

梅士龙, 管兆勇. 对流层上层斜压波包活动与 2003 年江淮流域梅雨的关系. 大气科学, 2008, **32** (6): 1333~1340

Mei Shilong, Guan Zhaoyong. Activities of baroclinic wave packets in the upper troposphere related to Meiyu of 2003 in the Yangtze River-Huaihe River valley. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, **32** (6): 1333~1340

对流层上层斜压波包活动与 2003 年 江淮流域梅雨的关系

梅士龙 管兆勇*

南京信息工程大学江苏省气象灾害重点实验室/大气科学学院, 南京 210044

摘 要 利用 NCEP/NCAR 再分析和中国 740 站逐日降水资料, 研究了 2003 年淮河流域梅雨期间对流层上层斜压波动的传播情况。结果发现, 斜压波组织成波包向下游传播且具有明显的下游频散效应。波动起源于巴尔喀什湖西北侧, 沿着西北-东南向的路径向东南传播, 传至江淮流域大约需要 3 天。斜压波包所带来的扰动能量为江淮流域暴雨的发生发展提供了必要的能量积聚。通过与 1998 和 1997 年这两个梅雨年份的比较, 发现 1998 年异常强梅雨年的斜压波包的活动特征与 2003 年的相似, 但在梅雨降水非常偏少的 1997 年, 未发现有明显的斜压波包向下游的传播。

关键词 斜压波包 江淮流域梅雨 下游发展效应 2003 年

文章编号 1006-9895 (2008) 06-1333-08

中图分类号 P426

文献标识码 A

Activities of Baroclinic Wave Packets in the Upper Troposphere Related to Meiyu of 2003 in the Yangtze River-Huaihe River Valley

MEI Shilong and GUAN Zhaoyong

Key Laboratory of Meteorological Disaster, College of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract Using NCEP/NCAR reanalysis daily data from 1980 to 2003 along with 740-station precipitation data in China, the authors analyze the propagation features of the baroclinic wave packets in middle latitudes of the Northern Hemisphere during the Meiyu period of 2003. The results demonstrate that the baroclinic waves in the upper troposphere organize into the Rossby wave packets during the Meiyu period of 2003, dispersing to their downstream area distinctly. The waves originate from the regions northwest of Lake Balkhash and then spread southeastward to their downstream regions. About 3 days later, wave packets arrive in the Yangtze River-Huaihe River valley. The energy dispersion associated with baroclinic wave packets leads to the energy accumulation for rainstorms in the Yangtze River-Huaihe River valley. To further understand the downstream effect of the baroclinic wave packets, the authors compare the propagation features of the wave packets during the Meiyu periods of 1998 and 1997. It is found that the activities of baroclinic wave packets in flood Meiyu year 1998 are very similar to those in 2003. However, the downstream effect was not clearly observed in 1997 which is known as a dry Meiyu year in the Yangtze River-

收稿日期 2007-04-23, 2007-11-20 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2004CB418302

作者简介 梅士龙, 男, 1980 年出生, 讲师, 从事天气及气候动力学研究工作。E-mail: meisl@nuist.edu.cn

* 通讯作者 E-mail: guanzzy@nuist.edu.cn

Huaihe River valley.

Key words baroclinic wave packet, Meiyu in the Yangtze River-Huaihe River valley, downstream development effect, year 2003

1 引言

天气尺度的斜压 Rossby 波及与其有关的地面气旋、反气旋是影响中纬度地区天气的重要系统。因 Rossby 波传播速度快,且可给局地扰动带来较大能量,其在短期天气预报中占有非常重要的地位。ECWMF 已成功地运用“Rossby wave thinking”进行了一些短期预报等方面的工作^[1]。过去的研究中,诊断分析^[2, 3]表明这些波动常组织成局地波包,而且在其传播过程中能持续一段时间。模式研究也指出,下游波动发展的能量是来自于上游扰动能量的频散,即所谓的下游发展效应^[4]。最近的研究^[5~8]证实了斜压波下游发展的普遍性,指出全球不同季节对流层的大部分区域下游发展都是盛行的,而大部分向下游发展的高空槽会导致地面气旋的生成,对局地天气产生重要影响。

江淮流域是暴雨多发地区。近年来的研究表明,导致该地区暴雨的产生有多种因素^[9],其中欧亚大陆上空副热带急流中的静止 Rossby 波列及以急流为波导东传的瞬变波对暴雨的发生发展起着重要的作用^[10, 11]。向下游传播的有组织的斜压波为江淮流域带来了必需的冷空气及能量积聚,研究我国上游地区的斜压波及与其有关的波包络的传播对于认识江淮流域暴雨产生的机制有着重要意义。

2003 年梅雨期间,雨带长期维持在淮河流域,江淮、黄淮地区连续发生暴雨,淮河出现了历史上罕见的特大洪涝,降雨量、洪水流量皆超过 1991 年,许多地区甚至超过 1954 年^[12]。2003 年梅雨期集中,暴雨持续时间长、强度大,给江淮流域造成重大的灾害,给人民生命财产构成严重的威胁^[13, 14, 15]。在此期间,我国上游西风带中的瞬变波动较为活跃,大部分暴雨过程都对应着频繁东传的短波槽脊^[16],深入分析 2003 年梅雨期间的斜压波动活动情况,对于进一步理解江淮流域的暴雨产生机制和预测暴雨的发生发展等均有重要意义。

