Analysis on Characteristics of Disturbance Energy of Heavy Precipitation in Early Summer in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River

Wei Wei, Tiangui Xiao*, Xiaoqing Liu, Xingyu Ren

School of Atmospheric Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan Email: ^{*}xiaotiangui@cuit.edu.cn

Received: Jun 25th, 2018; accepted: Jul. 5th, 2018; published: Jul. 12th, 2018

Abstract

Using the meteorological sounding data of the middle and lower reaches of the Yangtze River in the summer of 2016, this paper analyzes the characteristics of a heavy rainfall process in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Using wave packet diagnostic methods, combined with the spatial distribution of precipitation and changes in wave packet values, the spread of perturbation energy, we explore the connection between wave propagation changes and the release of disturbance energy and heavy precipitation. The results show that the wave packet value has a significant growth process before the occurrence of heavy precipitation. During the reduction process, the release of perturbation energy contributes to the strong precipitation. At the same time, the wave packet values around the heavy precipitation are significant. The area also continuously transmits disturbance energy to the precipitation area, which is also an important reason why heavy precipitation can be maintained. Therefore, the characteristics of changes in disturbance energy before the occurrence of precipitation are applied to medium-range weather forecasting techniques to improve the timeliness and accuracy of the forecast.

Keywords

Precipitation, Wave Packet, Disturbance Energy, Medium-Range Weather Process

长江中下游地区初夏强降水过程扰动能量特征 分析

魏 薇,肖天贵*,柳晓庆,任兴宇

成都信息工程大学,大气科学学院,四川 成都 ^{•通讯作者。}

文章引用:魏薇,肖天贵,柳晓庆,任兴宇.长江中下游地区初夏强降水过程扰动能量特征分析[J].自然科学,2018,6(4):306-323.DOI:10.12677/ojns.2018.64042

Email: ^{*}xiaotiangui@cuit.edu.cn

收稿日期: 2018年6月25日; 录用日期: 2018年7月5日; 发布日期: 2018年7月12日

摘要

本文利用2016夏季长江中下游地区的气象探空资料,分析了长江中下游地区的一次强降水过程的特征, 利用波包诊断方法,结合降水空间分布以及波包值的变化、扰动能量的传播,来探究波包的传播变化和 扰动能量的释放与强降水之间的联系。结果表明:波包值在强降水发生前有显著增长过程,在减小过程 中伴随扰动能量的释放,扰动能量的释放对强降水起到了促进作用,同时,在强降水周围的波包大值区 也不断为降水区域输送扰动能量,这也是强降水能够维持的一个重要原因。因此通过降水发生前扰动能 量的变化特征将此应用于中期天气预报技术,可以提高预报的时效性和准确性。

关键词

降水,波包,扰动能量,中期天气过程

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/

CC O Open Access

1. 引言

2016 年我国的强天气过程频发,据研究[1],2016 年为强厄尔尼诺年,以长江中下游为例[2],长江 中下游地区梅雨期间暴雨发生频率高,6、7、8月的强降水频率显著增加,南京、武汉等市普降暴雨[3], 同时,全国降水量也较常年同期值显著上升。中期天气预报是大气科学领域研究的难点所在[4] [5],针对 强天气过程造成的自然灾害,如何准确、快速的对天气过程进行预报成为了重中之重,了解中期天气的 演变规律、加强中期天气预报的研究,成为当前研究的主要问题。

关于波动能量的传播,究其起源,为1940年叶笃正的能量频散理论[6];其后,曾庆存在《强迫基流 上 Rossby 波包的结构和演变》一文中[7] [8],通过 WKB 方法阐述了正压及斜压大气下波包的发展和传 播过程,同时研究了其演变特征;缪锦海[9]等将波动能量的传播真正应用于实际中,将观测资料用于诊 断从而进行天气预报;缪锦海,宋燕[10]等将其应用到天气预报的过程中;肖天贵[11]等研究了波包传播 与青藏高原夏季风强弱之间的联系,得出波包大值区与强天气过程相对应,波包的传播与槽脊的移动有 相同的趋势。

