

王黎娟, 陈璇, 管兆勇, 等. 2009. 我国南方洪涝暴雨期西太平洋副高短期位置变异的特点及成因 [J]. 大气科学, 33 (5): 1047 - 1057.
Wang Lijuan, Chen Xuan, Guan Zhaoyong, et al. 2009. Features of the short-term position variation of the western Pacific subtropical high during the torrential rain causing severe floods in southern China and its possible cause [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (5): 1047 - 1057.

我国南方洪涝暴雨期西太平洋副高短期 位置变异的特点及成因

王黎娟¹ 陈璇^{1,2} 管兆勇¹ 何金海¹

1 南京信息工程大学 气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044

2 武汉中心气象台, 武汉 430074

摘 要 利用 NCEP/NCAR 多年逐日再分析资料、美国环境预报中心 CMAP (NOAA NCEP Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation) 候平均降雨量资料以及全国 740 站逐日降水资料, 对华南前汛期和江淮梅雨期大范围持续性暴雨过程中西太平洋副高短期位置变异的异同及其可能成因进行了分析。结果表明: 华南和江淮大范围持续性暴雨期间, 西太平洋副高位置均比同期气候平均值异常偏南偏西, 且强度偏强。华南暴雨期间, 副高西北侧华南地区以及西侧孟加拉湾地区存在异常强烈的视热源和视水汽汇; 江淮暴雨期间, 副高北侧江淮流域及西侧孟加拉湾地区也存在异常强烈的视热源和视水汽汇。运用全型垂直涡度倾向方程理论, 研究非绝热加热对西太平洋副高短期位置变异的影响, 结果表明: 副高位置的短期变异与非绝热加热场及其配置有密切联系。华南暴雨期间, 副高西北侧边缘的华南地区加热场可在短期内迫使副高东撤南退; 江淮暴雨期间, 副高北侧江淮流域加热场的存在不利于副高北进, 而西侧较远处孟加拉湾热源会诱导副高西伸, 两者的共同作用导致副高在江淮以南维持, 且会明显西伸。

关键词 华南 江淮 大范围持续性暴雨 西太平洋副高 非绝热加热

文章编号 1006-9895 (2009) 05-1047-11

中图分类号 P434

文献标识码 A

Features of the Short-Team Position Variation of the Western Pacific Subtropical High during the Torrential Rain Causing Severe Floods in Southern China and Its Possible Cause

WANG Lijuan¹, CHEN Xuan^{1, 2}, GUAN Zhaoyong¹, and HE Jinhai¹

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074

Abstract By using the NCEP/NCAR daily reanalysis data, NOAA NCEP Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation (CMAP) pentad-mean precipitation data and daily precipitation data of 740 stations in China, the authors analyze the similarities and differences of the short-term position variation of the Western Pacific Subtropical

收稿日期 2008-04-29, 2008-10-06 收修定稿

资助项目 国家科技支撑计划项目 2007BAC29B02, 江苏省气象灾害重点实验室项目 KLME060204, 江苏省高校自然科学基金研究项目 06KJB170050

作者简介 王黎娟, 女, 1970 年出生, 博士, 副教授, 主要从事季风和海气相互作用的研究。E-mail: wljfw@163.com

High (WPSH) and its probable formation cause during large-scale continuous torrential rain in South China pre-flood period and the Changjiang-Huaihe River valley Meiyu period. Results show that during the torrential rain in South China and the Changjiang-Huaihe River valley, in comparison with the same period climatic mean, the WPSH is exceptionally strong and its position is abnormally south-westward. During the torrential rain in South China, the apparent heating source and apparent moisture sink are exceptionally strong over South China on the northwest side of WPSH and the Bay of Bengal to the west of WPSH. During the torrential rain in the Changjiang-Huaihe River valley, the apparent heating source and apparent moisture sink are also exceptionally strong over the Changjiang-Huaihe River valley on the north side of WPSH and the Bay of Bengal to the west of WPSH. Using the complete form of vertical vorticity tendency equation, the authors study the impact of diabatic heating on the short-term position variation of the WPSH. Conclusions indicate that the short-term position variations of WPSH are affiliated with the diabatic heating and those configurations. The heating field over South China which is on the northwest side of WPSH may force an east-southward withdrawal of WPSH during the torrential rain in South China. And during the torrential rain in the Changjiang-Huaihe River valley, the heating field over the Changjiang-Huaihe River valley on the north side of WPSH is unfavorable to the WPSH moving northward, and the heat source over the Bay of Bengal to far west of WPSH may induce a westward extension of WPSH. The coaction of the two results in the maintenance on the south side of the Changjiang-Huaihe River valley and westward extension of WPSH.

Key words South China, the Changjiang-Huaihe River valley, large-scale continuous torrential rain, western Pacific subtropical high, diabatic heating

1 引言

我国南方夏季雨量充沛,降水多出现在4~9月,其中以华南前汛期和江淮梅雨期最容易发生大范围持续性暴雨,引发洪涝灾害。近二十年来,我国南方地区多次发生暴雨洪涝灾害,1998年6月中下旬广西连续11天出现暴雨天气过程、2003年7月上旬淮河流域降水异常以及2005年6月中旬华南出现50年罕见的致洪暴雨都造成了不同程度的经济损失。多数研究(陶诗言等,1980;Zhu et al., 1986; Ding, 1992; 施能等, 1996)表明,华南和江淮暴雨与大尺度环流和东亚夏季风异常活动有关,与中低纬天气系统联系紧密,特别是与西太平洋副热带高压之间存在着相互作用与制约的关系(张韧等, 1995; 吴国雄等, 2003)。另外,暴雨的发生与非绝热加热场也有密切的联系(唐东升等, 1994)。

夏半年500 hPa西太平洋副高的西侧位于我国华南至东南沿海一带,其形态和位置的短期变化及季节进退对我国南方夏季区域性大暴雨的发生有重要影响。关于西太平洋副高对我国南方夏季暴雨影响的研究已有很多(张韧等, 1995; 张庆云等, 1999),但较少研究暴雨过程对副高的作用和影响,特别是从非绝热加热方面去考虑暴雨过程对西太平洋副高位置变化的影响。近年来,一些研究表明副

热带高压的南北移动和东西进退在很大程度上取决于非绝热加热的空间分布,东亚季风降雨所致的凝结潜热是决定夏季副高位置和强度的关键因素(黄荣辉等, 1988; 吴国雄等, 1999b; 刘屹岷等, 1999)。但以往研究多是基于对定常副高的研究,在短期时间尺度上,大气外部强迫如何影响副高的东西和南北进退是一个更为复杂的课题(刘屹岷等, 2000)。刘还珠等(2000)利用数值模拟揭示了在中短期过程中降水引起的垂直方向非均匀非绝热加热对西太平洋副高的影响过程。

针对我国南方暴雨和副高位置变异,气象工作者开展了不少研究工作,有的是个例分析或对比,有的运用数值模拟揭示其规律,但每次暴雨过程有其特性,也有其共性,华南和江淮暴雨过程影响副高位置变异的异同特征又是如何? 本文将对华南、江淮流域大范围持续性暴雨过程进行合成分析,试图找出有关华南、江淮洪涝暴雨期间副高位置变动的特点及其成因,以加深对我国南方大范围持续性暴雨过程与西太平洋副高短期位置变化规律的了解和认识,提高预报能力。