2 资料与主要分析方法

风场旋转分量的谱分析显示^[17],中纬度对流

层上部 300 hPa 的经向风主要由波数为 5~7 的波所组成,这代表了我们感兴趣的斜压波的典型尺度。因此,选取 300 hPa 经向风作为分析斜压波动的资料。风场资料来自 NCEP/NCAR 的逐日再分析资料集^[18](分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$),降水资料来源于中国气象局整编的中国 740 站逐日降水资料集。本文各变量的扰动均定义为变量本身与其气候平均(1980~2002 年)之间的偏差。

使用 Hilbert 变换^[19, 20]方法可将斜压波包络从经向风扰动中分解出来。通常情况下,可将波包络表示为简化形式: $V_e = \text{mod}(v' + i\hat{v})$,其中 v' 为带通滤波的 300 hPa 的经向风扰动, $\hat{v}$ 为 v' 的 Hilbert 变换, i 为虚数单位, V_e 为提取出来的波包络。之所以采用这一方法,是因为人们很难从天气图上直接辨认波包并对其进行追踪。 V_e 可被看成波包参数。如进一步使用一点滞后相关分析 V_e ,可研究与江淮流域降水相关的扰动能量的传播。

3 2003 年梅雨期斜压波动的传播特征

3.1 2003 年夏季梅雨期分段及雨带分布

2003 年 6 月中旬到 7 月中旬,淮河流域发生了自 1998 年长江流域大洪水后的又一次重大洪涝灾害事件。通过求取江淮流域区域内降水的面积平均,可得夏季降水的时间序列(图 1a)。由图 1a 可以看出,夏季主要的强降水时段集中在 6 月 21 日到 7 月 22 日,共 32 天。这段时间即为本文的波包分析时段。在这段时期内,降水强度大而且集中,日降水量超过 100 mm 的天数较多,因此将这段时期定义为江淮流域强降水期或者梅雨期。

为进一步了解梅雨期间的降水分布,对该段时期内的降水及 500 hPa 垂直速度场进行了合成(图 1b)。由图可知,2003 年梅雨期间降水强度非常大,平均降水量超过 120 mm 的地区主要集中在江淮地区。另外,从梅雨期 500 hPa 合成平均的垂直速度场上可以很清楚地看出,江淮流域上空为垂直上升运动的大值区,与降水中心有着很好的对应,强烈的大尺度上升运动也为暴雨的发生发展提供了有利的背景。

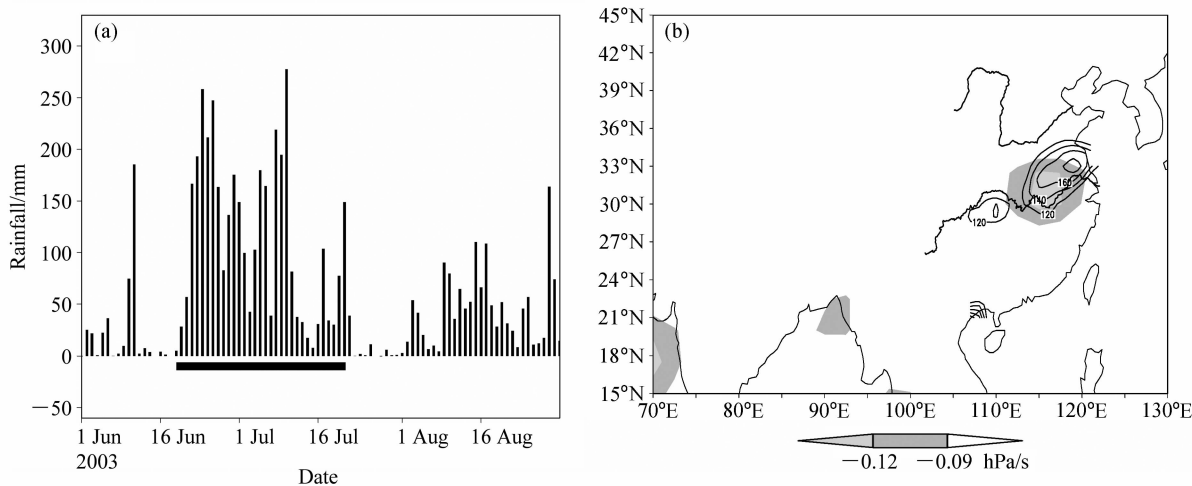


图 1 2003 年江淮流域 (32°N~34°N, 115°E~120°E) 夏季降水序列 (a) 以及梅雨期降水 (等值线, 降水≥120 mm) 和 500 hPa 垂直速度合成 (阴影) (b)

Fig. 1 (a) Time series of summer rainfall in the Yangtze River-Huaihe River valley, and (b) composites of rainfall (contours, precipitation≥120 mm) and 500-hPa vertical velocity (shadings) during the Meiyu period of 2003