在前述研究工作中,针对长江中下游地区强降水期间波动能量的传播和发展研究较少,陈伟斌等[12] 将波包传播诊断方法(WPD)应用于强天气过程(如暴雨)的预报:在降水发生前,扰动能量急剧增加,而在 降水结束后,大气的扰动能量值又开始迅速减小,由此得出了可以通过扰动能量的增大减小判断强降水 的开始和结束的结论,因此能够对强天气进行预报与分析;葛非[13]等通过研究 2008 年我国南方低温雨 雪等特殊天气过程中扰动能量的变化趋势,得出在天气过程发生期间,雨雪区域基本处于波包大值区的, 而在天气过程结束后扰动能量开始减小的结论。因此本文选取了长江中下游的某些省份降水期间波能传 播进行研究,长江中下游的强降水可能导致长江及其支流水位上升,给周边城带来洪涝灾害,同样会对 人民的财产造成损失[14],针对长江中下游的降水,何冬燕等[15]通过研究初春青藏高原地表温度变化对 长江中下游降水的影响发现:地表温度与长江中下游南部的降水量有负相关的关系,本文通过研究中长 期天气过程中扰动能量的规律,并从中提取共同点,以期将此规律应用于中长期天气预报,提高预报的 时效性。

2. 资料与方法

本文的数据资料选用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的 2016 年 6 月~9 月 500 hPa、700 hPa、850 hPa 高度场资料,分辨率为 0.75 × 0.75,以及同期三个高度的 U、V 风场资料,同时选用全国降水站 点逐日 20 时~20 时,24 小时降水数据。

为了研究夏季长江中下游降水的扰动能量的传播,本文采用 Butterworth 带通滤波方法[16] [17],通过带通滤波挑选出适于研究的 15~30 天内的低频波[18],接着使用 WPD 波包传播诊断方法:

降水、风场、高度场等资料都由波动组合而成,因此有下式:

$$P(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i(x, y, z, t) \cos(k_i x + l_i y + m_i z + \omega_i t + \varphi)$$
(1)

波动能量沿着包络传播,上式中 $A_i(x, y, z, t)$ 为振幅,最大值可以显示波动的传播方向,k,l,m为x,y,z方向的波数。

缪锦海等(2002)通过 Hilbert 变换,阐述了波包传播诊断方法(WPD),并应用实际观测资料验证了其 正确性,其具体计算步骤为:

1) 对高度场等气象资料进行带通滤波,并得到相应资料的窄带信号 P(x, y, z, t)。

2) 对窄带信号进行 Hilbert 变换:

$$\hat{P}(x,y,z,t) = A(x,y,z,t) \cdot \sin\left[kx + ly + mz + \omega_0 t + \varphi(x,y,z,t)\right]$$
(2)

3) 通过解析信号 $P_c(x, y, z, t)$,可以求出振幅,其中 $A_i(x, y, z, t)$ 即为所求的波包值

$$P_{c}(x, y, z, t) = A(x, y, z, t) \cdot \cos[kx + ly + mz + \omega_{0}t + \varphi(x, y, z, t)]$$

+ $iA(x, y, z, t) \cdot \sin[kx + ly + mz + \omega_{0}t + \varphi(x, y, z, t)]$
= $\tilde{A}(x, y, z, t) e^{i(kx+ly+mz+\omega_{0}t)}$ (3)

进而**:**

$$P_{c}(x, y, z, t) = P(x, y, z, t) + i\hat{P}(x, y, z, t)$$
(4)

其中

$$A(x, y, z, t) = \sqrt{P^{2}(x, y, z, t) + \hat{P}^{2}(x, y, z, t)}$$
(5)

