0577-6619/2008/66(6)-1020-31 *Acta Meteorologica Sinica* 气象学报

中高纬度 Rossby 波活动对华南前汛期 EAP 事件中期演变过程的影响*

施 宁[1] 布和朝鲁[2,3] 纪立人[2,3] 王盘兴[1]
SHI Ning[1] BUEH Cholaw[2,3] JI Liren[2,3] WANG Panxing[1]

1. 南京信息工程大学大气科学学院,南京, 210044
2. 中国科学院大气物理研究所灾害性气候研究与预测中心,北京, 100029
3. 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室,北京, 100029
1. *College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044, *China*
2. *Center for Disastrous Climate Research and Prediction, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029, *China*
3. *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029, *China*

2008-01-04 收稿,2008-03-19 改回.

Shi Ning, Bueh Cholaw, Ji Liren, Wang Panxing. 2008. The impact of mid-and high-latitude Rossby wave activities on the medium-range evolution of EAP event in the pre-rainy period of South China. *Acta Meteorologica Sinica*, 66(6):1020－1031

Abstract Based on the NCEP-DOE AMIP-Ⅱ daily reanalysis data (1979－2005), the evolution of the EAP event during the pre-rainy period of South China is studied on the medium-range time scale. It is shown that: (1) The life cycles of positive and negative EAP events share some similarities: in the middle and upper troposphere, Rossby wave packets emanating from the northeast Atlantic or Europe propagate toward East Asia along the Eurasian continent waveguide and finally give rise to the three anomaly centers of EAP event over East Asia. Among the three anomaly centers, Rossby wave packets propagate from the high-latitude anomaly center toward the middle-latitude and subtropical ones. The enhancement and maintenance of the subtropical anomaly center is closely associated with the existence of subtropical jet waveguide and with the incoming of Rossby wave packets from the upstream. In the lower troposphere, Rossby wave packets emanating from Asia subtropical area toward East Asia. (2) Among the three anomaly centers of EAP events in the middle and upper troposphere, the western Pacific subtropical one appears latter most. (3) Yet, the positive and negative EAP events could not be regarded as "mirror" each other. For the positive event, the positive height anomaly center around the Scandinavia Peninsula keep its strength and position during the mature period, and the Rossby wave packets thus propagate persistently toward East Asia, facilitating a longer ripe time of the positive event. As for the formation of negative EAP event, however, the incoming Rossby wave energy from the upstream contribute to both the enhancement and southeastward movement of the negative anomaly belt from the Yenisei River to the Bering Strait and the positive anomaly center around Mongolia. At the peak time, those two anomaly circulations become the northeast Asia and middle-latitude anomaly centers of the negative event, respectively. The energy dispersion of Rossby wave packets is relatively fast due to the predominant zonal circulation in the extratropics, causing a shorter mature period of the negative event. (4) During the pre-rainy period of South China, the prevalence of the EAP event significantly affects the rainfall over the region south of the Yangtze River. The positive (negative) EAP event tends to cause the positive (negative) precipitation anomalies of the region south of the Yangtze River, which is different from the early research based on the monthly mean data.

Key words Rossby wave, Medium-range process, EAP event, Pre-rainy period of South China, Precipitation

---

* 资助课题:973 计划项目(2006CB403601)和国家自然科学基金(40523001 和 40575024)。
作者简介:施宁,主要从事短期气候预测。E-mail: shining0826@homail.com

摘　要　文中从中期过程的角度探讨了 Rossby 波活动在华南前汛期东亚-太平洋遥相关型事件的形成、成熟和衰减过程中的作用,并得出如下结果:(1)正负东亚-太平洋遥相关型事件的形成过程有相似之处:在对流层中上层,源自东北大西洋或欧洲的 Rossby 波在欧亚大陆中高纬弱波导区中不断地向下游频散,最终在东亚地区形成东亚-太平洋遥相关型事件的 3 个异常中心。在东亚-太平洋遥相关型事件的 3 个异常中心之间,Rossby 波能量从高纬度向中纬度和副热带地区频散。东亚-太平洋遥相关型事件副热带异常中心的形成归因于东亚副热带急流波导的存在以及上游中高纬度地区 Rossby 波能量的注入。在对流层低层,Rossby 波则从亚洲副热带地区向东亚中纬度地区频散。(2)东亚-太平洋遥相关型事件的 3 个异常中心在对流层中上层中,西太平洋副热带地区异常中心最后形成。(3)正负东亚-太平洋遥相关型事件也并不是简单的反位相演变过程:在对流层中上层,在正事件成熟阶段,斯堪的纳维亚半岛上的正异常环流基本维持了其中心强度和位置,它不断地向下游东亚地区频散能量,使正事件的持续时间较长;在负事件中,由于中高纬度盛行纬向型环流,波能量的频散较快,因而负事件成熟阶段的持续时间比正事件短。(4)在这一时期,东亚-太平洋遥相关型事件对中国长江以南地区的降水形势具有显著的影响。正(负)东亚-太平洋遥相关型事件易引起长江以南降水异常偏多(少)。

关键词　Rossby 波,中期过程,东亚-太平洋遥相关型事件,华南前汛期,降水

中图法分类号　P434

1　引　言

中国气象工作者根据长期的天气预报实践发现,夏季江淮流域的降水异常与 500 hPa 上东亚地区出现的位势高度距平场密切相关,当西太平洋副热带地区、东亚中纬度地区和东北亚地区(雅库次克及鄂霍次克海地区,简称 YO 地区)上空,由低纬到高纬高度距平场呈现出正、负、正分布时,江淮流域异常多雨;当上述 3 个地区出现相反的距平环流形势后,江淮流域出现异常少雨。Huang 等 1987 年首次将这种高度距平场分布称之为东亚-太平洋遥相关型(EAP 型)。至于该遥相关型的形成机理,Huang 等(1987)、Nitta(1987)以及黄荣辉等(1994)提出,热带西太平洋暖池区对流活动可以触发夏季北半球 Rossby 波列,从而形成 EAP 型。

Tao 等(1987)曾指出中高纬度影响也是东亚夏季风环流变化的重要因素之一。对应正 EAP 型的高纬度环流系统是东北亚阻塞高压异常。对该高压异常的维持机理及影响研究已获得了很多有意义的成果(Huang 等,1987;吴国雄等,1994;Lu 等,1996;王亚非等,1998)。潘婕等(2008)发现,夏季高纬度 YO 地区的高度异常对类似于 EAP 型持续异常事件具有重要影响。张庆云等(1998)指出,当鄂霍次克海高压建立并稳定时,亚洲中高纬度地区易出现纬向距平波列,东亚东部易形成经向距平波列;而当鄂霍次克海为低值区时,上述两地区易出现相反的距平波列。天气预报实践也表明,东北亚高压异常可能对梅雨槽区高度异常具有重要的作用。这启发我们,除低纬度环流外,中高纬环流对 EAP 的形成可能也有一定的作用。

近年来,夏季环北半球异常环流所对应的上下游环流之间的联系受到进一步关注。Ding 等(2005)发现北大西洋和欧洲地区的环流异常可导致亚洲副热带急流(简称亚洲急流)区环流异常,特别是在东亚梅雨槽区。1994 年 7—8 月,沿亚洲急流静止 Rossby 波及其与 PJ(Pressure Jump)型遥相关的共同作用使得在东亚上空出现持续性反气旋环流,导致韩国和日本发生严重干旱(Park,et al,1997;Yoo,et al,2004;吕俊梅等,2006)。Enomoto 等(2003)认为 1985 年 8 月日本的西太平洋副高北上的过程是由于沿亚洲急流静止 Rossby 波的能量传播过程所引起。陶诗言等(2006)提出,应将亚洲副热带急流的 Rossby 波作为东亚夏季风系统的一个新成员。以上的研究又启发我们,亚洲副热带急流 Rossby 波活动可能对 EAP 型的形成也会有重要的作用。