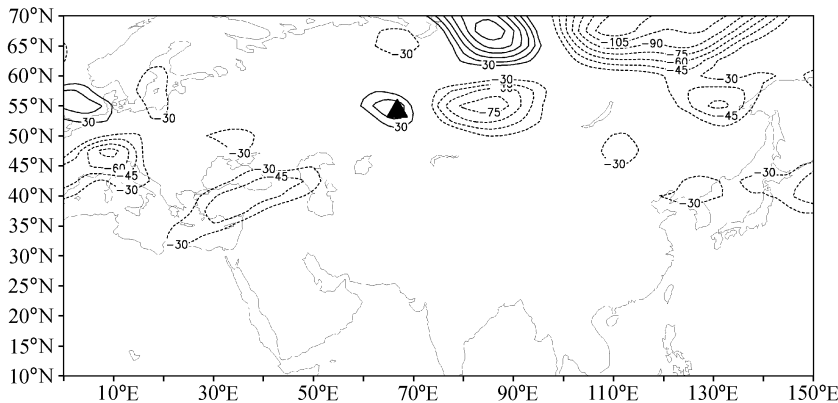


图 2 2003 年梅雨期平均 $\overline{u'v'}$ (单位: m^2/s^2)

Fig. 2 Composites of $\overline{u'v'}$ (m^2/s^2) during the Meiyu period of 2003. Wind variations with periods longer than 30 d have been removed

3.2 2003 年夏季波动活动基本情况

斜压波的传播主要沿中纬度的急流进行, 因此, 在研究斜压波的传播特征之前, 有必要考察 2003 年夏季中纬度西风急流的特征。这里用 300 hPa 纬向风数值来表示急流的强弱。通过比较 300 hPa 上夏季平均的 2003 年和 1980~2002 年多年平均 (气候平均) 的纬向风 (图略), 可以知道, 2003 年夏季西风急流的位置位于 30°N~45°N 之间, 方向基本呈东西走向, 与气候平均值相比, 强度明显偏强 (中心值要偏大 5 m/s 以上)。较强的西风急流为斜压波的传播提供了很好的通道。

在半球范围内, 夏季 300 hPa 上经向风扰动的标准差强度 (图略) 可显示出扰动发展的强弱以及

风暴轴的具体位置和强度。与气候平均分布相比较, 2003 年夏季位于两大洋上的风暴轴明显偏强, 位置略微偏北。同时, 经向风扰动标准差的大值区还存在于我国上游巴尔喀什湖东北侧, 表明天气尺度瞬变扰动在此地较易发展。扰动向下游的传播将对长江流域的强降水过程产生一定影响。

梅雨期间平均的 $\overline{u'v'}$ 场 ($\mathbf{E}$ 矢量的经向分量^[21, 22], 计算时风场中已经滤除了 30 天以上的变化) 可反映夏季欧亚地区瞬变扰动的基本情况 (图 2)。由图 2 可看出, 巴尔喀什湖西北方为一片正值区 (图中黑色三角标注区), 表明该地区有较强的导式瞬变扰动, 即瞬变扰动在此地较易发展。这些与前述用 v' 的标准差得到的结果相符。

根据 2003 年夏季急流所在位置, 对 300 hPa 上 $30^{\circ}\text{N}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 之间的 v' 进行平均, 得到急流轴上 v' 的时间-经度剖面 (图略)。由剖面可知, 2003 年夏季风期间, 存在多次移动性波列向下游的传播, 东传的经度可达 120°E 附近。这些波列常组织成局地波包, 以群速度向下游传播且频散能量, 引导大量冷空气东南向移动至江淮流域, 与副热带高压西北侧的东南暖湿气流辐合, 导致强降水过程的发生。

3.3 2003 年梅雨期间斜压波动的下游效应

2003 年夏季大尺度环流背景场为上游的瞬变波动向江淮流域的传播提供了有利的条件, 而向下游传播的斜压波动所带来的冷空气和能量则为强降水的发生提供了必要条件。由于夏季的强降水基本集中在梅雨期间, 所以更清楚地了解梅雨期间的斜压波动传播情况是非常必要的。为此, 将使用一点滞后相关的方法来研究与江淮流域天气变动相关的波动位相以及能量的传播过程。

根据降水分布 (图 1b), 选定降水中心点 (32.5°N , 115°E) 为基点, 用该点 300 hPa 上的经

向风扰动 v' 及其波包络 V_e (Hilbert 解调) 的时间序列与整个场求一点滞后相关 (图 3)。从 v' 的滞后相关 (虚、实线) 可明显看出波动中心向下游的传播: 从 -3 d (基点滞后整个空间场) 开始, 波列从巴尔喀什湖西北侧出发, 沿着西北-东南向的路径, 逐步向江淮流域传播。 -3 d 到 -1 d 期间波动的最大相关均位于基点上游, 且不断向基点处靠近。到 0 d , 上游的相关系数有所减弱, 下游的则增强。这一下游效应在 V_e 的滞后相关 (阴影及围绕其的实线) 上表现得更为清晰。由图 3 知, 波包的最大相关中心同样从巴尔喀什湖西北侧开始传播, 最终于暴雨过程发生前后传至降水中心点附近。

