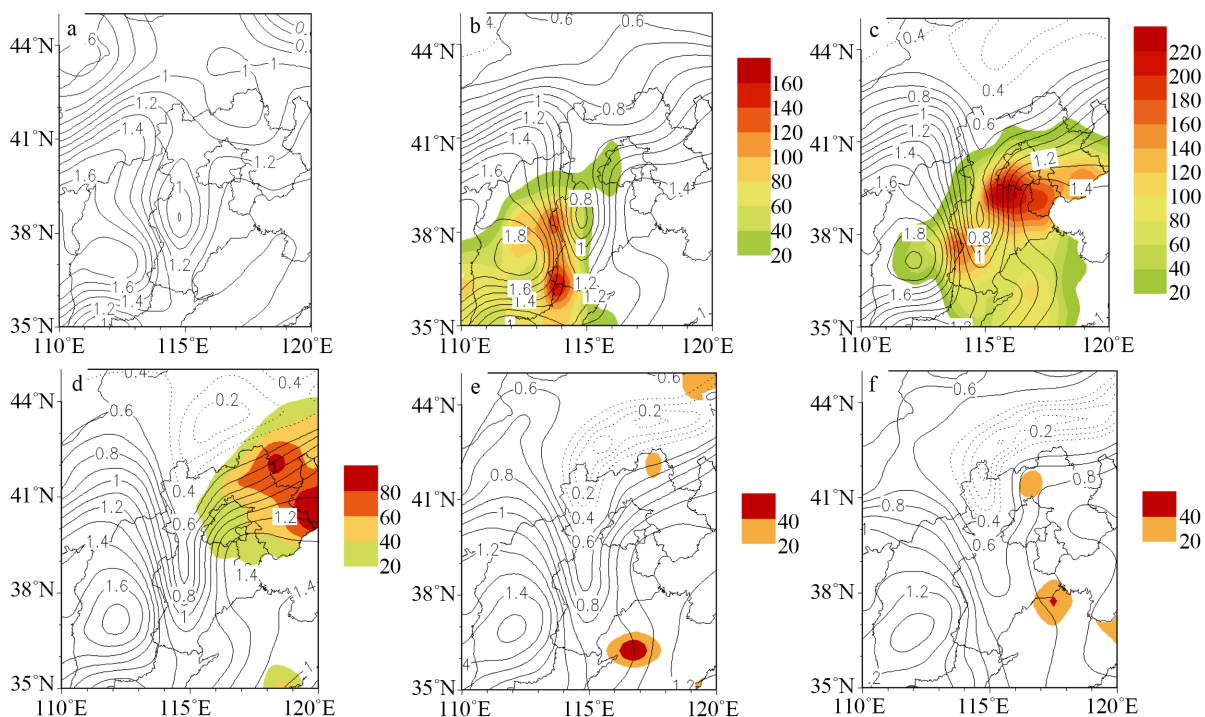


Figure 13. Regional average perturbation energy curve of 500 hPa meridional wind field in North China Curve

图 13. 华北地区 500 hPa 经向风场区域平均扰动能量曲线图



**Figure 14.** Synthetic chart of 500 hPa meridional wind disturbance energy (dotted line  $\leq 0.4$ ) and 20~20 h cumulative precipitation (shadow  $\geq 20$  mm) a: 18<sup>th</sup> b: 19<sup>th</sup> c: 20<sup>th</sup> d: 21<sup>st</sup> e: 22<sup>nd</sup> f: 23<sup>rd</sup>

**图 14.** 500 hPa 经向风场扰动能量(虚线  $\leq 0.4$ )与 20~20 时累积降水(阴影  $\geq 20$  mm)合成图 a: 18 日 b: 19 日 c: 20 日 d: 21 日 e: 22 日 f: 23 日