广受关注的 THORPEX 国际合作计划(Shapiro,et al,2004)把提高 2 周以内的中期时间尺度上的高影响天气过程的预报作为其主要目标,再次强调了研究中期天气过程的理论和实际意义。至于 EAP 环流型,过去的研究更注重该环流型在月平均或季平均时间尺度上的特征和影响,很少从中期过程的角度来研究。既然 EAP 环流型的 3 个活动中心的两个中心在中高纬度地区,并且中高纬度环流又有鲜明的中期过程特点,那么 EAP 环流型的中期过程特征及其机理无疑值得深入研究。

众所周知,6—8月的夏季基本涵盖了华南前汛期、梅雨期、华北雨季这3个时段。西太平洋副高、副热带西风急流、青藏高压等重要天气系统的位置与强度在这3个时段中存在较大的差异。因此,前人得出的关于夏季EAP事件成因的结论是否在这3个时期均能成立?实际上,布和朝鲁等(2008)已从中期过程角度出发,发现在梅雨期EAP事件中,对流层上层中高纬Rossby波能量在欧亚大陆上准纬向频散以及对流层中低层东亚沿岸的准经向Rossby波能量频散具有同等的重要性。那么对于梅雨期之前或之后的EAP事件而言,到底又是哪一种Rossby波频散过程更为重要?这仍值得进一步研究。其中发生在梅雨期之前的夏季时段基本与中国华南前汛期对应,而华南前汛期中类似于EAP型的环流形势也不少见。作为例子,我们在图1中给出了两个环流个例及其对中国降水的影响。第1个例(图1a和1c)对应正位相EAP型,第2个例(图1b和1d)则为负位相EAP型。除了EAP型环流的3个异常中心以外,欧亚大陆中高纬度地区均存在正负相间的环流异常中心。在正(负)EAP型环流盛行时,长江以南地区降水增加(减少)。同时,在黄河流域、中国东北和西北地区的降水情况均受该环流型的影响,而且与不同位相EAP型对应,其异常分布存在显著差异。在正EAP型环流盛行时,表征西太平洋副热带高压的586 dagpm线已在中国华南;而在负EAP型环流盛行时,该等高线在远离华南的偏东位置上。那么,对长江以南地区的华南前汛期降水异常情况而言,是否仅关注热带和副热带

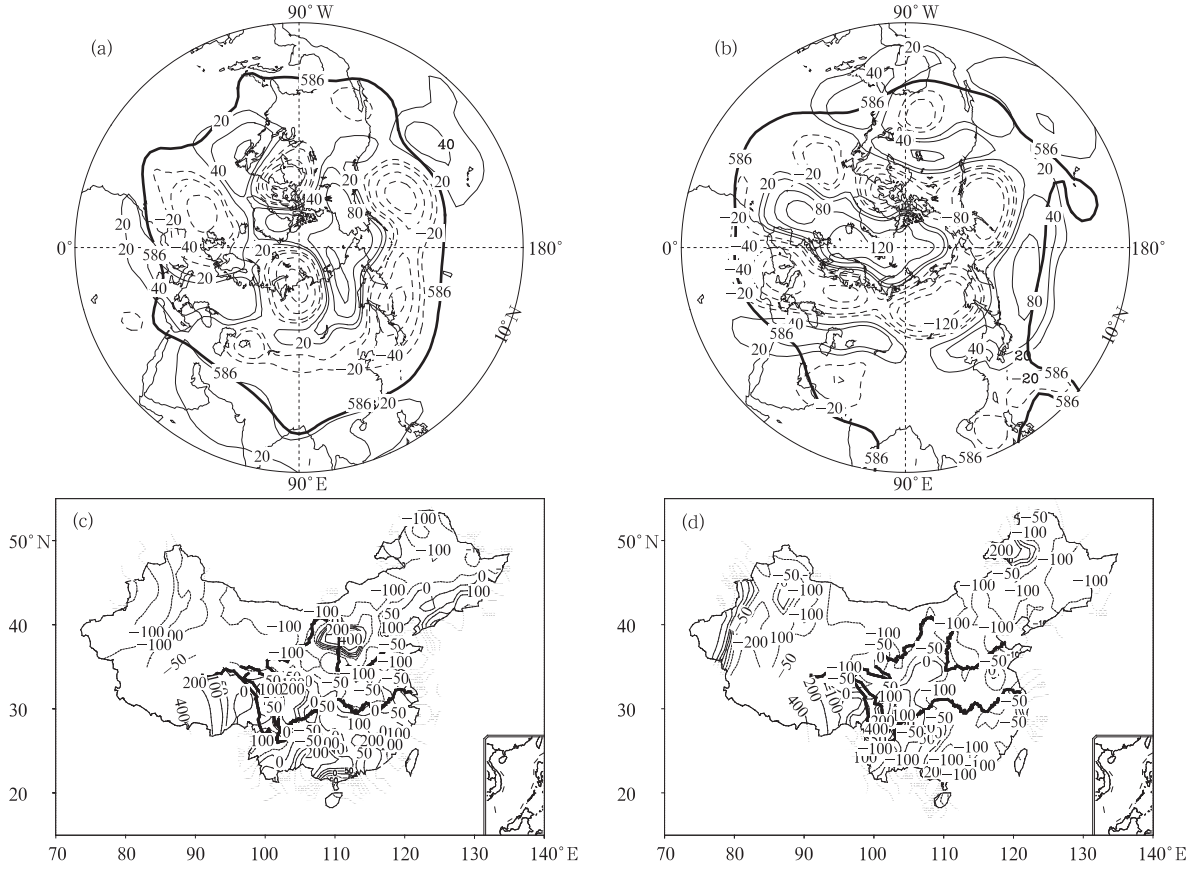


图1 500 hPa位势高度异常(a、b;单位:gpm,等值线分别为±20、±40、±80、±120 gpm,粗实线为586 dagpm)和中国降水距平百分率(c、d;等值线为0、±50%、±100%、±200%、±400%)
(a、c. 1981年5月26日—6月1日平均,b、d. 1980年5月17—21日平均)

Fig. 1 500 hPa mean height anomalies (gpm) during 1981.5.26−1981.6.1 (a) and 1980.5.17−1980.5.21 (b), spectively (contours are drawn for ±20, ±40, ±80, ±120, and the thick solid lines represent the 586 dagpm isolines) and the corresponding precipitation anomaly percentages (c,d; contours are drawn for 0, ±50, ±100, ±200, ±400)

系统的影响,而不必考虑中高纬度环流系统的影响呢? 实际上,这一时期 EAP 型环流的形成,包括西太平洋副热带高压系统的变化,可以认为是欧亚大陆中高纬 Rossby 波向下游传播的直接结果。这将在后文中加以详细讨论。

本文将从中期时间尺度上探讨华南前汛期 EAP 型环流(简称 EAP 事件)的演变特征及其与欧亚中高纬地区和亚洲急流区Rossby波活动的关联。

2　资料、EAP 指数和分析方法

本文所用数据为 1979—2005 年的 NCEP-DOE AMIP-Ⅱ逐日高度场、温度场、水平风场再分析资料(Kanamitsu,et al,2002),其水平分辨率均为 2.5°×2.5°,垂直方向分为 17 层。我们对所有变量场资料进行逐层低通滤波,滤去 8 天以下的高频天气扰动。

依据 EAP 型 3 个活动中心的地理位置,我们在中期时间尺度上定义了一个标准化的 EAP 型指数(I_{EAP}),其计算步骤为:(1)将 5 月 15 日至 6 月 14 日定为华南前汛期;(2)在 EAP 型的 3 个异常中心[①]地区分别选取 3 个基点,它们分别为 WP(20°N,125°E)、EA(37.5°N,125°E)和 YO(60°N,130°E),依次代表西太平副热带地区(简称 WP 地区)、东亚中纬度地区(简城 EA 地区)和 YO 地区;(3)对 3 个基点的逐日 500 hPa 位势高度(低通滤波部分)进行标准化,得到标准化的位势高度 H_{WP}、H_{EA} 和 H_{YO},由此给出一个指数 $I=1/3H_{WP}-1/3H_{EA}+1/3H_{YO}$;(4) 对 I 再进行标准化,得到逐日标准化指数 I_{EAP},其长度为 810 d (27×30 d)。这里定义的指数与 Huang (2004)定义的指数非常相似,尽管后者所定义的指数是基于季度平均 500 hPa 位势高度资料。

