

李娜, 肖子牛, 赵亮. 2020. 2018 年夏季东北极端高温事件物理机制分析 [J]. 气候与环境研究, 25(5): 469–482. LI Na, XIAO Ziniu, ZHAO Liang. 2020. Analysis on the Mechanism of the 2018 Summer Extreme High Temperature Event in Northeast China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25 (5): 469–482. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19100

2018 年夏季东北极端高温事件物理机制分析

李娜^{1,2} 肖子牛¹ 赵亮¹

1 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

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 基于观测资料和再分析资料, 研究分析了 2018 年夏季中国东北地区持续多日出现高温异常事件的形成机理。首先分析了整个夏季该地区观测台站逐日的温度资料, 计算了观测台站的超热因子 (Excess Heat Factor, EHF) 指数, 发现东北地区出现高温异常的时段主要是 7 月和 8 月, 异常高温的发生区域集中在东北南部。在此期间, 东亚大气环流形势的异常主要表现为南亚高压和西太平洋副热带高压强度异常增强, 作用相互重叠和位置持续偏北。进一步的分析可以注意到, 二者的重叠造成研究区域内有负涡度异常增强, 使得南亚高压和西太平洋副热带高压在北推的过程中不断带动东北南部上空负涡度异常增强, 并伴随有异常下沉气流, 下沉绝热增温与晴空辐射增温, 这可能是东北南部地表增温的一个重要原因。相关分析证实, 在整个夏季东北南部地表气温与其上空 300 hPa 至 500 hPa 涡度异常都有显著的负相关关系。因此, 南亚高压和西太平洋副热带高压之间的相互叠加组合是导致东北南部在 2018 年夏季 7、8 月份出现高温异常的主要原因。进一步的研究发现, 夏季副热带西风急流中准定常 Rossby 波能量的传播与南亚高压和西太平洋副热带高压异常增强有密切联系, 同时夏季西太平洋暖池的显著增暖导致了菲律宾地区异常旺盛的对流活动, 进而在 500 hPa 高度场上激发出 PJ (太平洋—日本涛动) 波列, 从另一个路径上促进了西太平洋副热带高压偏强偏北。

关键词 超热因子指数 涡度异常 南亚高压 西太平洋副热带高压 PJ 波列

文章编号 1006-9585(2020)05-0469-14

中图分类号 P463.1

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19100

Analysis on the Mechanism of the 2018 Summer Extreme High Temperature Event in Northeast China

LI Na^{1,2}, XIAO Ziniu¹, and ZHAO Liang¹

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049

Abstract The mechanisms involved in the development of high temperature anomalies in Northeast China during the summer of 2018 were studied using observational and reanalysis data. First, daily temperatures recorded at observation stations in the region throughout the summer were analyzed. Next, the excess heat factor index of the observation stations was calculated. July and August were the main anomaly high temperature periods when high temperature anomalies occurred in the southern part of Northeast China. The South Asia high (SAH) and western Pacific subtropical high

收稿日期 2019-07-03; 网络预出版日期 2020-03-23

作者简介 李娜, 女, 1995 年出生, 博士研究生, 主要从事中高纬环流异常及极端气候事件特征及成因分析。E-mail: lina@lasg.iap.ac.cn

通讯作者 肖子牛, E-mail: xiaozn@lasg.iap.ac.cn

资助项目 国家重点研发计划“全球变化与应对”专项 2018YFA0606203, 中国科学院战略性先导科技专项 XDA20100304

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2018YFA0606203), Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (Grant XDA20100304)

(WPSH) were significantly intensified during this period, and overlapped with each other on different levels and extended northward. There was also an increase in the negative vorticity anomalies in the overlapping area of the SAH and WPSH, and the two northward extending systems continued to drive the negative vorticity anomalies. In addition, an abnormal down draft occurred over the southern part of Northeast China together with sinking adiabatic warming and clear-sky radiation warming, which may have been important factors involved in surface warming in this area. Furthermore, surface temperature anomalies were significantly correlated with negative vorticity anomalies at geopotential heights from 300 to 500 hPa during the summer of 2018 in this region. It was also determined that the quasi-stationary Rossby wave energy propagation in the summer subtropical westerly jet was closely related to the anomalous enhancement of the SAH and WPSH. Significant simultaneous warming of the western Pacific warm pool during the summer also promoted unusually strong convective activity in the Philippines. The Pacific–Japan (PJ) wave train was excited at a geopotential height field of 500 hPa, which also led to the enhancement and northward extension of the WPSH. In summary, the existence of the SAH and WPSH and their overlapping were the main causes of the high temperature anomalies in the southern part of Northeast China during July and August 2018.

Keywords Excess heat factor index, Vorticity anomaly, South Asia high, Western Pacific subtropical high, PJ wave train

1 引言

在全球气候变暖的背景下, 北半球夏季极端高温热浪等极端事件发生地愈加频繁。中国是气候变化影响的敏感脆弱地区, 许多研究已表明, 在过去几十年中中国极端高温事件的发生有增加的趋势 (Zhou and Wang, 2016; Freychet et al., 2017)。进一步的研究指出, 极端高温事件的变化趋势表现出了区域差异性 (Ding and Qian, 2011; Yan et al., 2011; Dong et al., 2017)。夏季欧亚大陆增暖在欧洲和东北亚比北半球的其他地区更强 (Sutton and Dong, 2012; Stainforth et al., 2013; Chen and Lu, 2014; Dong et al., 2016, 2017; Chen et al., 2017; Hong et al., 2017)。

高温热浪往往伴随着特定的大尺度反气旋性环流型 (Black et al., 2004), 出现这些环流型后, 高温异常区的 500 hPa 位势高度场上会出现下沉气流, 晴朗的天空会增强太阳辐射, 促进地表蒸发, 进一步增强高温异常 (Kunkel et al., 1996; Palecki et al., 2001; Xoplaki et al., 2003; Meehl and Tebaldi, 2004)。因此, 一个地区出现高温热浪天气离不开特定的天气尺度系统和大气环流型的控制。研究发现南亚高压、西太平洋副热带高压与东亚急流对东亚夏季季风区的夏季气候有重要影响 (Zhang et al., 2005; Zhao et al., 2009; Lin et al., 2010; Park et al., 2010; Liu et al., 2013)。南亚高压会影响到东亚夏季风的生成 (Reiter and Gao, 1982; Zhu et al., 1986; Liu et al., 2013), 还会对夏季热带北太平洋大尺度海气

相互作用起调制作用, 传递与 ENSO 有关的信号 (Zhao et al., 2009)。急流可以充当形成准纬向遥相关型的波导 (Branstator, 2002; Branstator and Teng, 2017), 也可以通过南北位移来与西伸增强的西太平洋副热带高压相互耦合共同影响东亚夏季气候, 如 Wang et al. (2016) 研究指出, 东亚急流位置南移引发的反气旋性环流和西太平洋副热带高压向西南方增强是 2003 年夏季长江以南发生高温热浪的重要原因, 其中东亚急流向北偏移并伴随有西太平洋副热带高压西伸则是导致 2013 年中国东部发生高温热浪的重要过程。2018 年东北地区经历了一个罕见的酷夏, 连续多日出现高温异常, 且不断有台站日最高温打破历史记录。个别台站整个夏季的高温日数达 50 天以上, 最长的一次高温过程的持续时间在 25 天以上。本文利用台站观测资料和再分析资料, 分析了 2018 年夏季中国东部出现的这次异常高温事件的大气环流演变特征, 探讨了东北地区的高温事件与大气环流异常内在的物理联系和发生机制。

