

江淮地区夏季极端日降水事件变化特征及其与 Rossby 波活动的联系

孙思远^{1,2,3} 管兆勇¹ 金大超¹

1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/
气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

2 中国气象局数值预报中心, 北京 100081

3 国家气象中心, 北京 100081

摘要 利用 NCEP/NCAR 逐日再分析资料和中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集, 研究了 1979—2016 年夏季江淮地区区域性极端日降水事件的统计特征及其与 Rossby 波活动的联系。结果表明: 在 38 年夏季 (6—7 月) 中, 江淮地区区域性极端日降水量的 95 百分位阈值为 33.95 mm/d, 且共有 63 次极端日降水事件发生。江淮地区极端日降水事件发生时, 在对流层中低层受气旋性异常环流控制, 在对流层上层受反气旋性异常环流控制, 为极端日降水事件的形成和维持提供了有利的斜压性环流背景。源于孟加拉湾和中国南海地区的水汽在江淮地区有较强的汇集, 为极端日降水事件的发生发展提供了有利的水汽条件。在极端日降水事件发生期间, 引起江淮地区扰动涡度拟能显著变化的主要是时间平均气流对扰动涡度的平流输送项和扰动气流中的水平散度项; 在极端日降水事件发生当天, 对流层上层的扰动涡度拟能迅速减弱, 同时在低层快速增强。波动起源于里海和黑海附近, 有明显的下游频散效应, 传至江淮地区约需 3—5 天时间, 为江淮地区极端日降水事件的形成提供了扰动能量。这些结果加深对极端日降水事件成因的认识, 并为预报预测提供了思路。

关键词 江淮地区 极端日降水 Rossby 波 扰动涡度拟能

文章编号 2020226A

中图分类号 P

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2108.20226

Summer Regional Daily-Precipitation Extreme Events in Yangtze-Huai Rivers Region of China and Their Relationships with Rossby Wave Activities

Sun Siyuan^{1,2,3}, Guan Zhaoyong¹ and Jin Dachao¹

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/ International Joint

收稿日期 2020-11-09; 网络预出版日期

作者简介 孙思远, 女, 1994年出生, 主要从事气候动力学。E-mail: sunsy@nuist.edu.cn

通讯作者 管兆勇, E-mail: guanzy@nuist.edu.cn

资助项目 国家重点研发计划重点专项2019YFC1510201, 公益性行业(气象)科研专项GYHY201406024, 江苏省PAPD项目

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2019YFC1510201), China Meteorological Administration Special Public Welfare Research Fund (Grant GYHY201406024), PAPD project of Jiangsu Province

Laboratory on Climate and Environment Change (ILCEC)/ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

2 Numerical Weather Prediction Center of China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 National Meteorological Center, Beijing 100081

Abstract Based on NCEP/NCAR reanalysis and datasets of daily basic meteorological elements from China national meteorological stations, the statistical characteristics of The regional daily-precipitation extreme events (RDPEs) in the Yangtze-Huai Rivers (YHR) region in eastern China from 1979 to 2016 and their relationships with Rossby wave activities are investigated. The results show that in the summers (June-July) of 1979 – 2016, the 95th percentile threshold of regional extreme daily-precipitation in YHR region is 33.95 mm/d. There are 63 RDPEs in total in the past 38 years. When RDPEs occur in YHR region, it is controlled by an anomalous cyclonic circulation in the middle and lower troposphere and an anomalous anticyclonic circulation in the upper troposphere. The water vapor from the Bay of Bengal and the South China Sea has a strong concentration in YHR region. Baroclinic circulation and sufficient water vapor are conducive to the occurrence and development of RDPEs. The eddy enstrophy in the upper troposphere over YHR region reaches its maximum on the day before RDPEs occur and rapidly decreases from then on. Meanwhile, the eddy enstrophy in the middle and lower troposphere reaches its maximum when RDPEs occur. This is dominated by processes including the advection term of the time average flow to the disturbed vorticity and the horizontal divergence term of the disturbed flow. Moreover, Rossby waves originate near the Caspian Sea and the Black Sea and obviously disperse downstream-ward. It takes about 3 – 5 days to move to YHR region, providing disturbance energy for the formation of RDPEs in this region. Overall, these results have deepened the understanding of the reasons for RDPEs in YHR region and could provide clues for effective predictions.

Keywords Extreme daily-precipitation, Rossby wave, Eddy enstrophy, Yangtze-Huai Rivers region

1 引言

近年来, 极端气候事件受到广泛关注。研究表明, 极端事件在全球范围内均有所增加, 但各地区的极端事件又存在明显的区域差异 (Groisman et al., 1999; Emori and Brown, 2005; Kharin et al., 2007; Ren et al., 2012)。极端降水事件诱发的洪涝灾害严重威胁人民生命财产安全。频繁活动的暴雨天气系统是洪涝形成的根本原因。江淮地区是我国经济较为发达的地区, 受季风影响, 夏季洪涝灾害频发, 容易引起较大的经济损失 (夏芸等, 2008; 傅云飞等, 2020)。江淮地区的洪涝灾害主要集中在 6 – 8 月, 其中 6 – 7 月的洪涝灾害主要是由梅雨引起的, 8 月的洪涝灾害主要受台风活动影响。

江淮地区夏季降水受众多因素影响。江淮地区降水明显的年际和年代际异常与西风急流的位置有密切的关系 (Liang and Wang, 1998; 魏林波等, 2012; Huang et al., 2014); 而

印度洋地区和西太平洋地区的大气环流异常同样会影响江淮夏季降水（卢明等，2013；张璟等，2014；Liu et al., 2014）；海洋信号包括 El Nino 和 IOD 对江淮夏季降水也有显著影响，其对降水的正影响约为一年，一年后变为负影响（钱永甫等，2007）；我国邻近海区以及太平洋、印度洋和大西洋的海温异常变化会导致海陆热力差异，进而也对江淮流域夏季降水有直接影响（王钟睿和钱永甫，2005；李永平等，2006；王黎娟等，2014）；同时，青藏高原东部和其以北区域的大尺度热力差异和高原积雪对江淮地区夏季降水有着很好的指示意义（章基嘉等，1995；Wang et al., 2017）。这些降水异常事件通常与极端日降水事件有关。

江淮地区乃至中国东部极端强降水事件的发生与对流层上层斜压波包的活动有关（如：陈丹萍等，2016）。斜压 Rossby 波主要存在于中纬度对流层上层（Hoskins and Karoly, 1981；谭本旭，2008），副热带高空西风急流对 Rossby 波及其在一定条件下组织成的波包的传播有引导作用，可以对下游地区的降水产生一定影响（梅士龙和管兆勇，2008，2009；李明刚等，2016）。

根据前人的研究可以知道，在个例年，江淮地区夏季强降水过程与对流层上层波包活动联系密切，但是，统计意义上强降水发生时段波包活动特征及涡动能量变化如何尚需分析。所以，本文针对多年极端日降水事件与对流层上层波包活动的关系以及极端日降水发生时扰动涡度拟能的变化进行研究，以期进一步揭示极端强降水事件形成的机理。

2 资料和方法

本文的研究时段为 1979 - 2016 年共 38 年，使用的资料有：

（1）NCEP/NCAR 逐日再分析资料，使用的变量有经向风（ v ）、纬向风（ u ）、垂直速度（ ω ）、位势高度（ h ）、比湿（ q ）等，资料水平空间分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。各变量的扰动定义为该变量与其气候平均值之间的偏差。这里的气候平均被定义为 1981 - 2010 年 30 年的平均值。

（2）中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集的 1979 - 2016 年夏季 2425 个站点的逐日降水资料。江淮地区的选取使用 Jin et al. (2015) 所定义的范围，即 $[31.5^\circ\text{N} - 34.5^\circ\text{N}, 115.5^\circ\text{E} - 121^\circ\text{E}]$ ，因为所选的区域站点分布比较均匀，且在空间上较为密集，所以在计算区域平均时使用简单的算术平均。

