

施宁. 2013. 高频瞬变涡动反馈强迫对东亚/太平洋事件演变过程的作用 [J]. 大气科学, 37 (6): 1187–1198, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12147.
Shi Ning. 2013. Role of high-frequency transient eddy feedback forcing in the evolution of East Asia–Pacific events [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (6): 1187–1198.

高频瞬变涡动反馈强迫对东亚/太平洋事件 演变过程的作用

施 宁

南京信息工程大学大气科学学院/气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044

摘 要 本文通过位势倾向方程研究了高频瞬变涡动反馈强迫 (TEFF) 对东亚/太平洋型在低频时间尺度上 (8 天以上) 的演变过程 (EAP 事件) 的影响。一个重要的发现是, 无论正位相还是负位相的 EAP 事件, 在对流层中低层上, TEFF 对其中、高纬度两个异常中心的演变均起着重要的作用。尤其是高纬度中心, 在对流层中层, TEFF 异常在盛期前可解释其增强部分的 50% 左右; 盛期之后则起着减缓其减弱的作用。TEFF 异常可分解为由高频涡动热量通量的辐合辐散引起的 $TEFF_{heat}$ 异常和高频涡动涡度通量引起的 $TEFF_{vor}$ 异常。两者在对流层上层相互抵消、下层相互叠加, 导致 TEFF 异常在对流层上层 (低层) 的作用要弱 (强) 于对流层中层。就 $TEFF_{heat}$ 和 $TEFF_{vor}$ 的相对贡献而言, 正位相的 EAP 事件中, $TEFF_{vor}$ 的贡献较大; 但在负位相 EAP 事件中, $TEFF_{heat}$ 的贡献则增大至与 $TEFF_{vor}$ 相当的程度。这种 $TEFF_{heat}$ 作用在负事件中的增强可能是与贝加尔湖以东地区对流层低层上斜压性的加强有关。

关键词 EAP 高频瞬变涡动 反馈强迫

文章编号 1006–9895(2013)06–1187–12

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12147

Role of High-Frequency Transient Eddy Feedback Forcing in the Evolution of East Asia–Pacific Events

SHI Ning

Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education/College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract In this study, the dynamic features of East Asia–Pacific (EAP) events are investigated in terms of high-frequency transient eddy feedback forcing (TEFF) through the geopotential height tendency equation. One important finding is that the TEFF anomalies contribute greatly to the development and maintenance of the high- and mid-latitude centers of the EAP event during its evolution. In particular, in the mid-troposphere, the anomalous TEFF can account for approximately 50% of the amplification of the high-latitude center before the peak of EAP event, and then it counteracts the decay process to some extent. The feedback forcing anomalies could be decomposed into two components: one is associated with the divergence or convergence of the high-frequency transient eddy heat flux ($TEFF_{heat}$) and the other is associated with that of the vorticity flux ($TEFF_{vor}$). These two components usually reinforce each other in the lower troposphere but counteract each other in the upper troposphere. Thus, the total TEFF anomaly is less important in the upper troposphere than in the lower troposphere. It is evident that the $TEFF_{vor}$ anomalies account for a predominant

收稿日期 2012–09–10, 2013–05–22 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 41105042, 国家科技支撑计划项目 2009BAC51B02, 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD)

作者简介 施宁, 男, 1982 年出生, 讲师, 主要从事中高纬度大气动力学研究。E-mail: shining@nuist.edu.cn

fraction of the total TEFF anomaly in positive EAP events; in contrast, in negative events, the contribution of the TEFF_{heat} anomalies increases to such an extent that they are at least comparable to the TEFF_{vor} anomalies. The increased importance of the TEFF_{heat} anomalies in the formation of negative EAP events might be related to the enhanced lower-tropospheric baroclinicity over the area east of Lake Baikal.

Keywords EAP, High-frequency transient eddy, Feedback forcing

1 引言

在北半球夏季, 东亚沿岸地区通常会出现一个异常的经向环流型, 气象学者将它称之为太平洋—日本 (PJ) 型 (Nitta, 1987) 或者东亚/太平洋 (EAP) 型 (Huang and Sun, 1992)。EAP 型主要由沿东亚沿岸地区从低纬至高纬的三个异常活动中心构成, 它们分别为西太平洋 (WP)、东亚 (EA) 和雅库茨克 (YA) 中心。而 PJ 型仅由中低纬两个异常中心构成, 并不包含 YA 异常活动中心。Huang and Sun (1992) 以及 Huang (2004) 指出 EAP 型与东亚地区夏季降水异常密切相关。目前, EAP 型已成为我国东部地区夏季气候分析和短期气候预测时广为引用的模型。

很多工作已对这种经向遥相关型的机制进行了研究。Nitta (1987) 和 Huang and Sun (1992) 首先提出, 由西太平洋暖池区对流异常所激发的向北传播的准定常 Rossby 波可引起这种遥相关型。Kosaka and Nakamura (2006) 认为, PJ 型的形成不仅与对流层低层上向北传播的 Rossby 波有关, 还与对流层顶层上在东亚沿岸由北向南传播的 Rossby 波有关。除这些 Rossby 波的经向传播特征外, Bueh et al. (2008), Shi et al. (2009) 以及施宁等 (2009) 发现, 源自上游地区的 Rossby 波在对流层中上层的向东传播对 EAP 事件 (EAP 型在 8 天以上低频时间尺度上的演变过程) 也有重要影响。关于外强迫影响, Lu and Huang (1996), Sun and Ding (2003) 的以及宗海峰等 (2008) 认为, ENSO 事件可通过西太平洋海表面温度异常进而影响到东亚经向遥相关型的形成。此外, Lu and Lin (2009) 发现副热带地区的降水异常反过来也对该经向环流型的形成和维持起重要作用。

除以上低频动力学机制外, 很多研究认为高频瞬变涡动反馈强迫 (TEFF) 作用也是准定常环流异常维持的一个重要机制。TEFF 可通过高频涡动的涡度和热量通量的辐合辐散对低频场产生强迫作用, 这种作用在中高纬度地区尤为明显 (Lau and Holopainen, 1984; Lau and Nath, 1991)。如 Bueh and

Nakamura (2007) 指出斯堪的纳维亚遥相关型中位于斯堪的纳维亚半岛的异常中心由于位于大西洋急流的出口处, 因此它的形成和维持与瞬变涡动强迫密切相关。Nakamura et al. (1997) 认为冬季在太平洋风暴轴中发展起来的瞬变涡动对北太平洋地区的阻塞起着正压反馈作用, 它大约可解释实际观测中该地区出现的阻塞强度的 75%。许多研究表明, 瞬变涡动对夏季鄂霍茨克海阻塞高压 (简称鄂海阻高) 的形成具有重要作用 (吴国雄等, 1994; 王亚非和宋永加, 1998; Nakamura and Fukamachi, 2004)。而鄂海阻高基本对应着 EAP 高纬度 YA 中心的活动位置。

由于 EAP 型的三个异常中心中有两个位于中高纬地区, 那么 TEFF 是否会对 EAP 型的形成起着重要作用。如果有, 又是起着怎样的作用? 正、负事件中 TEFF 的作用是否一致? 这些问题仍不清楚。本文将重点讨论 TEFF 在 EAP 事件形成过程中的作用。

2 数据和方法

本文所使用的数据是美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, 简称 NCEP) 和美国能源部 (Department of Energy, 简称 DOE) 大气模式比较项目二 (Atmospheric Model Intercomparison Project, AMIP-II) (Kanamitsu et al., 2002) 的 6 小时再分析资料, 时间段为 1979~2009 年。要素场包括高度场、温度场、水平风场, 其水平分辨率均为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, 垂直方向分为 17 层。对所有变量场资料进行低通滤波, 分离出 8 天以下的高频天气扰动和 8 天以上的低频环流。所选用的滤波器为递归六极正切巴特沃斯 (Butterworth) 滤波器 (Kaylor, 1977)。本研究中的高频瞬变涡动即指 8 天以下的高频天气扰动。

EAP 指数 (EAPI) 通常是利用 EAP 型三个活动中心的 500 hPa 位势高度异常进行构造 (Huang, 2004; Bueh et al., 2008)。本研究利用低频异常场采用与前人类似的方法定义了 EAPI:

$$EAPI = -1.0 \times \text{Nor} [0.25Z_{YA}^*(60^\circ\text{N}, 125^\circ\text{E}) -$$

$$0.5Z_{EA}^*(40^\circ\text{N}, 125^\circ\text{E}) + 0.25Z_{WP}^*(20^\circ\text{N}, 125^\circ\text{E})], \quad (1)$$