## 5.2. 700 hPa 经向风场扰动能量分布特征

从图 15 平均扰动能量分布曲线可以看到 5 次波动, 分别出现于 2~4 日、4~6 日、7~26 日、26~29 日、29~31 日。整体形势表现为 7 月初至 7 月中旬扰动能量不断加强, 7 月 20 日达最强, 7 月下旬扰动能量不断减弱。华北强降水过程处于 7~26 日的平均扰动能量振荡的过程中, 其中强降水发生之前扰动能量不断增强, 21 日扰动能量开始减弱。

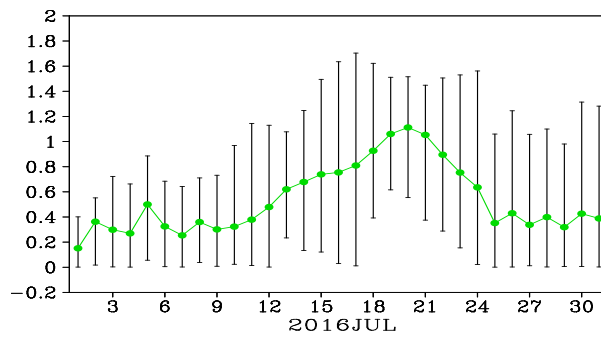
18 日华北地区扰动能量分布表现为多个强扰动中心, 整体扰动能量较强(如图 16(a)所示)。19 日强降水过程开始, 华北北方地区开始出现较低的扰动能量区域, 接下来几天华北北部扰动能量不断减小。18 日位于西北地区的中心为 0.9 的强扰动能量在 19 日向南部移动消失。强降水发生过程中位于华北南部地区有两个强扰动能量中心稳定维持, 降水区北移消失后, 两个强扰动能量中心开始减弱。综合以上特征, 我们发现降水发生的时候华北南部有强扰动能量中心维持, 华北北部扰动能量频散。