通过比较图 3 中两种变量的一点滞后相关可知, 由相关系数揭示的波列位置和波包络的最大相关区域基本一致。事实上, 此处揭示的波包传播特征与后文 (图 5) 所揭示的结果一致。

在 v' 的一点滞后相关图上, 滞后为 0 d 时, 在基点的上下游各有一个负的最大中心, 这两个中心之间的距离可被看成是该处的波长。同时, 通过跟踪 v' (V_e) 的一点滞后相关图上正的最大相关中心

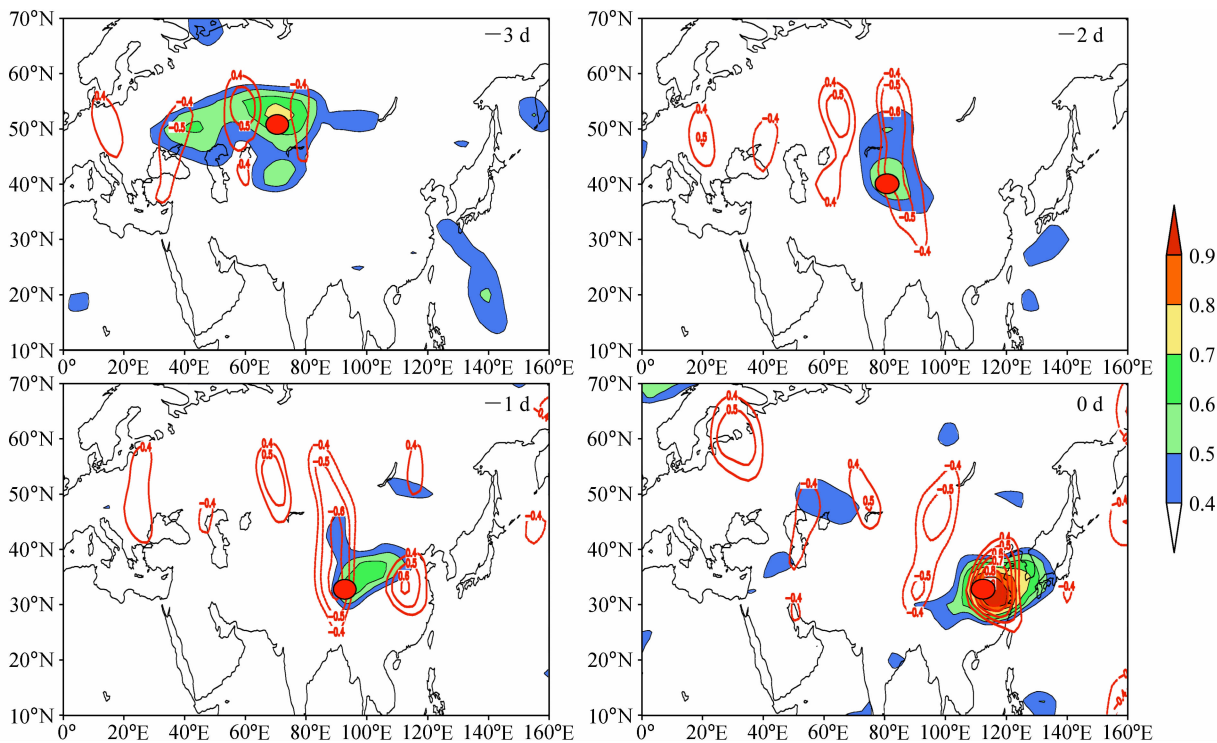


图 3 梅雨期间基点在 (32.5°N , 115°E) 的 v' 及 V_e 的一点滞后相关。红色等值线为 v' 的滞后相关系数, 阴影为 V_e 的滞后相关系数, 相关系数 ≥ 0.4 即为 t 检验超过 99% 信度; 圆点: 表示波动中心点附近

Fig. 3 One-point lag correlations for v' (red contours) and V_e (shadings) during the Meiyu period of 2003. The base point is at (32.5°N , 115°E); areas with correlation coefficient ≥ 0.4 are significant at 99% confidence level; the red dot represents the center of wavepackets

从时间滞后 -1 d 到 $+1\text{ d}$ 的变化,可以得到波动的相速(群速)。据此,可估算出 2003 年夏季梅雨期间斜压波的波长约为 50° 经度左右,相速约为每天 12° 经度,而群速度约为每天 20° 经度。显然,群速度大于相速度,波动具有明显的下游效应。这里得出的 2003 年夏季斜压波活动的基本特性与 Chang^[6]对北半球夏季斜压波包的估算结果基本一致。

根据图 3 中 V_e 从 -3 d 到 0 d 的滞后相关,可选取每张图上的相关极值中心位置,即 $(52.5^\circ\text{N}, 75^\circ\text{E})$ 、 $(42.5^\circ\text{N}, 82.5^\circ\text{E})$ 、 $(35^\circ\text{N}, 100^\circ\text{E})$ 、 $(32.5^\circ\text{N}, 115^\circ\text{E})$ 四个点,用以考察这些点上波包络在梅雨期间的演变情况。图 4a 显示出这四个点上梅雨期 V_e 的时间序列。可以清楚地看到,在梅雨期间约有 6 次波包相关的极值从上游传到江淮流域,为该地区强降水过程的发生发展提供了必需的能量。