其中，“*”代表低频异常，三格点的位势高度异常值(Z_{YA}^* , Z_{EA}^* 和 Z_{WP}^*)均乘上 $\sin 45^\circ / \sin \varphi$, $\text{Nor}[X]$ 表示标准化。公式(1)与 Huang (2004)一致。每个 EAP 事件首先由逐日 EAPI 的极值来确定，其极值需满足 $|\text{EAPI}| > 1.5$ 。极值日期则定义为该 EAP 事件的盛期日期。EAP 事件的起始(结束)日期被定义为 $|\text{EAPI}| \geq 0.5$ 的第一天(最后一天)，持续时间则定义为从起始日期至结束日期的时段。最终挑选出的 EAP 事件还需满足以下条件(Bueh et al., 2008): (1) 两个相邻同位相事件之间的盛期日期需间隔 8 天以上; (2) EAP 事件中三个中心的 500 hPa 的高度异常需以+, -, + (或者-, +, -) 排列; (3) 三个基点上的高度异常的绝对值要大于 10 gpm (以下简称为 m); (4) EAP 事件的持续时间需大于或等于 5 天。以下分别简称正、负位相 EAP 事件为正、负事件。最终, 在 31 年的夏季中, 共挑出 20 (29) 个正 (负) 事件 (表 1)。Bueh et al. (2008) 挑出的 EAP 事件是发生在梅雨时段 (6 月 15 日至 7 月 14 日), 施宁等 (2009) 挑出的 EAP 事件则是在盛夏时段 (7 月 15 日至 8 月 31 日)。如果允许 EAP 事件盛期日期有一天的偏差, 那么可以发现, 表 1 中有 13 个正事件、19 个负事件 (星号标出) 与 Bueh et al. (2008) 或者施宁等 (2009) 挑选的 EAP 事件一致。因此, 本文的方法与上述工作基本一致。

TEFF 的作用是用位势倾向来表征 (Lau and Holopainen, 1984; Holopainen and Fortelius, 1987):

$$\begin{cases} g \left\{ \frac{1}{f} \nabla^2 + f \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{1}{\sigma} \frac{\partial}{\partial p} \right) \right\} \frac{\partial Z}{\partial t} = D_{\text{heat}} + D_{\text{vor}} + R, \\ D_{\text{heat}} = f \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{\nabla \cdot \overline{V'\theta'}}{S} \right), \\ D_{\text{vor}} = -\nabla \cdot \overline{V'\zeta'm}, \end{cases} \quad (2)$$

垂直边界层设定为 1000 hPa 和 100 hPa, 它们需满足:

$$\begin{cases} -\frac{gp}{R} \left(\frac{p_0}{p} \right)^{R/C_p} \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{\partial Z}{\partial t} \right)_{\text{heat}} = -\nabla \cdot \overline{V'\theta'}, \\ \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{\partial Z}{\partial t} \right)_{\text{vor}} = 0, \end{cases} \quad (3)$$

上述公式中“'”和“—”分别表示高频和低频滤波场。在公式(2)中, $\sigma = (-\alpha/\theta)(\partial\theta/\partial p)$ 为静力

稳定度, 这里它仅是气压 p 的函数, α 为比容, \tilde{S} 表示北半球平均的 $-\partial\bar{\theta}/\partial p$, f 为 43°N 上的科氏参数 ($1.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$), R 表示准地转位涡方程中的剩余项, 比如低频环流的水平平流, 非绝热加热以及摩擦。公式(3)中的下标“heat”和“vor”分别表示高频瞬变涡动的热量和涡度通量的作用。其他变量则为常用的气象场变量。具体计算步骤与 Holopainen and Fortelius (1987) 一致, 即主要利用球谐函数对(2)式中的二维拉普拉斯算子在球面上进行展开。本文所用谱截断为 T21 截断。在后面的介绍中, 将由 D_{vor} 项所引起的 TEFF 记为 TEFF_{vor} , 由 D_{heat} 引起的记为 $\text{TEFF}_{\text{heat}}$, TEFF_{vor} 与 $\text{TEFF}_{\text{heat}}$ 的线性叠加记为 TEFF_{all} 。本文计算了逐日的 TEFF_{vor} 和 $\text{TEFF}_{\text{heat}}$, 并据此计算出两者的异常场。

表 1 EAPI 及 EAP 事件的盛期日期

Table 1 EAP index (EAPI) and date of the EAP events at their peak time

正事件			负事件		
序号	EAPI	日期	序号	EAPI	日期
1*	2.32	1980-07-27	1*	-2.86	2004-06-28
2*	2.20	1998-08-26	2*	-2.82	2005-07-18
3	2.20	2009-07-26	3*	-2.80	2000-07-04
4*	2.10	1993-08-02	4*	-2.60	1997-06-16
5	2.05	2008-08-18	5	-2.54	2002-06-06
6*	2.02	2005-07-29	6*	-2.45	1997-07-23
7*	1.97	2005-07-10	7*	-2.44	1979-08-12
8*	1.94	1980-08-15	8	-2.42	2006-07-11
9*	1.92	1998-08-16	9	-2.27	2007-06-11
10*	1.89	1988-08-29	10*	-2.18	1994-07-09
11*	1.82	1981-08-09	11	-2.17	1999-06-13
12	1.80	1998-07-20	12*	-2.17	1997-06-26
13*	1.77	1996-06-30	13	-2.07	2003-06-19
14*	1.77	2005-08-25	14*	-2.06	1989-06-22
15	1.74	1998-06-04	15	-2.03	2006-08-21
16	1.69	2007-08-03	16*	-2.01	1979-08-23
17*	1.64	1988-07-24	17	-1.87	1991-08-25
18	1.59	2002-08-07	18*	-1.87	1984-08-09
19*	1.58	1998-08-02	19*	-1.82	1997-08-26
20	1.51	1979-07-13	20	-1.77	1999-06-02
			21*	-1.74	1994-07-20
			22*	-1.73	2004-08-10
			23	-1.71	1989-08-04
			24*	-1.71	1981-08-01
			25*	-1.64	1981-06-18
			26*	-1.61	2001-07-03
			27	-1.54	2008-08-07
			28*	-1.54	1990-07-28
			29*	-1.50	1985-06-20

注: *表示与 Bueh et al. (2008) 或施宁等 (2009) 挑出的事件一致

因为气候平均分量的 TEFF 会被其他过程抵消平衡,所以本文仅关注与 EAP 事件相联系的异常涡动所引起的异常 TEFF。

本文中所有的逐日低频异常场(包括 TEFF 异常)是通过减去其对应日期的 31 天滑动平均的气候平均值而获得。为讨论方便,将早于(晚于)盛期 N 天的日期简称为第 $-N(N)$ 天。

3 TEFF 的影响

3.1 正 EAP 事件

图 1 给出了第 -6 天至第 2 天 500 hPa 上合成的正 EAP 事件演变图以及与之对应的异常 TEFF。

第 -6 天(图 1a),贝加尔湖地区维持着正高度异常(约 $+20$ m)。在随后的演变过程中,该正环流异常将逐渐成为 EAP 事件中的 YA 中心。从图 1f 可以看出,贝加尔湖地区有显著的 $TEFF_{all}$ 异常(约 $+5$ m/d)。与之对应,该地区的正高度异常强度在第 -4 天加强为 40 m(图 1b)。第 -4 天(图 1g),贝加尔湖地区的 TEFF 异常中心向东扩展,这有利于引导贝加尔湖地区的正异常逐渐加强东移(图 1b-c)。第 0 天(图 1d),正高度异常已位于雅库茨克地区稍偏西的位置上,其中心强度约为 60 m,成为典型 EAP 事件的 YA 中心。实际上,从第 -2 天开始至第 2 天, YA 异常中心的位置基本稳定少动,