2 资料和方法

本文所使用的资料为中国气象局国家气象信息中心提供的全国740站逐日降水观测资料,1948~

2005 年 NCEP/NCAR 的逐日再分析资料 (空间分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$), 以及 1979~2005 年美国环境预报中心的全球候平均 CMAP (NOAA NCEP Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation) 降雨量资料 (空间分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$)。需要说明的是: 受所选用全球降水资料的限制, 本文计算暴雨期平均的降水凝结潜热时, 选取暴雨期所在候的 CMAP 候平均降水量资料代替逐日降水量资料做近似计算出降水凝结潜热 H_L 。

大气视热源 Q_1 、视水汽汇 Q_2 的计算详见 Yanai et al. (1993), 将 Q_1 、 Q_2 从对流层顶 $p(Q_1$ 中取 100 hPa, Q_2 中取 300 hPa) 到地面 p_s 垂直积分即可得到整层大气的视热源 $\langle Q_1 \rangle$ 和视水汽汇 $\langle Q_2 \rangle$, 表达式如下:

$$\langle Q_1 \rangle = \frac{1}{g} \int_p^{p_s} Q_1 dp = \langle Q_R \rangle + H_S + H_L, \quad (1)$$

$$\langle Q_2 \rangle = \frac{1}{g} \int_p^{p_s} Q_2 dp = L(P - E), \quad (2)$$

其中, $\langle Q_R \rangle$ 为整层辐射, H_S 为地表感热通量, 降水凝结潜热 $H_L = L \times P$ 。L 为凝结潜热系数, P 为降水率, E 为地表蒸发。

3 洪涝暴雨过程及日数的选取

本文研究对象为近 20 年我国南方夏季洪涝暴雨过程, 对全国 740 个站点的逐日降水资料, 剔除因台站迁徙和观测资料缺失等原因的影响, 选取降水资料有效序列达 20 年以上的站点 606 个, 做 1986~2005 年 5~7 月全国逐日降水量分布图 (图略)。考虑到我国南方雨季起讫时间不同, 华南前汛期多出现在 5~6 月, 江淮梅雨期多出现在 6~7 月, 本文试图将南方分为华南和江淮两个地区进行对比分析。选取华南地区范围为 ($20^\circ\text{N} \sim 27.5^\circ\text{N}$, $105^\circ\text{E} \sim 120^\circ\text{E}$), 包括广西、广东、福建以及贵州、湖南、江西、浙江南部等大部分省 (区), 江淮流域范围为 ($27.5^\circ\text{N} \sim 35^\circ\text{N}$, $110^\circ\text{E} \sim 125^\circ\text{E}$), 包括湖北、安徽、江苏以及湖南、江西、浙江北部、河南南部等省 (区)。从该年逐日降水图中分别挑选出华南、江淮大范围暴雨过程持续时间大于等于 7 天, 日降水量均达到或超过 50 mm 的典型个例, 并普查 20 年历史天气图, 从华南和江淮分别挑选出了 4 个和 6 个暴雨典型的时段。为研究大范围持续性暴雨过程中西太平洋副高位置的异常特征, 选取各典型暴雨过程中最显著的 7 天进行合成分析 (见表 1)。

表 1 华南和江淮大范围持续性暴雨的典型时段

Table 1 Typical periods of time for large-scale continuous torrential rain in South China and the Changjiang-Huaihe River valley

华南地区	江淮流域
1994 年 6 月 14~20 日	1987 年 7 月 2~8 日
1998 年 6 月 19~25 日	1991 年 6 月 30 日~7 月 6 日
2002 年 6 月 11~17 日	1995 年 6 月 20~26 日
2005 年 6 月 17~23 日	1996 年 6 月 29 日~7 月 5 日
	1999 年 6 月 25 日~7 月 1 日
	2003 年 6 月 30 日~7 月 6 日

4 暴雨期间副热带高压的位置特征

我国南方暴雨与西太平洋副热带高压有密切的联系, 副高位置的变动直接影响着雨带的位置。分别对 1986 年~2005 年华南 4 次、江淮 6 次大范围持续性暴雨过程平均的 500 hPa 高度场进行了合成分析 (图略), 并与各自对应的同期气候平均 (1948~2005 年) 值进行比较, 发现华南、江淮持续性暴雨过程发生期间, 西太平洋洋面 500 hPa 高度场上 5880 gpm 线包括范围均明显偏大, 且都有闭合 5900 gpm 线生成, 副高强度异常偏强。同时在华南暴雨期间, 500 hPa 副高西伸脊点及 120°E 脊线分别位于 120°E 和 18°N 附近, 比其气候平均值的 130°E 和 22°N 明显偏西 10 个经度, 偏南约 4 个纬度。江淮暴雨期间, 500 hPa 副高西伸脊点和 120°E 脊线位于 110°E 和 22°N 也比其气候平均 (125°E 和 25°N) 明显偏西偏南。可见无论华南还是江淮流域, 在暴雨发生期间, 副高位置均异常偏南偏西。但是, 江淮暴雨期间副高位置比华南暴雨期间要偏北偏西些, 这与副高位置的季节变动有很大的关系, 同时也决定了副高北侧雨带的位置在江淮而不在华南。

5 空间非绝热加热与副热带高压位置变异的关系

5.1 视热源与视水汽汇的分布特征

暴雨的发生与非绝热加热有很好的对应关系, 与大气加热场的变化密切相关。图 1 和图 2 是华南和江淮暴雨过程对应的平均的降水凝结潜热 H_L 、整层积分的视热源 $\langle Q_1 \rangle$ 及视水汽汇 $\langle Q_2 \rangle$ 合成图。图 1a 中阴影区基本反映了雨带位置的分布情况,