综合来看山西地区强扰动能量中心再降水期间加强, 山东地区强扰动能量则不断发展北上。

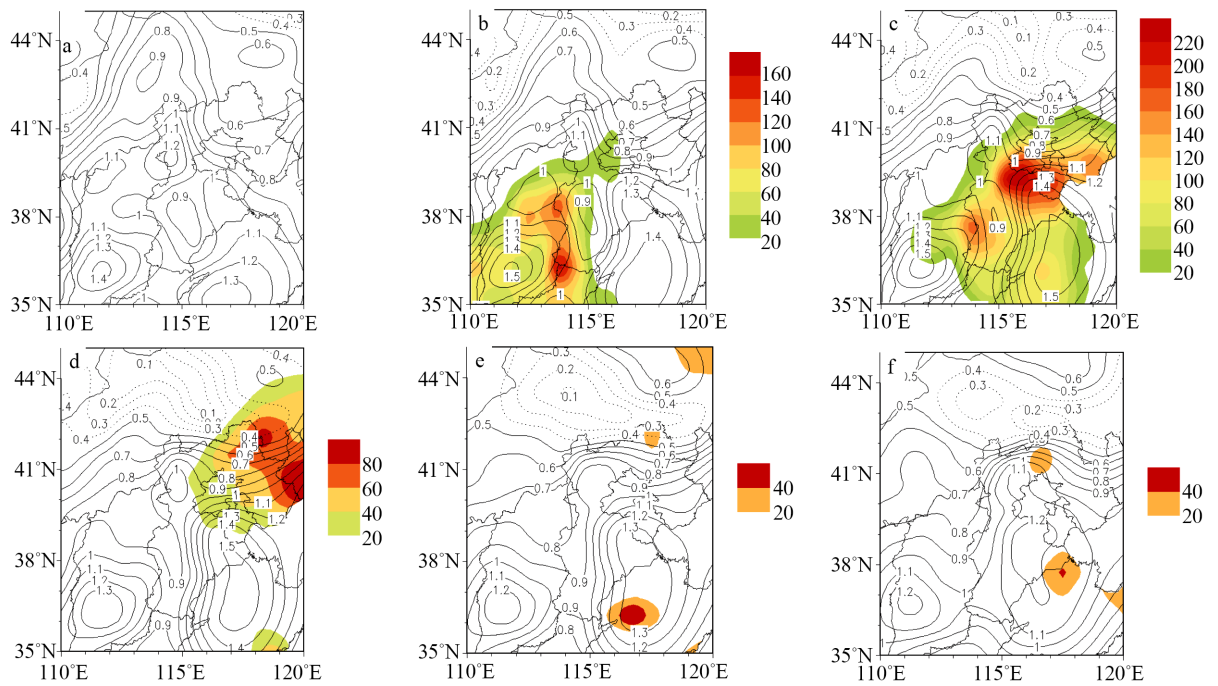
## 5.3. 850 hPa 经向风场扰动能量分布特征

图 17 平均动能分布显示 850 hPa 华北平均扰动能量曲线表现为多次波动, 分别出现于 2~4 日、4~7 日、7~16 日、16~26 日、26~28 日及 28~31 日。华北 19~21 日强降水过程出现于 16~26 日的扰动能量振荡过程中, 20 日之前扰动能量持续增强, 21 日减弱。

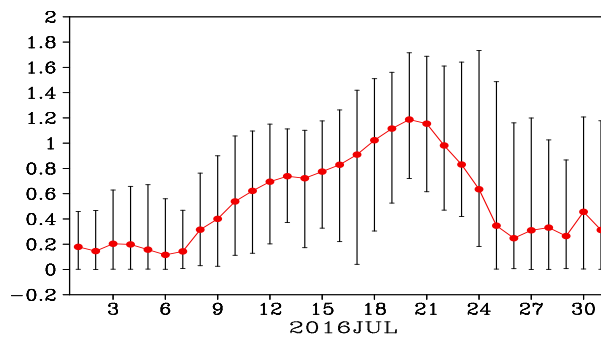
18 日华北南部有两个强扰动能量中心, 内蒙古地区有一扰动能量大值区(图 18(a)), 根据文献[8]-[15], 扰动能量分布图上强扰动能量中心一般与低压低槽相联系, 对比 850 hPa 天气图发现内蒙古地区存在一低涡, 19 日出现强降水过程, 南部的两个强扰动能量中心加强。内蒙古地区的扰动能量大值区



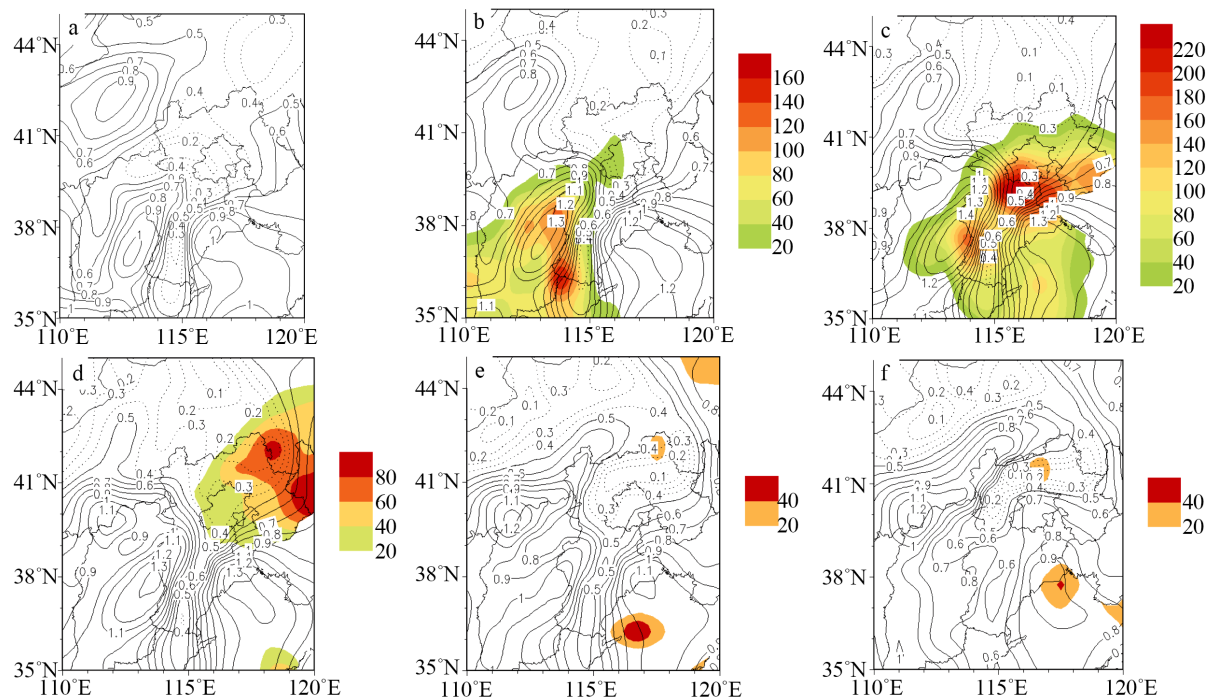
**Figure 15.** The average perturbation energy curve of the 700 hPa meridional wind field in North China  
**图 15.** 华北地区 700 hPa 经向风场区域平均扰动能量曲线图