图 4b 示意性地显示了根据一点滞后相关(图

3) 所获得的波动传播路径。梅雨期间的斜压波包大致起源于巴尔喀什湖西北侧,沿着西北-东南向的路径向下游传播,东传的纬度可达 120°E 左右。为了进一步显示梅雨期间斜压波动的下游传播,沿图 4b 所示的波动传播路径上截取 300 hPa 上 v' 的时间-经度剖面(图 4c),可以看到,经向风扰动除了具有位相传播外,也具有显著的能量传播。波动传播的 6 次过程与图 4a 所示完全一致,由此进一步证实了梅雨期间确有明显的斜压波能量向下游的传播。

为使得上述结果更具有说服力,根据图 4a、c 显示的 6 次波包传播过程,对梅雨期间的高频(周期 $\leq 7\text{ d}$) v' 及 V_e 进行了合成并进行统计检验,得到图 5。从中可以看出,经向风清楚地显示波包向下游的传播过程,且由巴尔喀什湖西北侧传至江淮流域的过程大约需要 3 天。从 V_e 的演变过程(阴影区)也同样可看出波包包的传播,其向下游传播的速度要大于 v' 的位相传播。我们注意到,波包在向

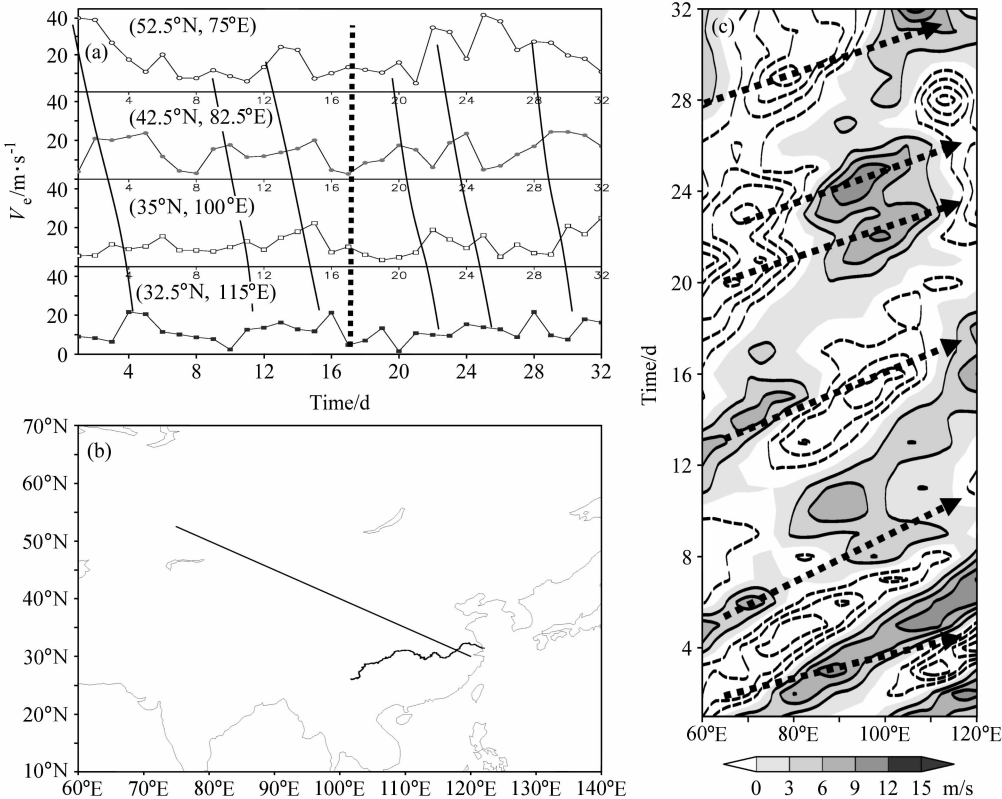


图 4 (a) 梅雨期所选取的 V_e 滞后相关中心点处的 V_e 序列; (b) 由一点滞后相关获得的波动传播路径示意; (c) 沿图 4b 所示路径所截取的梅雨期 (32 天) 300 hPa 上 v' (已滤除 30 天以上的变化) 的时间-经度剖面

Fig. 4 (a) Time series of V_e at locations where the maximum lag correlations are found in Fig. 3; (b) the path along which the baroclinic wave packets propagate, as obtained from Fig. 3 and Fig. 4a in terms of one-point lag correlations; (c) time-longitude cross section of v' in which the components with periods longer than 30 d have been removed