本文从逐日 I_{EAP} 中挑选出 $|I_{EAP}|>1.0$ 的极值日期,以此界定正负位相的 EAP 事件的峰值日(简称盛期)。在此基础上进一步确定出每一个正负 EAP 事件。EAP 事件必须满足以下 3 个约束条件:(1)相邻的两个同一类型事件的盛期间隔必须大于 8 d,若存在间隔小于 8 d 的两个同一类型事件,则将 $|I_{EAP}|$ 小的事件并入 $|I_{EAP}|$ 大的事件中;(2)正(负)EAP 事件中,3 个基点的 500 hPa 位势高度异常场从低纬至高纬必须以"+,−,+(−,+,−)"的分布排列;(3)每一个基点的位势高度距平的绝对值必须大于 10 gpm。由此确认的正负 EAP 事件分别为 10 和 11 个,其盛期所对应的 I_{EAP}、日期以及 3 个基点的位势高度距平分别列在表 1 中。

表 1　EAP 事件盛期 I_{EAP}、日期、以及 3 个基点位势高度距平(gpm)

Table 1　The I_{EAP}, date and 500 hPa height anomalies (gpm) at the three base points at the peak time of the EAP events

EAP 正事件						EAP 负事件					
序号	I_{EAP}	年月日	YO	EA	WP	序号	I_{EAP}	年月日	YO	EA	WP
1	2.78	1981.5.29	179.7	−75.0	28.0	1	−3.00	1992.6.01	−90.8	84.8	−40.4
2	2.53	1990.5.23	156.8	−70.0	22.4	2	−2.74	1980.5.19	−157.6	28.7	−28.7
3	2.30	1981.5.19	124.2	−65.5	12.8	3	−2.55	1999.6.02	−162.6	40.5	−18.6
4	2.06	1998.6.4	67.8	−91.3	10.7	4	−2.54	1999.6.13	−114.3	93.1	−14.9
5	1.80	1983.6.10	28.8	−19.0	23.5	5	−2.49	2002.6.07	−91.7	79.6	−22.9
6	1.72	1989.5.25	52.1	−53.7	17.5	6	−2.27	2003.5.27	−51.4	46.7	−39.9
7	1.60	1984.5.28	144.8	−36.6	10.6	7	−1.99	1985.5.24	−96.8	22.6	−26.4
8	1.43	2005.5.22	16.7	−76.4	18.0	8	−1.91	1986.5.25	−87.0	28.9	−20.9
9	1.33	1995.5.29	52.9	−30.8	21.7	9	−1.50	2005.5.28	−53.2	68.8	−13.5
10	1.08	1988.5.25	41.5	−30.8	10.0	10	−1.23	1993.5.28	−80.8	24.9	−15.1
						11	−1.12	1987.6.07	−39.2	16.2	−16.0

本文利用 Takaya 等(1997,2001)推导出的三维波作用通量(后文简称 T-N 通量)描述准定常 Rossby 波的能量频散特征。该通量在 WKB 近似假定下与波位相无关,且与定常 Rossby 波列的局地群速度方向一致。波作用通量(W)在对数气压坐标中的公式为

$$W=\frac{p}{2000|U|}\left\{[u(v'^2-\psi'v'_x)+v(-u'v'+\psi'u'_x)]\boldsymbol{i}+[u(-u'v'+\psi'u'_x)+v(u'^2+\psi'u'_y)]\boldsymbol{j}+\frac{f_0R_a}{N^2H_0}\cdot[u(v'T'-\psi'T'_x)+v(-u'T'-\psi'T'_y)]\boldsymbol{k}\right\} \quad (1)$$

其中 ψ' 为准地转扰动流函数,$\boldsymbol{V}'=(u',v')$ 为

① 本文在中期时间尺度上称其为异常中心,以此区别它与月或季度时间尺度上的对应名称"活动中心"。

扰动准地转风，$\boldsymbol{U}=(u,v)$为基本流场(华南前汛期气候平均场)，p 为气压(hPa)，R_a 为干气体常数，H_0 为标高，N^2 为 Brunt-V!?is!?l!?频率，T'为温度扰动，$\boldsymbol{i}$、$\boldsymbol{j}$、$\boldsymbol{k}$ 分别为纬向、经向、垂直地表方向的单位矢量。计算中，基本流场取为 27 a(1979—2005年)平均的华南前汛期(5月15日至6月14日)31 d平均场，距平场取为从每一个 EAP 事件的逐日低通滤波气象场中减去其逐日气候平均场。然后根据表1中每个正、负 EAP 事件的盛期日期，分别对其前后8天进行逐日合成，得到式(1)中的准地转扰动场。该通量公式的基本流场中包含了纬向不均匀的纬向和经向风场，特别适合于夏季蜿蜒曲折的中高纬度背景环流。

本文还用以前汛期气候平均西风气流的波导结构来探讨 Rossby 波的水平传播特征。波导定义为准静止波数(K_s)的大值区。与 Karoly 等(1982)及 Nishii 等(2004)的定义一致，局地 K_s 为

$$K_s^2=\frac{|\nabla Q|}{|\boldsymbol{U}|} \tag{2}$$

其中 $\boldsymbol{U}$ 和 ∇Q 分别为 300 hPa 水平风场和绝对涡度的水平梯度，由前汛期气候平均水平风场计算。准静止 Rossby 波的能量频散路径为由低 K_s 区折向高 K_s 区。两大洋的急流处均存在高波数(准静止波)区，这就是大家所熟悉的急流波导区(Nishii, et al, 2004)。

本文的降水资料取自中国气象局国家气象中心提供的中国 730 站的逐日降水资料，但仅挑出其中的 160 站，时间为 1979—2000 年。160 站主要是根据中国国家气象中心列出的提供月平均降水资料的 160 站站点的位置进行选择。