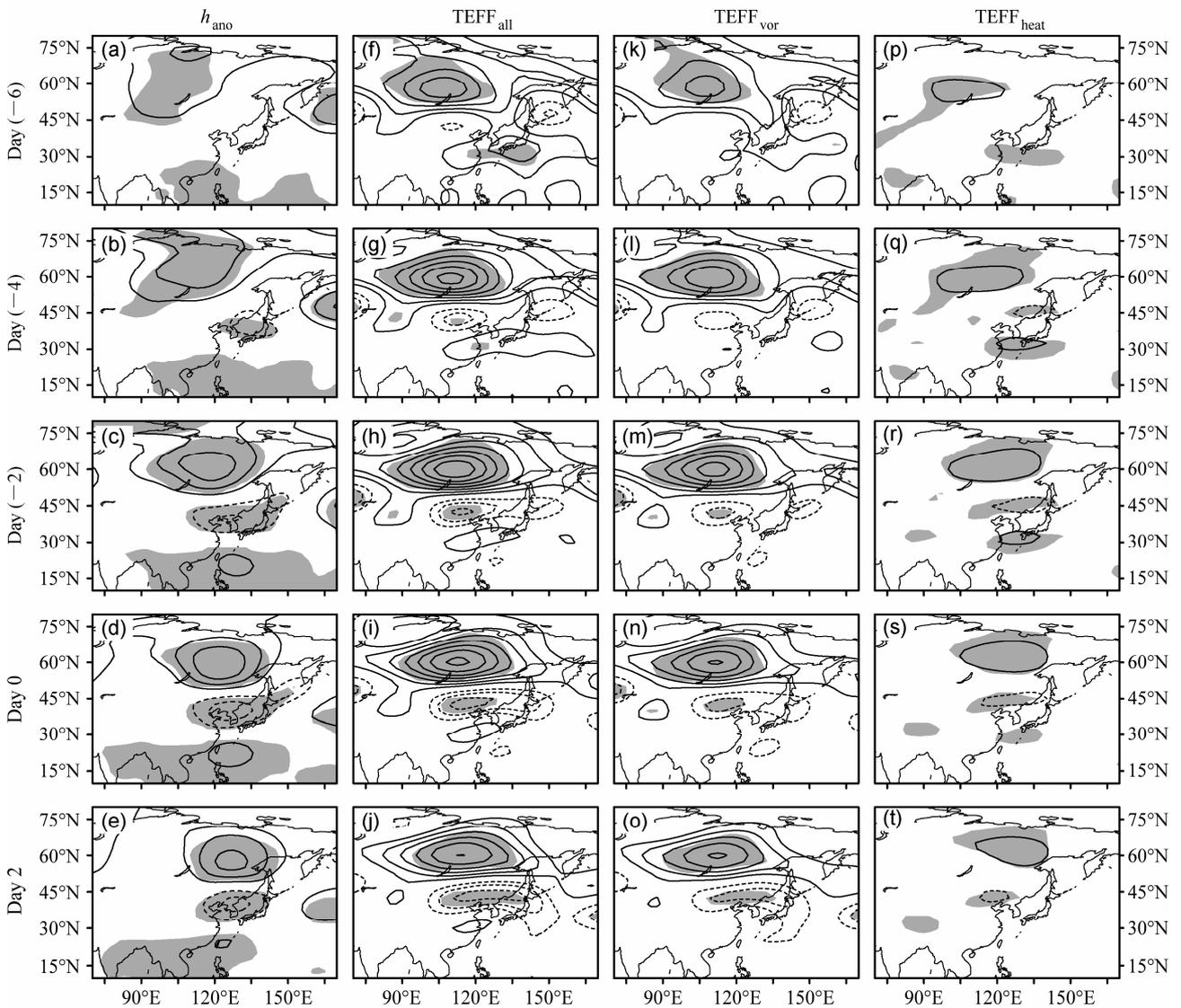


图 1 20 个正位相 EAP 事件的高度异常 h_{ano} , $TEFF_{all}$, $TEFF_{vor}$ 和 $TEFF_{heat}$ 在 500 hPa 上的合成演变。 h_{ano} 和 TEFF 的等值线间隔分别为 20 m 和 1 m/d,零线已略去;阴影为通过 95% 显著性检验的地区

Fig. 1 Composite time evolution of the anomalous geopotential height (h_{ano}), $TEFF_{all}$, $TEFF_{vor}$, and $TEFF_{heat}$ at 500 hPa for the 20 positive EAP events. Contour intervals are 20 m and 1 m/d for h_{ano} and transient eddy feedback forcing (TEFF), respectively, zero lines are omitted; shading marks the region of 95% confidence level

这与 $TEFF_{all}$ 异常在该地区持续维持有关(图 1h-j)。可以推算出,从第-4 天到第-2 天(图 1b-c),YA 地区的正高度异常中心大约以 10 m/d 的强度增强,而在第-2 天至第 0 天(图 1c-d),其基本维持着约+60 m 的强度不变。而 $TEFF_{all}$ 异常中心从第-4 天至第 0 天(图 1g-i)基本保持着约+7 m/d 的强度。因此, $TEFF_{all}$ 异常有利于 YA 中心的形成和维持。需指出的是,Bueh et al. (2008) 及施宁等 (2009) 认为 YA 地区是波作用通量的一个辐散区,也即一个波源区,它会向下游频散 Rossby 波能量。由此推断, $TEFF_{all}$ 异常可通过抵消该地区的波能量频散进而维持该高度异常。在第 2 天(图 1e)及第 4 天(图略),YA 地区异常强度缓慢减弱,这主要与 $TEFF_{all}$ 异常仍在局地维持着约+6 m/d 的强度有关(图 1j)。因此,在 EAP 事件盛期之后, $TEFF_{all}$ 异常的作用并没有消失,它起着减缓 YA 中心减弱的作用。若将 $TEFF_{all}$ 异常分解为 $TEFF_{vor}$ 异常和 $TEFF_{heat}$ 异常,可发现在整个演变过程中, $TEFF_{all}$ 异常(图 1f-j)与 $TEFF_{vor}$ 异常(图 1k-o)在强度和地理位置上均较为一致。 $TEFF_{heat}$ 异常虽对 $TEFF_{all}$ 异常有一定程度的正贡献(图 1p-t),但其强度(约+1 m/d)要小于 $TEFF_{vor}$ 异常(约+5 m/d)。由此可见, $TEFF_{all}$ 异常主要来自于 $TEFF_{vor}$ 异常。它们的局地影响将在本文的第 4 部分予以讨论。

$TEFF_{all}$ 异常对 EAP 事件的中纬度异常中心(EA 中心)的发展和维持也有一定的贡献。第-4 天(图 1b),日本海地区出现一显著负高度异常中心(约-20 m)。而在其西北方向的我国内蒙古中西部有负 $TEFF$ 异常(-2 m/d,图 1g)。此时,两者在空间上并不重合。第-2 天(图 1h),内蒙古中西部的 $TEFF$ 负异常逐渐扩展增强。与之对应,日本海地区的负高度异常逐渐向西扩展至内蒙古中西部地区,并基本保持其强度至第 2 天(图 1d-e)。因此,与 YA 中心不同,EA 中心的位置与 $TEFF_{all}$ 异常并不完全对应, $TEFF_{all}$ 异常仅在第-2 天至第 2 天(图 1h-j)有利于 EA 中心西北部分的发展和维持。与 YA 中心类似的是, $TEFF_{vor}$ 异常仍是 $TEFF_{all}$ 异常的主要组成部分。但 $TEFF_{heat}$ 异常强度能占至 1/3 左右。

至于低纬度的 WP 中心,在 30°N 以南地区没有 $TEFF_{all}$ 异常的显著信号。因此,其他机制可能对 WP 中心和 EA 中心的其余部分的形成起着重要作用(Nitta, 1987; Huang and Sun, 1992; Kosaka and

Nakamura, 2006; Bueh et al., 2008; Lu and Lin, 2009)。

因此, $TEFF_{all}$ 异常对正 EAP 事件发展的贡献主要是加强和维持 YA 中心及维持 EA 中心的西北部分。而 $TEFF_{all}$ 异常主要来自于 $TEFF_{vor}$ 异常的贡献,尤其是在 YA 地区。