根据 Wirth et al. (2018) 的研究可知，尽管实际上每年组成中纬度对流层上层斜压波包的主要波数是不同的（Kao and Wendell, 1970；Chang and Yu, 1999；Chang, 2005），但是波数介于 5 - 7 的波通常是组成中纬度对流层上层 300hPa 经向风显著扰动的主要分量。本文在分析波包前，首先计算了极端日降水发生期间多年个例平均的经向风的纬向波数，典型波数范围确为 5 - 7。采用 Hilbert 变换来做包络分析（Zimin et al., 2003）。该变换能够有效地从扰动经向风场中提取出斜压波包参数。波包络的表达式为： $Ve = \text{abs}(v' + i * \hat{v}')$ ，其中 v' 表示 300hPa 的扰动经向风， $\hat{v}'$ 表示 v' 的 Hilbert 变换，所得的 Ve 则表示波包参数。然后进一步使用一点相关对波包进行分析，揭示扰动能量与江淮地区降水的关系。

Rossby 波动能量变化与涡度拟能 ($E_n = 1/2\zeta^2$) 变化有关。涡度拟能变化反映了大气涡旋运动的强弱 (Wu, 1985; 杨哲等, 2012), 其既是全球以及局部环流系统扰动状态的反映, 也与区域天气气候甚至全球天气气候有着十分密切的联系 (Holopainen and Oort, 1981; Schoeberl and Smith, 1986)。虽然已有学者对天气过程中的涡度拟能的变化有所研究, 并发现其在鄂霍次克海阻高的发展过程 (黄昌兴等, 2001) 和台风的发展和衰减阶段 (冉令坤等, 2014) 均起着重要作用, 但在极端降水过程中, 目前却鲜有关于扰动涡度拟能 ($E_{ne} = 1/2\zeta'^2$) 的分析。对 p 坐标系下的涡度方程取时间平均并作差, 先得到扰动涡度方程; 扰动涡度方程两边标乘 ζ' 后, 最终整理得到 p 坐标系下扰动涡度拟能变化方程为:

$$\begin{aligned} \underbrace{\frac{\partial E_{ne}}{\partial t}}_{E_{ne1}} = & \underbrace{-\zeta'(\bar{V}' \cdot \nabla \bar{\zeta} + \omega' \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial p})}_{E_{ne2}} - \underbrace{(\bar{V} \cdot \nabla E_{ne} + \bar{\omega} \frac{\partial E_{ne}}{\partial p})}_{E_{ne3}} - \underbrace{\beta \zeta' v'}_{E_{ne4}} - \underbrace{\zeta'(f + \bar{\zeta}) \nabla \cdot \bar{V}'}_{E_{ne5}} \\ & - \underbrace{2E_{ne} \nabla \cdot \bar{V}'}_{E_{ne6}} + \underbrace{\zeta'(\frac{\partial \omega'}{\partial y} \frac{\partial \bar{u}}{\partial p} - \frac{\partial \omega'}{\partial x} \frac{\partial \bar{v}}{\partial p} + \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial y} \frac{\partial u'}{\partial p} - \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial x} \frac{\partial v'}{\partial p})}_{E_{ne7}} + R, \end{aligned} \quad (1)$$

其中 ζ 为相对涡度, $\bar{\zeta}$ 时间平均的相对涡度, ζ' 为扰动相对涡度, $\bar{V}$ 为时间平均的水平风矢量, $\bar{V}'$ 为扰动水平风矢量, $\bar{\omega}$ 为时间平均的垂直速度, ω' 为扰动垂直速度, p 为气压, f 为地转参数。等式左端为扰动涡度拟能的局地变化项 (E_{ne1}), 右端第一项为扰动气流对时间平均涡度的平流输送项 (E_{ne2}), 第二项为时间平均气流对扰动涡度的平流输送项 (E_{ne3}), 第三项为扰动涡度经向输送项 (E_{ne4}), 第四项为扰动气流中的水平散度项 (E_{ne5}), 第五项为时间平均气流中的水平散度项 (E_{ne6}), E_{ne4} 和 E_{ne5} 体现的是涡度制造的作用, 第六项为倾侧项 (E_{ne6}), 最后一项为残差项 (E_{ne7})。

3 江淮地区夏季极端日降水事件特征

3.1 极端日降水事件的定义和降水分布

将 1979 - 2016 年共 38 年夏季共 2318 天的江淮地区 97 站的日降水量进行区域平均, 再将日降水量小于 1 mm 的天数去掉, 剩下的天数按升序排列, 取 95 百分位上的值作为阈值 (李红梅等, 2008)。选取大于该阈值 (33.95 mm/d) 的天数为极端日降水事件的日数。根据极端日降水的定义, 可以得到 63 个极端降水日 (表 1), 其中发生在 6 月的极端日降水事件有 27 次, 7 月有 36 次。为了进一步了解江淮地区极端日降水的分布情况, 绘制了 63 次极端日降水事件的降水均值及其与前一日降水均值之差图 (图 1)。由图 1a 可以看出, 极端降水的最大值出现在江苏和安徽的交界处, 最大值超过 44mm/d; 而由图 1b 可以看出, 江淮地区 63 次极端日降水事件的降水均值与前一日相比有显著增加, 最大值位置也在江苏和安徽的交界处, 最大值超过 30mm/d。

表 1 1979 - 2016 年夏季江淮地区极端日降水事件的发生日期和区域平均雨量

Table.1 Occurrence dates of extreme daily-precipitation events and regional average precipitation in the Yangtze-Huai Rivers (YHR) region of China in the summers of 1979 - 2016.

年份	日期 (月/日)	雨量 (mm)
1979	7/16	37.2
1980	6/24, 7/9	54.25, 43.86
1981	7/10	42.04
1982	7/19, 7/23	42.26, 37.78
1983	7/1, 7/21	59.4, 37.18
1984	6/13	45.9
1985	—	—
1986	6/12	51.68
1987	7/6	47.42
1988	7/24, 7/25	35.03, 46.01
1989	—	—
1990	7/19	34.44
1991	6/13, 6/14, 6/30, 7/1, 7/3, 7/6, 7/9, 7/11	34.47, 75.26, 36.47, 34.56, 53.16, 71.88, 42.57, 38.57
1992	—	—
1993	6/29	36.28
1994	—	—
1995	6/20	36.33
1996	6/24, 7/3, 7/4	48.75, 50.55, 39.24
1997	6/30	46.51
1998	6/1, 6/29, 6/30	44.38, 40.37, 42.63
1999	6/23, 7/7	39.78, 36.12
2000	6/2, 6/3, 7/13	45.18, 65.57, 34.19
2001	—	—
2002	6/23	37.31
2003	6/30, 7/1, 7/2, 7/5, 7/10	51.93, 36.29, 35.15, 64.61, 49.22
2004	—	—
2005	7/7, 7/10	34.24, 40.89
2006	7/1	55.04
2007	7/3, 7/5, 7/8, 7/9	40.82, 35.45, 45.3, 51.63
2008	—	—
2009	7/23	47.21
2010	6/9, 7/12	35.11, 46.57
2011	6/18	36.12
2012	—	—
2013	6/25, 7/5	44.8, 41.14
2014	6/1, 7/5	48.21, 37.1
2015	6/2, 6/17, 6/25, 6/27	38.63, 35.44, 36.84, 84.63
2016	6/21, 7/1	35.28, 61.6