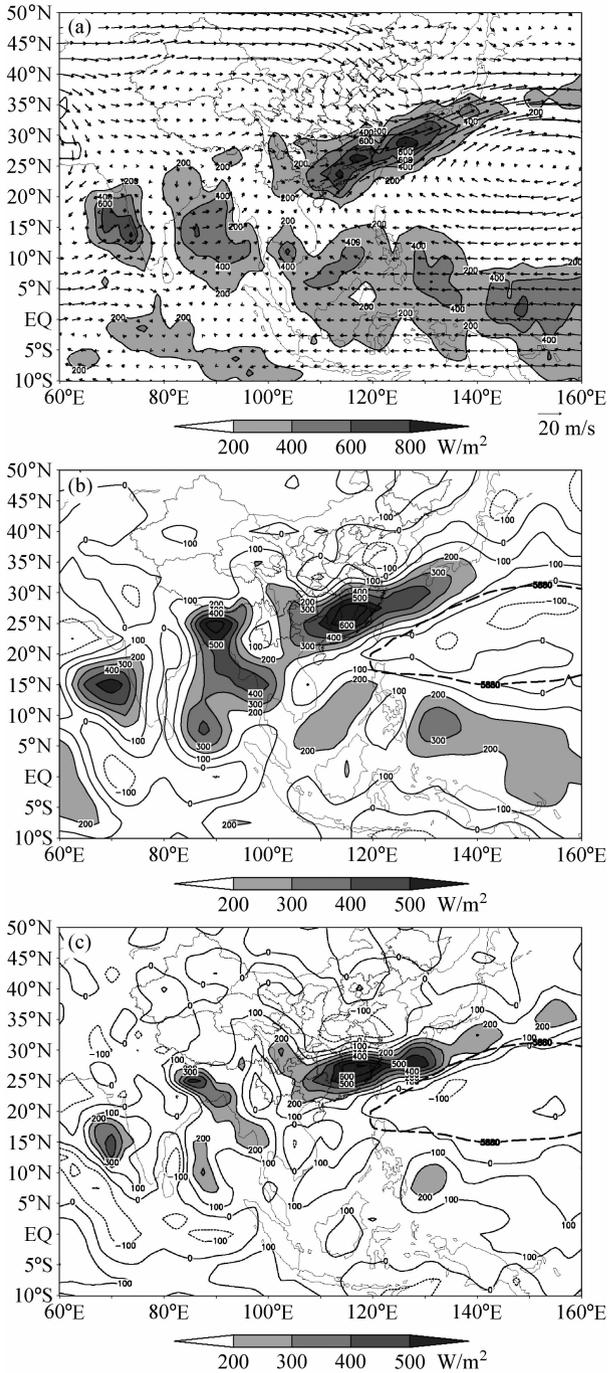


图1 华南暴雨过程中 (a) 平均的降水凝结潜热 H_L 、(b) 整层积分的视热源 $\langle Q_1 \rangle$ 及 (c) 视水汽汇 $\langle Q_2 \rangle$ 合成图 (单位: W/m^2)。 (a) 矢量为平均的 500 hPa 风场; (b、c) 虚线为对应的 500 hPa 副高 5880 gpm 线

Fig. 1 (a) Mean condensation latent heating H_L , composites of vertically integrated (b) apparent heating source $\langle Q_1 \rangle$ and (c) apparent moisture sink $\langle Q_2 \rangle$ during the torrential rain in South China. (a) Vector arrow is mean wind field at 500 hPa; (b, c) dashed line is 5880 gpm line of 500-hPa height

即暴雨区主要位于我国华南及其东部沿海地区、孟加拉湾、阿拉伯海以及低纬-赤道西太平洋,雨带都分布在副高外围。500 hPa 风场显示,在华南及其东部沿海有西南风携带海上暖湿水汽与北方冷空气在华南汇合形成持续性降水;孟加拉湾及阿拉伯

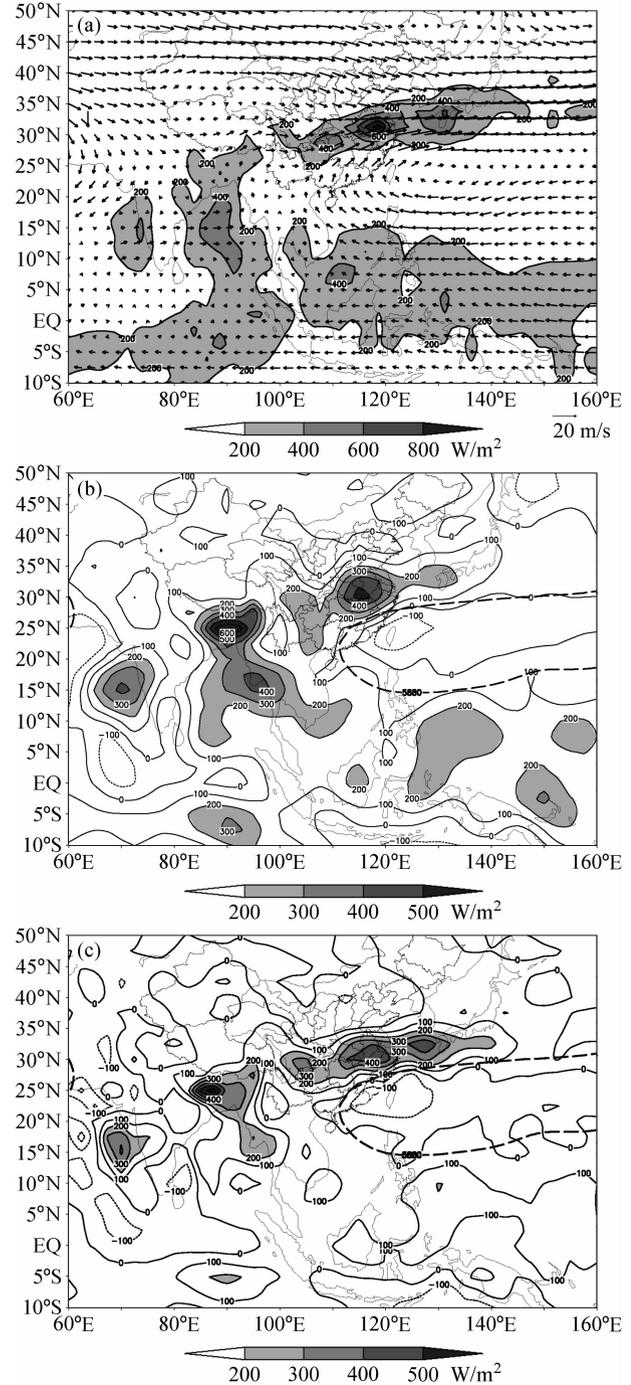


图2 同图1, 但为江淮暴雨期

Fig. 2 Same as Fig. 1, but during the torrential rain in the Changjiang-Huaihe River valley

海上空都存在有气旋性环流与该地区降水对应。而低纬-赤道西太平洋的雨带则是由赤道的对流活动造成。从视热源 $\langle Q_1 \rangle$ 和视水汽汇 $\langle Q_2 \rangle$ 的分布图(图 1b、c)中可以看到,视热源和视水汽汇的分布型式非常相似,存在两个主要的大值中心,分别位于华南地区和孟加拉湾及其北侧,与图 1a 中雨带的分布对应。华南地区 $\langle Q_1 \rangle$ 和 $\langle Q_2 \rangle$ 呈东西带状分布,主要位于副热带高压边缘西北侧,量值较为接近,高值中心在江西南部 and 福建北部均达到 600 W/m^2 以上,与华南降水大值中心 1000 W/m^2 对应。在孟加拉湾及其北侧 $\langle Q_1 \rangle$ 位于副高西侧较远处,呈南北走向,量值与该地区降水相当都达到 600 W/m^2 以上,但 $\langle Q_2 \rangle$ 的最大值比降水略小。

同样,图 2a 中阴影区也对应了降水的主要分布,分别在江淮流域及其东部沿海地区、孟加拉湾以及赤道西太平洋地区,分别有西南暖湿气流和气旋性环流在江淮流域和孟加拉湾对应着降水天气过程。图 2b、c 中,视热源和视水汽汇的分布与雨带分布(图 2a)也较为一致,存在两个主要的大值中心分别位于江淮流域和孟加拉湾及其北侧。江淮流域 $\langle Q_1 \rangle$ 和 $\langle Q_2 \rangle$ 的量值也相当,大值区主要位于副热带高压的北侧,覆盖了江淮大部分省市,中心量值都达到 500 W/m^2 以上与降水大值中心 1000 W/m^2 对应。孟加拉湾及其北侧的 $\langle Q_1 \rangle$ 、 $\langle Q_2 \rangle$ 位于副高西侧较远处,量值与该地区降水量值相当达到 500 W/m^2 以上。