3 EAP 事件的中期演变过程

图 2 给出正、负 EAP 事件盛期 300、500 和 850 hPa位势高度距平场。在负事件盛期，东亚沿岸

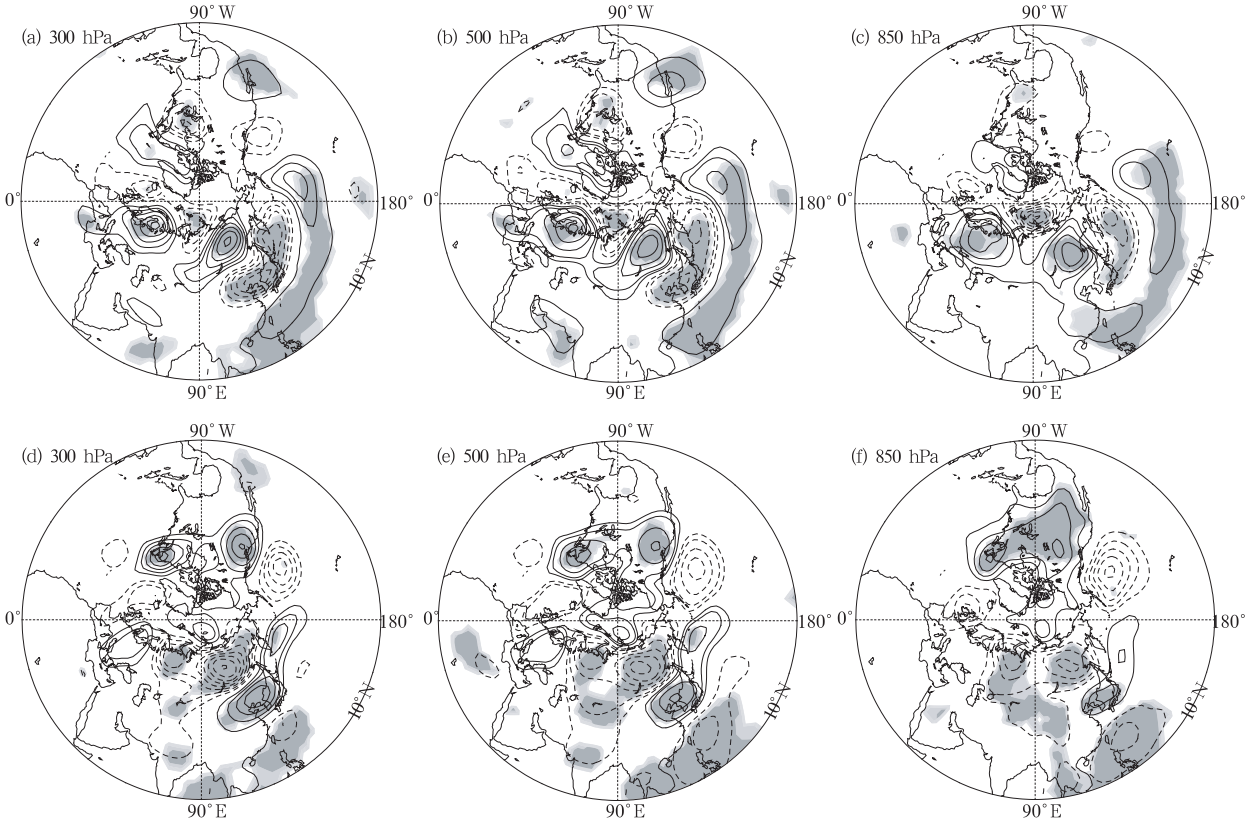


图 2 EAP 事件盛期时的位势高度距平合成场(gpm)

(a—c 为正 EAP 事件，d—f 为负 EAP 事件；图中 0 线均已略去，图 a、b、d 和 e 中等值线间隔为 20 gpm，图 c、f 中为 10 gpm。其中图 b 及 e 中增加的细虚(实)线表示 −10(10) gpm。浅和深阴影分别表示 0.1 和 0.05 的置信度)

Fig. 2 Composite height anomalies (gpm) at the peak time of the EAP events

((a)—(c) for the positive EAP event, and (d)—(f) for the negative ones. Zero lines are omitted. Contours are drawn for every 20 gpm in Figures (a), (b), (d) and (e), and every 10 gpm in (c) and (f). The thin dashed and solid isolines added in Figures (b) and (e), representing −10 and 10 gpm, respectively. Light (dark) shading marks the region of 0.1 (0.05) confidence level)

的 YO、EA 和 WP 地区均存在异常中心,该 3 个异常中心在整个对流层均具有正压结构(图 2d—2f)。在正事件盛期,3 个异常中心在对流层中高层具有正压结构(图 2a 和 2b)。但在 850 hPa 层上(图 2c),其 EA 异常中心位于日本以东洋面上;WP 异常中心相比其 500 hPa 上的位置偏西北。因此,正事件盛期时 EA、WP 异常中心从对流层低层到中层呈斜压结构,这有利于华南前汛期的平均有效位能向扰动有效位能转换,有利于异常中心本身的维持和发展。盛期 EAP 事件在空间结构上与过去基于月或季度平均资料得出的 EAP 型结构基本一致(Huang,et al,1987;黄荣辉等,1994;Huang,2004)。

在中高纬度地区环北半球的环流异常与 EAP 事件相伴出现。在正事件盛期,上游欧亚大陆最显著的环流异常中心为斯堪的纳维亚半岛正异常中心及喀拉海附近负异常中心。在负事件盛期,从乌拉尔山至雅库次克地区存在一个负异常带。正负事件中,在下游的东亚至北美的中高纬度地区均出现正负相间的异常环流中心。

3.1　正 EAP 事件

图 3 给出正 EAP 事件在对流层上层(300 hPa)的中期演变特征及其 Rossby 波能量频散过程。图 4 则给出 300 hPa 华南前汛期局地静止波波数 K_s 及气候平均纬向风。以后为方便起见,将早(晚)于盛期 N 天的日期称作第 $-N(N)$ 天。

我们将 EAP 事件的演变过程大致分为 3 个阶段:初始阶段、成熟阶段、衰亡阶段。从第 -8——-4 天(图 3a—3c),可视为正 EAP 事件的初始阶段。从乌拉尔山至渤海湾附近出现了正、负、正的高度异常分布,在这 3 个异常环流之间 Rossby 波能量向下游频散的特征显著。3 个异常环流缓慢地向东南方向移动,对应着低频波(位相)的向下游传播。其中在第 -8 天时,乌拉尔山附近波作用通量辐散(深阴影),说明该地区是波源区。由于该波源区位于 K_s 相对较小的区域(图 4a),有利于从此激发的 Rossby 波沿着中纬度弱波导区向下游频散。初始阶段中,欧亚大陆上的环流形势变化缓慢,源于乌拉尔山附近的低频 Rossby 能量在向下游频散的同时,波位相也向下游传播。

第 -2—4 天(图 3d—3g),可视为正 EAP 事件的成熟阶段。上游中高纬地区的环流异常稳定少动,显示驻波特征。其中斯堪的纳维亚半岛阻塞型异常环流中心基本保持了其位置和强度(约 100 gpm),成为一个重要的驻波波源,它源源不断地向下游频散 Rossby 波能量。在第 -2 天时,东亚地区已形成正 EAP 事件 3 个异常中心的基本形态。在 YO 异常中心和 EA 异常中心处,都有波作用通量的辐散区,尤其是 YO 异常中心处。这不利于各自异常中心的维持和加强,说明它们存在其他维持机制。由于副热带急流波导的存在(图 4a),Rossby 波能量从 EA 负异常中心向副热带方向传播,这使得日本南部上空的正异常环流逐步向西伸展到达中国华南,并在盛期时形成 WP 异常中心。由于在鄂霍次克海地区存在一 K_s 相对较大的弱波导区,Rossby 波从 YO 正异常中心的东部向南频散。与之对应,在盛期时,EA 负异常中心逐渐向东北方向伸展,而 WP 异常中心逐渐向东伸展,与北太平洋正高度异常中心连成一片。第 2—4 天(图 3f 和 3g),由于能量向下游频散,YO、EA 异常环流逐步减弱东移,WP 异常环流也逐步减弱。这一阶段,Rossby 波从高纬 YO 异常中心频散到 WP 异常中心的特征显著。

第 6—8 天(图 3h 和 3i),可视为正 EAP 事件的消亡阶段。斯堪的纳维亚半岛阻塞型异常环流中心减弱并向东南移动,WP 正异常环流消失,EAP 事件结束。

在对流层中层(500 hPa,图略),EAP 事件的中高纬度两个异常中心的发展、成熟和衰减过程与对流层上层的情况基本一致。在第 -2—2 天,WP 异常中心附近存在向北的波作用通量指向,但 EA 与 WP 异常中心间的 Rossby 波纽带并不明显。

在对流层低层(850 hPa,图略),没有明显的上游 Rossby 活动与 EAP 正事件的中高纬度异常中心对应。需要指出的是,在第 -2—2 天,中国南海至日本以南的西太平洋上存在 Rossby 波从副热带地区向北传播的现象,它对 850 hPa 的 WP 正异常中心的形成与维持可能有一定的影响。

概括起来,低频 Rossby 波的能量频散和位相传播对正 EAP 事件的发展和维持起着重要作用。在对流层中高层,与西风波导结构一致,源自欧亚大陆的 Rossby 波能量不断地向下游频散,最终在东

亚地区形成正 EAP 事件的 3 个异常中心。其中 WP 异常中心是由 Rossby 波从东亚中纬度地区向亚洲副热带急流波导处传播而形成。而在对流层低层,Rossby 波则从亚洲副热带地区向东亚中纬度地区频散。正 EAP 事件的驻波特征较为明显,其持续时间较长(约 7 d)。