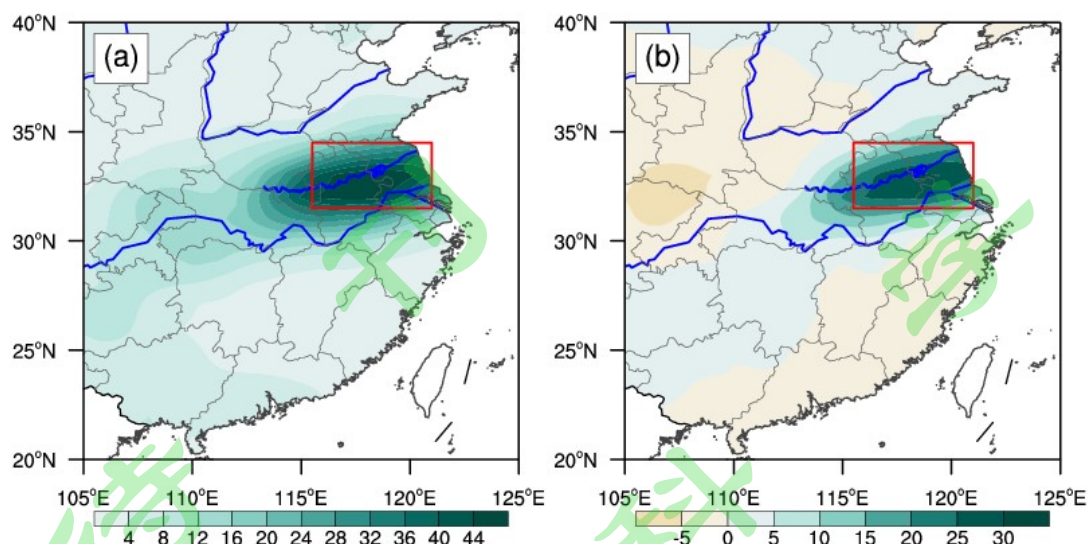


图 1 江淮地区极端日降水事件的平均降水量（单位：mm/d）分布（a）及其与前一日降水量之差的分布（b），红色矩形框区域为江淮地区的位置，蓝色实线自南向北分别为长江、淮河和黄河。

Fig.1 (a) Precipitation (unit: mm/d) averaged over RDPEs in YHR region and (b) the differences of precipitation averaged over RDPEs from the precipitation averaged over days before the day when RDPEs occurred. The red rectangular frame is for YHR region whereas the thick blue lines from south to north are for the Yangtze River, Huai River, and Yellow River, respectively.

3.2 极端日降水事件与环流异常

为探讨江淮地区极端日降水事件的发生与局地环流的关系，分析 63 次极端日降水事件合成的异常流场和水汽输送特征（图 2）。在中国东部，由南向北存在气旋 - 反气旋的水平分布。江淮地区在对流层中低层受气旋性环流异常控制，在其南侧为中心在东海附近的反气旋性环流异常（图 2a 和 2b）；而在对流层上层则受反气旋性环流异常控制，在其北侧为中心在华北地区的气旋性环流异常（图 2c）。环流在垂直方向上，一方面表现为整体自下向上明显北倾，呈斜压结构；另一方面表现为在对流层中低层西太副高反气旋性环流异常在中国东南沿海处西伸，而在对流层上层南亚高压则异常东伸至江淮地区上空。异常辐散风在对流层中低层辐合（图 2a 和 2b），在对流层上层辐散（图 2c），这种低层至高层的斜压环流结构对极端日降水事件的形成十分有利。注意到 850hPa 上，江淮地区处于西北风与西南风的辐合区（图 2a），这种辐合有利于锋生的加强（Hou and Guan, 2013），而强锋生有利于极端强降水事件的发生。

夏季江淮地区受到夏季风的影响，水汽主要来自于孟加拉湾、南海和西太平洋地区。从图 2d 给出的整层积分（1000hPa - 300hPa）的水汽通量散度及水汽通量旋转分量和辐散分量分布可见，江淮地区为水汽较强的汇（水汽通量散度和水汽通量辐散分量），该地区水汽主要来源于孟加拉湾和中国南海地区（水汽通量旋转分量），这为江淮地区极端日降水事件提供了充足的水汽条件（李明刚等，2016）。

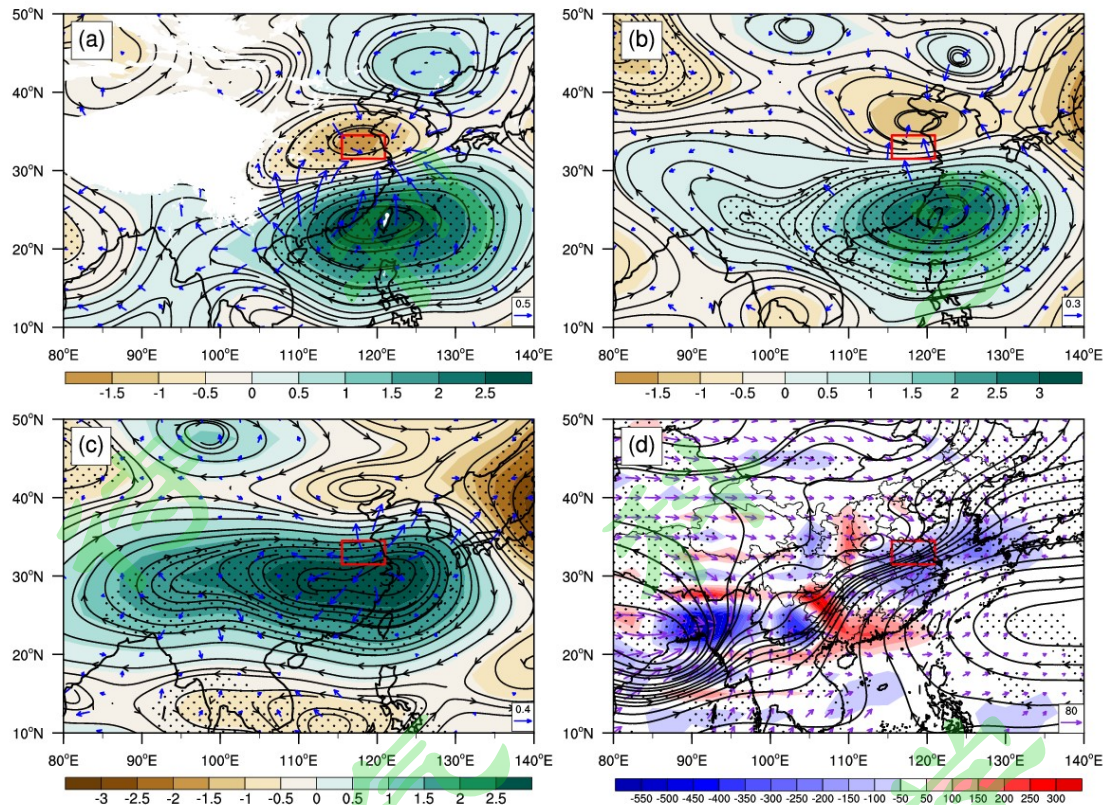


图 2 江淮地区极端日降水事件发生时 (a) 850hPa、(b) 500hPa、(c) 300hPa 高度上合成的异常旋转风场流函数 (阴影, 打点表示通过 90% 信度 t 检验, 单位: $10^6 \text{m}^2/\text{s}$)、旋转风场 (流线, 单位: m/s) 和辐散风场 (箭头表示通过 90% 信度 t 检验, 单位: m/s) 以及 (d) 整层积分 (1000hPa - 300hPa) 的水汽通量散度 (阴影, 打点表示通过 90% 信度 t 检验, 单位: 10^6Kg/s) 及水汽通量辐散分量 (箭头表示通过 90% 信度 t 检验, 单位: $\text{Kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$) 和旋转分量 (流线, 单位: $\text{Kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$)

Fig.2 Composites of anomalous circulations at (a) 850hPa, (b) 500hPa, (c) 300hPa, and (d) water vapor transports for the RDPEs in YHR region. Shown in (a, b, c) are the stream-functions (shaded contours, unit: $10^6 \text{m}^2/\text{s}$), rotational component (streamlines, unit: m/s), divergent component (arrows, unit: m/s) of the anomalous winds. Stippled areas are for stream function values exceeding 90% confidence level using a t-test whereas arrows that exceed 90% confidence level using a t-test are shown. Shown in (d) are same as in (a) but for water vapor fluxes integrated from 1000hPa up to 300hPa. Units for shaded, streamlines, and arrows of water vapor fluxes are 10^6Kg/s , $\text{Kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$, and $\text{Kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$, respectively.