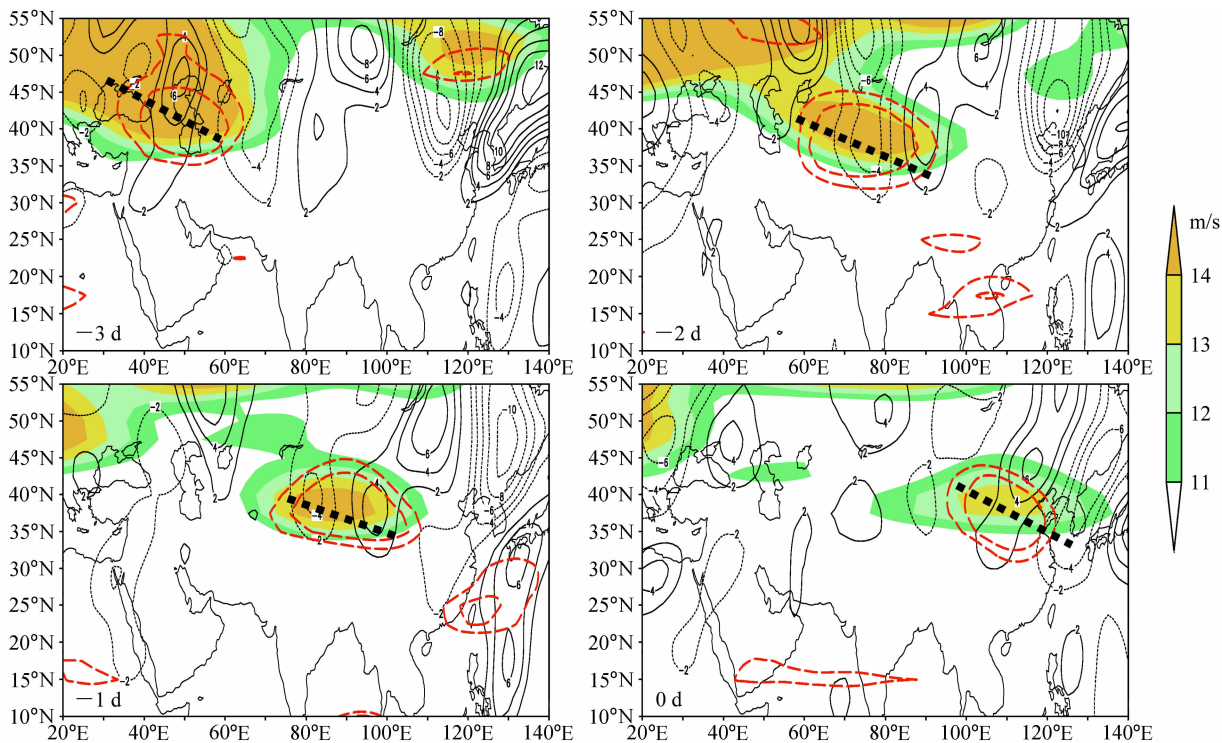


图 5 根据图 4a、c 中的 6 次 V_e 极大值的传播过程进行的高频 v' (周期 ≤ 7 天, 黑色等值线) 及 V_e (彩色阴影) 的合成 (单位: m/s)。红色长虚线内外圈分别为 t 检验下 V_e 通过 95% 和 90% 信度的区域

Fig. 5 Composites of v' (black contours, m/s) and V_e (colored shadings) from 6 cases related to the propagation of wave packets as displayed in Figs. 4a and 4c. Area where V_e is significant above 90% (95%) confidence level are circled by the outer (inside) red long-dashed lines

下游的传播过程中是逐渐衰减的, 这是由于波动的传播方向相对于急流位置来说是指向南的。根据曾庆存^[19]提出的波包理论, 从波动传播方向和急流的相对位置, 可知瞬变扰动是衰减的。

以上的分析表明, 梅雨期间确有较强的天气尺度瞬变扰动的能量向下游传播, 导致江淮流域扰动增强, 为南方强降水过程的发生发展创造了有利的条件。

这里需要说明的是, 对于 v' 及其相关的波包而言, 最大扰动出现在较高纬度。影响江淮地区的扰动只是 v' 扰动或波包的南部边缘较弱的部分。然而, 正是这种较弱的波包活动, 成为造成江淮流域强降水过程发生发展的一个重要条件。

4 与 1998 年斜压波活动的比较

为了解斜压波活动在其他年份中的情况, 选取 1998 年进行对比。1998 年夏季, 长江流域气候持续异常, 暴雨连续不断, 主要雨带长时间徘徊于长江流域, 使得长江上游、中下游地区接连发生洪

涝灾害, 成为继 1954 年后的又一次全流域性大洪水。1998 年的梅雨期分为两段^[10], 同样根据其梅雨期降水合成 (图略), 选取其降水中心 (30°N, 110°E) 为基点, 对该点的 300 hPa 经向风扰动及其波包 V_e (Hilbert 解调) 时间序列作出一点滞后相关的水平分布。限于篇幅, 这里仅给出 V_e 的相关用于比较 (图 6)。可以看出, 在 1998 年梅雨期, 同样可以看到非常明显的斜压波包向下游的传播, 波动于 -3 d 时起源于里海附近, 同样沿着西北-东南向的路径向下游传播, 于 0 d 时传至长江流域附近, 促进了强暴雨的发生。

1998 年梅雨强降水期间的斜压波活动与 2003 年非常类似 (图 6 与图 3)。斜压波包有组织地向下游传播, 在其传播的过程中伴随有能量的频散, 给所经过地区带来天气影响。下游发展效应对这两年的梅雨强降水发生发展起着重要的作用。