3.2 负 EAP 事件

与正 EAP 事件类似, $TEFF_{all}$ 异常也有利于负 EAP 事件的 YA 和 EA 中心的发展和维持(图 2)。从图 2f 可以看出,第-6 天贝加尔湖西北侧有负 $TEFF_{all}$ 异常。随后该地区的 $TEFF_{all}$ 异常逐渐增强直至盛期(图 2g-i),它引导着原位于巴尔喀什湖北侧地区的显著负高度异常(图 2a)逐渐向东扩展移动,并最终维持在 YA 地区(图 2b-d)。与正事件类似, $TEFF_{all}$ 异常基本与 YA 异常中心的位置对应。但相比于正事件, $TEFF_{all}$ 异常的中心位置略偏东,与之对应,YA 中心位置也略偏东。

至于 EA 异常中心,它是从位于巴尔喀什湖至贝加尔湖南侧一带的正高度异常(图 2a)演变而来。从第-6 天至第 2 天(图 2f-j),东亚中纬度地区维持着一纬向拉长的正 $TEFF_{all}$ 异常,其中心位于我国东北地区附近,在其南侧则维持着负 $TEFF_{all}$ 异常。该正 $TEFF_{all}$ 异常引导着上游正高度异常逐渐向我国东北地区移动,并最终使其在该地区维持(图 2d)。需指出的是,在第-4 天至第 0 天,EA 地区的高度异常偏北部分的位置与正 $TEFF_{all}$ 异常相对应。在第 0 天后,EA 异常中心逐渐南压(图 2e)离开正 $TEFF_{all}$ 异常所在的位置,且其南侧部分开始受到我国东部沿海及东海地区的负 $TEFF_{all}$ 异常(图 2j)的影响,该异常中心逐渐减弱。

需要注意的是,在这个整个过程中,虽中高纬地区 $TEFF_{vor}$ 异常的中心强度仍大于 $TEFF_{heat}$ 异常,但相比于正事件,两者之间的差异已有所缩小。以第 0 天为例,YA 地区的 $TEFF_{vor}$ 异常强度约为+4 m/d(图 2n),但其位于一个较偏西的位置上,因此,它仅对 YA 中心偏西部分有一定的强迫作用。而此时, $TEFF_{heat}$ 异常强度约为+2 m/d(图 2s),其中心强度约占 $TEFF_{vor}$ 异常的 1/2,且其中心位置与该地区的高度异常基本对应(图 2d)。至于 EA 地区, $TEFF_{heat}$ 异常强度(图 2s)更是达到了与 $TEFF_{vor}$ 异常相当的程度(图 2n)。

整体而言,与正事件类似, $TEFF_{all}$ 异常对 YA 中心和 EA 中心的形成和维持也起着重要作用,其

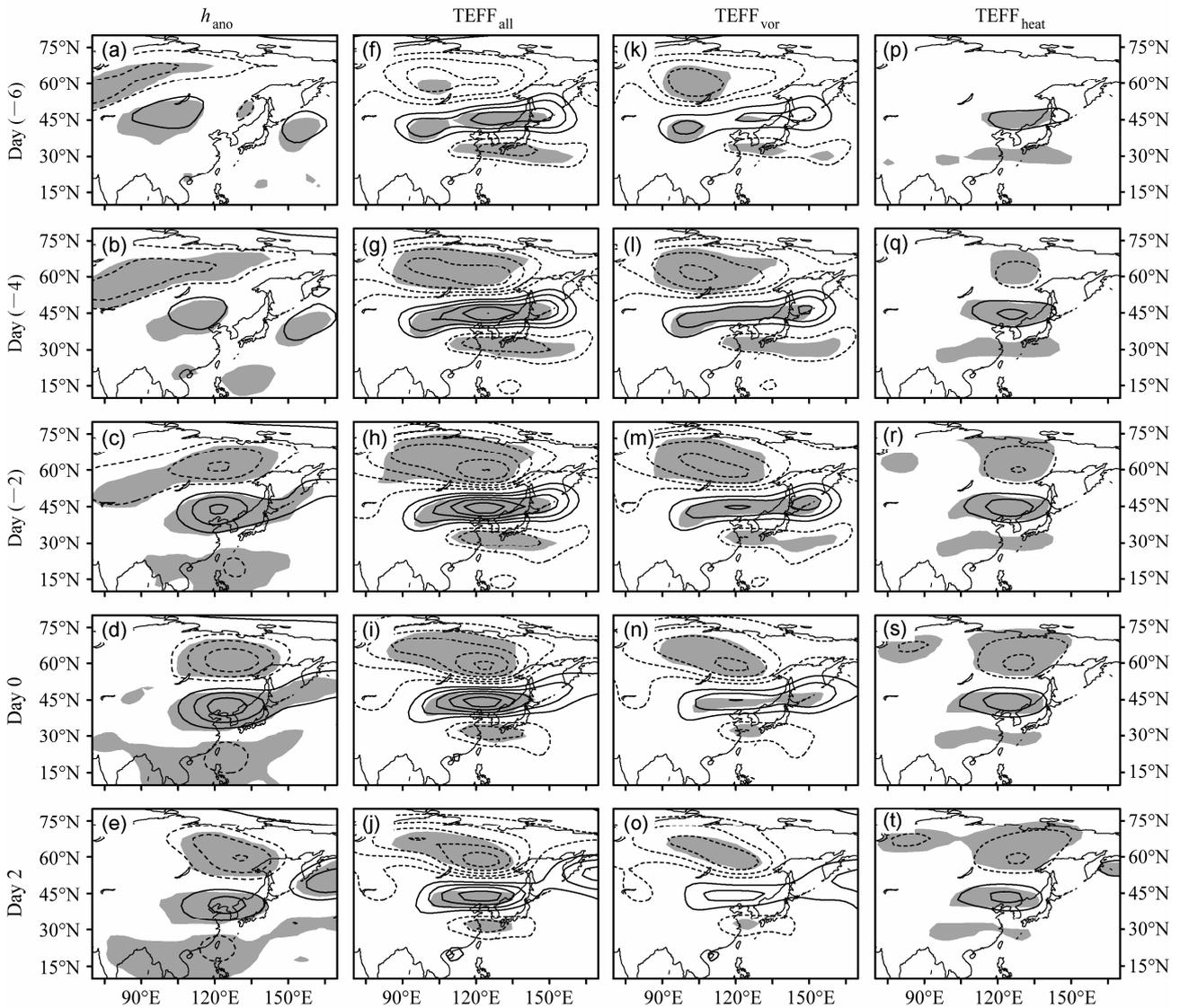


图2 同图1, 但为29个负事件
Fig. 2 Same as Fig.1, but for the 29 negative events

中来自 $TEFF_{heat}$ 异常的贡献已明显增强。但与正事件相比, 在盛期之前, $TEFF_{all}$ 异常有利于 EA 中心偏北部分的形成。

3.3 对流层上、下层

实际上, 与 EAP 事件相联系的位势高度异常场在整个对流层中呈现出相当正压结构(图略), 这与前人的结论一致。但需要注意的是, $TEFF$ 的作用却在对流层不同层次上有所不同。这种不同的特征在 EAP 事件的演变过程中均有所体现, 本文仅讨论第 0 天。

图 3、4 分别给出了正、负 EAP 事件中第 0 天位势高度异常以及 $TEFF$ 异常的垂直结构图。从图 3 中可以看出, $TEFF_{vor}$ 在对流层呈现出相当正压的

结构(图 3c、1n、3g), 其振幅中心在对流层上层。与之不同的是, $TEFF_{heat}$ 在东亚地区呈现出在对流层上、下层反相的斜压结构(图 3d 和 3h)。因此, $TEFF_{vor}$ 异常和 $TEFF_{heat}$ 异常在对流层上层相互抵消, 而在对流层低层相互叠加, 也即 $TEFF_{all}$ 异常的影响会在低层更明显。这与 Lau and Holopainen (1984) 以及 Lau and Nath (1991) 的结论一致。这种 $TEFF_{vor}$ 异常和 $TEFF_{heat}$ 异常上层抵消、底层叠加的特征在负 EAP 事件中(图 4)亦是如此。但需要指出的是, 在正事件对流层上层, 东亚地区的 $TEFF_{heat}$ 异常中心强度(图 3d)通常仅是 $TEFF_{vor}$ 异常的 1/4 左右(图 3c)。因此, 两者相互抵消后得到的 $TEFF_{all}$ 异常的中心强度和位置能够基本与