综上所述,暴雨期,华南地区、江淮流域以及孟加拉湾地区均存在着异常强烈的 $\langle Q_1 \rangle$ 和 $\langle Q_2 \rangle$,其分布范围与降水的分布非常一致。在副高 5880 gpm 线包围区域, $\langle Q_1 \rangle$ 和 $\langle Q_2 \rangle$ 的量值都小于 0,为非绝热冷却区,与副高主体内部的下沉冷却相对应。由丁一汇等(1997)的研究可知,在暴雨发生期间地面的感热和蒸发是很小的,如果强烈的视水汽汇都形成强降水,强降水的发生又释放大量的凝结潜热,会造成该过程大气主要的非绝热加热。根据式(1)和式(2)可知,大气非绝热加热 $\langle Q_1 \rangle$ 包括辐射加热、净的水汽凝结潜热加热和地面感热加热,视水汽汇 $\langle Q_2 \rangle$ 包括净的水汽凝结潜热加热和地表蒸发。从降水凝结潜热 H_L 与大气视热源 $\langle Q_1 \rangle$ 、视水汽汇 $\langle Q_2 \rangle$ 的对比中可以看出,暴雨期, $\langle Q_1 \rangle$ 和 $\langle Q_2 \rangle$ 在降水区有较好的吻合,并且其大值区基本上对应暴雨区域,但小于降水凝结潜热 H_L 的值,由

Liu et al.(2004)可知,在中国大陆南部及孟加拉湾地区夏季感热很小,且为负的辐射冷却区,使得 $\langle Q_1 \rangle$ 值比 H_L 值小,可见在暴雨期间降水凝结潜热的释放构成了大气主要的非绝热加热。

大量研究(黄荣辉等,2008;吴国雄等,2008)表明,暴雨的产生与副热带高压位置变异有着相互作用的关系,副高的异常偏南偏西是造成华南、江淮降水偏多的主要原因,那么华南、江淮大范围暴雨的产生和维持又会对副高位置的变化产生何种影响?

5.2 大气非绝热加热与副高位置变异的关系

为了探讨华南、江淮大范围持续性暴雨前后大气非绝热加热与副高位置的演变特征,把大范围暴雨爆发日作为 0 天,对暴雨前后 10 天整层积分的视热源进行合成(下同)。图 3 是华南和江淮暴雨期 $\langle Q_1 \rangle$ 与副高位置关系的时间纬度剖面图,横坐标 0 对应暴雨开始日,6 为暴雨结束日,负值表示暴雨开始前,大于 6 为暴雨结束后 10 天。从图 3 中可以看到,在华南地区和江淮流域, $\langle Q_1 \rangle$ 值均随着暴雨的发生而增大,在暴雨发生中期达到最大,暴雨结束后又迅速减小,即强降水过程会释放大量的凝结潜热,构成了大气主要的非绝热加热。另外, $\langle Q_1 \rangle$ 随时间的变化与阴影区副高位置变化也有着很好的对应关系。

对于季节内的中短期振荡,西太平洋副高的活动一般是东撤伴有南退,西伸伴有北进(喻世华等,1986)。图 3a 中,华南暴雨开始前(0 天以前),降水凝结潜热释放较少, $\langle Q_1 \rangle$ 值较小,沿 125°E 的副高阴影区向北扩展且范围变大,即副高有缓慢的西伸北抬。随着暴雨的开始(0 天),对流活动增强,凝结潜热释放增大, $\langle Q_1 \rangle$ 显著增强,此时阴影区减小,在 2 天后发生断裂。阴影区西北侧华南地区 $\langle Q_1 \rangle$ 的值明显大于其西南侧的 $\langle Q_1 \rangle$,不利于副高的北抬却有利于副高南退(王黎娟等,2005;温敏等,2006),对应着副高在暴雨发生期会出现短期的东撤南退,5880 gpm 线退回 125°E 以东。暴雨结束后(6 天以后),华南地区 $\langle Q_1 \rangle$ 迅速减弱,副高西伸北抬至 23°N 以北。图 3b 江淮暴雨发生前(0 天以前),沿 120°E 的阴影区不断北移扩展,副高向北移动且强度加强。暴雨开始后,凝结潜热的释放致使 $\langle Q_1 \rangle$ 显著增大,阴影区在江淮热源南侧稳定维持,且阴影区副高控制范围内 $\langle Q_1 \rangle$ 值很小以致负

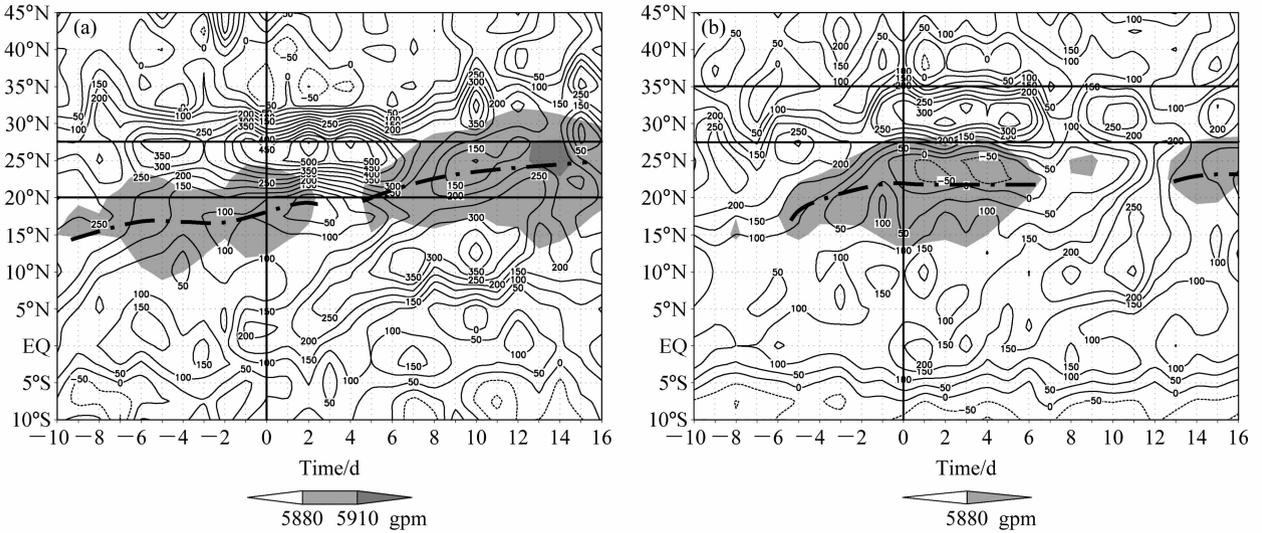


图3 $\langle Q_1 \rangle$ 的时间-纬度剖面图：(a) 华南暴雨期（沿105°E~120°E）；(b) 江淮暴雨期（沿110°E~125°E）。阴影：(a) 沿125°E和(b) 沿120°E 500 hPa的位势高度>5880 gpm区域；点划线：副高平均脊线位置；横线：华南、江淮纬度带

Fig. 3 Time-latitude cross sections of $\langle Q_1 \rangle$: (a) The torrential rain period in South China (averaged between 105°E and 120°E); (b) the torrential rain period in the Changjiang-Huaihe River valley (averaged between 110°E and 125°E). Shading: the areas with 500-hPa geopotential height > 5880 gpm (a) along 125°E and (b) along 120°E; dot-dashed line: the average Western Pacific Subtropical High (WPSH) ridge line; transverse lines: the latitude zones of South China, the Changjiang-Huaihe River valley