**Figure 16.** Synthetic chart of 700 hPa meridional wind disturbance energy (dotted line  $\le 0.4$ ) and 20~20 h cumulative precipitation (shadow  $\ge 20$  mm) a: 18<sup>th</sup> b: 19<sup>th</sup> c: 20<sup>th</sup> d: 21<sup>st</sup> e: 22<sup>nd</sup> f: 23<sup>rd</sup>  
**图 16.** 700 hPa 经向风场扰动能量(虚线  $\le 0.4$ )与 20~20 时累积降水(阴影  $\ge 20$  mm)合成图 a: 18 日, b: 19 日, c: 20 日, d: 21 日, e: 22 日, f: 23 日



**Figure 17.** The average perturbation energy curve of the 850 hPa meridional wind field in North China  
**图 17.** 华北地区 850 hPa 经向风场区域平均扰动能量曲线图



**Figure 18.** Synthetic chart of 850 hPa meridional wind disturbance energy (dotted line  $\leq 0.4$ ) and 20~20 h cumulative precipitation (shadow  $\geq 20$  mm) a: 18<sup>th</sup> b: 19<sup>th</sup> c: 20<sup>th</sup> d: 21<sup>st</sup> e: 22<sup>nd</sup> f: 23<sup>rd</sup>

**图 18.** 850 hPa 经向风场扰动能量(虚线  $\leq 0.4$ )与 20~20 时累积降水(阴影  $\geq 20$  mm)合成图 a: 18 日, b: 19 日, c: 20 日, d: 21 日, e: 22 日, f: 23 日

向南移动减弱,中心强度 0.8,山西地区强扰动能量区域分裂出强扰动于 20 日出现于 40°N 左右,中心强度为 1。21 日山西地区及内蒙古地区扰动能量减弱,但是仍持续向北传递强扰动能量,使 40°N 附近的扰动能量持续增大。22 日降水过程基本结束后,40°N 附近扰动能量持续增大,南部地区的扰动能量迅速减弱。强降水落区基本处于扰动能量大值区。此次降水过程位于山东和山西地区的两个扰动能量大值区刚好对应天气图上西南低空急流和偏东风急流,也即强降水过程的两条水汽输送通道。强降水落区随着东北西南走向的两个扰动能量大值区等值线走向不断向东北方向移动,强降水覆盖范围基本上为扰动能量大值区。综合来看华北南部的两个强扰动能量中心不断向北发展,同时雨带也不断北进。