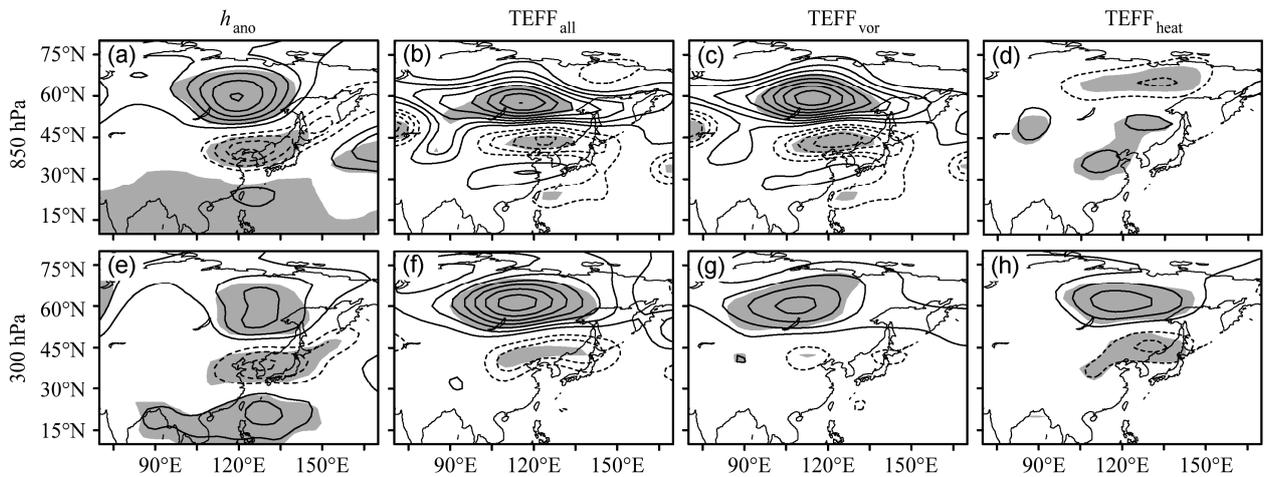


图 3 同图 1, 但为第 0 天 300 hPa 和 850 hPa

Fig. 3 Same as Fig.1, but for 300 hPa and 850 hPa at day 0

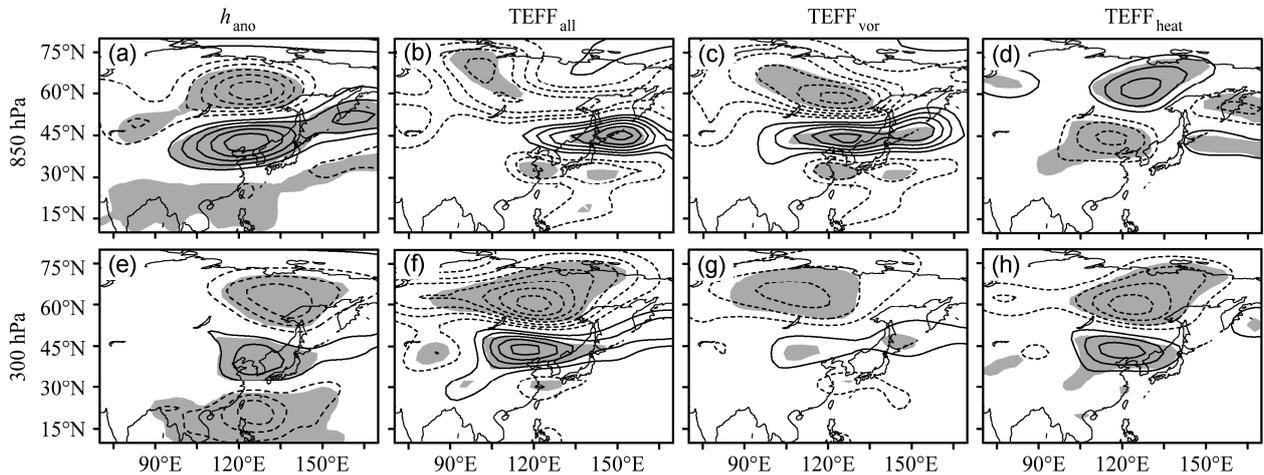


图 4 同图 3, 但为负事件

Fig. 4 Same as Fig.3, but for the negative event

TEFF_{vor} 异常一致。但在负事件 300 hPa 上 (图 4c), TEFF_{heat} 异常中心强度已增强至 TEFF_{vor} 异常的 1/2 左右。因此, 两者抵消后, 位于雅库茨克地区、中国华北的 TEFF_{all} 异常不再显著 (图 4b)。因此, 负事件中 TEFF_{all} 异常分布与 TEFF_{vor} 异常有较大的不同。

综上所述, TEFF_{all} 在对流层中低层上对 EAP 事件的中高纬度两个异常中心的形成有重要作用, 这与 TEFF_{vor} 和 TEFF_{heat} 的作用在对流层中低层相互叠加有关。而在对流层上层, TEFF_{vor} 和 TEFF_{heat} 的作用相互抵消, 因此 TEFF_{all} 的作用通常较弱。尤其是在负事件中, TEFF_{heat} 的强度明显增大, 导致 TEFF_{all} 在对流层上层的作用进一步削弱。

4 局地强迫

由图 1 及图 2 可知, 正、负 EAP 事件之间的三

个异常中心的位置并不完全一致。因此, 有必要划出不同的空间范围来进一步讨论 TEFF 异常对中高纬度 YA 及 EA 两个异常中心的影响。根据图 1 及图 2, 正 EAP 事件中 YA 中心的活动范围以 (57.5°~62.5°N, 112.5°~117.5°E) 表示, EA 中心则取其西北部 (42.5°~47.5°N, 112.5°~117.5°E), 即受 TEFF_{all} 异常影响的部分; 负事件中 YA 中心为 (57.5°~62.5°N, 122.5°~127.5°E), EA 中心为 (42.5°~47.5°N, 122.5°~127.5°E)。分别算出上述地区的区域平均位势高度异常的逐日变化 (即时间差分, 简记为 DZ) 及区域平均的 TEFF 异常。若以 Z_N 表示某地区第 N 天的区域平均位势高度异常, 那么第 N 天的 DZ 为 $(Z_{N+1} - Z_{N-1}) / 2d$, 即单位为 m/d, 这与 TEFF 的单位一致。

图 5、图 6 分别给出正、负 EAP 事件中随时间

演变的 TEFF 异常及其所占 DZ 的百分比。可以看出, 在正 EAP 事件中的 500 hPa 上 (图 5c), 从第 -7 天至 -2 天的时段内, TEFF_{all} 可占据 YA 中心 DZ 的 60% 以上, 也即 YA 地区的高度异常在该时段内每天增强的部分中至少有 60% 可被 TEFF_{all} 所解释。这与 3.1 节中讨论的基本一致。值得注意的是, 在第 -1 天后, TEFF_{all} 占 DZ 的百分比由正突转为负。这实际上是由于第 -1 天后, YA 地区的 TEFF_{all} 虽基本维持 +6 m/d 的强度, 但该地区的高度异常不再增强转而开始减弱 (图略), 即 DZ 为负, 从而导致两者比值为负。由此可见, 第 -1 天后, TEFF_{all} 有助于减缓 YA 中心的减弱过程。在对流层上层 (图 5a), TEFF_{all} 对 YA 中心的作用要弱于对流层中层, 在盛期前 7 天内它能解释 YA 中心 DZ 的 30% 以上。在盛期后, TEFF_{all} 仍维持着约 +5 m/d 的强度, 同样起着减缓 YA 中心减弱的作用。在对流层低层上 (图 5e), 在第 -6 至第 -3 天时段内, TEFF_{all} 已超出 DZ 的数值 (大于 100%), 表明

在对流层低层上, TEFF_{all} 除强迫出 YA 异常中心外, 还抵消摩擦耗散过程。至于 EA 中心的西北部, TEFF_{all} 的作用要明显弱于它对 YA 中心的作用。TEFF_{all} 仅在对流层中低层上对 EA 中心西北部分的形成和维持起重要作用, 它在盛期前大致能解释其 DZ 的 40% (图 5d、5f)。