2 资料和方法

2.1 资料

本文所用的逐日最高气温 ($T_{\max}$)、日最低 ($T_{\min}$)、日平均气温 (T_{mean}) 资料取自中国气象局国家气象信息中心发布的《中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集 (V3.0)》(任芝花等, 2012), 该数据集解决了国家级和省级气象部

门存储的资料中所存在的大量与实际观测数据不符的信息化问题, 还解决了国家级和省级气象部门保存的基准基本站资料不一致的问题, 对观测数据质量进行了反复检测与控制, 使得数据质量得到明显提升, 已在业务和科研中得到广泛应用。本文选取的研究时段为 2018 年夏季 5 月 1 日至 8 月 31 日, 历史气候态为 1971~2017 年的 5 月 1 日至 8 月 31 日。通过筛选去掉部分缺测站点, 在研究时段东北地区有 108 个观测站, 分布如图 1 所示。同时段的大气环流资料源自 NCEP/NCAR 逐日再分析资料, 其中包括地表/高空日平均温度资料, 10~1000 hPa 共 17 层的位势高度场、水平风场、垂直速度场和对外长波辐射场 (Outgoing Longwave Radiation, OLR), 资料的水平分辨率为 2.5° (纬度) $\times 2.5^\circ$ (经度)。为分析 2018 年整个夏季背景场中的海温异常, 本文选用了 Hadley 环流中心提供的 1971~2018 年夏季 6~8 月的月平均海表温度资料 (Sea Surface Temperature, SST), 次表层海温资料 (Subsurface Sea Temperature), 空间分辨率为 1° (纬度) $\times 1^\circ$ (经度)。

2.2 方法

IPCC 第四次评估报告将极端天气事件定义为一特定时间和地点发生概率极小的事件, 通常发生概率只占该类天气现象的 10% 或者更低 (Cruz et al., 2007)。极端高温事件作为一种小概率事件, 其引发的高温热浪天气得到了广泛的国际关注和讨论, 然而, 国际上对于高温热浪天气的研究并没有一个统一的方法。我国气象局规定日最高温度 (Tmax) 大于或等于 35°C 为高温日, 连续 3 天以上即可定义为一次高温事件, 但由于中国地域辽阔, 东北地区又处在中高纬, 常年气温偏低, 故不能以此标准来做研究。为此, 本文引用超热因子 (Excess Heat Factor, EHF) 来做研究, 该因子由 Perkins et al. (2012) 设计, 并从该因子推导出多个热浪指数来描述热浪天气特征, 得到了国外其它学者的应用 (肖安和周长艳, 2017)。

本文在计算 2018 年东北地区夏季发生的高温日数和高温过程数时, 计算了各个台站的超热因子 EHF 指数, 超热因子 EHF 指数由两部分组成: 第一部分体现一个台站最近 3 天日均温是否超过该地长期气候极端高温 (EHI_{sig}); 第二部分体现当地最近 3 天平均气温是否超过该地最近 3~32 天的平均气温 (EHI_{accl}) (肖安和周长艳, 2017)。它

们的计算公式如下:

$$A_{\text{sig}} = \frac{T_i + T_{i-1} + T_{i-2}}{3} - T_{95}, \quad (1)$$

$$B_{\text{accl}} = \frac{T_i + T_{i-1} + T_{i-2}}{3} - \frac{T_{i-3} + \dots + T_{i-32}}{30}, \quad (2)$$

$$C = A_{\text{sig}} \times \max(1, B_{\text{accl}}), \quad (3)$$

其中, EHI_{sig} 用 A_{sig} 表示, EHI_{accl} 用 B_{accl} 表示, EHF 用 C 表示; T 表示平均气温 (日最高温度和最低温度的平均值), 下标 i 为日期序列 (肖安和周长艳, 2017)。例如, 在本文研究的时间段, 2018 年 5 月 1 日为日期序列的第一天, 2018 年 8 月 31 日为日期序列的最后一天; $(T_i + T_{i-1} + T_{i-2})/3$ 表示 3 天平均气温; $(T_{i-3} + \dots + T_{i-32})/30$ 表示 3~32 天的平均气温; T_{95} 表示某站 1971~2017 年这 47 年里逐日平均气温升序排列后第 95% 分位值, 代表本站极端高温阈值。在本文中, 定义当超热因子 $\text{EHF} > 0$ 即为一个高温天气事件; 至少连续 3 天超热因子 $\text{EHF} > 0$ 时为一个高温热浪事件。

本文在分析副热带西风急流中的波活动矢量时, 计算了准定常 Rossby 波活动通量及其散度。准定常 Rossby 波能量传播的强弱可以用波活动矢量水平分量来表示:

$$F_\lambda = \frac{p}{2000a^2 \cos \Phi} \left[\left(\frac{\partial \Psi'}{\partial \lambda} \right)^2 - \Psi' \frac{\partial^2 \Psi'}{\partial \lambda^2} \right], \quad (4)$$

$$F_\Phi = \frac{p}{2000a^2} \left(\frac{\partial \Psi'}{\partial \lambda} \frac{\partial \Psi'}{\partial \Phi} - \Psi' \frac{\partial^2 \Psi'}{\partial \lambda \partial \Phi} \right), \quad (5)$$

其中, Ψ' 为扰动流函数 (对纬向平均流的偏差), p 为气压, Φ 为纬度, λ 为经度, a 为地球半径。水平波活动矢量散度代表波活动的源和汇, 强辐散区作为波活动的源可激发出 Rossby 波向下游地区传播, 辐合区作为波活动的汇则会使当地天气系统得到增强。

此外本文还运用了合成分析, 皮尔逊线性同期相关及显著性检验等气候统计方法。

3 2018 年夏季东北高温时空分布特征

2018 年夏季东北地区持续多日出现高温异常, 图 1 给出了去除缺测站点后的中国东北地区 (包括辽宁省、吉林省、黑龙江省、内蒙古自治区东部和河北省的东北部) 观测站点分布, 图 2 给出了

2018 年 5 月到 8 月日最高温度的演变。从图 2 可以看出,在夏季初期 5~6 月,虽然东北地区日最高温度异常偏强,但发生高温过程的持续时间短暂。

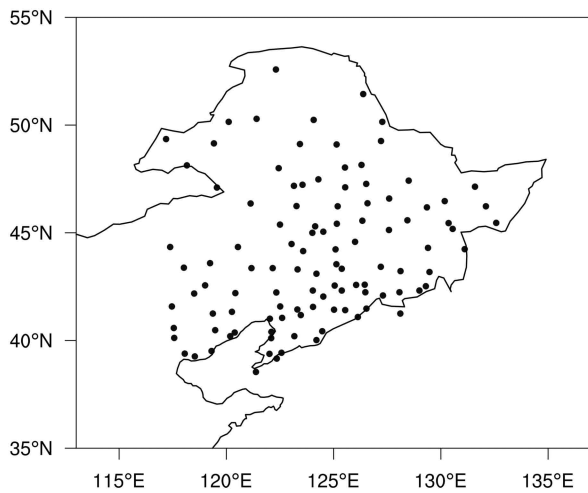


图 1 地理上中国东北地区(包括辽宁省、吉林省、黑龙江省、内蒙古自治区东部和河北省的东北部)站点分布。我们选取了无缺失且经过质量控制的 108 个台站

Fig. 1 Geographical map of Northeast China including the Liaoning Province, Jilin Province, Heilongjiang Province, eastern part of Inner Mongolia Autonomous region, and northeastern part of Hebei Province. We selected 108 qualified stations without missing measurement