### 5.3. 小结

强降水期间经向风场中层能量频散先于低层(表 2),高层能量中心传至中低层(700~500 hPa)而后开始减弱,强降水天气开始出现。强降水过程中扰动能量表现为 900~200 hPa 整个层次均为强扰动区域。500 hPa 扰动能量分布显示强降水发生之前整个华北地区的扰动能量比较强;降水基本消失,整个华北区域的扰动能量迅速减小;华北东南部的强扰动能量可能反映副高西侧的水汽输送,华北西南部的强扰动能量可能反映华北气旋对水汽的输送。700 hPa 扰动能量分布显示山西地区强扰动能量中心在降水期间加强,山东地区强扰动能量则不断发展北上。850 hPa 扰动能量分布显示内蒙古地区有一扰动能量大值区对应内蒙古地区存在的低涡,位于山东和山西地区的两个扰动能量大值区刚好对应天气图上存在的西南低空急流和偏东风急流,也即强降水过程的两条水汽输送通道,强降水覆盖范围基本上为扰动能量大值区。

## 6. 华北强降水期间不稳定能量时空分布特征

强降水期间不稳定能量的积累和释放是非常重要的过程,因此我们讨论强降水期间动能的分布特征。

本文的动能计算公式为： $E = 0.5 \times (u^2 + v^2 + w^2)$ ，其中  $w = -\omega / \rho g$ 。

从河北省武安市上空动能时间高度剖面图(图 19)可以看出 18~23 日存在一次能量扰动，从 18 日开始动能不断增大，19 日 900~200 hPa 表现为 3 个动能大值中心，20 日位于 700 hPa 和 500 hPa 的两个动能大值中心开始减弱，位于高层 250 hPa 的动能发展达此次过程最强状态，21 日武安市从 900 hPa 至 200 hPa 整个上空的动能均减弱。22~24 日 700~200 hPa 的动能开始有所增大，25 日高层回落，700 hPa 发展最盛。动能表示空气运动的速度大小，华北地区“7·20”强降水过程水汽主要由低空急流输送，动能的大小基本可以代表水汽输送状况，对比经向风场扰动能量分布特征发现，华北地区动能的传播状况基本可以反应河北省武安市强降水天气过程经向风场扰动能量的传播特征。我们再来看一下华北区域平均动能分布情况。

图 20 的平均动能分布显示 500 hPa 多波动，700 hPa 和 850 hPa 各有两个明显的大振荡，在华北强降水发生时三个层次上均出现动能迅速增大的情况，具体表现为 18~20 日动能增大，21 日开始减小，其中 850 hPa 的动能在 17 日就已经有开始增大的趋势。动能的垂直分布特征和经向风场的垂直扰动能量分布在华北强降水天气过程中的表现基本相同。空气运动产生动能，而经向风场可以代表水汽的输送，动能越大，水汽输送越剧烈，冷暖空气碰撞，产生强天气过程。对比经向风场的扰动能量分布与动能的分布可以发现二者基本可以吻合。

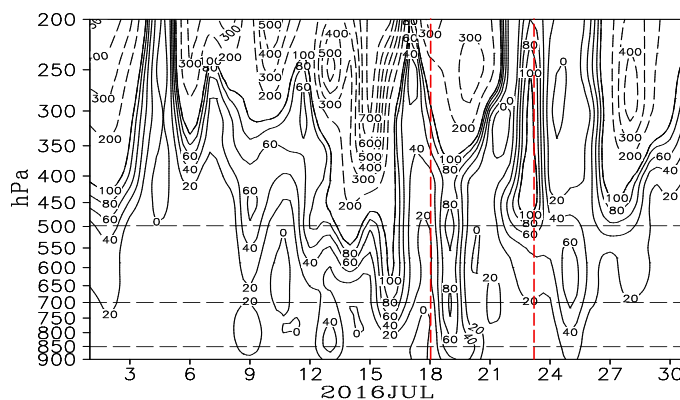
## 7. 结论

本文利用国家气候中心站点降水数据、欧洲中期天气预报中心再分析格点资料，使用 Morlet 小波分析、巴特沃斯带通滤波及波包传播诊断方法，选取风场 4~8 天的高频扰动能量作为研究对象，对华北地区“7·20”强降水过程的扰动能量时空分布特征进行分析，主要结论如下：