将 TEFF_{all} 异常分解为 TEFF_{vor} 异常和 TEFF_{heat} 异常后, 可以发现, TEFF_{all} 异常对 YA 异常中心的影响在对流层中、上层上主要来自于 TEFF_{vor} 异常。在 300 hPa (图 5a) 和 500 hPa (图 5c) 上, TEFF_{vor} 的数值均远大于 TEFF_{heat}。因此, 无论两者在对流层高层上相抵消 (图 5a) 还是在对流层中层上相叠加 (图 5c), 最终的 TEFF_{all} 仍主要是由 TEFF_{vor} 构成。这也是 Nakamura and Fukamachi (2004) 可以用对流层高层 (250 hPa) 上的 TEFF_{vor} 来替代 TEFF_{all} 以讨论高频涡动在鄂海阻高形成机制的主要原因。但在 850 hPa 上 (图 5e), TEFF_{heat} 与 TEFF_{vor} 数值相当且同号, 两者相互叠加。

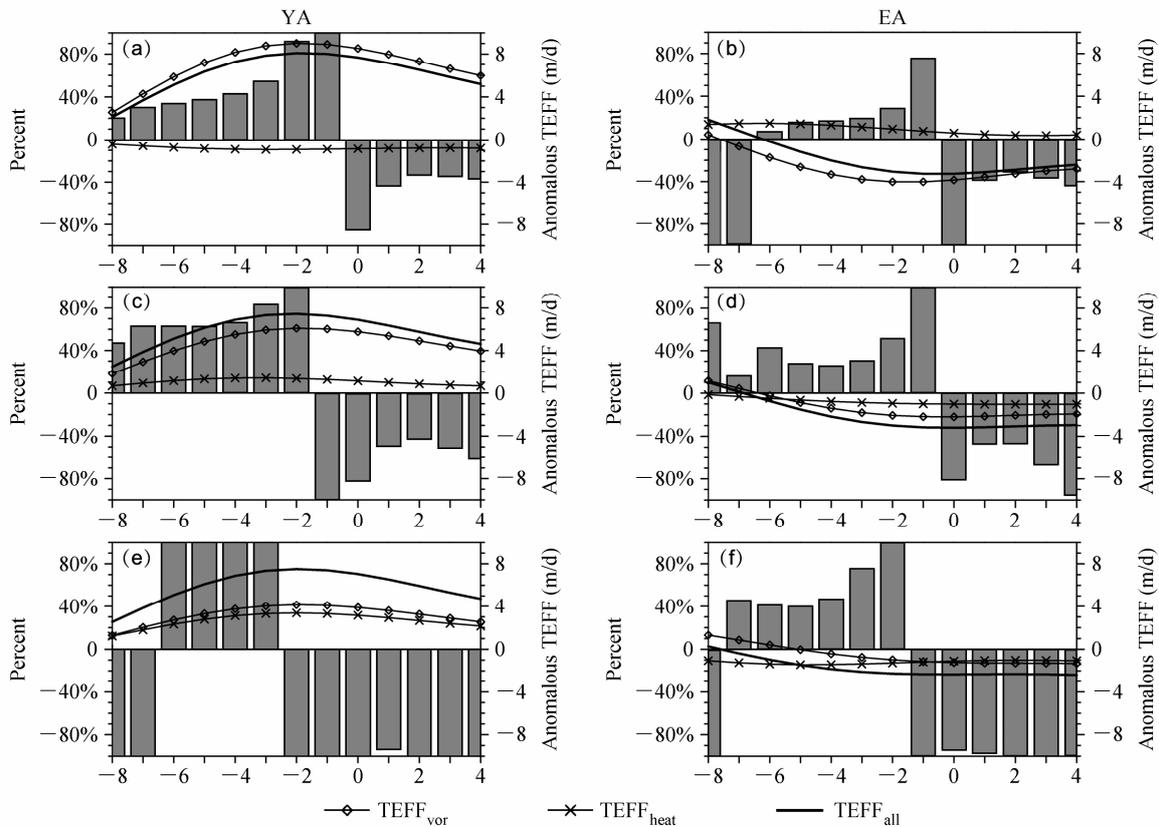


图 5 正 EAP 事件中 YA 地区上随时间演变的 300 hPa (a)、500 hPa (c) 和 850 hPa (e) 的异常 TEFF (曲线, m/d) 及异常 TEFF_{all} 所占局地位势高度异常的逐日变化 (DZ) 的百分比 (阴影柱); (b)、(d)、(f) 同 (a)、(c)、(e), 但为 EA 地区

Fig. 5 Time evolution of the anomalous TEFF (contours) and ratio of the anomalous TEFF_{all} to the local daily difference of geopotential height (DZ) (shaded bar) at (a) 300 hPa, (b) 500 hPa, and (c) 850 hPa in the Yakutsk (YA) area associated with the positive EAP event; (b), (d), and (f) as in (a), (c), and (e), but for the East Asia (EA) area

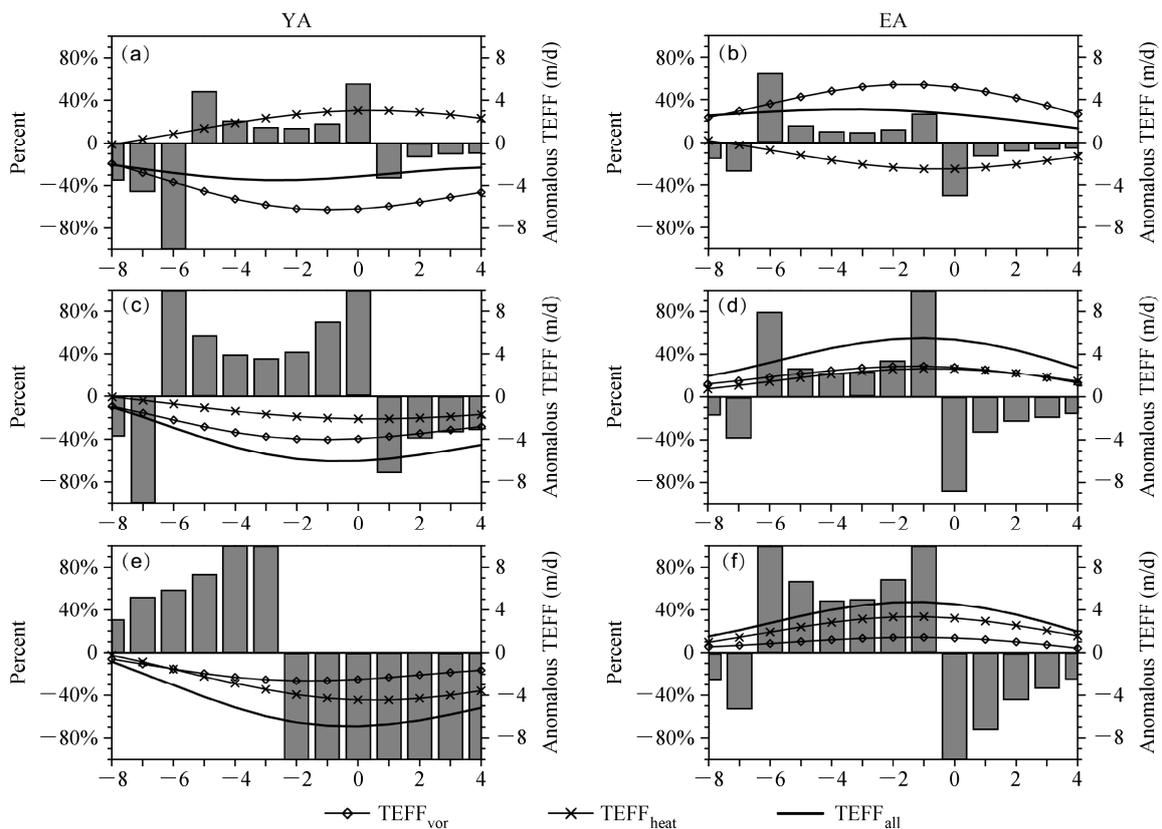


图6 同图5, 但为负EAP事件

Fig. 6 As in Fig. 5, but for the negative EAP event

对于负事件而言, 对流层中层 (500 hPa, 图 6c), $TEFF_{all}$ 在第一 6 天至第 0 天基本可解释 YA 中心 DZ 的 40%。此后则有助于减缓 YA 中心的减弱过程。在对流层低层 (850 hPa, 图 6e), $TEFF_{all}$ 的作用与 500 hPa 上类似, 但它在第 -3 天前可解释 YA 中心 50% 以上的 DZ, 之后则起着减缓其减弱的作用。对流层上层 (图 5a), $TEFF_{all}$ 的作用则不如对流层中下层那样明显。它仅在第 0 天能占到 DZ 的 60%。这主要是由于 $TEFF_{heat}$ 在对流层上层有较高的数值, 且与 $TEFF_{vor}$ 反号, 导致两者相互抵消, 从而导致 $TEFF_{all}$ 作用不如正事件中对 YA 中心那样明显。对于 EA 中心, $TEFF_{all}$ 也主要在对流层低层上起重要作用 (图 5f)。在第 -6 至 -1 天, $TEFF_{all}$ 可解释 50% 以上的局地 DZ。随着高度的增高 (图 5b, 图 5d), $TEFF_{all}$ 所占 DZ 有所下降。需指出的是, 相比于正事件, 负事件中 $TEFF_{heat}$ 的作用有所增强, 这与本文第 3 节讨论的一致。