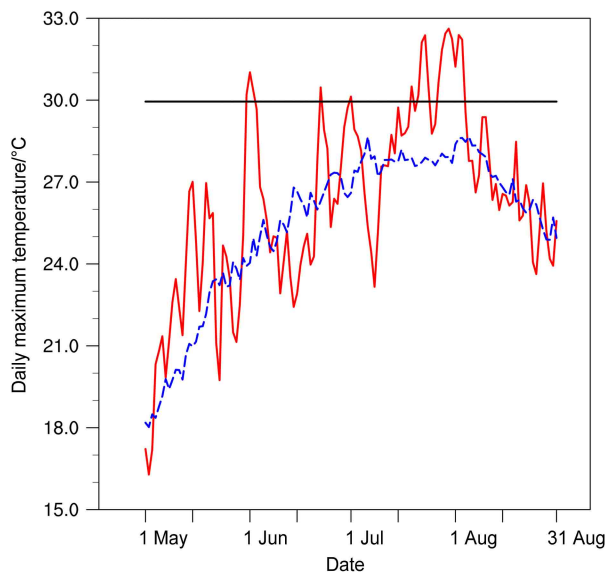


图 2 2018 年 5~8 月东北地区全区日最高温度时间序列(红线)。蓝线表示东北地区 1971~2017 年同时段气候态;黑线表示 30°C 线(本文选取的东北地区极端高温阈值)

Fig. 2 Daily maximum temperature time series (red line) in Northeast China from May to August 2018. The blue line indicates the climatic state time series between May and August from 1971 to 2017 in Northeast China; black line represents the 30°C line, which is defined as the extreme high temperature threshold in Northeast China

而进入 7 月份之后,东北全区发生高温过程的持续时间明显变长。如果对每个台站求取 1971~2018 年这 48 年逐日日最高温度升序排列后的第 95 百分位值,再对所有台站求平均后得到的温度值,视为东北地区发生极端高温的阈值,这个阈值为 30°C,在用图 2 中用黑实线表示,不难发现 2018 年夏季东北发生极端高温的时段主要集中在 7 月份,而在 5 月末 6 月初这一时段,东北也发生了一次短暂的极端高温事件。

为统计 2018 年夏季 5~8 月,东北全区 108 个台站发生的高温日数和高温过程数,本文采用超热因子 EHF 来进行判断。超热因子 EHF 由 Perkins et al. (2012) 设计,定义超热因子 $EHF > 0$ 即为高温日,连续 3 天超热因子 $EHF > 0$ 的时候,则定为发生了一次高温热浪,且依据 EHF 指数的计算方法,可以得知当某一台站 $EHF > 0$ 时,说明该站当日及前后两日的日平均气温超过了该站从 1971~2017 年的长期气候态的极端高温阈值。图 3a 和图 3b 给出了东北地区 5~8 月发生的高温日数和高温过程数的分布情况。由图 3a 可看出,这个夏季最热的地区集中在东北南部(45°N 以南),该地区的观测台站出现高温天气的日数基本均在 30 天以上,部分台站的高温日数甚至超过 50 天,仅有少数台站的高温日数在 25~30 天;与之相比,东北北部(45°N 以北)观测台站在整个夏季的高温日数偏少,绝大多数台站的高温日数集中在 20~30 天这一区间,有极个别台站在整个夏季的高温日数不足 10 天。而从图 3b 中可以发现,东北北部的台站整个夏季发生的高温过程数较多,而东北南部的台站发生的高温过程数偏少,特别是靠近 40°N 位置的台站,整个夏季经历的高温过程数不足 3 次。结合图 3a 和图 3b 不难看出,2018 年夏季东北全区发生高温异常有明显的空间分布差异,具体表现在东北南部站点经历的高温异常日数明显偏多,经历的高温过程次数少但持续时间长。而东北北部站点经历的高温异常日数偏少,经历的高温过程次数偏多,但每一次高温过程的持续时间短暂。考虑到图 2 给出的结果,我们可以推测,东北地区发生极端高温的事件集中在 2018 年 7 月份之后,发生高温显著异常的区域在东北南部。为验证这一结果,我们计算了整个夏季东北全区,东北南部及东北北部 EHF 指数序列,如图 4 所示。不难看出,尽管 6 月份前期东北地区经历了短暂的高温,且高温

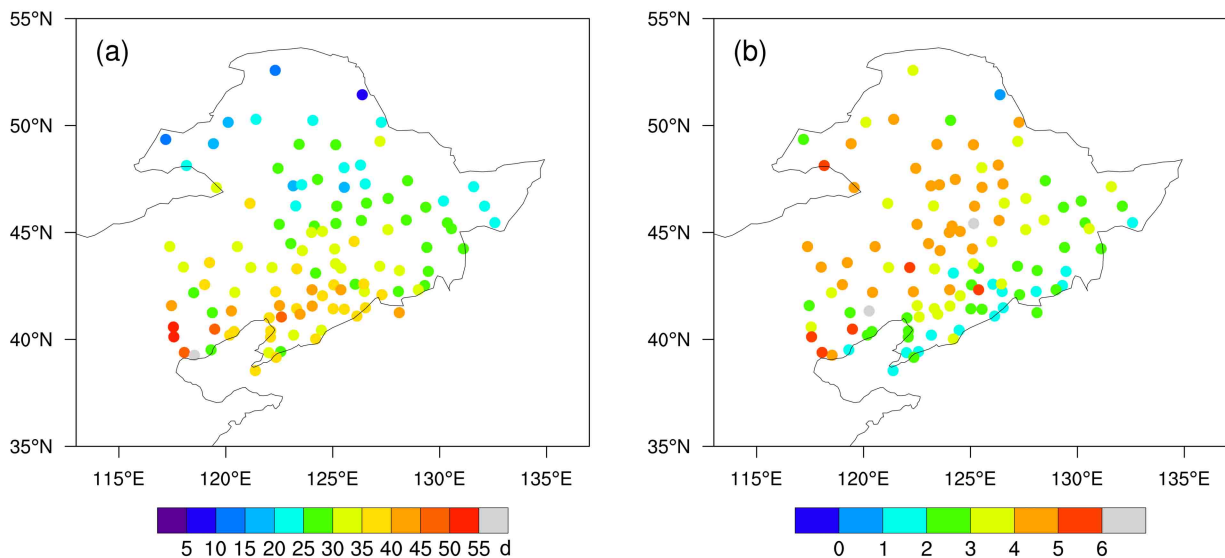


图3 2018 年 5~8 月东北地区每个台站发生的 (a) 高温日数和 (b) 高温过程数 (高温日连续 3 天以上就定为一个高温过程)

Fig. 3 (a) High temperature days and (b) high temperature processes occurring at each station in Northeast China from May to August 2018. There are more than three continuous high temperature days during each high temperature process