3.3 极端日降水事件与扰动涡度拟能变化

分析 63 次极端日降水事件合成的扰动涡度拟能 E_{ne} 的高度 - 时间变化 (图 3a), 可以发现 E_{ne} 在 day-5 至 day-3 变化不大, 从 day-2 开始 E_{ne} 在 400hPa 及以上的对流层上层显著增大, 并在 day-1 时达到最大, 随后在对流层低层出现明显变化, 对流层低层从 day-1 开始显著增大, 并在 day0 时达到最大, 随后减小。扰动涡度拟能的变化有利于极端日降水事件的发生和发展, 这种变化特征可为提前 1 - 3 天预报极端日降水事件提供线索。

值得注意的是, 极端降水发生当日即 day0, 500hPa 以下的扰动涡度拟能极大, 表明极端降水与低层气旋性环流的增强 (表现为 ζ' 达到极大值) 有关, 而此时, 400hPa 以上的对

流层上层的扰动涡度已经减弱（图 3a）。这种垂直结构进一步表现出了环流系统的斜压特征（图 2a 和 2c）。

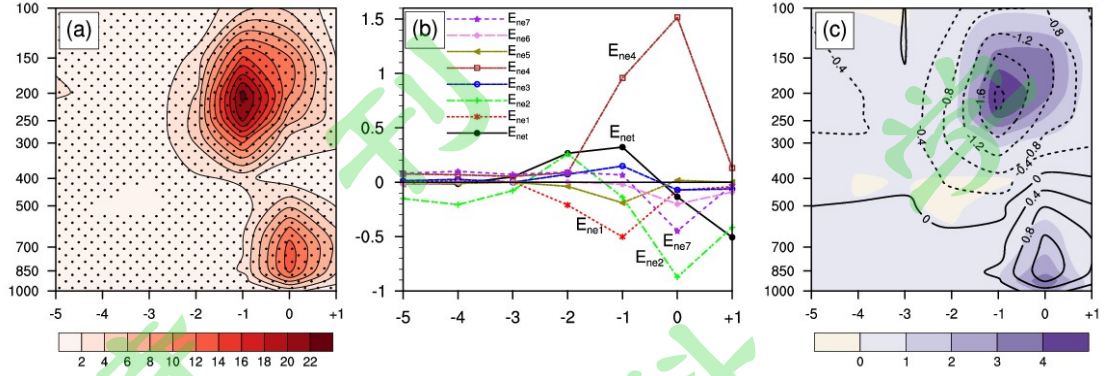


图 3 (a) 江淮地区上空区域平均的扰动涡度拟能的高度 - 时间剖面（打点表示通过 99% 信度 t 检验，单位： $10^{-11} s^{-2}$ ）、(b) 区域极端日降水事件中引起扰动涡度拟能变化的各项的整层积分（1000hPa—100hPa）随时间的变化（单位： $10^{-14} s^{-3}$ ）以及 (c) 区域平均的水平散度项 E_{ne4} （阴影，单位： $10^{-15} s^{-3}$ ）和扰动涡度 ζ' （等值线，单位： $10^{-5} s^{-1}$ ）的高度 - 时间剖面

Fig.3 (a) Height-time cross-section of regional average eddy enstrophy (unit: $10^{-11} s^{-2}$) over the YHR region with stippled areas for values exceeding 99% confidence level using a t -test, (b) the temporal variations of terms (unit: $10^{-14} s^{-3}$) including E_{net} , E_{ne1} , E_{ne2} , ..., and E_{ne7} integrated vertically from 1000hPa to 100hPa, which induce the eddy enstrophy to change over YHR region during RDPEs, and (c) height-time cross-section of horizontal dispersion term E_{ne4} (shaded, unit: $10^{-15} s^{-3}$) and disturbance vorticity ζ' (contours, unit: $10^{-5} s^{-1}$) over the YHR region.

利用扰动涡度拟能变化方程 (1) 对江淮地区 63 次极端日降水事件合成的扰动涡度拟能随时间的变化进行诊断分析，各项变化情况如图 3b 所示。可以看出， E_{net} 在 day-3 至 day+1 先增后减，在 day-1 达到极大值，即 E_{ne} 的整层积分在 day-1 达到最强，随后快速减弱； E_{ne1} 和 E_{ne5} 的变化趋势相似：在 day-3 至 day0 先减后增，均在 day-1 达到极小值，且符号大多为负，说明整个变化过程中扰动气流对时间平均涡度的平流输送较弱，同时扰动涡度拟能呈现出辐散特征，即不利于 E_{ne} 在江淮地区上空的增强和维持； E_{ne6} 和 E_{ne7} 在 day-1 至 day+1 先减后增，在 day0 达到极小值，同样不利于 E_{ne} 在江淮地区上空的维持，且残余项 E_{ne7} 的贡献略强于倾侧项 E_{ne6} ； E_{ne3} 对 E_{ne} 在江淮地区上空的增强和维持贡献较小，在 day-3 至 day-1 起正作用，而在 day0 至 day+1 起负作用。 E_{ne2} 在极端日降水发生期间先增再减后增，在 day-2 达到最大值，在 day0 达到最小值。除在 day-2 起到正作用外， E_{ne2} 对 E_{ne} 在江淮地区上空的增强和维持起到负作用； E_{ne4} 作为量级较大的一项，符号始终为正，在 day-2 至 day+1 先增后减，于 day0 达到最大值，说明涡度在扰动气流中有较强的辐合，且作为涡度制造项是有助于 E_{ne} 在江淮地区上空的增强和维持的。具体数值变化见表 2。

由于 E_{ne4} 即拟能制造项相对较大，这里给出江淮地区上空 E_{ne4} 的时间 - 高度剖面（图

3c)。由图 3c 可以看出, E_{ne4} 在极端日降水事件发生期间几乎均为正值, 且在 day-1 的对流层上层和 day0 的对流层低层各存在一个大值中心, 这与扰动涡度拟能 E_{ne} 本身的变化是相吻合的。同时, 该项主要是扰动涡度 ζ' 和水平散度 $\nabla \cdot \vec{V}'$ 的共同作用, 可以发现, 在对流层上层 $\zeta' < 0$ 、 $\nabla \cdot \vec{V}' > 0$, 因此对流层上层的反气旋环流系统随着极端降水事件的发展逐渐增强, 并于 day-1 达到最强; 而在对流层低层 $\zeta' > 0$ 、 $\nabla \cdot \vec{V}' < 0$, 此时对流层低层的气旋性环流系统也在发展加强, 并于 day0 达到最强。也就是说, 先有对流层上层的辐散增强, 反气旋性涡度增强, 拟能增强, 一天后, 对流层低层继而有了正涡度增强, 辐合增强, 拟能达到最大。这种垂直方向的斜压性环流的变化有利于极端降水事件的发展和维持。