综上所述, 在盛期前 6 天左右, 对流层中低层上局地的 $TEFF_{all}$ 异常通常可解释 EAP 事件高纬度中心 50% 以上的增强部分。 $TEFF_{vor}$ 异常在正 EAP 事件中占据着 $TEFF_{all}$ 异常主要部分, 而 $TEFF_{heat}$

异常则在负事件中的对流层中低层上占据着主导或与 $TEFF_{vor}$ 的作用相当, 其在对流层上层的强度虽弱于 $TEFF_{vor}$ 异常, 但相比于正事件也明显增强。

5 结论和讨论

通过合成方法, 本文讨论了夏季高频瞬变涡动反馈强迫对 EAP 事件形成的作用。结果表明, 在对流层中低层上, $TEFF$ 异常对 EAP 事件的形成具有重要作用。一方面, $TEFF$ 异常可解释盛期之前高纬度中心 YA 中心增强部分的约 50%, 盛期之后则减缓其减弱过程。另一方面, $TEFF$ 异常也有利于 EA 中心的发展和维持。在正事件中, 主要是加强和维持 EA 中心的西北部分; 负事件中, 则是加强 EA 中心的偏北部分。在正、负 EAP 事件中, $TEFF$ 作用的主要差异在于正 EAP 事件中 $TEFF_{vor}$ 异常是 $TEFF_{all}$ 异常构成的主要部分, 而在负事件中, $TEFF_{vor}$ 和 $TEFF_{heat}$ 的作用相当。

Lau and Holopainen (1984) 认为在对流层中, $TEFF_{vor}$ 作用通常是一种正压结构, 而 $TEFF_{heat}$ 则是斜压结构, 两者会在对流层低层相互叠加, 而在对流层上层相互抵消。与之对应的是, $TEFF$ 的影响

在低层更明显,而在高层则不明显。这正如本文图 5 和图 6 所示,TEFF 在高层所占 DZ 的百分比通常要弱于中、低层。

需要指出的是,相比于正 EAP 事件,负 EAP 事件中 $TEFF_{heat}$ 的作用有所提升,尤其是在对流层低层。图 7 给出了异常经向温度梯度的强度(绝对值)、向极的涡动热量通量 $\overline{v'T'}$ (用以表示斜压涡动的强度或活跃性)以及高频涡动热量散度 $\nabla \cdot (\overline{v'\theta})/\bar{s}$ 的异常值在 125°E 的垂直剖面图。其中符号含义与公式(2)、(3)中的一致。可以看出,贝加尔湖以东地区的斜压性在负事件中增强(图 7d),而在正事件中减弱(图 7a)。与之对应的是,

该地区的高频瞬变波的强度在负事件中增强(图 7e)、正事件中减弱(图 7b)。需注意的是,负事件中增强的程度要大于正事件中减弱的程度。这种差异基本对应着负事件中 400 hPa 和 850 hPa 上局的热量辐合辐散的强度增强(图 7c、7f),并直接造成其垂直梯度的增强,也即公式(2)中 D_{heat} 以及 $TEFF_{heat}$ 的数值在负事件中会更强。因此, $TEFF_{heat}$ 作用在负事件中的增强可能是与底层斜压性的增强联系在一起。

东亚地区大气环流在夏季通常有较大的季内变化,我们似乎可以预计 TEFF 对 EAP 事件的影响可能也存在着一定的季节性。本研究虽是以整个夏

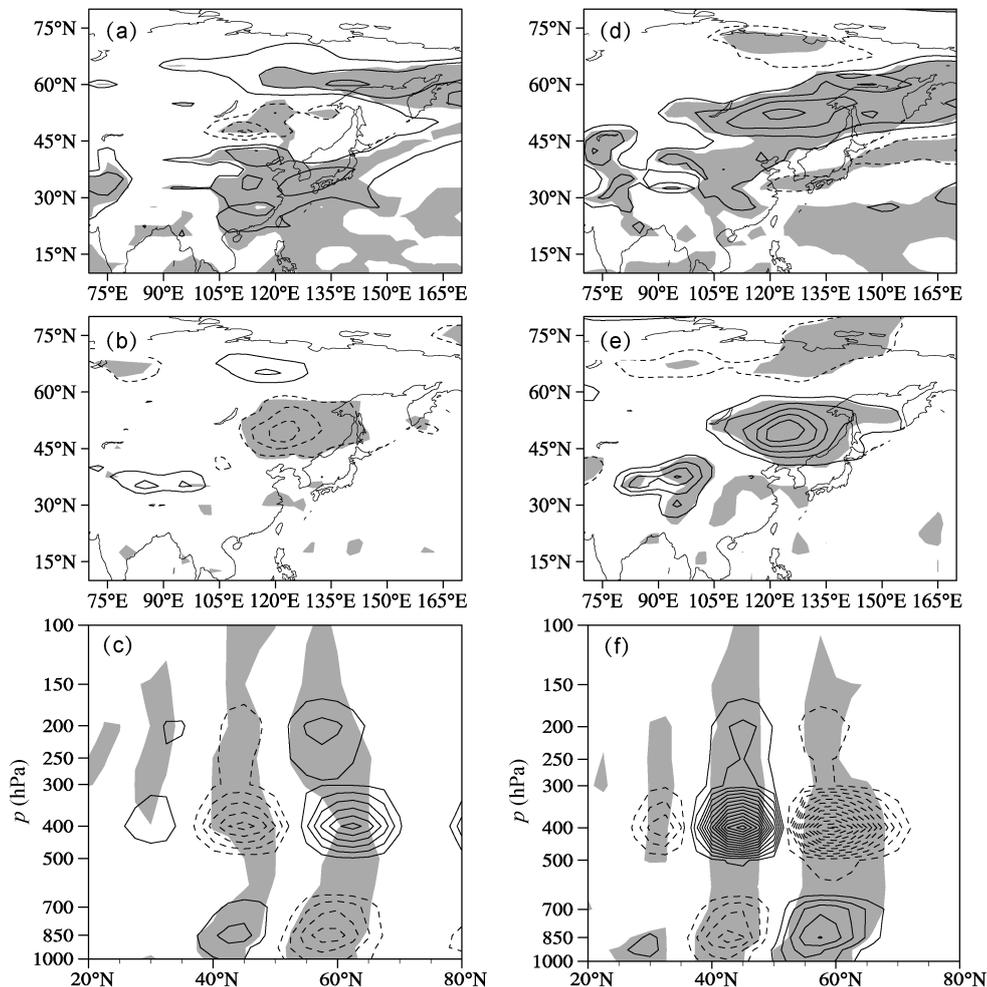


图 7 正 EAP 事件以盛期为中心的 7 天平均(-3~3 天)合成统计量:(a) 850 hPa 上的异常的经向温度梯度强度(等值线间隔: 10^{-6} K/m), (b) 850 hPa 上异常的向极热量通量 $\overline{v'T'}$ (等值线间隔: 1 K m s^{-1}), (c) 125°E 上异常高频涡动热量通量散度 $\nabla \cdot (\overline{v'\theta})/\bar{s}$ 的高度-纬度剖面(等值线间隔: 0.002 Pa/s)。 (d) - (f) 同 (a) - (c), 但为负 EAP 事件。实(虚)线表示正(负)值, 零线均已略去; 阴影为通过 95% 显著性检验的区域