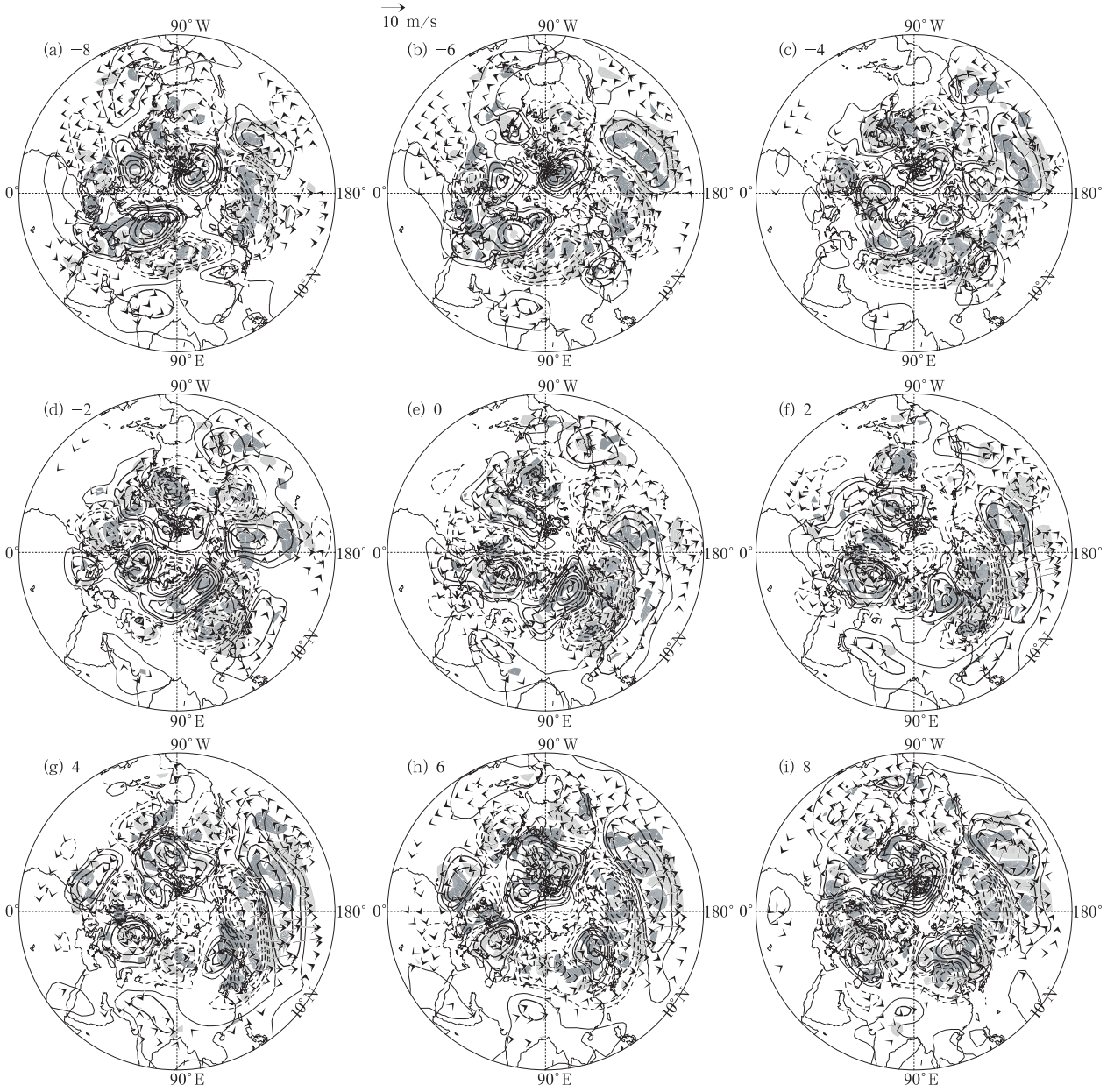


图 3 正 EAP 事件中 300 hPa 高度异常场(m,等值线)的演变及其对应的波作用通量(m^2/s^2,箭头)

(a—i 分别表示第−8、−6、−4、−2、盛期、2、4、6、8 天。等值线间隔同图 2(b)。深(浅)阴影表示波作用通量辐散(辐合)大于(小于)3×10^{-6}(-3×10^{-6})m/s^2 的区域)

Fig. 3 300 hPa height anomalies (gpm, contours) and wave activity fluxes (m^2/s^2, arrows) during the evolution of the positive EAP event

((a)—(i) at days −8, −6, −4, −2, 0(peak time), 2, 4, 6, 8, respectively. Contours are drawn as in Figures 2(b). Dark (light) shading marks the region where the divergence of wave activity flux is more (less) than 3×10^{-6}(-3×10^{-6}) m/s^2)

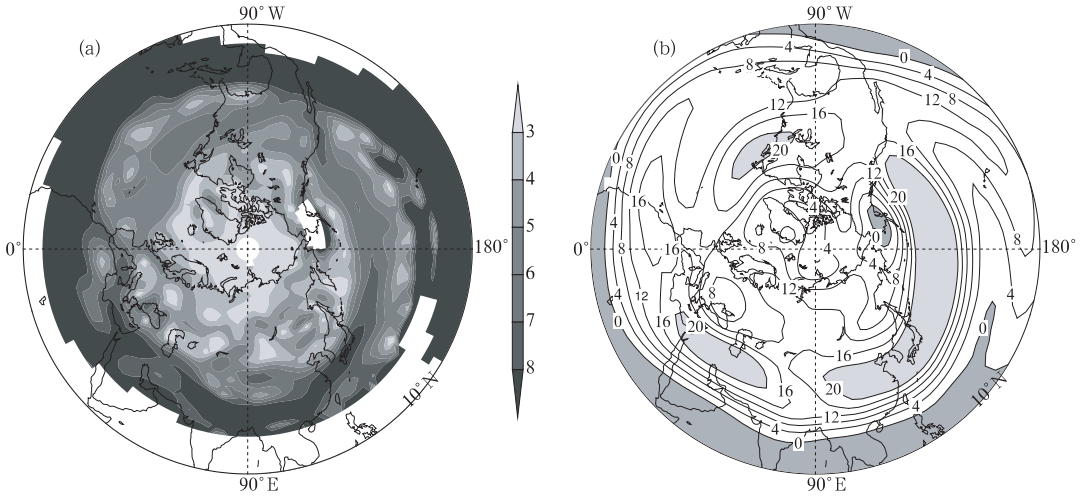


图 4　华南前汛期 300 hPa 的局地静止波波数 K_s(a)及气候平均纬向风(b)
(图 b 中轻和重阴影分别表示纬向风速大于 20 m/s 和小于 0 m/s 的区域)

Fig. 4　300 hPa climatological mean fields for the pre-rainy period of South China
((a) stationary Rossby wave number K_s; (b) zonal wind (m/s). The light (dark) shading in (b) indicates the region with zonal wind speed more (less) than 20 m/s (0 m/s))

3.2　负 EAP 事件

图 5 给出负 EAP 事件在对流层上层的中期演变特征。第－8——4 天(图 5a—5c),可视为负 EAP 事件的初始阶段。欧亚大陆中高纬地区的异常环流形势在该阶段稳定少动,但能量频散特征明显,这与异常中心强度及位置的变化一致。其中在第－8 天时,上游的北大西洋存在一个很强的负异常中心(约－120 gpm),源自该负异常中心的 Rossby 波沿着中纬度弱波导区不断地向下游频散。第－6 天,在叶尼塞河中下游地区形成了一个负异常中心。该负异常中心和切尔斯基山附近的负异常中心在第－6——4 天相互连通并逐渐增强,形成了一个叶尼塞河至白令海峡的负异常带。蒙古正异常中心的强度在初始阶段中没有明显变化,但稍微向东南方向移动。后面将看到,这一阶段的叶尼塞河至白令海峡的负异常带和蒙古正异常中心是负 EAP 事件盛期中高纬两个异常中心的雏形。在初始阶段中,源自北大西洋的 Rossby 波不断地向下游频散、叶尼塞河至白令海峡的负异常带的形成和蒙古正异常中心的稳定维持为其主要特征。