另外, 还选取了梅雨降水显著偏少的年份即 1997 年来进行对比分析 (图略), 结果发现, 在梅雨偏少年, 类似于 2003 年和 1998 年的斜压波包向

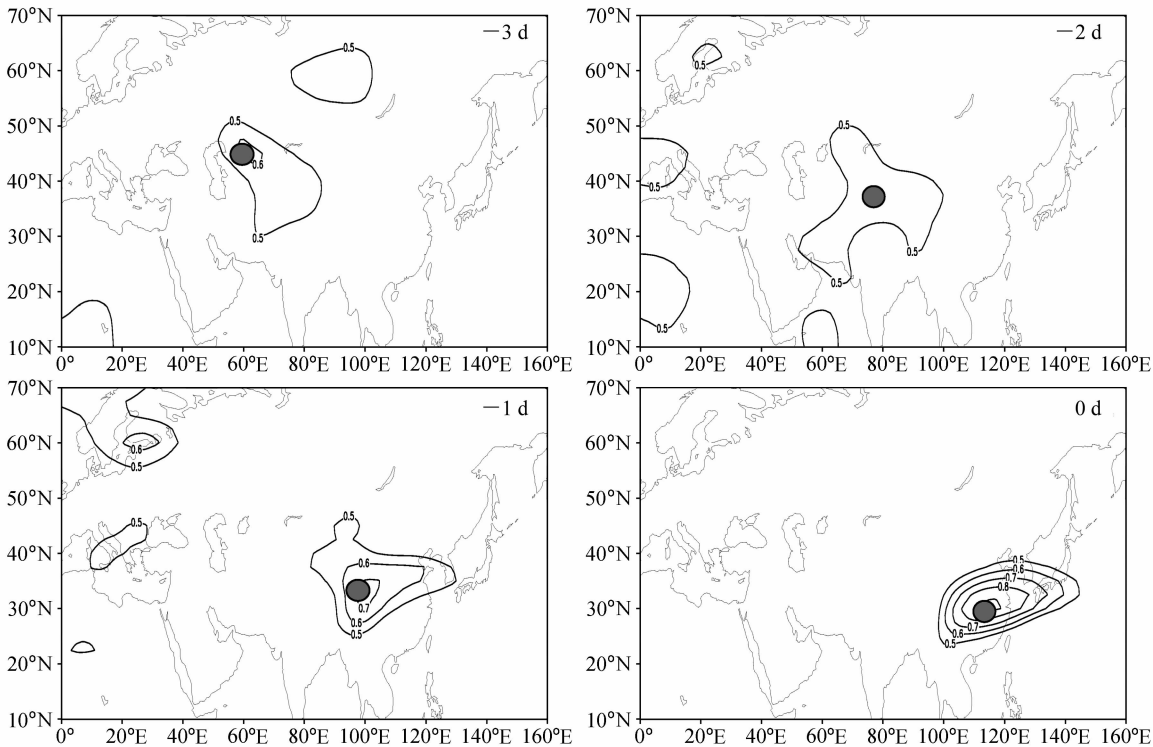


图 6 1998 年梅雨期间基点在 (30°N, 115°E) 的 V_e 的一点滞后相关图。圆点为波包络中心点
Fig. 6 One-point lag correlation for V_e at base point (30°N, 115°E) during the Meiyu period of 1998. The red dot represents the center of wavepackets

下游传播的特征非常不明显。

5 结论

本文对 2003 年夏季梅雨期间的斜压波活动作了详细的分析, 得到:

(1) 2003 年梅雨期强降水过程与对流层上层斜压波包活动关系密切, 斜压波包的活动可能是强降水过程发生发展的必要条件。

(2) 2003 年淮河流域梅雨期间斜压波具有明显的下游发展效应, 波动在降水前 3 天左右起源于巴尔喀什湖西北侧, 沿着西北-东南向的路径向下游传播, 于降水发生当日前后传至江淮流域。

(3) 1998 年异常强梅雨年的斜压波活动情况与 2003 年非常相似, 而 1997 年弱梅雨年则观测不到显著的如 2003 年和 1998 年那样的波包传播, 亦即弱梅雨年与强降水年份相比对流层上层斜压波包活动存在显著不同。

(4) 由于 1998、2003 年强降水期间上游斜压波包具有显著的下游发展效应, 这可为预测江淮流域强降水过程的发生发展提供线索。

致谢 感谢国家自然科学基金委员会地球科学部南京大气资料服务中心 (设在南京信息工程大学) 提供了资料服务。

参考文献 (References)