4) 利用上述三步求出的波包值进行绘图,通过分析波包值变化及其经向、纬向剖面图,分析扰动能 量传播的时间和方向,研究波包的传播特性。

3. 初夏降水低频特征

6月,北半球的极涡为单极型,西太副高活动强度较常期偏强[19],如图 1,6月上旬为一槽一脊, 冷空气影响我国东部地区,副高位于华南南部,至6月中旬转为两槽一脊,冷空气活动更加频繁,副高 北跳,致使雨带略微北移,受冷空气与副高交汇与南支槽东移共同影响,产生较强降水,至6月下旬仍 维持两槽一脊环流形势,槽脊都有所加深、加强,副高继续北抬,并西伸至我国西南地区,北方冷空气





影响逐渐减弱,但由于西南急流的影响,加之东北冷涡东移南下,致使黄淮、江南一带出现了新一轮的 强降水天气[20] [21]。

14 日强降水带主要在长江以北地区,强降水中心位于江苏北部,至 15 日南移至长江以南,强中心 位于湖南和江西北部,长江中下游部分地区降水量达到 50 mm,达到大雨级别。至 16 日,雨带南移至两 广地区,17,18 日华南沿海地区强降水较为明显,至 19 日,降水带北移,长江中下游一带有较强降水 产生,其中,湖北和安徽南部均有大于 30 mm 的降水产生,局地超过 50 mm,已达到暴雨级别,降水强 中心位于湖北湖南交界处;20 日,我国南方的降水区域被分成两部分,其中一个大值区位于湖南一带, 另一个大值区移动到江苏,江苏大部降水量超过 25 mm,局地超过 60 mm,为大雨至暴雨级别(图 2)。

对江苏省 6~8 月的降水进行空间平均,对平均后的降水进行小波分析,得出结果,从图 3 中可以看出,小波分析的显著周期在 8~12 天左右,说明江苏省降水有一个 8~12 天的周期,因此可以利用 10~30 天的波动对长江中下游的降水进行相关研究。

4. 长江中下游波能分布特征

为了研究不同高度层的显著性,本文选取 6 月波包时间序列进行显著性分析。在上述分析中已经求 出长江中下游降水在 8~12 天有显著周期,因此通过滤波留下 15~30 天周期的波动,对波包值进行分析。

选取长江中下游较为典型的南京市进行分析,如图 4,6 月上旬波包值较小,对应全国站点降水,本 地无明显强天气过程,6 月中旬,波包值有明显的增加,至 17 日有所下降,持续性降水从 18 日开始, 说明 500 hPa 高度层上出现了能量的释放,6 月下旬,波包值开始有明显的下降趋势,扰动能量有所释放,







图 2.6月 15~20 日降水过程空间分布



Figure 3. Spatial average wavelet analysis of June-August precipitation in Jiangsu province 图 3. 江苏省 6-8 月降水空间平均小波分析



Figure 4. Time series diagram of 500 hPa wave packet value in June 图 4.6月 500 hPa 波包值 - 时间序列图 另外,在图中也有突变的较小波包值也导致无降水天气;21日之后两天之内,波包值有所上升,可以看 出其他高度层的能量回落至500hPa,使此高度层出现能量集聚,通过6月逐日波包值的整体分析可以看 出,在强降水天气过程中,波包值维持在一个相对稳定的大值范围之内,伴随着扰动能量的释放,波包 值逐渐较小,能量的释放给降水提供了动力因素。

同 500 hPa 研究方法,如图 5,从 2 日开始,波包值就处于一个逐渐增大的过程中,至 14 日达到最 大值之后逐渐减小,说明 14 日开始有扰动能量的释放,产生较强降水,能量的释放为降水提供了良好的 动力因素;此后直至 23 日,波包值都维持在一个稳定的大值区之中,有小幅度的震荡,23 日之后减小 速度较快,表现出能量逐步释放或扩散到其他高度层;27 日波包达到极小值之后,又开始迅速增加,对 应 30 日开始的新一轮强降水天气过程,可以说明此波包值的增加在为 30 日的降水积聚能量,总体来说, 700 hPa 高度层上波包的对应性较好。

如图 6,可以看出波包值的变化趋势反映了降水的变化趋势,且 18 日~21 日、6 月 30~7 月 6 日两次 强降水之间有明显的波包小值区,但是波包的释放对降水影响较为滞后,且波包值均较小,无法判断波 包大值区与降水的准确对应关系,因此显著性比 500 hPa 高度层上小。