从第－2—2 天(图 5d—5f),可视为负 EAP 事件成熟阶段。叶尼塞河至白令海峡的负异常带和蒙古正异常中心加强并明显向东南移动,分别形成 YO 及 EA 异常中心。其中 YO 负异常中心大部分地区以波作用通量辐散为主要特征,这表明存在另一种因子的强迫维持着该异常中心。与正事件类似,在第－2 天,由于东亚副热带急流波导的存在,Rossby 波开始从蒙古正异常中心向中国东南沿海地区频散,使得原在渤海湾至日本一带的负异常环流向西南方向延伸,形成负 EAP 事件的 WP 异常中心。由于鄂海地区存在着弱波导区,Rossby 波开始从雅库次克附近向该地区频散,使得蒙古正异常中心与中太平洋日界线附近的正异常中心逐渐合拢。在第 2 天,YO 异常中心与 WP 异常中心明显减弱,EA 异常中心略向东移,但整体仍维持着负 EAP 事件的典型形态。在成熟阶段中,中高纬异常环流向下游移动到东亚地区后,Rossby 波从高纬 YO 异常中心向低纬频散的特征十分明显。

第 4—8 天(图 5g—5i),EAP 事件的典型形态消失,可视为衰减阶段。第 4 天,由于来自上游的波作用通量大幅度减弱,YO、EA 异常中心强度也随之迅速减弱,而此时 WP 异常中心已经消失,EAP 事件结束。

在 500 hPa 上(图略),负 EAP 事件的中期演变特征与 300 hPa 的情形基本一致。

在 850 hPa 上(图略),与正事件类似,在第－2—2 天,中国南海至台湾以东洋面上出现了 Rossby 波向中纬度径向频散的现象,它对 850 hPa WP 和 EA 异常中心的形成与维持可能具有一定的作用。

综上所述,与 EAP 正事件类似,负 EAP 事件 3 个异常中心在对流层中上层的形成、发展也与上游

Rossby 波向下游频散能量及波位相的传播有关。而在对流层低层,盛期 Rossby 波从亚洲副热带地区向中纬度亚洲中纬度地区频散。负事件的驻波特征较弱,因此其成熟期持续时间也相对较短(约 5 d)。

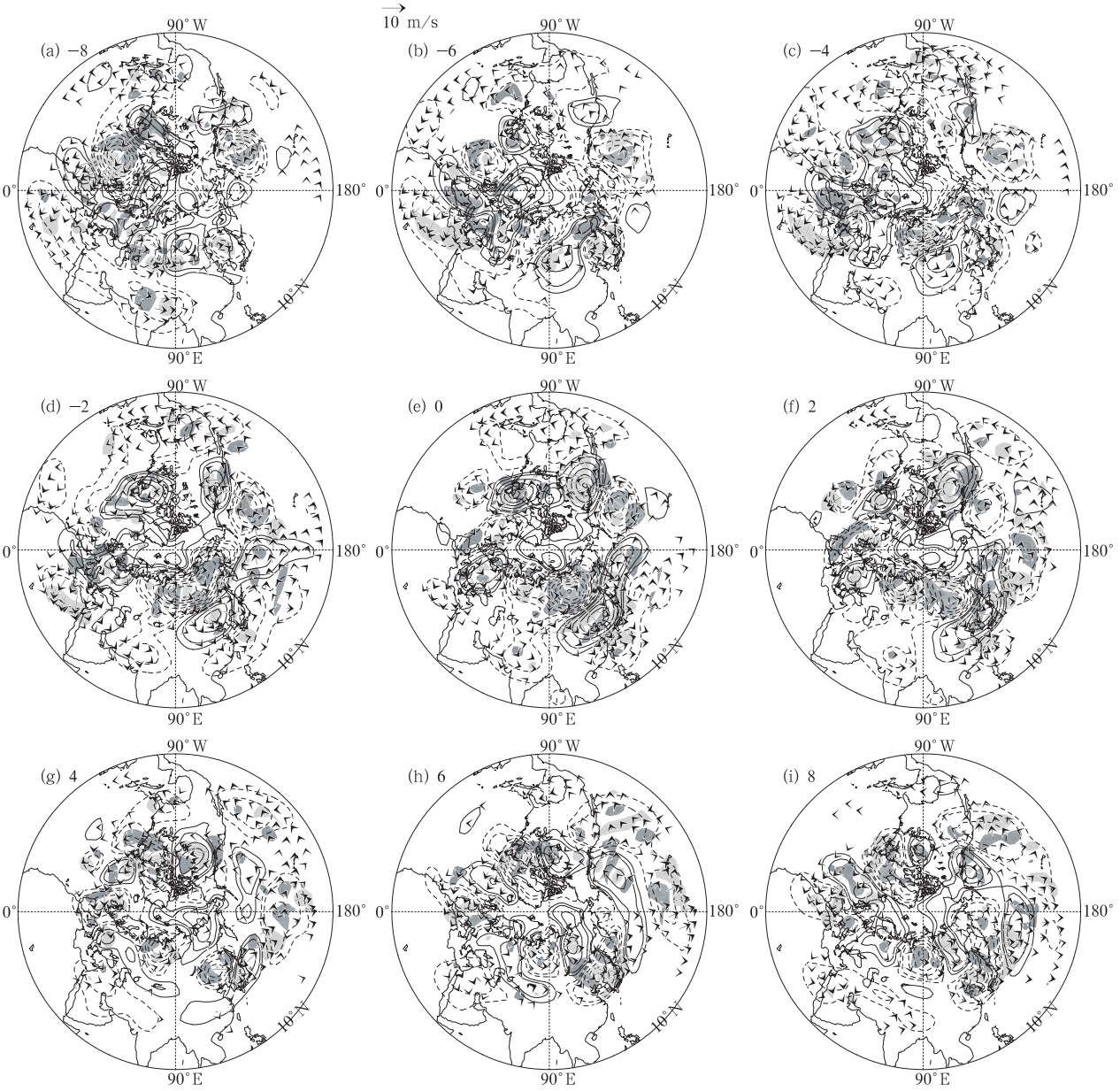


图 5 同图 3,但为负 EAP 事件

Fig. 5 As in Fig. 3, but for the negative EAP event

4 华南前汛期 EAP 事件与中国降水

一直以来,EAP 型的出现与否是预报中国夏季江淮流域降水形势的依据。但过去研究多集中在 7、8 月。那么发生在 5—6 月华南前汛期中的 EAP 事件又是如何影响中国降水分布? 这里我们从中期过程的角度探讨华南前汛期 EAP 事件对中国降水分布的影响,以检验图 1 中给出的两个个例是否具有普遍性。

根据前面讨论的 EAP 事件成熟阶段的持续时间在正事件中约为 7 d,而在负事件中约为 5 d 的事实,我们分别计算了正、负事件成熟阶段的合成平均降水距平百分率(图 7)。其中,成熟阶段在正事件中取为盛期及其前后 3 天,而在负事件中取为盛期

及其前后 2 天。以 1979—2000 年华南前汛期(5 月 15 日—6 月 14 日)31 d 平均的 27 a 气候平均降水量作为气候平均降水量。在计算中,若某个 EAP 事件出现在 2000 年之后,则将该事件做缺省处理。根据表 1,发生在 2000 年之前的正、负 EAP 事件分别有 9 个和 8 个。

从图 7a 中可以看出,在正 EAP 事件出现时,除了东北部分地区以外,长江以北的绝大部分地区出现了显著的负降水距平区。从正 EAP 事件成熟阶段的 500 和 850 hPa 高度场上(图 2b、2c 和图 7c)可以看出,与东北亚正异常环流中心对应,中国长江以北地区均处于脊前槽后的位置,在此大片区域内盛行下沉气流,导致该地区降水量显著减少。在吉林中北部、黑龙江南部和内蒙古东部降水量增加(达不到置信度),这可能与 EA 异常中心所对应的、类似于东北低涡环流形势所引起。正 EAP 事件有利于长江以南大部分地区降水量增加。与 WP 异常中心相对应,西太平洋副热带高压西边靠近中国华南地区,586 dagpm 线处在中国东南沿海地区(图 7c)。与此对应,长江以南大部分地区水汽输送丰沛,有利于降水量的增加,但是没有通过置信度。为此我们考察了每一个个例的降水情况,发现长江以南降水量增加的区域在各个个例间东西摆动,不够稳定,没能形成置信区。当负 EAP 事件盛行时(图 7b),中国