[1] Persson A. Synoptic-dynamic diagnosis of medium range weather forecast systems. Proceedings of the Seminars on Diagnosis of Models and Data Assimilation Systems. 6-10 September 1999, ECMWF, Reading, U. K., 123~137
[2] Lee S, Held I M. Baroclinic wave packets in models and observations. *J. Atmos. Sci.*, 1993, **50**: 1413~1428
[3] Berbery E H, Vera C S. Characteristics of the Southern Hemisphere winter storm track with filtered and unfiltered data. *J. Atmos. Sci.*, 1996, **53**: 468~481
[4] Simmons A J, Hoskins B J. The life cycles of some nonlinear baroclinic waves. *J. Atmos. Sci.*, 1978, **35**: 414~432
[5] Chang E K M, Yu D B. Characteristics of wave packets in the upper troposphere. Part I: Northern Hemisphere winter. *J. Atmos. Sci.*, 1999, **56**: 1708~1728
[6] Chang E K M. Characteristics of wave packets in the upper troposphere. Part II: Seasonal and hemispheric variations. *J. Atmos. Sci.*, 1999, **56**: 1729~1747
[7] Chang E K M. Wave packets and life cycles of troughs in the

- upper troposphere: examples from the Southern Hemisphere summer season of 1984/85. *Mon. Wea. Rev.*, 2000, **128**: 25~50
- [8] Chang E K M. The structure of baroclinic wave packets. *J. Atmos. Sci.*, 2001, **58**: 1694~1713
- [9] 陶诗言, 倪允琪, 赵思雄. 1998 年夏季中国暴雨的形成机理与预报研究. 北京: 气象出版社, 2001. 1~10
Tao Shiyang, Ni Yunqi, Zhao Sixiong. *Forecast Study and Formation Mechanism of Rainstorms in the Summer of 1998* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2001. 1~10
- [10] 谭本旭, 潘旭辉. 1998 年夏季北半球斜压波活动与长江流域洪涝灾害分析. 南京大学学报 (自然科学), 2002, **38** (3): 355~364
Tan Benxui, Pan Xuhui. Baroclinic waves of Northern Hemisphere and Yangtze River flood in the summer of 1998. *Journal of Nanjing University* (Natural Science) (in Chinese), 2002, **38** (3): 355~364
- [11] 陶诗言, 卫捷. 再论夏季西太平洋副热带高压的西伸北跳. 应用气象学报, 2006, **17** (5): 513~524
Tao Shiyang, Wei Jie. The westward, northward advance of the subtropical high over the west Pacific in summer. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2006, **17** (5): 513~524
- [12] 李峰, 丁一汇, 鲍媛媛. 2003 年淮河大水期间亚洲北部阻塞高压的形成特征. 大气科学, 2008, **32** (3): 469~480
Li Feng, Ding Yihui, Bao Yuanyuan. A study of the forming characteristics of blocking high in northern Asian during the flood period of the Huaihe River basin in 2003. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, **32** (3): 469~480
- [13] 毕宝贵, 章国材, 李泽椿. 2003 年淮河洪涝与西太副高异常及成因的关系. 热带气象学报, 2004, **20** (5): 505~514
Bi Baogui, Zhang Guocai, Li Zechun. The relationship of abnormal features of western Pacific subtropical high and 2003 Huaihe River flood and cause exploration. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2004, **20** (5): 505~514
- [14] 张庆云, 王会军, 林朝晖, 等. 中国天气气候异常成因研究——2003 年. 北京: 气象出版社, 2004. 9~10
Zhang Qingyun, Wang Huijun, Lin Zhaohui, et al. *Studies on the Causes of Anomalous Weather and Climate over China in 2003* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2004. 9~10
- [15] 矫梅燕, 毕宝贵, 鲍媛媛, 等. 2003 年 7 月 3~4 日淮河流域大暴雨结构和维持机制分析. 大气科学, 2006, **30** (3): 475~490
Jiao Meiyang, Bi Baogui, Bao Yuanyuan, et al. Thermal and dynamical structure of heavy rainstorm in the Huaihe River basin during 3~4 July 2003. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (3): 475~490
- [16] 矫梅燕, 姚学祥, 周兵, 等. 2003 年淮河大水天气分析与研究. 北京: 气象出版社, 2004. 61~62
Jiao Meiyang, Yao Xuexiang, Zhou Bing, et al. *Analysis and Research of Heavy Rainfalls Causing Flood in Huaihe River in 2003* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2004. 61~62
- [17] Kao S K, Wendell L L. The kinetic energy of the large-scale atmospheric motion in wavenumber-frequency space: I, Northern Hemisphere. *J. Atmos. Sci.*, 1970, **27**: 359~375
- [18] Kistler R, Kalnay E, Collins W, et al. The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2001, **82** (2): 247~267
- [19] Zimin A V, Szunyogh I, Patil D J, et al. Extracting envelopes of Rossby wave packets. *Mon. Wea. Rev.*, 2003, **131**: 1011~1017
- [20] 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. 气象学报, 2002, **60** (4): 461~467
Miao Jinhai, Xiao Tianguai, Liu Zhiyuan. Theoretic foundation and computational method about the wave-packet propagation diagnosis. *Acta Meteorological Sinica* (in Chinese), 2002, **60** (4): 461~467
- [21] Zeng Qingcun. Evolution and structure of Rossby wave packet in forced mean flow. *Scientia Sinica (Series B)*, 1985, **28**: 872~881
- [22] Hoskins B J, James I N, White G H. The shape, propagation and mean-flow interaction of large-scale weather systems. *J. Atmos. Sci.*, 1983, **40**: 1595~1612