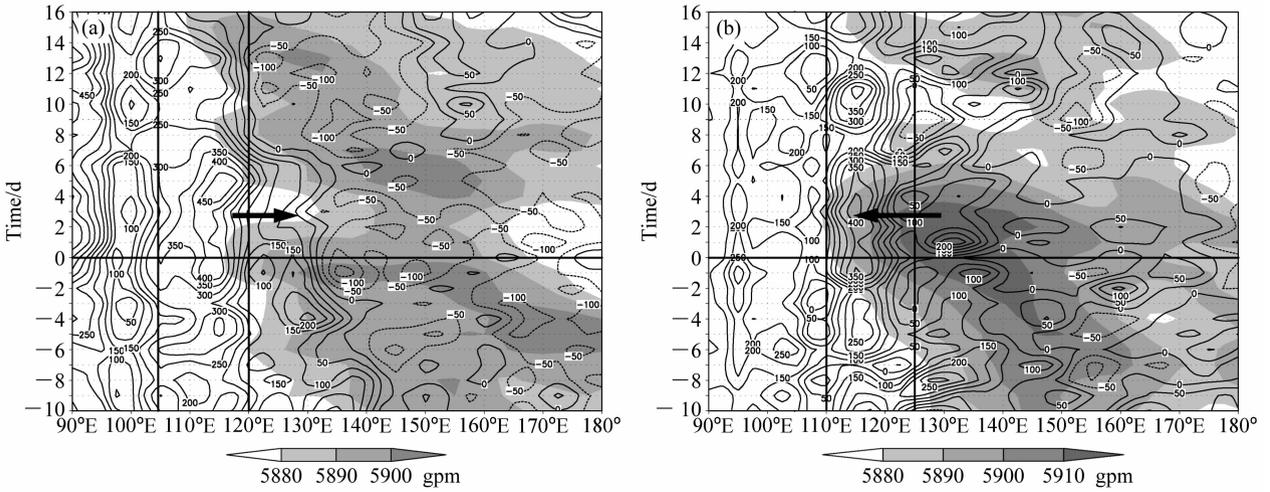


图4 $\langle Q_1 \rangle$ 的时间-经度剖面图：(a) 华南暴雨期（沿20°N~27.5°N）；(b) 江淮暴雨期（沿27.5°N~35°N）。阴影：(a) 沿20°N和(b) 沿22°N 500 hPa位势高度>5880 gpm区域；粗实线箭头：副高的东撤、西伸过程；纵线：华南、江淮经度带

Fig. 4 Time-longitude cross sections of $\langle Q_1 \rangle$: (a) The torrential rain period in South China (averaged between 20°N and 27.5°N); (b) the torrential rain period in the Changjiang-Huaihe River valley (averaged between 27.5°N and 35°N). Shading: the areas with 500-hPa geopotential height > 5880 gpm (a) along 20°N and (b) along 22°N; thick solid line arrows: the eastward retreat and westward extension of WPSH; vertical lines: the longitude zones of South China, the Changjiang-Huaihe River valley

值，不同于华南暴雨期的阴影区会发生断裂，副高脊线滞留在22°N附近，对应雨带在江淮流域维持。暴雨结束后（6天以后），阴影区北侧的江淮流域 $\langle Q_1 \rangle$ 在原地减弱，阴影区断裂，副高东撤南退。

图4是华南和江淮暴雨期 $\langle Q_1 \rangle$ 与副高位置关

系的时间经度剖面图。图4a华南暴雨发生之前副高已西伸到120°E以西，在暴雨开始日0天达到最西端约116°E，随后暴雨发生，副高也开始东撤，在雨期中期3天退回130°E以东，之后暴雨减弱，副高又西伸。图4b中，在江淮暴雨发生前，副高

不断西伸。而暴雨发生时, 副高并不像在华南地区暴雨期会有一个东撤的过程, 相反, 副高会继续西伸, 在暴雨期中期 3 天达到最西端 110°E 附近, 随后暴雨减弱才逐渐东退, 雨期结束, 副高退回 120°E 以东。

可见, 在华南和江淮暴雨期间, 副高位置的异常变动情况是有所不同的。虽然在暴雨发生过程中副高阴影区北(西北)侧的 $\langle Q_1 \rangle$ 值均明显大于其南(西南)侧 $\langle Q_1 \rangle$, 不利于副高北进, 致使副高在热源南(东南)侧维持, 但不同的是, 华南暴雨期, 副高明显东撤南退, 而江淮暴雨期间则相反, 副高会在江淮以南稳定维持, 且随着副高的加强会有明显的西伸。什么原因导致了两者之间的这种差别? 下文将对此进行讨论。

6 副高位置异常的可能成因

前面的分析表明, 大范围持续性暴雨期间副高位置的异常变动与大气非绝热加热有密切的关系, 那么非绝热加热是否是导致副高位置异常的主要原因? 吴国雄等 (1999a) 利用全型垂直涡度倾向方程研究非绝热加热对副高形成和变异的影响时发现, 决定西太平洋副高位置、强度、分布和变化的关键因素是非绝热加热的垂直梯度及其变化。利用吴国雄等 (1999a) 给出的全型垂直涡度倾向方程, 在不考虑大气内部热力结构的变化、热源本身及摩擦耗散的影响, 而仅考虑外热源作用时的全型涡度方程简化式:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \zeta + \beta v = (1 - \kappa) (f + \zeta) \frac{\omega}{p} + \frac{f + \zeta}{\theta_z} \frac{\partial Q}{\partial z} - \frac{1}{\theta_z} \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{1}{\theta_z} \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial Q}{\partial y}, \quad (3)$$

式中, Q 为热力学方程中的非绝热加热率, 在本文中即为大气视热源 Q_1 , $\theta_z = \partial \theta / \partial z$, 其它为气象常用符号。根据尺度分析 (吴国雄等, 1999b), (3) 式可简化为

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \zeta + \beta v = \frac{f + \zeta}{\theta_z} \frac{\partial Q_1}{\partial z}, \quad (4)$$

式中, $[(f + \zeta) / \theta_z] (\partial Q_1 / \partial z)$ 为非绝热加热作用项 (记为 Q_{1z}), βv 为 β 效应项, $\mathbf{V} \cdot \nabla \zeta$ 为涡度平流项。

暴雨期间, 大气非绝热加热主要来自于深对流凝结潜热的释放, 刘屹岷等 (1999) 指出深对流凝结潜热加热中心一般在对流层中高层, 位于 $300 \sim 400$ hPa, 当时间尺度很短时, 垂直非均匀凝结潜热释放将在最大潜热加热中心下方加强气旋的发展, 1 天内即可诱发副热带高压的变异; 时间尺度很长时, 在对流层中下层副高外围 β 效应将使热源下方南风增强, 在热源西侧出现气旋式环流, 东侧出现反气旋式环流。从暴雨期间 500 hPa 平均的经向风 (图 5) 来看, 在华南 ($20^{\circ}\text{N} \sim 30^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\text{E} \sim 140^{\circ}\text{E}$)、江淮 ($25^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\text{E} \sim 125^{\circ}\text{E}$) 以及孟加拉湾 ($10^{\circ}\text{N} \sim 27.5^{\circ}\text{N}$, $85^{\circ}\text{E} \sim 100^{\circ}\text{E}$) 加热场上空 ($\langle Q_1 \rangle$ 大值区) 西部为偏北风 ($v < 0$), 东部为偏南风 ($v > 0$), 即涡度场对热源的响应, 在华南及江淮上空有弱的西风槽, 孟加拉湾加热场上空有气旋式环流存在 (见图 1a、图 2a)。因图 5 是对暴雨期经向风作