要说明的是, 图 3a 中给出了江淮地区极端日降水事件发生期间该地区上空扰动涡度拟能随高度和时间的变化, 而图 3b 则分析的是引起整层扰动涡度拟能变化的方程 (1) 中各项的随时间变化, 但扰动涡度拟能变化在对流层上层和下层间的联系并未讨论。事实上, 对流层上层扰动涡度拟能发生变化时, 对流层中下层的扰动涡度拟能也将发生变化, 这种上下层间联系的途径主要有: (1) 斜压 Rossby 波的传播在对流层各层均有反映, 且存在位相差 (黄荣辉等, 2016); (2) 对流层中上层槽脊移动会伴随或引起地面气旋/反气旋的移动和变化, 槽前通常伴随上升运动, 槽后往往伴随下沉运动; (3) 对流层上层和中下层扰动涡度拟能变化均与拟能制造项 (E_{ne4}) 有关, 也就是与 $\nabla \cdot \vec{V}'$ 有关 (图 3c)。当对流层上层 (如 200hPa) $\nabla \cdot \vec{V}' > 0$ 时, 将导致反气旋性扰动涡度增强, 也就使得上层扰动涡度拟能增强, 此时, 因为大气质量补偿, 对流层下层 (如 850hPa) $\nabla \cdot \vec{V}' < 0$, 导致气旋性扰动涡度增大, 进而造成拟能增强; (4) 由扰动涡度拟能变化方程 (1) 可见, 不同等压面层之间的扰动涡度拟能的变化可以通过 E_{ne1} 和 E_{ne2} 中的垂直输送项产生联系。

表 2 江淮地区区域极端日降水事件中扰动涡度拟能的变化及引起其变化的各项的整层积分 (1000hPa—100hPa) 随时间的变化 (单位: 10^{-14}s^{-3})

Table 2 The temporal variations of terms including E_{net} , E_{ne1} , E_{ne2} , E_{ne3} , E_{ne4} , E_{ne5} , E_{ne6} and E_{ne7} integrated vertically from 1000hPa to 100hPa, which induce the eddy enstrophy to change over YHR region during RDPEs (unit: 10^{-14}s^{-3}).

前后天数	E_{net}	E_{ne1}	E_{ne2}	E_{ne3}	E_{ne4}	E_{ne5}	E_{ne6}	E_{ne7}
day-5	-0.0053	0.0077	-0.1506	0.0138	0.0764	-0.0192	-0.0146	0.0813
day-4	-0.0154	0.0106	-0.2066	0.0258	0.0681	-0.0117	-0.0015	0.1000
day-3	0.0492	0.0033	-0.0777	-0.0004	0.0539	-0.0009	0.0002	0.0707
day-2	0.2662	-0.2101	0.2602	0.0725	0.0865	-0.0385	0.0028	0.0929
day-1	0.3226	-0.5030	-0.1383	0.1487	0.9577	-0.1898	-0.0192	0.0665
day0	-0.1350	-0.0745	-0.8729	-0.0711	1.5159	0.0167	-0.2012	-0.4478

整体来说, 江淮地区扰动涡度拟能变化方程中各项的变化集中在 day-3 至 day+1, 方程的贡献大项以时间平均气流对扰动涡度的平流输送项 E_{ne2} 和扰动气流中的水平散度项 (涡度

制造项) E_{ne4} 为主, 其它项相对而言均为小项, 可在讨论过程中忽略。值得注意的是, 在 day0 时, 水平散度项 (E_{ne4} 和 E_{ne5}) 均为正变化 (E_{ne5} 贡献很小), 但 E_{net} 和其他项均为负变化, 其中 E_{net} 在 day-1 至 day0 由正转负, 即整层扰动涡度拟能在 day0 迅速减弱, 与图 3a 中所示的 E_{ne} 在对流层上层迅速减小、对流层低层迅速增大且减小明显强于增大这一变化特征相吻合。Rossby 波波动的传播可导致下游扰动的增强, 扰动气流中的水平散度项 E_{ne4} 作为大项时, 江淮地区上空扰动的增强对强降水事件的发生具有重要作用。

4 与江淮地区夏季极端日降水事件相关的波包活动特征

江淮地区对流层中上层扰动涡度拟能的变化反映了该地区上空能量输入和能量转换的结果, 而局地拟能的变化与 Rossby 波的能量传播有关 (Takaya and Nakamura, 2001)。为揭示江淮地区夏季极端日降水事件发生时 E_{ne} 的变化原因, 这里分析斜压 Rossby 波包的传播特征。除了图 4 所示的江淮地区上空 day-5 至 day+1 的区域平均的经向风扰动 v' 和波包 Ve 的变化曲线, 还对江淮地区 300hPa 上经向风扰动 v' 及波包 Ve 的一点滞后相关进行分析, 给出了江淮地区 63 次极端日降水事件合成的区域平均 v' 序列与整个 v' 场 (等值线) 以及 Ve 序列与整个 Ve 场 (阴影) 的一点相关分布 (图 5)。

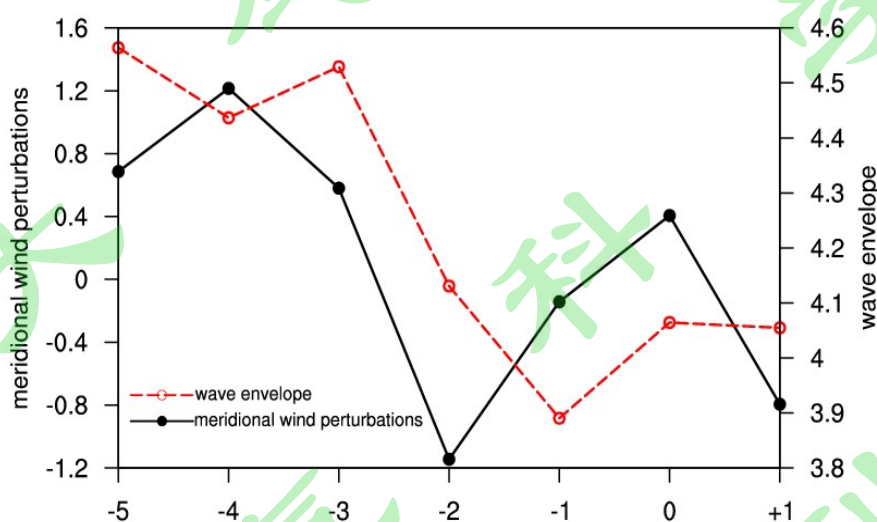


图 4 江淮地区 300hPa 区域平均的 v' 和 Ve 随时间的变化 (单位: m/s)。左侧纵坐标表示经向风扰动数值, 右侧则表示波包参数变化数值。

Fig.4 The temporal variations of regional average v' and Ve (unit: m/s) at 300hPa over YHR region. Values on left (right) Y-axis are for meridional winds perturbations (wave packet envelope).

波列表现出明显向下游频散的特征。从图 4 中可以发现, 在江淮地区上空扰动经向风 v' 在 -5d 至 -3d 和 0d 时为正, 在 -2d 至 -1d 和 +1d 为负, 表明 v' 在 -5d 至 +1d 有明显的异常北风和异常南风的转向, 即该地区上空有扰动过程。扰动经向风 v' 的变化在 -4d 至 +1d 呈现出先减后增再减的趋势, 而波包 Ve 则在 -3d 至 +1d 先减后增再减, 值得注意的是, v' 在极端日降水事件发生前的减弱趋势要比 Ve 早一天。由图 5 则可见, 波列源于里海和黑海附近 (-5d),

从-5d至+1d，波动自西北向东南沿高空西风急流从上游地区向江淮地区传播。-5d至+1d的传播中，上游的扰动强度不断减弱，下游的扰动强度不断增强。波列在0d时到达了江淮地区，随后继续向下游（海上）传播。同时，波动组织成的波包同样表现出明显的上游效应。-2d时，波包中心天山山脉附近，波包中心明显向下游传播；-1d时，波包中心传播到华北平原附近；0d时，波包传播到江淮地区。波包主要沿高空西风急流自西向东传播。