Fig. 7 Seven-day mean statistics for the (a, b, c) positive and (d, e, f) negative EAP events from the day -3 before to day 3 after the peak day of every event: (a, d) Anomalous magnitude of the meridional gradient of air temperature at 850 hPa , contour interval is 10^{-6} K/m ; (b, e) anomalous poleward eddy heat flux $\overline{v'T'}$ at 850 hPa , contour interval is 1 K m s^{-1} ; (c, f) pressure-latitude cross section for the anomalous divergence of the high-frequency transient eddy heat flux $\nabla \cdot (\overline{v'\theta})/\bar{s}$ at 125°E , contour interval is 0.002 Pa/s . Solid (dashed) lines represent the positive (negative) values and zero lines are omitted; shading marks the region at 95% confidence level

季中所挑选出的 20 (29) 个正 (负) 事件的合成结果为基础, 但也曾将夏季分为几个时段 (比如梅雨期、盛夏) 分别进行合成研究, 这与 Bueh et al. (2008), Shi et al. (2009) 和施宁等 (2009) 的做法类似。最终结果表明, TEFF 的影响并没有呈现出十分明显的季节性差异。虽 Nakamura and Fukamachi (2004) 认为在鄂霍次克海阻塞高压的形成过程中, TEFF 在 5 月份对其的贡献要大于 7 月份, 即有一定的季节性。但从其图 12 中可以看出, 就整个夏季 (6、7、8 月) 而言, 鄂霍次克海地区的 TEFF 活动或强度变化并不大。这与本文的研究一致。

值得注意的是, 虽本文指出了 TEFF 异常对 EAP 事件有重要作用, 尤其是其中高纬度异常中心, 但相比于高度异常的演变, TEFF_{all} 异常的演变似乎更加缓变、定常。这种不一致性可从公式 (2) 可以看出, 低频位势倾向的发生不仅和高频涡动的涡度和热量的辐合辐散有关, 也和低频环流的平流、非绝热加热及摩擦有关 (公式 2 中的 R 项)。虽本文仅讨论了高频瞬变涡动的作用, 但仍可看出 TEFF 是 EAP 演变过程中的一个重要因子。此外, Bueh et al. (2008), Shi et al. (2009) 以及施宁等 (2009) 的结果表明, 东亚中高纬度地区的准纬向 Rossby 波传播通常会在 EAP 盛期之前辐合, 而在盛期后辐散。而这种波活动作用通量的辐合、辐散本身也能引起环流强度的变化, 比如盛期之后, 低频波能量从 EAP 中高纬度两个异常中心向下游频散的特征十分明显, 这伴随着 EAP 异常中心的衰减以及下游的北太平洋地区反位相的高度异常的形成和加强。因此, 作者认为在 EAP 事件中高纬度两个异常中心的演变过程中, 盛期之前是 TEFF 占据主导作用, 而盛期之后则是波能量频散。

众所周知, EAP 型的形成还与热带对流异常所激发的准经向传播的低频 Rossby 波有关, 尤其是其中低纬度的两个异常中心。而本文揭示了 TEFF 作用对其中高纬度两个中心有重要作用。在 EAP 事件的演变过程中, 我们仍不清楚低频 Rossby 波的传播与 TEFF 是否仅是偶然一起发生还是存在着两者的相互作用。从 Peng et al. (2003) 和 Li et al. (2007) 的关于冬季北大西洋涛动形成机制的数值试验中可以看出, 热带地区非绝热加热引起的环流异常传播到中高纬度地区时, 可通过影响风暴轴进而影响 TEFF 异常及低频环流异常的形成。但这种

机制是否适用于夏季 EAP, 还需今后做进一步研究。

致谢 感谢审稿人提出了非常宝贵的意见。文中所用绘图软件为 NCAR Command Language (NCL)。

参考文献 (References)

- Bueh C, Nakamura H. 2007. Scandinavian pattern and its climatic impact [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 133 (629): 2117–2131.
- Bueh C, Shi N, Ji L, et al. 2008. Features of the EAP events on the medium-range evolution process and the mid- and high-latitude Rossby wave activities during the Meiyu period [J]. *Chinese Science Bulletin*, 53 (4): 610–623.
- Holopainen E, Fortelius C. 1987. High-frequency transient eddies and blocking [J]. *J. Atmos. Sci.*, 44 (12): 1632–1645.
- Huang G. 2004. An index measuring the interannual variation of the East Asian summer monsoon—The EAP index [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 21 (1): 41–52.
- Huang R, Sun F. 1992. Impact of tropical western Pacific on the East Asian summer monsoon [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 70: 243–256.
- Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, et al. 2002. NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2) [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83 (11): 1631–1643.
- Kaylor R E. 1977. Filtering and decimation of digital time series [R]. *Tech. Rep. Note BN 850*, 14 pp. (Available from Engineering and Physical Science Library, University of Maryland at College Park, College Park, MD 20740.)
- Kosaka Y, Nakamura H. 2006. Structure and dynamics of the summertime Pacific–Japan (PJ) teleconnection pattern [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 132 (619): 2009–2030.
- Lau N C, Holopainen E O. 1984. Transient eddy forcing of the time-mean flow as identified by geopotential tendencies [J]. *J. Atmos. Sci.*, 41 (3): 313–328.
- Lau N C, Nath M J. 1991. Variability of the baroclinic and barotropic transient eddy forcing associated with monthly changes in the midlatitude storm tracks [J]. *J. Atmos. Sci.*, 48 (24): 2589–2613.
- Li S, Robinson W A, Hoerling M P, et al. 2007. Dynamics of the extratropical response to a tropical Atlantic SST anomaly [J]. *J. Climate*, 20 (3): 560–574.
- Lu R, Huang R. 1996. Numerical simulation of the effect of the SST anomalies in the tropical western Pacific on the blocking highs over the northeastern Asia [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 13 (4): 411–424.
- Lu R Y, Lin Z D. 2009. Role of subtropical precipitation anomalies in maintaining the summertime meridional teleconnection over the western North Pacific and East Asia [J]. *J. Climate*, 22 (8): 2058–2072.
- Nakamura H, Nakamura M, Anderson J L. 1997. The role of high- and low-frequency dynamics in blocking formation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 125 (9): 2074–2093.
- Nakamura H, Fukamachi T. 2004. Evolution and dynamics of summertime blocking over the Far East and the associated surface Okhotsk high [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 130 (599): 1213–1233.
- Nitta T. 1987. Convective activities in the tropical western Pacific and their

- impact on the Northern Hemisphere summer circulation [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 65 (3): 373–390.
- Peng S, Robinson W A, Li S L. 2003. Mechanisms for the NAO responses to the North Atlantic SST tripole [J]. *J. Climate*, 16 (12): 1987–2004.
- Shi N, Bueh C, Ji L, et al. 2009. The impact of mid- and high-latitude Rossby wave activities on the medium-range evolution of the EAP pattern during the pre-rainy period of South China [J]. *Acta Meteor. Sin.*, 23 (3): 300–314.
- 施宁, 布和朝鲁, 纪立人, 等. 2009. 中高纬 Rossby 波活动对盛夏东亚/太平洋事件中期演变过程的影响 [J]. *大气科学*, 33 (5): 1087–1100.
- Shi Ning, Bueh Cholaw, Ji Liren, et al. 2009. Impacts of mid- and high-latitude Rossby wave activities on the medium-range evolution of East Asia/Pacific events during the mid- and late summer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (5): 1087–1100.
- 孙颖, 丁一汇. 2003. 1999 年东亚夏季风异常活动的物理机制研究 [J]. *气象学报*, 61 (4): 406–420. Sun Y, Ding Y H. 2003. A study of physical mechanisms of anomalous activities of East Asian summer monsoon during 1999 [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 61 (4): 406–420.
- 王亚非, 宋永加. 1998. 1991 年夏东亚阻塞高压形成的诊断分析 [J]. *气象学报*, 56 (2): 212–224. Wang Yafei, Song Yujia. 1998. A diagnostic analysis on the growth mechanism of the East Asia blocking high in 1991 [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 56 (2): 212–224.
- 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 [J]. *气象学报*, 52 (3): 308–320. 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 [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 52 (3): 308–320.
- 宗海峰, 张庆云, 陈烈庭. 2008. 东亚—太平洋遥相关型形成过程与 ENSO 盛期海温关系的研究 [J]. *大气科学*, 32 (2): 220–230. Zong H F, Zhang Q Y, Chen L T. 2008. A study of the processes of East Asia–Pacific teleconnection pattern formation and the relationship to ENSO [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (2): 220–230.