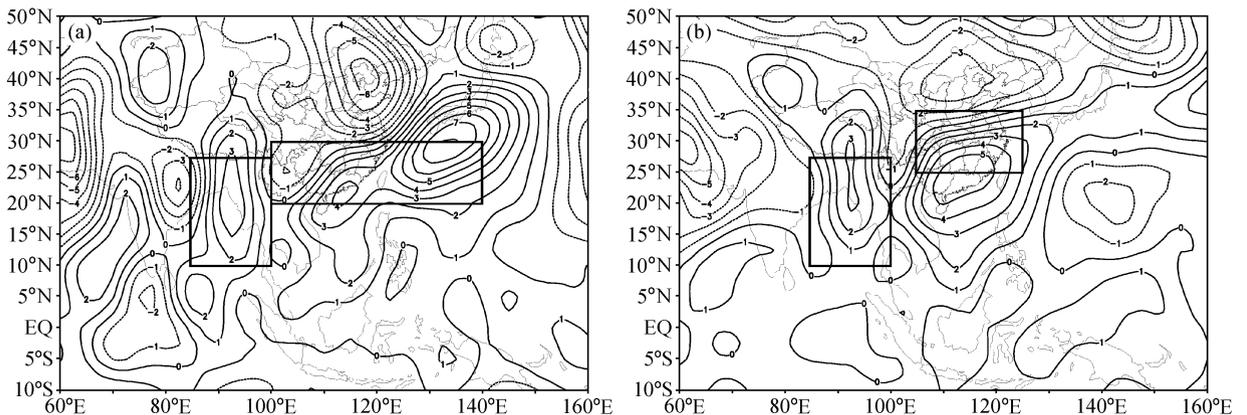


图 5 500 hPa 平均的经向风 (单位: m/s): (a) 华南暴雨期; (b) 江淮暴雨期。长方形框为选取的华南、江淮、孟加拉湾热源大值区域
Fig. 5 Mean meridional wind (m/s) at 500 hPa: (a) The torrential rain period in South China; (b) the torrential rain period in the Changjiang-Huaihe River valley. Rectangle frames are the heat source regions over South China, the Changjiang-Huaihe River valley, and the Bay of Bengal

平均, 时间尺度长时 β 效应会使热源下方出现南风异常, 从中可见潜热加热已经激发加热场上空南风发展, 对流中心有微弱的西移。

针对 500 hPa 副高变化情况, 分别计算上述华南、江淮和孟加拉湾 $\langle Q_1 \rangle$ 大值区的 500 hPa Q_{1z} 、 βv 和 $V \cdot \nabla \zeta$ 的值。因所取范围为整个气旋区域, 为避免南、北风抵消造成 βv 项较小, βv 只取热源东部的偏南风计算 (参考图 5)。图 6 和图 7 为各项的时间演变合成图, 可以看到 $V \cdot \nabla \zeta$ 的值始终很小, 即平流项作用很小, 而 βv 值稍大, 且在持续性暴雨发生后有所增长, 即有 βv 向热源适应使偏南风发展的倾向, 但其值较小仍不足以抵消 Q_{1z} 的值, 所以暴雨时期非绝热加热 $\frac{f+\zeta}{\theta_z} \frac{\partial Q_1}{\partial z}$ 的作用还主要体现在涡度的局地变化上, 即

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} \approx \frac{f+\zeta}{\theta_z} \frac{\partial Q_1}{\partial z} = Q_{1z}. \quad (5)$$

当 $Q_{1z} > 0$ 时, 有 $\partial \zeta / \partial t > 0$, 对流层中层 500 hPa 会有正的气旋性涡度增长。

温敏等 (2006) 研究指出, 加热场离副高较远时将诱导副高西伸, 较近时将迫使副高东退。对于华南暴雨期 (图 6a), 在暴雨发生前 3 天, Q_{1z} 的值陡然增大, 由前 7 天的负值增大到 $21 \times 10^{-11} \text{ s}^{-2}$, 此后大值一直维持在 $15 \times 10^{-11} \text{ s}^{-2}$ 以上长达 7 天, 到暴雨发生后 3 天才开始减小, 在暴雨结束后继续减小, 可见在暴雨发生时期, 副高西北侧边缘的华

南地区对流层中层 500 hPa 有正涡度的明显增长, 有利于气旋式环流在该地区的生成, 导致副高东撤南退。图 6b 中, 暴雨发生前后, 孟加拉湾地区始终存在 $Q_{1z} > 0$ 的情况, 且 Q_{1z} 基本在 $17 \times 10^{-11} \text{ s}^{-2}$ 左右上下波动, 可见孟加拉湾地区始终有热源存在, 在其上空 500 hPa 会强迫出气旋性环流, 且热源东侧偏南风的发展有利于其东侧反气旋式环流的生成, 会诱导副高西伸。从整个加热场的配置来看, 华南地区非绝热加热在副高西北侧边缘, 而孟加拉湾非绝热加热在副高西侧较远处, 在暴雨发生过程中, 虽然孟加拉湾加热场始终存在, 有引导副高西伸的趋势, 但由于副高西北侧较近处华南地区加热场的存在阻碍了较远处孟加拉湾热源对副高的诱导西伸, 所以我们有理由推测华南地区的非绝热加热比孟加拉湾北部非绝热加热对副高位置变异的影响更大, 从而导致副高短期的东撤南退。暴雨减弱后, 非绝热加热减小, 副高又开始西伸北进。

对于江淮暴雨期 (图 7a), 在暴雨发生前和结束后始终有 $Q_{1z} > 0$, 但其值相对暴雨期的值较小, 均维持在 $25 \times 10^{-11} \text{ s}^{-2}$, 说明江淮流域始终有弱的正涡度增长。在暴雨发生前 3 天, Q_{1z} 的值会明显增大, 到暴雨发生后 2 天 Q_{1z} 达到最大 $58 \times 10^{-11} \text{ s}^{-2}$, 尔后逐渐减小, 暴雨结束后变化趋于平稳。可见在暴雨发生时, 500 hPa 副高北侧江淮流域加热场会引发气旋性涡度的显著增长, 不利于副高北抬, 有利于副高南退。图 7b 为孟加拉湾北侧加热