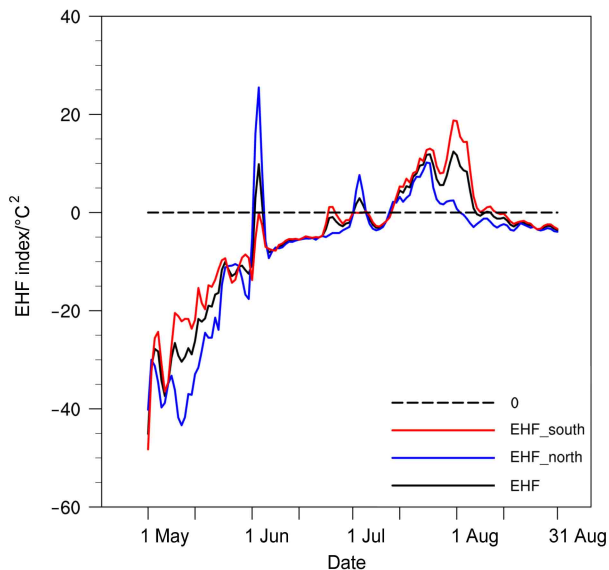


图4 2018 年 5~8 月东北全区 (黑实线)、东北北部 (蓝实线)、东北南部地区 (红实线) 的超热因子 (EHF, 单位: $^{\circ}\text{C}^2$) 指数的时间序列

Fig. 4 Excess heat factor ($^{\circ}\text{C}^2$) index time series in Northeast China (solid black line), northern part of Northeast China (solid blue line), and southern part of Northeast China (solid red line) from May to August 2018

主要发生在东北北部, 东北北部的 EHF 指数正值突出, 但是持续时间很短暂, 而在进入 7 月份之后, 东北南部地区的 EHF 指数得到显著增强, 基本处在正值很高的水平, 这说明东北南部在 7 月份之后, 经历了漫长的高温过程, 这再一次印证了前面的分析结果。

4 高温事件与南亚高压和西太平洋副热带高压的联系

为研究 2018 年 7 月到 8 月东北南部高温异常事件的形成机理, 我们首先考察东亚地区的大气环流背景的特征, 从各层大气环流的演变特征可以发现, 夏季 7、8 月东北地区上空 200 hPa 和 500 hPa 均有位势高度正异常叠加暖中心存在, 500 hPa 西太平洋副热带高压脊线的位置异常偏北, 西太平洋副热带高压北边界的位置在东北南部, 并且西太平洋副热带高压东南缘的暖湿气流不断地被输送至东北地区上空 (图略)。与此同时, 100 hPa 南亚高压边界 16800 gpm 等高线也异常偏北偏东, 甚至一度与西太平洋副热带高压在不同高度层上相重叠, 这种环流形势在同时段的气候态中不曾出现。由于南亚高压在 100 hPa 高空最强盛, 并在 150 hPa、200 hPa、250 hPa 上空仍有体现, 我们对比了南亚高压在不同高度层上的边界线轮廓以及西太平洋副热带高压 500 hPa 高度场上的边界 5880 gpm, 发现二者重叠的时段大致为 7 月 8 日到 8 月 31 日。从该时段的平均状态来看, 南亚高压系统深厚, 在不同的高度层上均与西太平洋副热带高压有重叠, 重叠的位置在渤海、黄海、朝鲜半岛以及日本中南部一带的上空。图 5 给出了南亚高压、西太平洋副热带高压不同高度层特征线在高温时段和气候平均状态的位置对比。从图 5 中可以看到, 高温时段的南

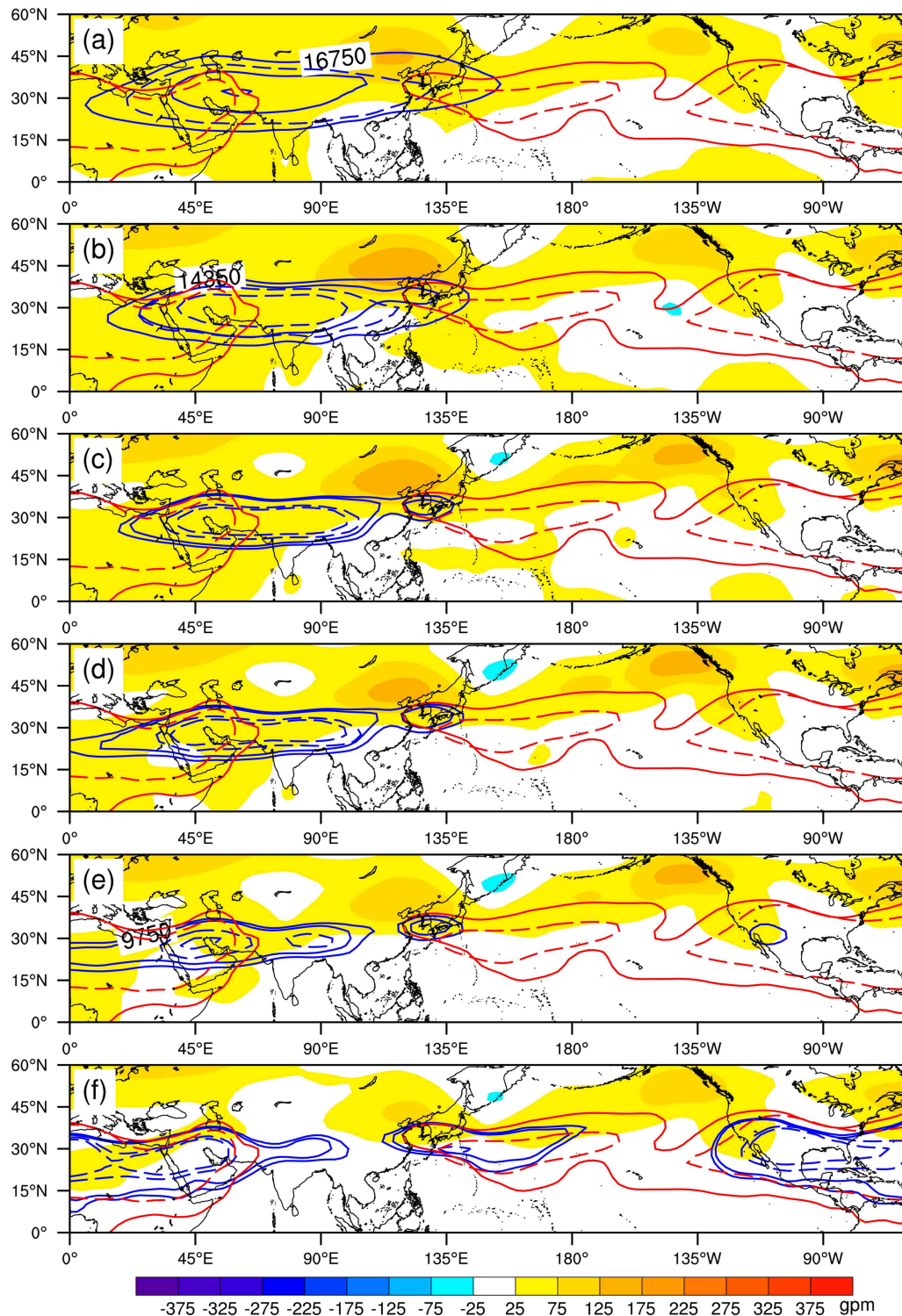


图5 2018年7月8日至8月31日平均南亚高压特征线(蓝实线)、位势高度异常(填色,单位:gpm)和同期气候平均(1971~2017年)南亚高压特征线(蓝色虚线):(a) 100 hPa;(b) 150 hPa;(c) 200 hPa; (d) 250 hPa; (e) 300 hPa; (f) 400 hPa。红色实线和红色虚线分别表示同期和同期气候平均(1971~2017年)500 hPa西太平洋副热带高压特征线