5. 扰动能量的积累和传播特征

在上述分析中可以看出,500 hPa 高度层对应性较好,因此主要讨论 500 hPa 高度层上波包值的变化 趋势以及波包大值区的分布特征,以研究扰动能量的传播与影响特征。

5.1. 降水期间扰动能量演变特征

为了研究波包值在降水期间发生的变化特征,下面选取了6月15日~6月20日长江中下游强降水天 气过程,对降水过程中的波包值、波包分布以及波包变化特征进行研究。



Figure 5. Time series diagram of 700 hPa wave packet value in June 图 5. 6 月 700 hPa 波包值 - 时间序列图



图 6.6月 850 hPa 波包值 - 时间序列图

此次降水过程影响范围广、降水强度大,下面对波包值的空间分布进行分析。

如图 7,图中填色区域为波包大值区,15 日长江中下游以北地区呈现大值区,大值区出现在湖北北 部至江苏东部一带,且相较于 14 日有所减小,说明能量释放在此地产生了降水,16 日波包大值区范围 扩大,且扰动能量在南移的过程中不断释放能量,同时将能量传播到波包值稍小的区域,进行能量补充 降水的范围不断扩大,安徽南部、江苏南部、浙江北部产生较强降水,而降水空间分布图上也较好的呈 现了此趋势;16日,波包值在长江中下游一带继续减小,而长江中下游南部地区的波包值开始逐渐增大, 说明降雨带开始向南移动,降水过程结束,可以看到,17日长江中下游的波包值开始逐渐增大,对长江 中下游开始了能量的补充,华南地区受扰动能量释放影响产生较强降水,而长江以北地区,扰动能量又 开始增加,为接下来的强降水积聚能量。18 日,湖北、安徽、江苏三省均处于波包大值区的控制范围, 波包的两个大值区处于陕西南部和江苏沿海地区,陕西的大值区是由新疆地区源源不断的冷空气输送、 上游能量对此地不断补充而产生,江苏沿海地区的大值区是由于副高不断西伸,并控制江淮沿海地区而 形成;19日波包值有所增加,大值区范围扩大,中心仍位于江苏沿海地区,大值区与降水大值区有很好 的对应关系;20日的波包值图中,长江以南地区波包值迅速减小,可以看出波包在此范围中有扰动能量 的释放,为降水提供动力条件,产生较大降水,长江以北地区的波包值仍处于增大阶段,降水维持。

5.2. 扰动能量经向传播特征

为了分析降水过程中波包以及扰动能量的移动路径,对波包进行经向及纬向分析,画出波包的经向-时间剖面图和纬向-时间剖面图。







DOI: 10.12677/ojns.2018.64042





图 7.6月15日~6月20日波包值空间分布图

为了研究波包纬向剖面图的波包变化、传播等特征,选取了具有代表性的经度 117°进行分析,图 8 为 6 月 10°N~40°N 的经向剖面图。

从图 8 中可以看出,在 11 日,27°N~30°N 附近有波包的减小趋势,可以说明在此处有能量释放,13~17 日,在 30°N~33°N 附近有波包的增大趋势,而长江以南地区波包值开始减小,说明南部及副高的扰动能 量开始向此处传播,至 18 日开始迅速减小,因此在 18 日有扰动能量的大量释放,因此长江中下游 6 月 发生的两次强降水,由于降水变化与 500 hPa 高度上波包值的变化趋势相符,可以认为扰动能量的释放 造成了强降水的产生;23 日~27 日,在 30°N~33°N 有来自北方的波包向南传播,扰动能量的迅速增大, 开始为下一次降水积聚能量。