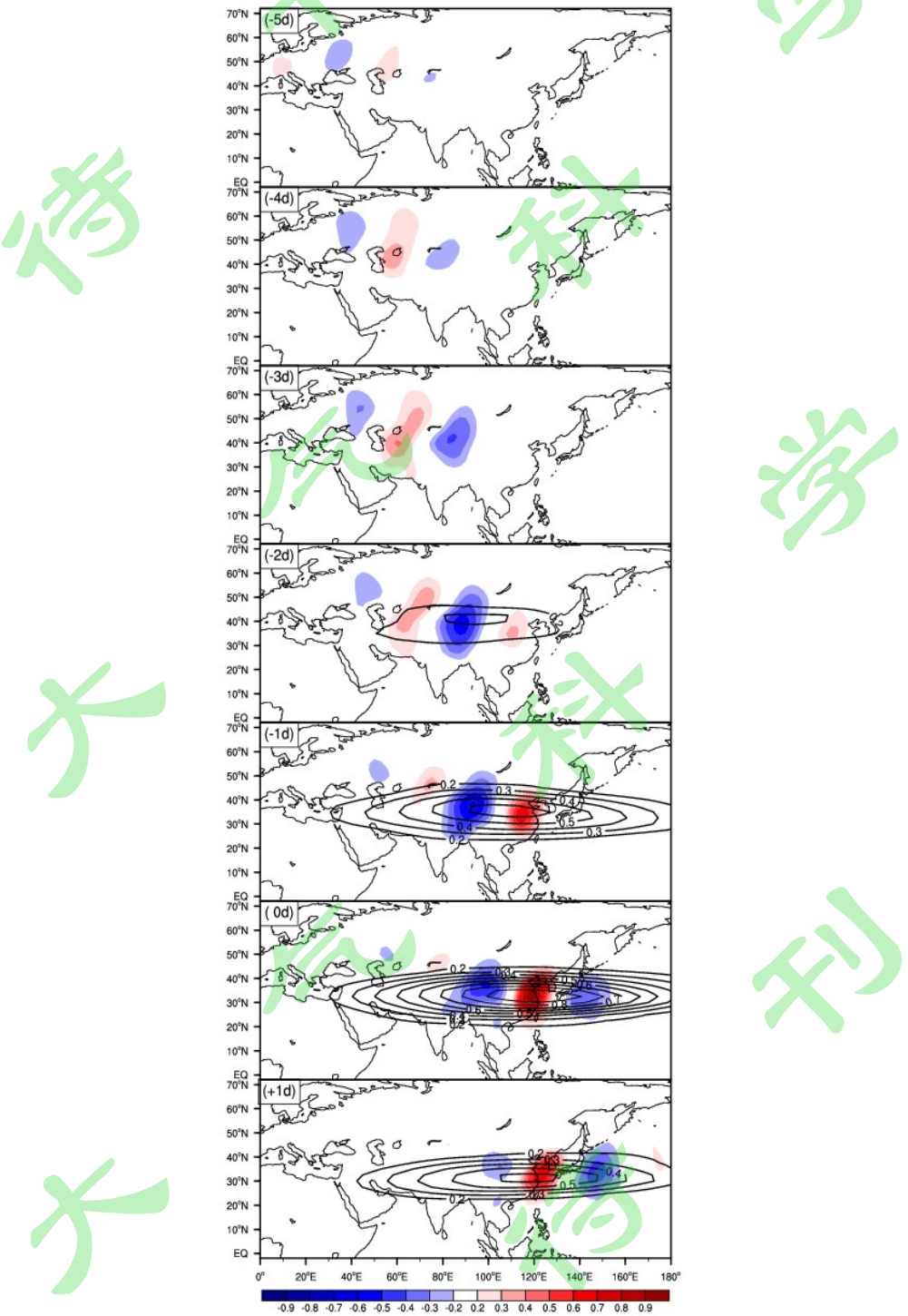


图 5 江淮地区极端日降水事件合成的 300hPa 区域平均 v' (阴影) 和 V_e (等值线) 与整个场在-5d 至+1d 的一点相关 (相关系数 ≥ 0.2 即为通过 90%的显著性检验, 阴影和等值线间隔为 0.1)

Fig.5 One-point correlations of the regional mean v' (Ve) over YHR region with the v' (Ve) at 300hPa in the whole study domain. Shaded contours (contours) are for v' (Ve). The time-lags are set in range from -5d to +1d. Negative time-lags mean that the variations in the study domain take place earlier than variations over YHR region. Contour intervals of correlations for both v' and Ve are 0.1. The correlation coefficient of 0.2 is found to be the value at 90% confidence level using a t -test.

注意到，尽管图 5 显示波包传播至江淮地区时发生极端强降水事件，但并不意味着在 300hPa 上的扰动涡度拟能达到极大值（图 3a），这是因为波包 Ve 与实际的扰动涡度强弱并不对应。在 Ve 的大值区，可出现 v' 和 ζ' 等于 0 的情形，这可从图 5 中 day0 时的经向风扰动 v' 及波包 Ve 的一点相关分布中加以判断。

为进一步揭示波列和波包传播特征，这里给出江淮地区极端日降水事件合成的 300hPa 区域平均 v' （阴影）和 Ve （等值线）与整个场的一点相关在 $[30^\circ\text{N} - 60^\circ\text{N}]$ 之间的时间 - 经度剖面（图 6）。从图中可以看出，波动能量的传播始于 -3d 左右，在 0 天时达到位于下游的江淮地区，持续 5 天左右。波动的相位传播很明显，每天东移 4 - 5 个经度，但群速度为每天 18 个经度左右，远快于相速度。在高空波包整个传播过程中，上游扰动逐步减弱，下游扰动逐步增强，表现出明显的下游频散特征。由以上分析可知，江淮地区极端日降水事件的形成与 Rossby 波能量频散以及由此引起的扰动涡度拟能变化关系密切。

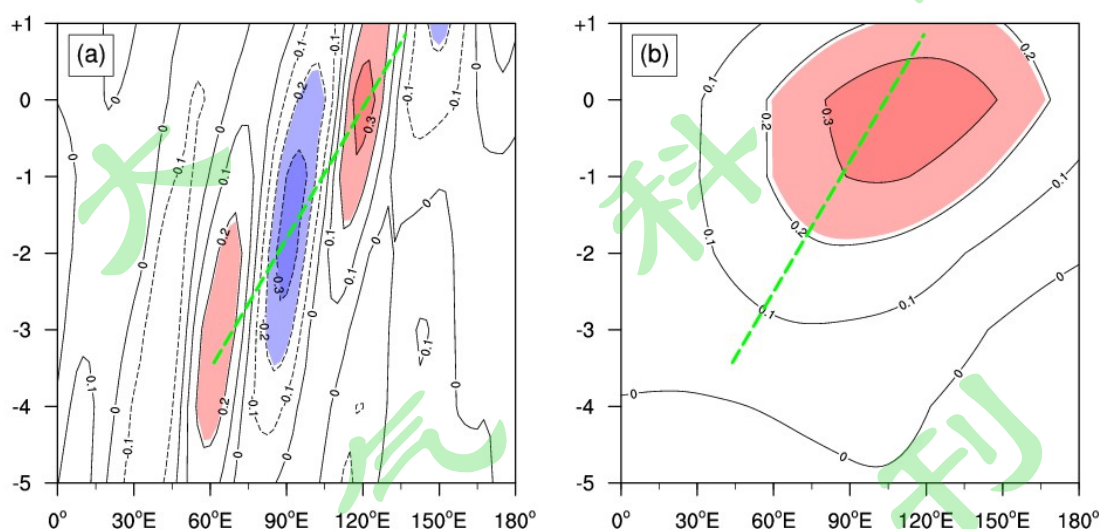


图 6 江淮地区极端日降水事件合成的 300hPa 区域平均 v' (a) 和 Ve (b) 与整个场的一点相关在 $[30^\circ\text{N} - 60^\circ\text{N}]$ 之间的时间 - 经度剖面（相关系数 ≥ 0.2 即为通过 90% 的显著性检验，阴影和等值线间隔为 0.1，绿色虚线表示群速度）

Fig.6 The time-longitude cross-sections of one-point correlations of regional mean v' (a) and Ve (b) at 300hPa with respectively the corresponding v' and Ve averaged over zonal belt between 30°N and 60°N for RDPEs in YHR region. Shaded contours are for absolute values of correlation coefficients larger than 0.2 that exceeding 90% confidence level using a t -test. Contour intervals are set as 0.1. The green dashed line depicts the group velocity.