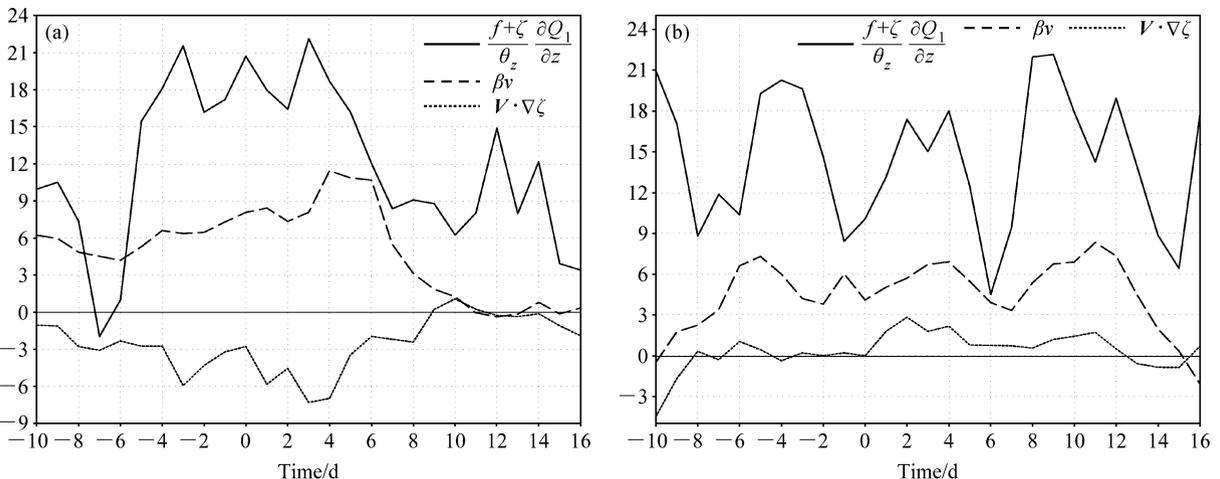


图 6 华南暴雨期 500 hPa $\frac{f+\zeta}{\theta_z} \frac{\partial Q_1}{\partial z}$ 、 βv 和 $V \cdot \nabla \zeta$ 的时间演变 (单位: 10^{-11} s^{-2}): (a) 华南; (b) 孟加拉湾

Fig. 6 Temporal evolutions of $\frac{f+\zeta}{\theta_z} \frac{\partial Q_1}{\partial z}$, βv , $V \cdot \nabla \zeta$ at 500 hPa during the torrential rain over South China (units: 10^{-11} s^{-2}): (a) South China; (b) the Bay of Bengal

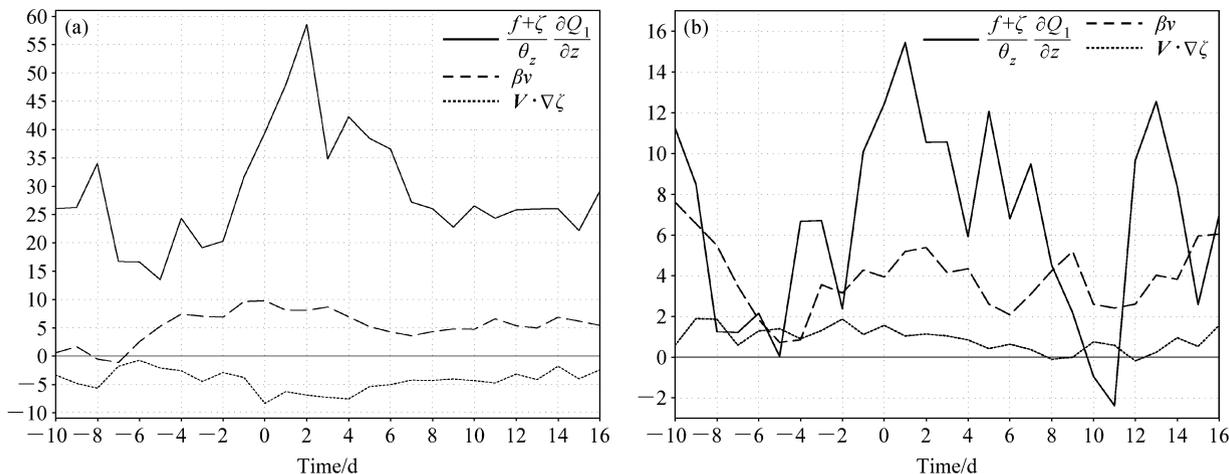


图7 同图6, 但为江淮暴雨期: (a) 江淮; (b) 孟加拉湾

Fig. 7 Same as Fig. 6, but during the torrential rain in the Changjiang-Huaihe River valley: (a) The Changjiang-Huaihe River valley; (b) the Bay of Bengal

场 Q_{1z} 随时间的变化趋势, 从图中可以看出在江淮暴雨发生期间, 位于副高西侧较远处的孟加拉湾 Q_{1z} 也有明显增长, 孟加拉湾加热场上空 500 hPa 气旋性涡度的增长有助于其东侧反气旋性环流出现, 从而诱导副高西伸, 这也是副高在江淮以南维持而没有南退的主要原因。暴雨结束后, Q_{1z} 迅速减小, 副高东撤。

图6、图7中 Q_{1z} 的变化趋势与前文中华南、江淮暴雨期副高位置的东进西退和南北移动在时间上都有很好的对应关系。华南暴雨期副高会出现短期的东撤南退, 江淮暴雨期副高会在江淮以南维持且明显西伸, 华南与江淮暴雨的热源与副高之间配置的差异主要是由于热源所处地理位置的差异造成的, 华南加热场位于副高西北侧, 而江淮热源位于副高北侧, 加热场位置的这种差异造成了它们与副高之间配置的差异。图6a中华南 Q_{1z} 的突然增长超前于暴雨开始 3~4 天并迅速达到最大值, 图4a中副高在暴雨中期 3 天才东撤到最东端; 图7a中江淮 Q_{1z} 在暴雨中期 2 天达到最大值, 孟加拉湾 Q_{1z} 在暴雨前期 1 天就达到最大值, 图4b中江淮暴雨期副高在暴雨中期 3 天西伸到最西端, 即 Q_{1z} 的增长要超前于副高西伸(东撤) 1~3 天, 而 Q_{1z} 在 1 天内即可诱发副高变异, 可见加热场对副高位置变化确实起诱导作用。另外, 加热场的超前增长可能与大尺度环流背景也有一定的联系。

本文通过理论分析证实, 大气非绝热加热作用

对副高短期位置的变异确实有重要的影响, 但在加热场对副高位置变化的主导作用上还缺乏有利的证明, 有待下一步通过数值模式来验证。

7 结论

(1) 我国南方大范围持续性暴雨发生过程中西太平洋副热带高压异常偏南偏西, 其北侧雨带是造成洪涝的主要原因。

(2) 暴雨期, 降水释放大量的凝结潜热构成了大气主要的非绝热加热。华南暴雨期间, 副高西北侧华南地区以及西侧孟加拉湾地区存在异常强烈的视热源和视水汽汇; 江淮暴雨期间, 副高北侧江淮流域及西侧孟加拉湾地区也存在异常强烈的视热源和视水汽汇。

(3) 视热源与暴雨的发生有很好的对应关系。视热源值随着暴雨的发生而增大, 暴雨过程结束后视热源值又迅速减小。华南暴雨期, 伴随着视热源的增大, 副高出现短期的东撤南退; 江淮暴雨期则相反, 随着视热源的增大, 副高在热源南侧维持, 且会出现明显的西伸。

(4) 副高短期位置变异与大范围持续性暴雨过程中大气非绝热加热有密切的关系, 与加热场所处地理位置有很大关系。华南暴雨期间非绝热加热的垂直变化在副高西北侧形成正涡度源, 在短时间内迫使副高东撤南退; 江淮暴雨期间非绝热加热的垂直变化在副高北侧形成正涡度源, 不利于副高北