5.3. 扰动能量纬向传播特征

由于南京、合肥、武汉三地的纬度都在 32°N 左右,因此具有典型性,因此选取此纬度做出波包的纬向剖面图,如图 9 所示,可以看出,在 9~13 日波包值逐渐增大,有扰动能量的积累,能量的源地在 135°E 附近,随时间不断向西传播,至 14 日传播至 110°E~120°E 处并开始释放,能量的释放为降水提供了较好的条件,与 14~16 日的强降水有较好的对应关系;在 18~21 日的降水过程中,处于此处的强波包继续维持并基本稳定,为降水提供了较为充足的能量;至 6 月末,波包值又开始逐渐增大,开始新一轮降水的能量释放。

从上述经向剖面图及纬向剖面图中可以看出,波包传播及扰动能量的释放与降水有较好的对应关系, 波包值的减小导致扰动能量的释放,为降水提供能量供给。



2016.06. time-lat

Figure 8. June wave energy transversal profile 图 8.6 月波能经向剖面图



通过上述相关讨论,可以发现,500 hPa 高度层的扰动能量的积累和传播,在强降水发生之前以及降 水期间有一些共同的特征:强降水发生前 3 天会有波包值的迅速增大,伴随着扰动能量的积聚,周围的 波包大值区也不断将扰动能量向降水区域传播;在降水发生时基本伴随着波包大值区的减小,伴随扰动 能量的释放,且强降水发生期间,波包值基本在较为稳定的大值区内;产生降水的区域,基本周围有强 波包区域,源源不断的将能量传播至降水区,使强降水维持;而在降水基本结束之后,波包值又会减小, 在下一次降水来临之前不断增大,为下一次降水积聚能量。

上述共同特点对长江中下游地区夏季波包的产生、发展以及演变的研究有一定的实际意义,同时也 为长江中下游地区夏季的中期预报提供了一个较为准确的思路: 在找出中频波对天气过程影响的共同特 征之后,可将此特征应用于对中期天气的预报过程中,若 15~30 天周期的波包有增大的趋势,可在此时 通过波包分布和波包经向、纬向剖面图对波包值的变化以及波包大值区的移动方向来提前对降水区域进 行预报,通过波包值的大小对降水强度、降水范围进行预报,在波包值维持稳定的大值区并开始逐渐减 小时,可以根据扰动能量的释放来预报降水的产生,在波包逐渐回落至正常值后,可以预报出降水过程 基本结束,若波包仍然有增大的趋势,则表明即将到来新一轮降水。

6. 结论

本文利用了波包诊断方法(WPD),通过应用 2016 年 6 月长江中下游各省份站点的降水数据,配合 ECMWF 的高度场和风场数据,对长江中下游夏季发生三次强降水过程进行相关分析,对降水过程中扰 动能量的传播进行研究得出如下结论:

1)6月发生在长江中下游地区的强降水天气过程基本特征为强度强,持续时间长。

2) 2016 年初夏, 欧亚大陆中高纬度主要呈两脊一槽或两槽一脊环流形势, 冷空气在我国以北地区活

动频繁,初夏长江中下游降水的基本机制即为副高携带暖湿气流和北方冷空气的共同作用。

3) 850 hPa 受地形影响,对降水的影响更为滞后,500 hPa 的周期显著性更高。

4) 在强降水过程发生期间,降水区域附近有强波表示的较强的扰动能量,且在降水过程期间维持在 较为稳定的大值区,强波包能量在降水区域达到有利于降水条件时,即形成能量释放,为降水提供动力, 且不断的波包传播与能量的释放也为降水维持提供了条件。

5) 通过分析 15~30 天周期的中频波代表的扰动能量的不断变化,发现中频波的传播以及扰动能量的 不断变化对中长期天气变化有很好的指示作用。

本文仅对 15~30 天的扰动能量影响降水机制进行了分析,对波包的传播与变化模式与中期天气预报 技术的研究仍存在不足。

致 谢

感谢我的指导老师肖天贵老师,他首先为我确定了大的研究方向,为论文的撰写构造了框架和系统, 老师在不断的指导中,为我提供了许多研究的思路和方法;感谢论文撰写过程中提供帮助的研究生学长 学姐,在论文框架以及研究方向的确定方面提供了很大的帮助,同时,他们也帮助我们完成论文最后的 检查工作。