注意到，从表 1 中可以发现江淮地区共有 7 次连续的极端日降水事件发生，分别是

1988/7/24 和 1988/7/25、1991/6/13 和 1991/6/14、1996/7/3 和 1996/7/4、1998/6/29 和 1998/6/30、2000/6/2 和 2000/6/3、2003/7/1 和 2003/7/2、2007/7/8 和 2007/7/9。原则上连续两天的极端日降水事件可以视为同一过程。为了揭示连续性极端降水事件的影响，首先扣除这些事件中降水较少的一天，即 1988/7/24、1991/6/13、1996/7/4、1998/6/29、2000/6/2、2003/7/2、2007/7/8，再使用同样的方法分析波包活动过程，最后发现波包的传播特征与图 5 所示相似。

5 总结

本文对江淮地区区域性日降水极端事件的统计特征及其与波包活动的联系进行了讨论，得到的结论如下：

(1) 在 1979 - 2016 年夏季，共发生了 63 次极端日降水事件，其中发生在 7 月的极端日降水事件略多于 6 月，95 百分位上的降水阈值为 33.95mm/d。江淮地区发生极端日降水时，该地区 850hPa 上空处于西北风和西南风辐合型流场控制下，而在对流层上层 300hPa 上则为辐散所主导。同时，孟加拉湾和中国南海地区为该地区带来充足的水汽，这些为极端日降水事件的发生和维持提供了有利的条件。

(2) 影响江淮地区扰动涡度拟能变化的主要是时间平均气流对扰动涡度的平流输送项和扰动气流中的水平散度项，对流层上层的扰动涡度拟能从 day-1 至 day0 的过程中迅速减小，对流层低层的扰动涡度拟能则在此过程中增强，江淮地区上空扰动增强对极端日降水事件的发生具有重要作用，且 day-2 和 day-1 对流层上层扰动拟能的增强对预报具有重要价值。

(3) 江淮地区发生极端日降水事件期间，扰动经向风场在极端日降水事件发生前几日的减弱趋势比波包的减弱趋势要早一天，波动能量向下游传播，波动起源于里海和黑海附近，传至江淮地区约需要 3 - 5 天时间；波能到达江淮地区，为江淮地区极端日降水事件的形成时对流层低层气旋异常增强提供了扰动能量。

致谢：中国气象局信息中心提供的中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集 (V3.0)；再分析资料取自 NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center (<https://www.noaa.gov/>)；文中插图使用 NCL 软件绘制。谨致谢忱！

参考文献

- Chang E K M, Yu D B. 1999. Characteristics of wave packets in the upper troposphere. Part I: Northern Hemisphere winter [J]. *J. Atmos. Sci.*, 56(11): 1708-1728. doi:10.1175/1520-0469(1999)056<1708:cowpit>2.0.co;2
- Chang E K M. 2005. The impact of wave packets propagating across Asia on Pacific cyclone development [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 133(7): 1998-2015. doi:10.1175/MWR2953.1
- Emori S, Brown S J. 2005. Dynamic and thermodynamic changes in mean and extreme precipitation under changed climate [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32(17): L17706. doi:10.1029/2005GL023272
- Groisman P Y, Karl T R, Easterling D R, et al. 1999. Changes in the probability of extreme

- precipitation: important indicators of climate change [J]. *Climatic Change*, 42(1): 243–283. doi:10.1023/A:1005432803188
- Holopainen E O, Oort A H. 1981. On the role of large-scale transient eddies in the maintenance of the vorticity and enstrophy of the time-mean atmospheric flow [J]. *J. Atmos. Sci.*, 38(2): 270–280. doi:10.1175/1520-0469(1981)038<0270:OTROLS>2.0.CO;2
- Hoskins J B, Karoly J D. 1981. The steady linear response of spherical atmosphere to thermal and orographic forcing [J]. *J. Atmos. Sci.*, 38(6): 1179–1196. doi:10.1175/1520-0469(1981)038<1179:TSLROA>2.0.CO;2
- Hou J, Guan Z Y. 2013. Climatological characteristics of frontogenesis and related circulations over East China in June and July [J]. *Acta. Meteor. Sinica*, 27(2): 144–169. doi:10.1007/s13351-013-0202-z
- Huang D Q, Zhu J, Zhang Y C, et al. 2014. The different configurations of the East Asian polar front jet and subtropical jet and the associated rainfall anomalies over eastern China in summer [J]. *J. Climate*, 27(21): 8205–8220. doi:10.1175/JCLI-D-14-00067.1
- Jin D C, Guan Z Y, Cai J X, et al. 2015. Interannual variations of regional summer precipitation in Mainland China and their possible relationships with different teleconnections in the past five decades [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 93(2): 265–283. doi:10.2151/jmsj.2015-015
- Kao S K, Wendell L L. 1970. The kinetic energy of the large-scale atmospheric motion in wavenumber-frequency space I: Northern Hemisphere [J]. *J. Atmos. Sci.*, 27(3): 359–375. doi:10.1175/1520-0469(1970)027<0359:tkeotl>2.0.co;2
- Kharin V V, Zwiers F W, Zhang X B. 2007. Changes in temperature and precipitation extremes in the IPCC ensemble of global coupled model simulations [J]. *J. Climate*, 20(8): 1419–1444. doi:10.1175/jcli4066.1
- Liang X Z, Wang W C. 1998. Associations between China monsoon rainfall and tropospheric jets [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 124(552): 2597–2623. doi:10.1002/qj.49712455204
- Liu H B, Yang J, Zhang D L, et al. 2014. Roles of synoptic to quasi-biweekly disturbances in generating the summer 2003 heavy rainfall in East China [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 142(2): 886–904. doi:10.1175/mwr-d-13-00055.1
- Ren F M, Cui D L, Gong Z Q, et al. 2012. An objective identification technique for regional extreme events [J]. *J. Climate*, 25(20): 7015–7027. doi:10.1175/jcli-d-11-00489.1
- Schoeberl M R, Smith A K. 1986. The integrated enstrophy budget of the winter stratosphere diagnosed from LIMS data [J]. *J. Atmos. Sci.*, 43(11): 1074–1086. doi:10.1175/1520-0469(1986)043<1074:tiebot>2.0.co;2
- Takaya K, Nakamura H. 2001. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasi-geostrophic eddies on a zonally varying basic flow [J]. *J. Atmos. Sci.*, 58: 608–627. doi:10.1175/1520-0469(2001)058<0608:AFOAPI>2.0.CO;2
- Wang C H, Yang K, Li Y L, et al. 2017. Impacts of spatiotemporal anomalies of Tibetan Plateau snow cover on summer precipitation in eastern China [J]. *J. Climate*, 30(3): 885–903.

doi:10.1175/JCLI-D-16-0041.1

Wirth V, Riemer M, Chang E K M, et al. 2018. Rossby wave packets on the midlatitude waveguide — a review [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 146(7): 1965–2001.

doi:10.1175/MWR-D-16-0483.1

Wu R S. 1985. On the change of enstrophy [J]. *Chinese Science Bulletin*, 30(6): 777–780.

Zimin A V, Szunyogh I, Patil D J, et al. 2003. Extracting envelopes of Rossby wave packets [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 131(5): 1011–1017.

doi:10.1175/1520-0493(2003)131<1011:ceorwp>2.0.co;2

陈丹萍, 管兆勇, 侯俊等. 2016. 2007 年夏季江淮强降水过程中 10~30d 低频变化及其与对流层上层波包活动的联系[J]. *大气科学学报*, 39(2): 177–188. Chen D P, Guan Z Y, Hou J, et al. 2016. The 10-30-day intraseasonal oscillations of circulations and their associations with Rossby wave packets in the upper troposphere during persistent severe rainfall in summer 2007 [J]. *Transactions Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 39(2): 177–188. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20150427042

傅云飞, 罗晶, 王东勇, 等. 2020. 夏季江淮地区降水的气候变化研究进展[J]. *暴雨灾害*, 39(4): 317–324. Fu Y F, Luo J, Wang D Y, et al. 2020. A review of studies on climate change of summer precipitation in the Jianghuai region [J]. *Torrential Rain and Disasters (in Chinese)*, 39(4): 317–324. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2020.04.001.