Fig. 5 Boundary lines of the South Asia high (SAH) (solid blue lines), geopotential height anomalies (shaded, units: gpm) from 8 July to 31 August 2018, and climatological (1971-2017) boundary lines of the SAH from 8 July to 31 August (blue dotted lines): (a) 100 hPa; (b) 150 hPa; (c) 200 hPa; (d) 250 hPa, (e) 300 hPa; (f) 400 hPa. The solid red lines represent the western Pacific subtropical high (WPSH) boundary lines at 500 hPa, and red dotted lines represent the climatological (1971-2017) boundary lines of the WPSH at 500 hPa from 8 July to 31 August

亚高压相较于气候平均态它的特征线在不同高度层上所覆盖的面积都有所扩大且东伸明显, 这种现象在 100 hPa、150 hPa、200 hPa (图 5a、5b、5c) 的位势高度场上表现的最明显。与此同时, 高温时段的西太平洋副热带高压特征线相较于气候平均态覆盖的面积也明显扩大, 5880 gpm 等高线并没有在太平洋中部发生断裂且西伸明显。显著增强的南亚高压与西太平洋副热带高压的特征线在不同高度层上重叠的中心位置均在朝鲜半岛、日本等地区。同时还发现, 南亚高压与西太平洋副热带高压重叠区域的西北部(即中国的东北地区)在不同高度层上有位势高度正异常。

涡度是判断环流系统的物理量, 图 6 给出了东北地区上空不同纬度、高度经向剖面上涡度的分布情况。从图 6 中可以看到, 在对应上述的南亚高压和西太平洋副热带高压重叠区域内, 从 500 hPa 到 100 hPa 均可以看到有负涡度异常。从不同纬度的垂直剖面图来看, 负涡度异常在向北延伸的过程中不断增强, 在 40°N、42.5°N 左右达到最强(图 6c、

6d)。在经纬度(37.5°N~47.5°N, 120°E~130°E)范围内可以看到负涡度异常在向北延伸并影响到整个东北南部, 对比可以发现, 这个区域与南亚高压和西太平洋副热带高压相交区域是吻合的。我们进一步考察该区域上空平均涡度在整个夏季的演变情况。图 7a 给出了其异常涡度的高度—时间剖面图, 从图中可见, 区域上空从 7 月上旬到 8 月中旬为显著持续性负涡度异常, 并有由高层向地面延伸的趋势, 这一时间序列的演变与上述高温时间的发生是一致的。涡度异常还伴随有异常垂直下沉气流, 图 7b 给出了同期异常垂直风场的时间剖面图, 也可以很明显的看到, 当南亚高压与西太平洋副热带高压相互重叠区域内的负涡度异常在向北延伸的过程中, 同时还伴随有异常的垂直下沉气流, 下沉绝热增温与晴空辐射增温, 这可能是东北南部地表增温的一个重要原因。

为进一步分析东北南部上空涡度异常与地表气温间的关系, 我们对夏季 7 月 1 日到 8 月 31 日 62 天中东北南部上空 300~500 hPa 的涡度异常区域

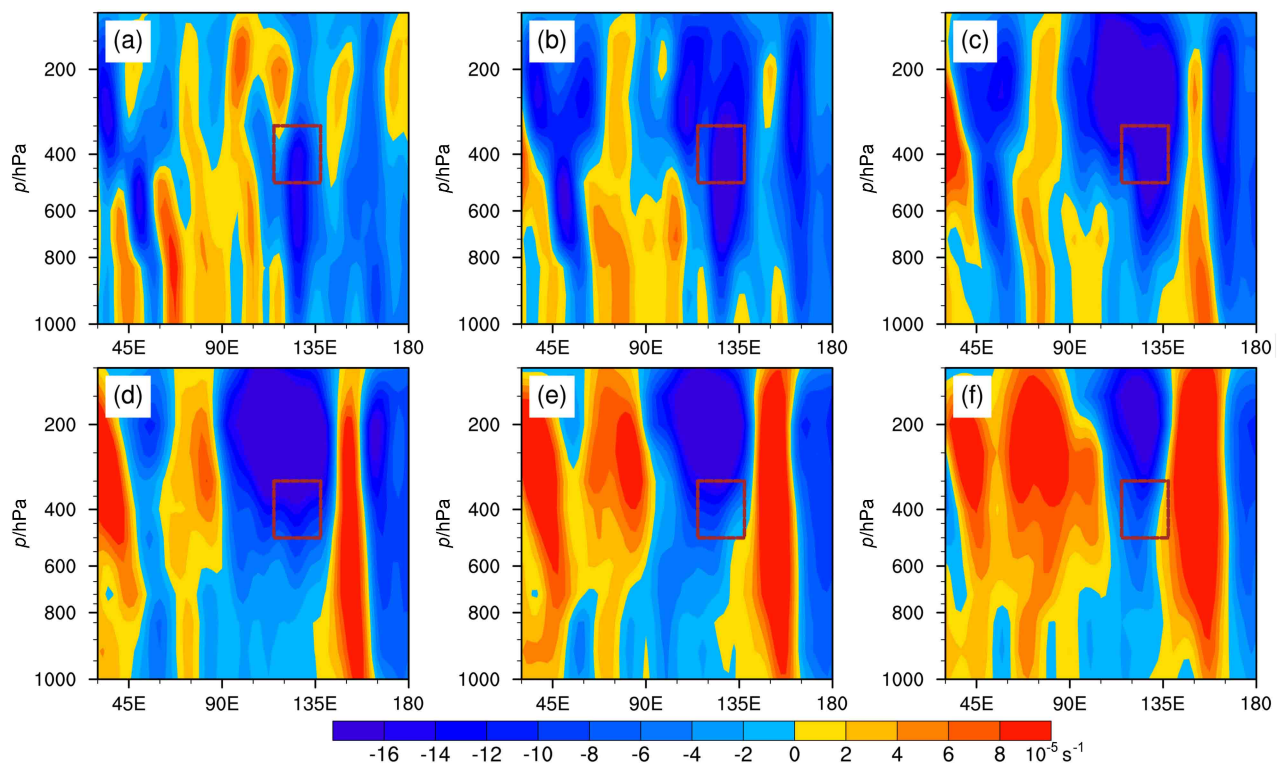


图 6 2018 年 7 月 8 日至 8 月 31 日平均沿 (a) 35°N、(b) 37.5°N、(c) 40°N、(d) 42.5°N、(e) 45°N、(f) 47.5°N 的涡度异常纬向—垂直剖面(单位: 10^{-5}s^{-1})。红色矩形区域内代表东北南部地区上空 300~500 hPa

Fig. 6 Longitudinal-vertical sections of vorticity anomalies (10^{-5}s^{-1}) along (a) 35°N, (b) 37.5°N, (c) 40°N, (d) 42.5°N, (e) 45°N, and (f) 47.5°N from 8 July to 31 August 2018. The area of the red rectangular frame represents the geopotential height of 300~500 hPa over the southern region of Northeast China