**Table 2.** Perturbation Energy Accumulation and Dispersion Period of meridional wind field in 500 hPa, 700 hPa and 850 hPa during Heavy Rainfall in North China

**表 2.** 华北地区强降水期间 500 hPa、700 hPa、850 hPa 经向风场扰动能量积累及频散时间段

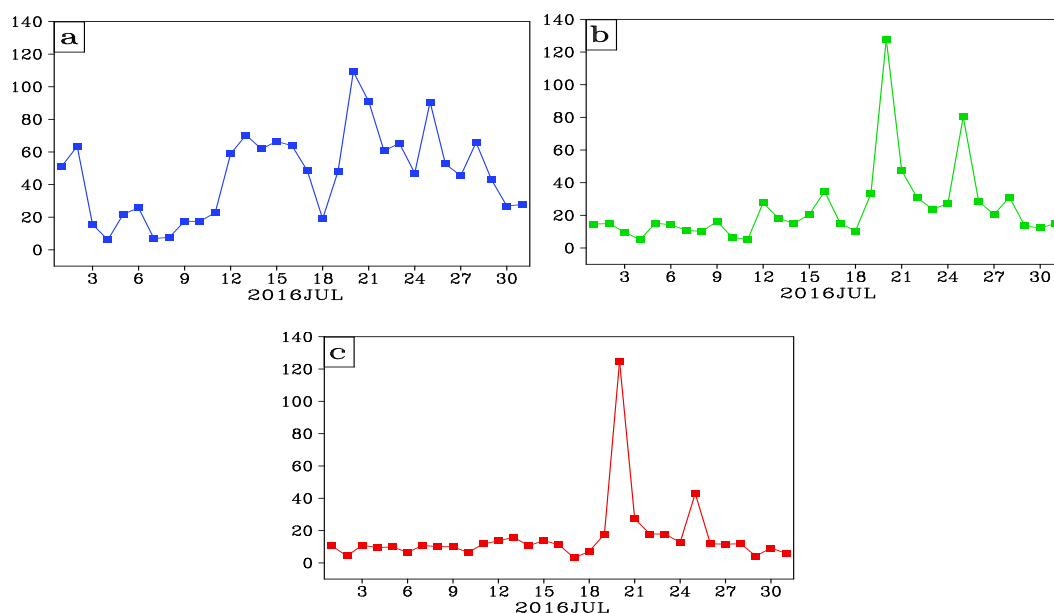
气压层次	华北强降水期间扰动能量积累时间段	华北强降水扰动能量频散开始时间段
500 hPa	18~19 日	20 日开始减弱
700 hPa	18~20 日	21 日开始减弱
850 hPa	18~20 日	21 日开始减弱



**Figure 19.** Time-height profile of kinetic energy in Wu'an City, Hebei Province (dotted line  $\geq 100$ , unit J)

**图 19.** 河北省武安市的动能时间高度剖面图(虚线  $\geq 100$ ，单位 J)





**Figure 20.** Regional average kinetic energy in North China (unit J). a: 500 hPa, b: 700 hPa, c: 850 hPa  
**图 20.** 华北地区区域平均动能图(单位 J)。a: 500 hPa, b: 700 hPa, c: 850 hPa

1) 强降水落区基本上为风场扰动能量高值区, 降水落区主要沿强扰动能量等值线形状分布并沿等值线的分布形状移动, 经向风场及纬向风场的扰动能量分布等值线走向可以反映水汽、冷暖空气的输送强弱, 发生强降水的区域, 扰动能量一直维持比较强的状态, 而强降水过程结束后, 扰动能量迅速减弱, 风场的扰动能量积累频散特征基本可以代表强降水期间能量的积累释放过程。

2) 华北南部的两个扰动能量大值区刚好对应天气图上西南低空急流和偏东风急流, 也即强降水过程的两条水汽输送通道, 内蒙古地区的扰动能量大值区域代表高纬度的冷空气输送。