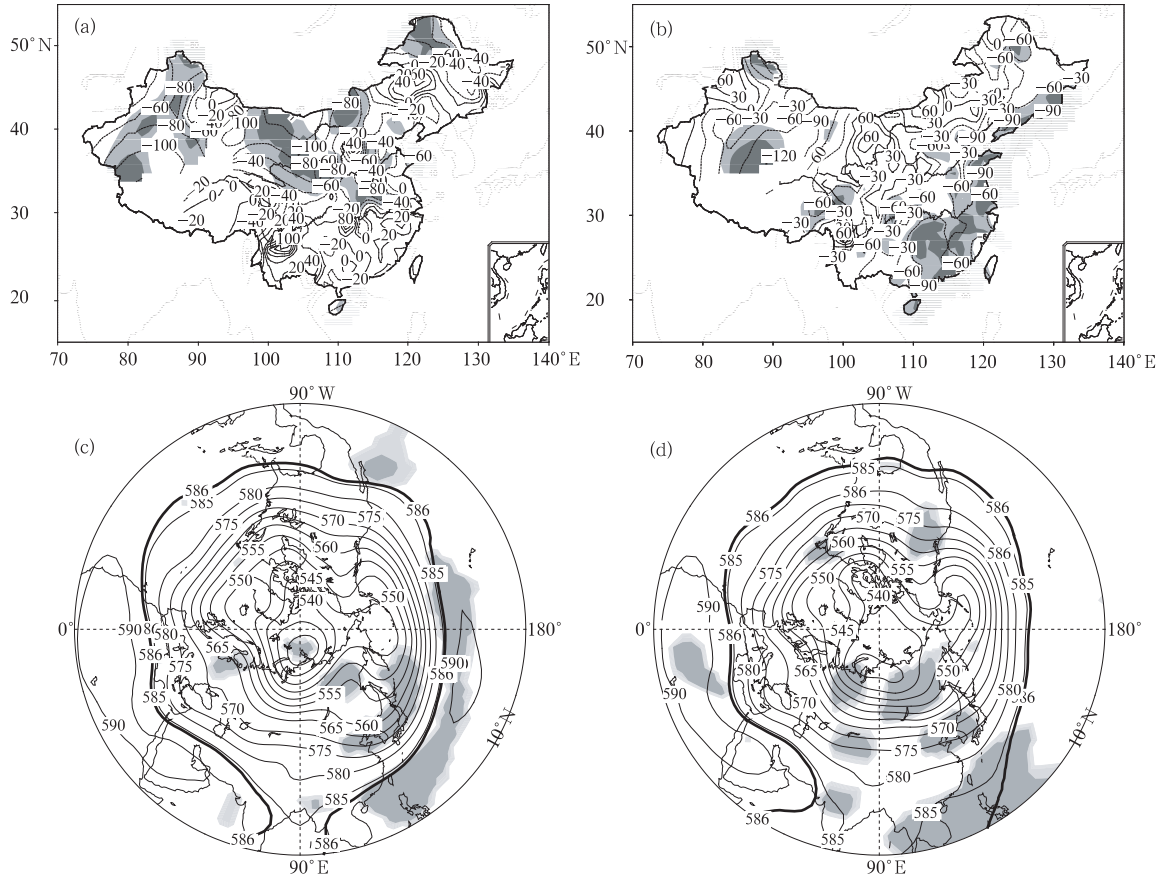


图 6　合成的正、负 EAP 事件成熟阶段的降水距平百分率(%)(a、b, 等值线间隔分别为 20%和 30%)和 500 hPa 高度场(dagpm)(c、d, 等值线间隔为 5,粗实线为 586,所有图中浅、深阴影分别表示 0.1、0.05 的置信度)

Fig. 6　(a), (b) Composite precipitation anomaly percentages (%). Contours are drawn at every 20 and 30 in (a) and (b), respectively. (c), (d) Composite 500 hPa height anomalies (dagpm), during the mature period of the positive and negative EAP events. contours are drawn at every 5. The thick solid lines stand for the 586 dagpm isolines. In all panels, light (dark) shading marks the region of 0.1 (0.05) confidence level

大部地区出现与正事件相反的降水形势。显著的负降水距平区出现在江淮流域及其以南地区,包括川渝地区和华南地区。在高度场上(图 7d)可以看出,与 WP 异常中心相对应的西太平洋副热带高压位于菲律宾以东的洋面上,远离中国华南地区,20°N 附近的 586 dagpm 线也比正事件偏东 10 个经度。负事件的 EA 和 WP 异常中心的维持不利于华南静止锋维持在其气候位置上,因而中国华南降水量显著减少。在负 EAP 事件盛行时,中国华北地区处在与东北亚负异常环流中心对应的槽前位置,因而降水偏多(达不到置信度)。与 EA 异常中心对应,在中国东北地区出现正高度异常环流,降水量显著减少。

可见,图 1 给出的两个个例基本上代表了正负 EAP 事件及其江南、华南降水形势相反的典型特征。

5 结论与讨论

本文利用 NCEP-DOE AMIP-Ⅱ逐日再分析资料,探讨了华南前汛期 EAP 事件的中期演变过程,揭示了正、负 EAP 事件相似和不同的特征,得到如下结果:(1)正、负 EAP 事件的形成过程的共同特征是,对流层中上层,位于东北大西洋或欧洲的环流系统发展,其波能量在中高纬弱波导区中不断地向下游传播,使已存在于欧亚大陆中高纬度上的异常环流不断发展并向东南方向移动,直至在东亚地区形成 EAP 事件 3 个异常中心的基本形态。在 EAP 事件成熟阶段时的 3 个异常中心之间,Rossby 波能量从高纬 YO 异常中心传向低纬 WP 异常中心的频散特征十分明显。其中 WP 异常中心的发展和维持与副热带急流波导的存在及上游中高纬度 Rossby 波能量的传入密切相关;在对流层低层,Rossby 波则从亚洲副热带地区向东亚中纬度地区频散。以上过程如图 7 所示。(2)正负位相 EAP 事件并非简单地反位相演变过程。在对流层中上层,在正 EAP 事件成熟阶段,斯堪的纳维亚半岛上的正异常环流基本维持了其中心强度和位置,它不断地向下游东亚地区频散能量,使正 EAP 事件的持续时间较长;在负 EAP 事件成熟阶段,由于中高纬度盛行纬向型环流,波能量的频散较快,因而负 EAP 事件的成熟阶段的持续时间比正 EAP 事件短;(3)正 EAP 事件盛行时,长江以北的绝大部分地区降水显著减少,长江以南大部分地区降水量增加。而负 EAP 事件的盛行时,中国降水形势则基本相反。

至于 EAP 型的形成机理方面,过去工作认为西太平洋暖池区对流活动异常起着重要的作用,它可

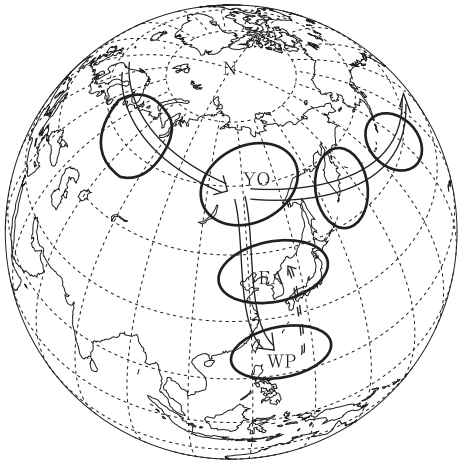


图 7 EAP 事件及其 Rossby 波能量频散示意图
(双实(虚)线箭头指示的是 Rossby 波在对流层中上层(低层)的传播情况)