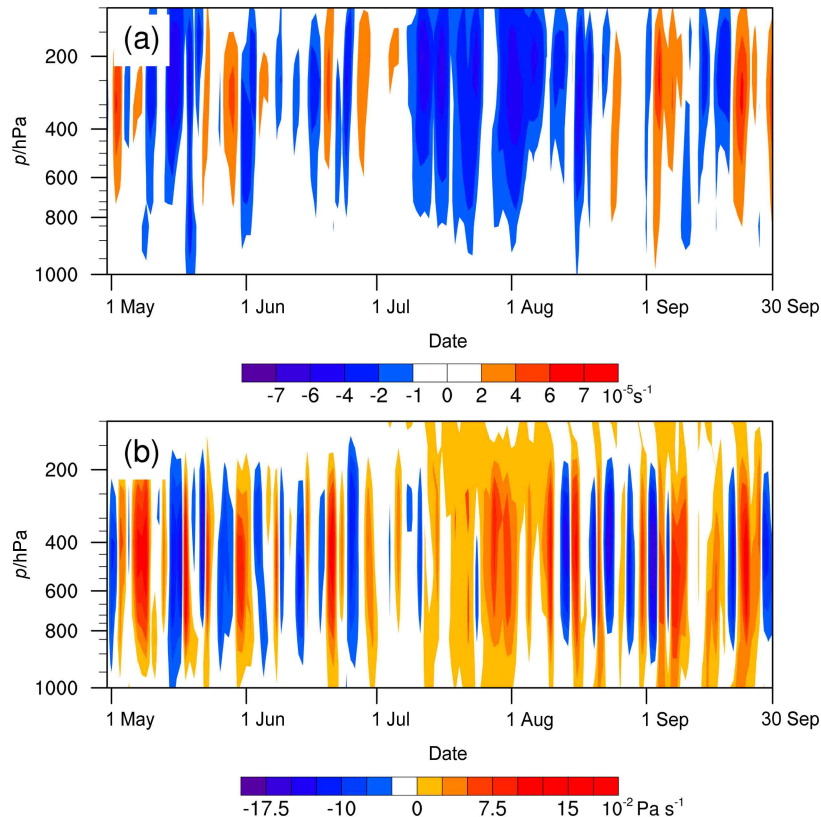


图7 2018年4月30日至9月30日东北南部(37.5°N~47.5°N, 120°E~130°E) (a) 涡度异常(阴影区, 单位: 10^{-5} s^{-1})和(b)垂直风场异常(阴影区, 单位: $10^{-2} \text{ Pa s}^{-1}$)时间序列

Fig. 7 Time series of (a) vorticity anomalies (10^{-5} s^{-1}) and (b) vertical wind field anomalies ($10^{-2} \text{ Pa s}^{-1}$) in the southern part of Northeast China (37.5°N–47.5°N, 120°E–130°E) from 30 April to 30 September 2018

均值(由于距离地表更近, 所以选择300~500 hPa)与同期东北南部日均温异常做皮尔逊线性同期相关, 并做了显著性检验。发现二者有良好的负相关关系, 并通过99%信度检验, 如果对整个夏季5月1日到8月31日东北南部上空涡度异常(300~500 hPa)与地表温度异常求相关, 也发现两者有很好的负相关关系, 并通过99%信度检验, 其相关系数为-0.53, 而二者的负相关关系在7月1日到8月31日这一时段更好, 两者的相关系数高达-0.55。

为进一步验证南亚高压与西太平洋副热带高压相互重叠并北跳是导致东北南部高温异常的重要原因。我们计算夏季5月1日到8月31日期间120°E~130°E地区西太平洋副热带高压脊线纬度位置, 将其标准化后(称为西太平洋副热带高压脊线指数)以考察西太平洋副热带高压脊线的演变。其次我们又计算南亚高压东北边界的纬度位置和经度位置, 得到两组时间序列(由于南亚高压自6月2日开始才在100 hPa高度场上有闭合的等高线, 因此时间序列从6月2日到8月31日), 将这两

组时间序列分别标准化后再相加, 得到一个南亚高压综合指数。这个指数正值越大, 则表示南亚高压北跳东伸越明显。图8a给出了东北南部的日均温异常时间序列、西太平洋副热带高压指数和南亚高压综合指数。从7月1日到8月31日的演变曲线, 对比三者的变化可以发现, 三组时间序列基本上峰谷相对, 并且有异常高值出现在7月中旬到8月中旬期间。整个夏季7月和8月温度异常与南亚高压和西太平洋副热带高压指数的相关系数分别为0.58和0.65, 均通过99%信度检验。仔细对比还可以注意到, 南亚高压指数与西太平洋副热带高压指数的折线的波动要稍稍领先于表示温度异常的折线的波动。计算其相互间的超前滞后相关系数, 可以发现当南亚高压指数超前于温度异常3天时, 二者的相关性最好, 达0.63; 当西太平洋副热带高压指数超前于温度异常1天时, 二者的相关性最好, 达0.75。图8b和图8c为同期东北南部上空的涡度演变和垂直风场演变, 结合图8a、8b和8c不难发现, 南亚高压与西太平洋副热带高压之间的叠加作