黄昌兴, 朱乾根, 周伟灿. 2001. 鄂霍次克海阻高发展过程的正斜压涡度和涡度拟能的演变特征[J]. *南京气象学院学报*, 24(3): 356–363. Huang C X, Zhu Q G, Zhou W C. 2001. Features of barotropic /baroclinic vorticity and enstrophy during Okhotsk blocking development [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 24(3): 356–363. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.2001.03.009

黄荣辉, 皇甫静亮, 刘永, 等. 2016. 从 Rossby 波能量频散理论到准定常行星波动力学研究的发展[J]. *大气科学*, 40(1): 3–21. Huang R H, Huangfu J L, Liu Y, et al. 2016. Development from the Theory of Energy Dispersion of Rossby Waves to Studies on the Dynamics of Quasi-Stationary Planetary Waves[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 40(1): 3–21. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1503.14298

李红梅, 周天军, 宇如聪. 2008. 近四十年我国东部盛夏日降水特性变化分析[J]. *大气科学*, 32(2): 358–370. Li H M, Zhou T J, Yu R C. 2008. Analysis of July-August Daily Precipitation Characteristics Variation in Eastern China during 1958-2000 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32(2): 358–370. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.02.14

李明刚, 管兆勇, 梅士龙. 2016. 夏季长江中下游地区降水持续性年(代)际变异及其与环流和 Rossby 波活动的联系[J]. *大气科学*, 40(6): 1199–1214. Li M G, Guan Z Y, Mei S L. 2016. Interannual and interdecadal variations of summer rainfall duration over the middle and lower reaches of the Yangtze River in association with anomalous circulation and Rossby wave activities [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 40(6): 1199–1214.

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1511.15257.

- 李永平, 于润玲, 秦曾灏. 2006. 未来半个世纪江淮流域夏季降水变化趋势的数值模拟结果分析[J]. 大气科学, 30(1): 153–161. Li Y P, Yu R L, Qin Z H. 2006. A numerical study of summer precipitation in the Changjiang River and the Huaihe River Valleys within coming half century [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 30(1): 153–161. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.01.13
- 卢明, 谭桂容, 陈海山, 等. 2013. 江淮夏季降水异常与西印度洋地区大气环流异常的关系[J]. 气象科学, 33(5): 510–518. Lu M, Tan G R, Chen H S, et al. 2013. The relationship between summer rainfall anomalies in Yangtze-Huaihe valley and atmospheric circulation anomalies over western Indian Ocean [J]. *Journal of the Meteorological Sciences* (in Chinese), 33(5): 510–518. doi:10.3969/2013jms.0032
- 梅士龙, 管兆勇. 2008. 对流层上层斜压波包活动与 2003 年江淮流域梅雨的关系[J]. 大气科学, 32(6): 1333–1340. Mei S L, Guan Z Y. 2008. Activities of baroclinic wave packets in the upper troposphere related to Meiyu of 2003 in the Yangtze River–Huaihe River valley [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 32(6): 1333–1340. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.06.08
- 梅士龙, 管兆勇. 2009. 1998 年长江中下游梅雨期间对流层上层斜压波包的传播[J]. 热带气象学报, 25(3): 300–306. Mei S L, Guan Z Y. 2009. Propagation of baroclinic wave packets in upper troposphere during the Meiyu period of 1998 over middle and lower reaches of Yangtze River valley [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 25(3): 300–306. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2009.03.007
- 钱永甫, 王谦谦, 黄丹青. 2007. 江淮流域的旱涝研究[J]. 大气科学, 31(6): 1279–1289. Qian Y F, Wang Q Q, Huang D Q. 2007. Studies of Floods and Droughts in the Yangtze–Huaihe River Basin [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 31(6): 1279–1289. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.06.22
- 冉令坤, 李娜, 崔晓鹏. 2014. 登陆台风莫拉克 (2009) 的涡度拟能收支分析[J]. 气象学报, 72(6): 1118–1134. Ran L K, Li N, Cui X P. 2014. Analysis of budget of enstrophy during the landing of Typhoon Morakot (2009) [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 72(6): 1118–1134. doi:10.11676/qxxb2014.088
- 谭本旭. 2008. 大气 Rossby 波动力学的研究进展[J]. 气象学报, 66(06): 870–879. Tan B K. 2008. Advances of atmospheric of Rossby waves dynamics [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 66(06): 870–879. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2008.06.003
- 王黎娟, 黄青兰, 李熠, 等. 2014. 江淮流域梅雨期降水的空间非均匀分布与前期海温的关系[J]. 大气科学学报, 37(3): 313–322. Wang L J, Huang L Q, Li Y, et al. 2014. Relationship between spatial inhomogeneous distribution of Meiyu rainfall over the Yangtze-Huaihe River Valley and previous SST [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 37(3): 313–322. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2014.03.008.

- 王钟睿, 钱永甫. 2005. 印度洋、南海和东南沿海海温异常影响江淮流域 6-7 月降水量的分析及数值模拟[J]. 应用气象学报, 16(4): 527-538. Wang Z R, Qian Y F. 2005. Influences of SSTA in Indian Ocean, South China Sea and southeastern coastal region of China on Yangtze-Huaihe River valley precipitation of June and July [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 16(4): 527-538. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2005.04.014.
- 魏林波, 周甘霖, 王式功, 等. 2012. 亚洲副热带高空西风急流活动的气候特征及其与我国部分地区夏季降水的关系[J]. 高原气象, 31(1): 87-93. Wei L B, Zhou G L, Wang S G, et al. 2012. Climate features of Asian upper westerly jet activities and their relationship with summer precipitation in partly areas of China [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 31(1): 87-93. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.
- 夏芸, 管兆勇, 王黎娟. 2008. 2003 年江淮流域强降水过程与 30 ~ 70d 天低频振荡的联系[J]. 南京气象学院学报, 31(1): 33-41. Xia Y, Guan Z Y, Wang L J. 2008. Association of 30-70d oscillations with the heavy rainfall over Changjiang-Huaihe River valley in summer 2003 [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 31(1): 33-41. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2008.01.005
- 杨哲, 管兆勇, 蔡佳熙. 2012. 近 30a 来北半球对流层大气月均环流的涡动减弱现象[J]. 大气科学学报, 35(6): 702-711. Yang Z, Guan Z Y, Cai J X. 2012. Weakening trends of tropospheric enstrophy of monthly mean circulation in the Northern Hemisphere in the past three decades [J]. *Transactions Atmospheric Sciences* (in Chinese), 35(6): 702-711. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2012.06.010
- 张璟, 智协飞, 缪锴, 等. 2014. 江淮流域夏季降水的准两年振荡特征及其关联因子分析[J]. 大气科学学报, 37(5): 541-547. Zhang J, Zhi X F, Miao K, et al. 2014. Characteristics of the quasi-biennial oscillation of the summer precipitation over Yangtze-Huaihe Valley and its correlation factors [J]. *Transactions Atmospheric Sciences* (in Chinese), 37(5): 541-547. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20121030006
- 章基嘉, 徐祥德, 苗峻峰. 1995. 青藏高原地面热力异常对夏季江淮流域持续暴雨形成作用的数值试验[J]. 大气科学, 19(3): 270-276. Zhang J J, Xu X D, Miao J F. 1995. A Numerical Experiment of the Effect of Anomalous Thermal Forcing of Tibetan Plateau Ground Surface on the Formation of Persistent Heavy Rain in Summer over the Yangtze-Huaihe Basin [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 19(3): 270-276. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1995.03.02