其次感谢我的家人,我的父母在我的成长过程中给予了我许多鼓励,是他们的理解和支持,我才能 够学习自己感兴趣的知识,他们的不断支持是我的力量源泉,我会更加努力的学习和生活,不辜负他们 的殷殷期望。感谢我的室友,在我失落的时候给予鼓励,在我遇到困难的时候给予帮助,在她们身上我 学到了很多,她们对学习,对生活的态度都深深影响着我,许多取得的成就都是我们共同努力的结果。

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] 毕宝贵, 张小玲, 代刊. 2016 年超强厄尔尼诺背景下的强对流和极端降水天气特点[J]. 科学通报, 2017(9): 928-937.
- [2] 倪允琪,周秀骥,张人禾,等. 我国南方暴雨的试验与研究[J]. 应用气象学报, 2006, 17(6): 690-704.
- [3] 吴玉明,杨红卫. 南京市 2016 年暴雨洪水分析与思考[J]. 江苏水利, 2016(12): 69-72.
- [4] 吴曼丽, 陆忠艳, 王瀛. 中期延伸天气预报方法研究[J]. 气象与环境学报, 2007, 23(2): 6-10.
- [5] 张智勇. 欧洲中心和日本数值预报格点产品解释应用初探[J]. 吉林气象, 2005(1): 10-12.
- [6] Yeh, T.C. (1949) On Energy Dispersion in the Atmosphere. *Journal of Meteorology*, **6**, 1-6. <u>https://doi.org/10.1175/1520-0469(1949)006<0001:OEDITA>2.0.CO;2</u>
- [7] 曾庆存. 强迫基流上 Rossby 波包的结构和演变[J]. 中国科学, 1985, 15(4): 377-395.
- [8] Zeng, Q.C. (1983) The Evolution of Rossby Wave Packet in a Three Dimensional Baroclinic Atmosphere. Journal of the Atmospheric Sciences, 40, 73-84. <u>https://doi.org/10.1175/1520-0469(1983)040<0073:TEOARW>2.0.CO;2</u>
- [9] 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.
- [10] 宋燕, 缪锦海, 琚建华. 波包传播特征与西太平洋副热带高压移动的关系[J]. 气象学报, 2006, 64(5): 577-582.
- [11] 李湘, 肖天贵, 向洋. 1998 年东亚夏季风波包传播特征研究[J]. 成都信息工程学院院报, 2007, 22(3): 365-368.
- [12] 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.
- [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] 段鹤, 夏文梅, 苏晓力, 等. 短时强降水特征统计及临近预警气象[J]. 气象, 2014, 40(10): 1194-1206.

- [15] 何冬燕,邓学良,赵勇. 初春青藏高原地表温度变化对长江中下游降水的影响[J]. 高原气象, 2010, 29(3): 579-586.
- [16] 周宁芳, 康志明, 赖芬芬. 年夏季华北降水和环流形势的低频振荡特征分析[J]. 气象, 40(9): 1106-1113.
- [17] Murakami, T. (1979) Temperature Changes over Eurasia during the Late Summer of 1979. Advances in Atmospheric Sciences, 2, 200-214.
- [18] 吕宏忠, 张先恭, 丁一汇. 赤道地区向西传播的 40 天周期低频波[J]. 气象学报, 1991, 49(1): 29-38.
- [19] 曹艳察, 张涛. 2016年6月大气环流和天气分析[J]. 气象, 2016, 42(9): 1154-1160.
- [20] 权婉晴,何立富. 2016年7月大气环流和天气分析[J]. 气象, 2016, 42(10): 1283-1288.
- [21] 向纯怡, 许映龙. 2016 年 8 月大气环流和天气分析[J]. 气象, 2016, 42(11): 1418-1424.



知网检索的两种方式:

- 1. 打开知网页面 <u>http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD</u>下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2330-1724, 即可查询
- 2. 打开知网首页 <u>http://cnki.net/</u> 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: <u>http://www.hanspub.org/Submission.aspx</u> 期刊邮箱: <u>ojns@hanspub.org</u>