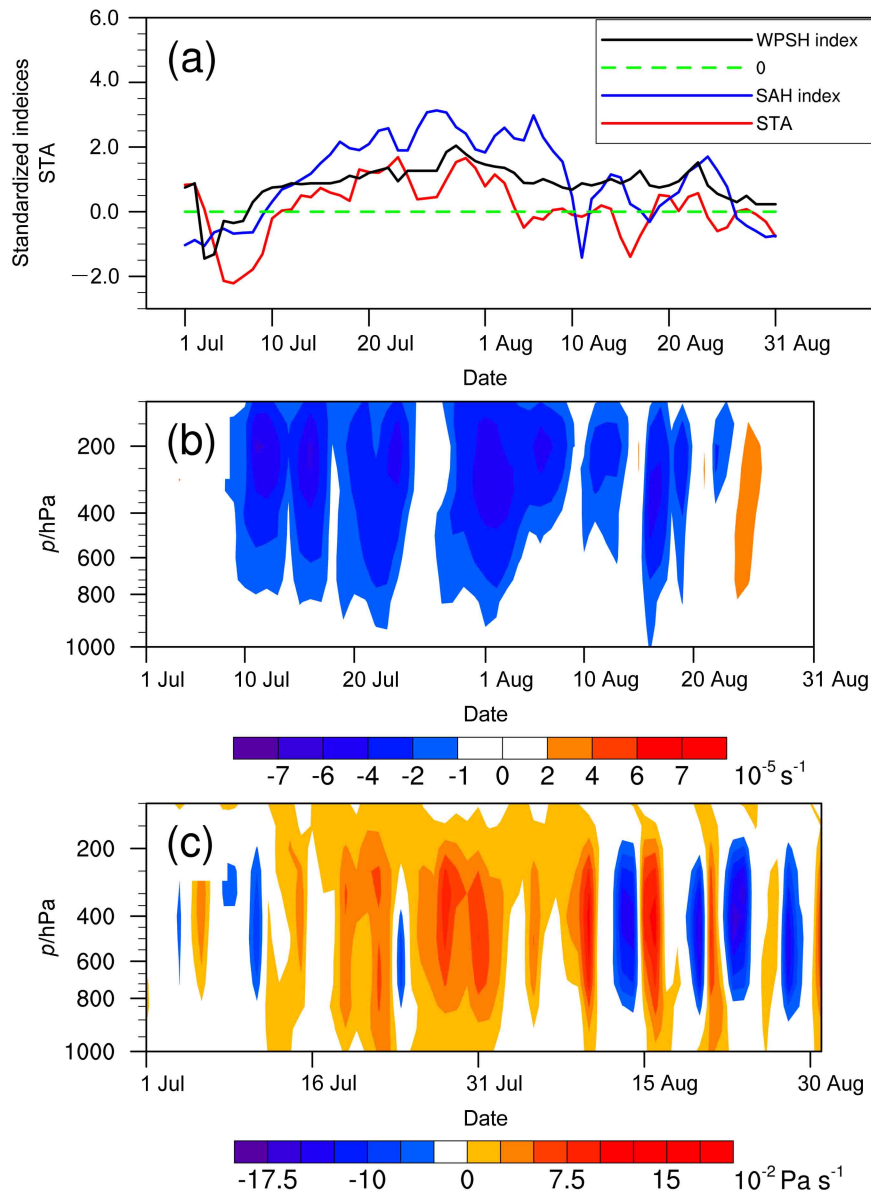


图 8 (a) 2018 年 7~8 月东北南部区域平均温度异常 (红线)、西太平洋副热带高压脊线 (黑线) 和南亚高压指数 (蓝线) 标准化后的时间序列; 2018 年 7~8 月东北南部区域平均 (b) 涡度异常 (单位: 10^{-5} s^{-1}) 和 (c) 垂直风场异常 (单位: $10^{-2} \text{ Pa s}^{-1}$) 高度—时间序列
Fig. 8 (a) Time series of standardized temperature anomalies (STA) in the southern part of Northeast China (red line), standardized WPSH ridge line (black line), and standardized SAH index (blue line) from July to August 2018; time–height series of (b) vorticity anomalies (10^{-5} s^{-1}) and (c) vertical wind field anomalies ($10^{-2} \text{ Pa s}^{-1}$) in the southern region of Northeast China from July to August 2018

用与东北南部上空的异常负涡度相对应, 负涡度异常伴随有异常的垂直下沉气流, 下沉绝热增温与晴空辐射增温很可能是最终导致东北南部地区显著增温的一个重要原因。

5 南亚高压和西太平洋副热带高压异常增强的原因

通过之前的研究已得知, 东北南部的高温异常

事件是由南亚高压与西太平洋副热带高压异常增强的叠加作用所导致, 下面将进一步分析这两个系统异常增强的可能原因。

前人的研究成果表明: 亚洲西风急流是北半球夏季准定常 Rossby 波的波导 (Ambrizzi et al., 1995), 西风急流中准定常 Rossby 波的活动和其能量传播对东亚的天气气候变化有着重要影响 (Liang et al., 1998; Lu et al., 2002)。而准定常 Rossby 波沿亚洲急流向东传播到日本及以东地区, 有可能导致西太

平洋副热带高压在日本上空增强 (Park and Schubert, 1997; Enomoto et al., 2003; Enomoto et al., 2004)。从夏季 200 hPa 纬向风 20 m/s 和 25 m/s 等风速线位置 (图 9), 可以明显看出副热带西风急流的位置变动: 2018 年 6 月, 西风急流的平均位置在 36°N 左右, 其中 30°E~180°E 的西风急流位置略北, 在 38°N 左右。到 7 月, 整体西风急流的平均位置北跃到 40°N 以北, 其中 30°E~60°E 的西风急流平均位置偏南, 60°E~180°E 的西风急流平均位置偏北, 副热带西风急流位置略呈东北—西南走向。到了 8 月, 西风急流的位置继续维持偏北态势, 其平均位置已达 42.5°N, 急流中心分别存在于北非与西亚的交界处, 地中海、黑海、里海的上空和贝加尔湖以南的蒙古高原上空。东亚地区上空的副热带西风急流在 7 月明显北跳, 在 8 月份继续维持偏北态势, 这应该是与西太平洋副热带高压在 7 月初发生北跳继而持续偏北紧密相连, 但同时也为 7、8 月副热带西风急流中 Rossby 波活动的位置偏北创造了有利条件。

为了在异常高温期间考察波流作用及其对南亚高压与西太平洋副热带高压强度和位置变化的影响, 我们依据图 8a 计算得到的南亚高压特征指数及西太平洋副热带高压纬度位置指数的强弱变化, 将夏季 7 月和 8 月分为 6 个阶段, 分别为 (1) 高温未发生前南亚高压与西太平洋副热带高压指数偏低阶段 (2018 年 7 月 1~8 日)、(2) 南亚高压与西太平洋副热带高压指数迅速增强阶段 (2018 年 7 月 9~15 日)、(3) 南亚高压与西太平洋副热带高压指数最高阶段 (2018 年 7 月 16 日至 8 月 9 日)、(4) 南亚高压与西太平洋副热带高压指数迅速减弱阶段 (2018 年 8 月 10~13 日)、(5) 南亚高压与西太平洋副热带高压指数再次增强阶段

(2018 年 8 月 14~26 日)、(6) 南亚高压与西太平洋副热带高压指数再次减弱阶段 (2018 年 8 月 27~31 日)。图 10 分别给出了这 6 个阶段, 伴随南亚高压与西太平洋副热带高压边界线的演变, 200 hPa 水平波活动作用通量与散度场的分布情况。首先从图 10a 可以看出在高温还未发生前, 南亚高压特征指数和西太平洋副热带高压脊线位置指数均偏低的情况下, 二者的边界线并没有重叠, 且位置偏南。但此时中国东北地区与日本岛一带上空有水平波活动作用通量在此地辐合, 且这种情况一直持续到南亚高压与西太平洋副热带高压特征指数持续增强达到最强阶段, 同时两者的边界线不断扩大北推, 最终在东北地区上空重叠, 由图 10a、10b 和 10c 可以很清楚的看到波活动作用通量局地辐合对南亚高压东北边缘强度增强及对西太平洋副热带高压偏北偏强的促进作用。图 10d 对应南亚高压与西太平洋副热带高压特征指数迅速衰减, 且二者的边界线位置偏南的情况, 不难发现在这一阶段中国东北及日本岛地区上空的水平波活动作用通量辐合较弱。图 10e 和图 10f 表明中国东北及日本岛一带地区上空的水平波活动作用通量辐合再次增强和减弱的情况, 与南亚高压特征指数与西太平洋副热带高压脊线位置指数的增强和减弱对应得很好。通过分析发现, 夏季 7、8 月份东北南部地区高温未发生前以及高温发生的整个过程中, 南亚高压与西太平洋副热带高压指数强度演变与中国东北地区及日本岛地区上空波活动作用通量辐合的强弱变化基本吻合, 我们认为这些地区上空偏强的水平波活动作用通量可能是夏季同期南亚高压维持偏北偏东态势及西太平洋副热带高压异常偏北并偏强的重要原因。图 11a 给出了 2018 夏季 7、8 月份 500 hPa 的位势高度场及异常场, 我们可以看到东北亚地区上空