进, 同时在副高西侧较远处孟加拉湾热源的共同作用下, 导致副高在江淮以南维持且出现明显的西伸。

参考文献 (References)

- Ding Yihui. 1992. Summer monsoon rainfalls in China [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 70: 373–396.
- 丁一汇, 吴晓曦, 马淑芬. 1997. 1991 年江淮暴雨期地气通量与混合层结构的研究 [J]. *气象学报*, 55 (3): 257–270. Ding Yihui, Wu Xiaoxi, Ma Shufen. 1997. A study of the surface fluxes and structure of mixed layer during the Meiyu rainfall over the Yangtze-Huaihe River basin in 1991 [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 55 (3): 257–270.
- 黄荣辉, 李维京. 1988. 夏季热带西太平洋上空的热源异常对东亚上空副热带高压的影响及物理机制 [J]. *大气科学*, 12 (特刊): 107–116. Huang Ronghui, Li Weijing. 1988. Influence of heat source anomaly over the western tropical Pacific on the subtropical high over East Asia and its physical mechanism [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 12 (Special Issue): 107–116.
- 黄荣辉, 顾雷, 陈际龙, 等. 2008. 东亚季风系统的时空变化及其对我国气候异常影响的最近研究进展 [J]. *大气科学*, 32 (4): 691–719. Huang Ronghui, Gu Lei, Chen Jilong, et al. 2008. Recent progresses in studies of the temporal-spatial variations of the East Asian monsoon system and their impacts on climate anomalies in China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (4): 691–719.
- 刘还珠, 姚明明. 2000. 降水与副热带高压位置和强度变化的数值模拟 [J]. *应用气象学报*, 11 (4): 385–391. Liu Huanzhu, Yao Mingming. 2000. Numerical simulation on the precipitation and variation of the location and intensity of the subtropical high [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 11 (4): 385–391.
- 刘屹岷, 吴国雄, 刘辉, 等. 1999. 空间非均匀加热对副热带高压形成和变异的影响 III: 凝结潜热加热与南亚高压及西太平洋副高 [J]. *气象学报*, 57 (5): 525–538. Liu Yimin, Wu Guoxiong, Liu Hui, et al. 1999. The effect of spatially nonuniform heating on the formation and variation of subtropical high Part III: Condensation heating and South Asia high and western Pacific subtropical high [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 57 (5): 525–538.
- 刘屹岷, 吴国雄. 2000. 副热带高压研究回顾及对几个基本问题的再认识 [J]. *气象学报*, 58 (4): 500–512. Liu Yimin, Wu Guoxiong. 2000. Reviews on the study of the subtropical anticyclone and new insights on some fundamental problems [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 58 (4): 500–512.
- Liu Yimin, Wu Guoxiong, Ren Rongcai. 2004. Relationship between the subtropical anticyclone and diabatic heating [J]. *J. Climate*, 17: 682–698.
- 施能, 朱乾根, 吴彬贵. 1996. 近 40 年东亚夏季风及我国夏季大尺度天气气候异常 [J]. *大气科学*, 20 (5): 575–583. Shi Neng, Zhu Qian'gen, Wu Bingui. 1996. The East Asian summer monsoon in relation to summer large scale weather-climate anomaly in China for last 40 years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 20 (5): 575–583.
- 唐东升, 王建德, 刘文泉. 1994. 夏季华南降水与水汽输送气流及大气加热场的关系 [J]. *南京气象学院学报*, 17 (2): 148–152. Tang Dongsheng, Wang Jiande, Liu Wenquan. 1994. Relation of South China precipitation to large scale water transporting flows and atmospheric heating fields [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 17 (2): 148–152.
- 陶诗言, 等. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 225pp. Tao Shiyang, et al. 1980. Heavy Rainfall in China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 225pp.
- 王黎娟, 温敏, 罗玲, 等. 2005. 西太平洋副高位置变动与大气热源的关系 [J]. *热带气象学报*, 21 (5): 488–496. Wang Lijuan, Wen Min, Luo Ling, et al. 2005. The relationship between the position variation of the west Pacific subtropical high and the apparent heating [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 21 (5): 488–496.
- 温敏, 施晓晖. 2006. 1998 年夏季西太副高活动与凝结潜热加热的关系 [J]. *高原气象*, 25 (4): 616–623. Wen Min, Shi Xiaohui. 2006. Relationship between activity of west Pacific subtropical high and condensation latent heating in summer of 1998 [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 25 (4): 616–623.
- 吴国雄, 刘还珠. 1999a. 全型垂直涡度倾向方程和倾斜涡度发展 [J]. *气象学报*, 57 (1): 1–15. Wu Guoxiong, Liu Huanzhu. 1999. Complete form of vertical vorticity tendency equation and slantwise vorticity development [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 57 (1): 1–15.
- 吴国雄, 刘屹岷, 刘平. 1999b. 空间非均匀加热对副热带高压形成和变异的影响 I: 尺度分析 [J]. *气象学报*, 57 (3): 257–263. Wu Guoxiong, Liu Yimin, Liu Ping. 1999. The effect of spatially nonuniform heating on the formation and variation of subtropical high I: Scale analysis [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 57 (3): 257–263.
- 吴国雄, 丑纪范, 刘屹岷, 等. 2003. 副热带高压研究进展及展望 [J]. *大气科学*, 27 (4): 503–517. Wu Guoxiong, Chou Jifan, Liu Yimin, et al. 2003. Review and prospect of the study on the subtropical anticyclone [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27 (4): 503–517.
- 吴国雄, 刘屹岷, 宇婧婧, 等. 2008. 海陆分布对海气相互作用的调控和副热带高压的形成 [J]. *大气科学*, 32 (4): 720–740. Wu Guoxiong, Liu Yimin, Yu Jingjing, et al. 2008. Modulation of land-sea distribution on air-sea interaction and formation of subtropical anticyclones. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (4): 720–740.

- Yanai M, Johnson R H. 1993. Impacts of cumulus convection on thermodynamic field [M]// Emanuel K A, Raymond D J. The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models of the Atmosphere. American Meteorological Society, 46: 39-62.
- 喻世华, 陆盛元, 卢春成, 等. 1986. 热带天气学概论[M]. 北京: 气象出版社, 75-96. Yu Shihua, Lu Shengyuan, Lu Chuncheng, et al. 1986. Tropical Synoptic Meteorology Conspectus (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 75-96.
- 张庆云, 陶诗言. 1999. 夏季西太平洋副热带高压北跳及异常的研究 [J]. 气象学报, 57 (5): 539-548. Zhang Qingyun, Tao Shiyun. 1999. The study of the sudden northward jump of the subtropical high over the western Pacific [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 57 (5): 539-548.
- 张韧, 史汉生, 喻世华. 1995. 西太平洋副热带高压非线性稳定性问题的研究 [J]. 大气科学, 19 (6): 687-700. Zhang Ren, Shi Hansheng, Yu Shihua. 1995. A study of non-linear stability of the western-Pacific subtropical high [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 19 (6): 687-700.
- Zhu Qian'gen, He Jinhai, Wang Panxing. 1986. A study of circulation differences between East-Asian and Indian summer monsoons with their interaction [J]. Adv. Atmos. Sci., 3 (4): 466-477.