3) 纬向、经向风场的扰动能量不仅代表冷暖空气和水汽的输送, 也一定程度上反映了不稳定能量(动能)的输送, 动能与经向风场的扰动能量垂直和水平分布基本吻合, 垂直方向上表现为 18 日 900 hPa~200 hPa 均有强扰动能量和动能高值分布, 强降水天气产生后, 开始减弱。

4) 扰动能量分布图上高值扰动一般对应天气图上的低压低槽。

## 基金项目

国家自然科学基金(91337215, 41575066); 国家科技支撑计划(2015BAC03B05); 全国大学生创新训练计划项目(201610621033)支持。

## 参考文献

- [1] 张利平. 华北地区陆气水循环时空演化规律研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- [2] 李克让, 尹思明, 沙万英. 中国现代干旱灾害的时空特征[J]. 地理研究, 1996, 15(3): 6.
- [3] 周国良, 高唯清, 黄昌兴. 2016 年我国极端暴雨事件浅析[J]. 国防防汛抗旱, 2017, 27(1): 75-87.
- [4] 梅梅, 姜允迪, 王遵娅, 等. 2016 年中国气候主要特征及主要天气气候事件[J]. 气象, 2017, 43(4): 468-476.
- [5] 2016 年 7 月气候评价[M]. 北京: 国家气候中心, 2016.
- [6] 符娇兰, 马学款, 陈涛, 等. “16·7”华北极端强降水特征及天气学成因分析[J]. 气象, 2017, 43(5): 528-539.
- [7] 孙继松, 何娜, 王国荣, 等. “7·21”北京大暴雨系统的结构演变特征及成因初探[J]. 暴雨灾害, 2012, 31(3): 218-225.

- [8] 李泽椿, 谌芸, 张芳华, 等. 由河南“75·8”特大暴雨引发的思考[J]. “75.8”暴雨洪水 40 周年专刊, 2015, 38(3): 1-12.
- [9] 袁媛, 高辉, 李维京, 等. 2016 年和 1998 年汛期降水特征及物理机制对比分析[J]. 气象学报, 2017, 75(1): 19-37.
- [10] Yeh, T.C. (1949) On Energy Dispersion in the Atmosphere. *Meteor*, **6**, 1-6.  
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1949\)006<0001:OEDITA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1949)006<0001:OEDITA>2.0.CO;2)
- [11] 曾庆存. 强迫基流上 Rossby 波包的结构和演变[J]. 中国科学, 1985: 377-395.
- [12] 缪锦海, 肖天贵, 刘志远. 波包传播诊断的理论基础和计算方法[J]. 气象学报, 2002, 60(4): 461-467.
- [13] 葛非, 肖天贵, 金荣花, 等. 2008 年低温雨雪天气扰动能量的积累和传播[J]. 气象, 2008, 34(12): 11-20.
- [14] 陈伟斌, 肖天贵, 谌芸, 等. 重庆“7·17”暴雨过程的波包分布及传播特征[J]. 暴雨灾害, 2009, 28(2): 126-130.
- [15] 肖天贵, 孙照渤, 葛非. 四川“9·22”暴雨过程的波包分布及传播特征[J]. 气象科学, 2010, 30(1): 185-192.
- [16] 郭胜利, 葛非, 马荣, 等. 2005 年 3 月西藏强降雪过程的波包分布及传播特征[J]. 大气科学学报, 2011, 34(4): 410-415.
- [17] Torrence, C. and Compo, G.P. (1998) A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **79**, 61-78. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2)
- [18] Stoy, P.C., Katual, G.G., Siqueira, M.B.S., et al. (2005) Variability in Net Ecosystem Exchange from Hourly to Inter-Annual Time Scale at Adjacent Pine and Hardwood Forests: A Wavelet Analysis. *Tree Physiology*, **25**, 887-902.
- [19] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(第二版) [M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [20] Pearson, K. (1902) On Lines and Planes of Closest Fit to System of Points in Space Philos. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, **6**, 559-572.

**知网检索的两种方式:**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-3967, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>期刊邮箱: [ag@hanspub.org](mailto:ag@hanspub.org)