Fig. 7 A schematic diagram of the EAP event and the corresponding Rossby wave energy emanation
(The double solid (dashed) line arrow indicate the Rossby wave in upper-and middle-(lower) troposphere

激发出向中高纬度地区频散的 Rossby 波,进而形成 EAP 型。那么在中期过程上,西太平洋暖池区对流活动异常对 EAP 事件的形成又有怎样的影响?从正负 EAP 事件盛期前后 8 天的合成 OLR 异常场(图略)中可以看出,西太平洋暖池区的对流活动在正负事件盛期之前,尤其是负事件,的确存在显著异常,并逐步加强向西移动。与之对应,第 -2 天时 Rossby 波在对流层低层开始从副热带西太平洋地区往东亚中纬度地区频散。因此,西太平洋暖池区对流活动异常激发出的 Rossby 波可能对 EAP 型在对流层低层的形成和维持起着重要的作用。但正负 EAP 事件的中高纬度 2 个异常中心的最强振幅在对流层高层(图 2)。因此,仅仅以西太平洋暖池区对流活动异常所对应的 Rossby 波能量传播过程本身不足以解释 EAP 事件本身。

在对流层低层,由于青藏高原以及西太平洋副热带高压的存在,使得前汛期对流层低层的气候风场在东亚地区以径向风为主(图略)。这可能是 Rossby 波在对流层低层出现的从西太平洋副热带异常环流向东亚中纬度地区异常环流频散的主要原因。在正负 EAP 事件成熟阶段 3 个异常中心之间,Rossby 波能量在对流层上下层反向的径向频散可能使得 3 个异常中心在上下层相互锁定、相互作用,进而使得它们更容易在东亚地区出现和维持。

最后,为便于同前人的研究进行比较,我们计算了 27 年华南前汛期(5 月 15 日—6 月 14 日)的平均 I_{EAP} 指数,并挑出 $|I_{EAP}|>0.5$ 的正负事件(各 9 个),分别进行合成。结果发现,典型 EAP 事件 3 个异常中心中的西太平洋副热带异常中心不能通过 90%的显著性检验(图略)。这说明,在月平均时间尺度上,EAP 事件不容易在华南前汛期形成,它可能更容易在梅雨后期出现。对于中期时间尺度以及月以上时间尺度,EAP 环流型(或事件)在梅雨后期的特征又是怎样?中高纬地区 Rossby 波能量频散和西太平洋暖池区异常对流活动对它的相对贡献如何?与华南前汛期的情形有何重要区别?这些问题值得我们进一步深入研究。

References

Bueh Cholaw, Shi Ning, Ji Liren, et al. 2008. Features of the EAP events on the medium-range evolution process and the mid-and high-latitude Rossby wave activities. Chinese Sci Bull (in Chinese), 53(1): 111-121

Ding Qinghua, Wang Bin. 2005. Circumglobal teleconnection in the Northern Hemisphere summer. J Climate, 18(17): 3483-3505

Enomoto T, Hoskins B J, Matsuda Y. 2003. The formation mechanism of the Bonin high in August. Qurt J Roy Meteor Soc, 129 (587): 157-178

Huang Gang. 2004. An index measuring the interannual variation of the East Asian summer monsoon: The EAP index. Adv Atmos Sci, 21(1): 41-52

Huang Ronghui, Li Weijing. 1987. Influence of heat source anomaly over the western tropical Pacific on the subtropical high over East Asia // Proceedings of International Conference on the General Circulation of East Asia. April 10-15. Chengdu, China

Huang Ronghui, Sun Fengying. 1994. Impact of the convective activities over the western tropical Pacific warm pool on the intraseasonal variability of the east Asian summer monsoon. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 18(2): 141-151

Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, et al. 2002. NCEP-DOE AMIP-Ⅱ Reanalysis (R-2). Bull Amer Meteor Soc, 83(11): 1631-1643

Karoly D J, Hoskins B J. 1982. Three dimensional propagation of planetary waves. J Meteor Soc Japan, 60: 109-123

Lu Riyu, Huang Ronghui. 1996. Numerical simulation of the effect of the SST anomalies in the tropical western Pacific on the Blocking highs over the northeastern Asia. Adv Atmos Sci, 13 (4): 411-424

Lü Junmei, Ju Jianhua, Zhang Qingyun, et al. 2006. Differences of influences of tropical western pacific SST anomaly and Rossby wave propagation on East Asian monsoon in the summers of 1993 and 1994. Chinese J Atmos Sci (in Chinese), 30(5): 977-987

Nishii K, Nakamura H. 2004. Lower-stratospheric Rossby wave trains in the southern hemisphere: A case-study for late winter of 1997. Qurt J Roy Meteor Soc, 130(596): 325-345

Nitta T. 1987. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the northern hemisphere summer circulation. J Meteor Soc Japan, 65(3): 373-390

Pan Jie, Bueh Cholaw, Ji Liren, et al. 2008. Characteristics of Rossby wave propagation associated with the summertime persistent anomaly events of mid-and high-latitude Eurasia. Chinese J Atmos Sci (in Chinese), 32(3): 615-628

Park C K, Schubert S D. 1997. On the nature of the 1994 East Asian summer drought. J Climate, 10(5): 1056-1070

Shapiro M A, Thorpe A J. 2004. A global atmospheric research programme for the beginning of the 21st century. WMO Bull, 53(3): 222-226

Takaya K, Nakamura H. 1997. A formulation of a wave-activity flux for stationary Rossby waves on a zonally varying basic flow. Geophys Res Lett, 24(23): 2985-2988

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 Atmos Sci, 58(6): 608-627

Tao Shiyan, Chen Longxun. 1987. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China // Chang C P, Krishnamurti T N. Review of Monsoon Meteorology. UK: Oxford University Press, 353pp

Tao Shiyan, Wei Jie. 2006. The westward, northward advance of the subtropical high over the west Pacific in summer. J Appli Meteor Sci (in Chinese), 17(5): 513-525

Wu Guoxiong, Liu Hui, Chen Fei, et al. 1994. Transient eddy transfer and formation of blocking high on the persistently abnormal weather in the summer of 1980. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 52(3): 308-320

Yoo S H, Ho C H, Yang S, et al. 2004. Influences of tropical western and extratropical Pacific SST on east and southeast Asian climate in the summers of 1993-94. J Climate, 17(13): 2673-2687

Wang Yafei, Song Yujia. 1998. A diagnostic analysis on the growth mechanism of the East Asia blocking high in 1991. Acta Meteor Sinica(in Chinese), 56(2): 212-224

Zhang Qingyun, Tao Shiyan. Influence of Asian mid-high latitude circulation on East Asian summer rainfall. Acta Meteor Sinica (in Chinese),1998, 56(2): 199-211

附中文参考文献

布和朝鲁,施宁,纪立人等. 2008. 梅雨期 EAP 事件的中期演变特征与中高纬 Rossby 波活动. 科学通报, 53(1): 111-121

黄荣辉,孙风英. 1994. 热带西太平洋暖池的热状态及其上空的对流活动对东亚夏季异常的影响. 大气科学, 18(2): 141-151

吕俊梅,琚建华,张庆云等. 2006. 热带西太平洋海温距平与 Rossby 波传播对 1993 和 1994 年东亚夏季风异常影响的差异. 大气科学, 30(5): 977-987

潘婕,布和朝鲁,纪立人等. 2008. 夏季欧亚中高纬环流持续异常事件的 Rossby 波传播特征. 大气科学, 32(3): 615-628

陶诗言,卫捷. 2006. 再论西太平洋副热带高压的西伸北跳. 应用气象学报, 17(5): 513-525

吴国雄,刘辉,陈飞等. 1994. 时变涡动输送和阻高形成—1980 年夏中国的持续异常天气. 气象学报, 52(3): 308-320

王亚非,宋永加. 1998. 1991 年夏东亚阻塞高压形成的诊断分析. 气象学报, 56(2): 212-224

张庆云,陶诗言. 1998. 亚洲中高纬度环流对东亚夏季降水的影响. 气象学报, 56(2): 199-211