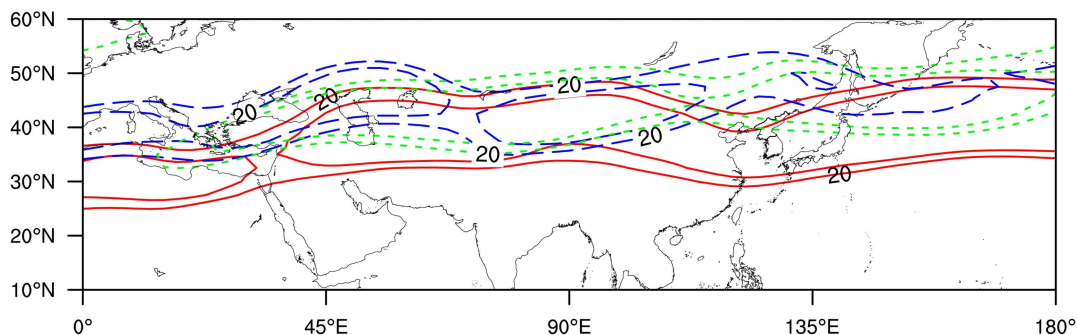


图 9 2018 年夏季 200 hPa 纬向风 20 m/s 和 25 m/s 等风速线的位置 (红线代表 6 月, 绿线代表 7 月, 蓝线代表 8 月)

Fig. 9 Positions of equal wind lines for zonal winds of 20 m/s and 25 m/s at a geopotential height at 200 hPa during the summer of 2018. The red line represents June, green line represents July, and blue line represents August

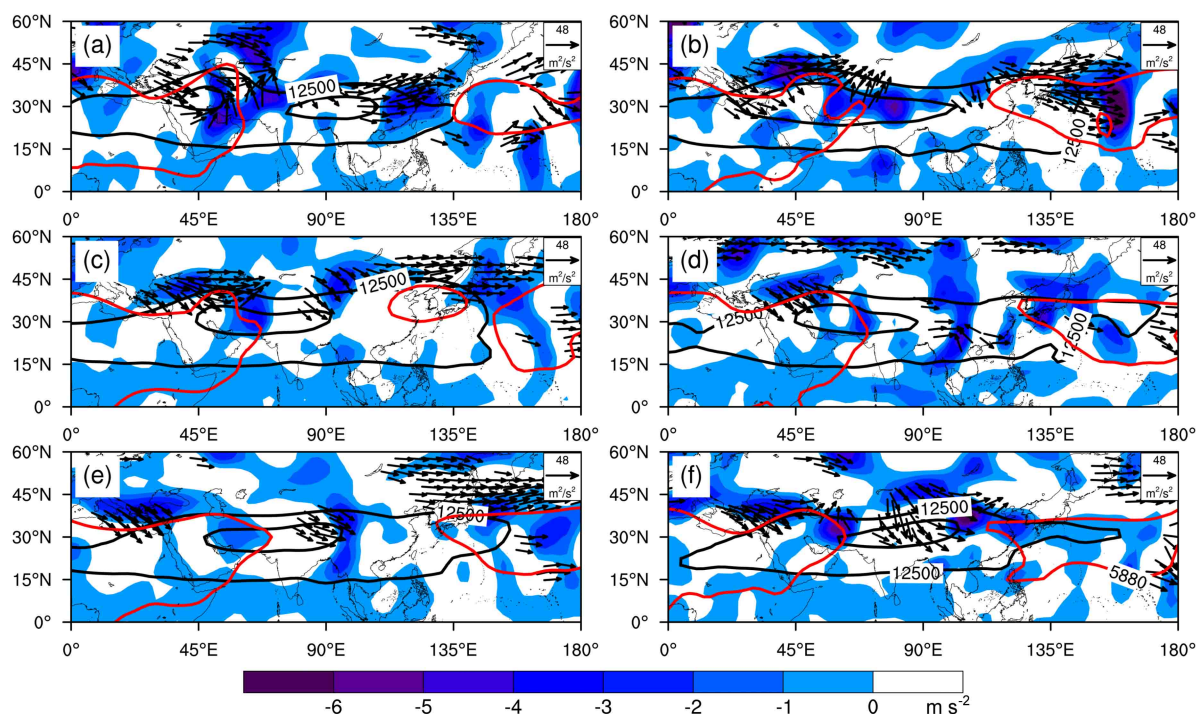


图 10 2018 年 7~8 月 6 个时段平均 200 hPa 水平波活动作用通量 (黑色矢量箭头, 单位: m^2/s^2 , 未画出小于 $20 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 的水平波活动矢量) 和水平波活动通量散度场 (填色, 单位: m s^{-2}): (a) 2018 年 7 月 1~8 日; (b) 2018 年 7 月 9~15 日; (c) 2018 年 7 月 16 日至 8 月 9 日; (d) 2018 年 8 月 10~13 日; (e) 2018 年 8 月 14~26 日; (f) 2018 年 8 月 27~31 日

Fig. 10 200-hPa horizontal wave activity fluxes (black vector arrow, units: m^2/s^2 , and the horizontal wave activity fluxes less than $20 \text{ m}^2/\text{s}^2$ are not drawn) and horizontal wave active flux divergence fields (shaded, units: m s^{-2}) averaged for the six periods from July to August 2018: (a) From 1 to 8 July; (b) from 09 to 15 July; (c) from 16 July to 09 August; (d) from 10 to 13 August; (e) from 14 to 26 August; (f) from 27 to 31 August 2018

500 hPa 西风环流平直, 冷空气不易向南侵袭, 同时欧亚大陆的大部分地区均有位势高度正异常存在, 正异常最显著的地区在东北亚地区上空, 东亚沿岸呈现 PJ 波列异常。黄荣辉和孙凤英 (1994) 早期的研究指出, PJ (太平洋—日本涛动) 波列是导致夏季西太平洋副热带高压位置偏北、强度增强的重要因素, 而 PJ 波列与热带太平洋海表温度异常有密切联系。我们进一步考察 2018 年夏季西太平洋暖池 ($0^\circ\sim 15^\circ\text{N}$, $125^\circ\text{E}\sim 145^\circ\text{E}$), 发现无论是海表层还是次表层海温均出现异常增暖的情况, 这种增暖现象在暖池的中南部表现的更为明显 (图 11b), 部分地区的次表层海温异常可达 1.0°C (图略), 海温的增暖使得菲律宾附近的对流异常增强 (图 11c), 为 PJ 波列的增强提供了一个有利的背景场 (图 10a)。因此夏季 7、8 月 500 hPa 出现的 PJ 波列与副热带西风急流中静止 Rossby 波波能量的传播相互叠加组合, 加强了西太平洋副热带高压并使其位置偏北, 为 2018 年夏季东北的高温天气提供了动力异常组合条件。

6 小结与结论

2018 年东北地区夏季连续多日出现了高温异常, 个别台站夏季的高温日数达 50 天以上, 一次高温过程的持续时间在 25 天以上。我们分析了这次极端高温事件的大气环流背景和产生原因, 我们可以得到如下几个结论:

(1) 南亚高压和西太平洋副热带高压强度异常增强, 二者强度偏强、位置持续偏北, 是造成 2018 年东北夏季高温的主要原因。

(2) 在高温事件发生时期, 南亚高压和西太平洋副热带高压发生空间上的叠加, 空间重叠区域内有显著的负涡度异常, 这两个系统的持续北上与东北南部地区的上空的负涡度异常增强相对应, 负涡度异常增强同时伴随有异常下沉气流, 下沉绝热增温同时晴空辐射得到增强, 而东北南部地表气温与其上空 300~500 hPa 的负涡度异常均有显著的相关关系。因此, 南亚高压和西太平洋副热带高压的叠加效应, 是导致东北南部在 2018 年夏季 7、8 月份出现高温异常的直接原因。

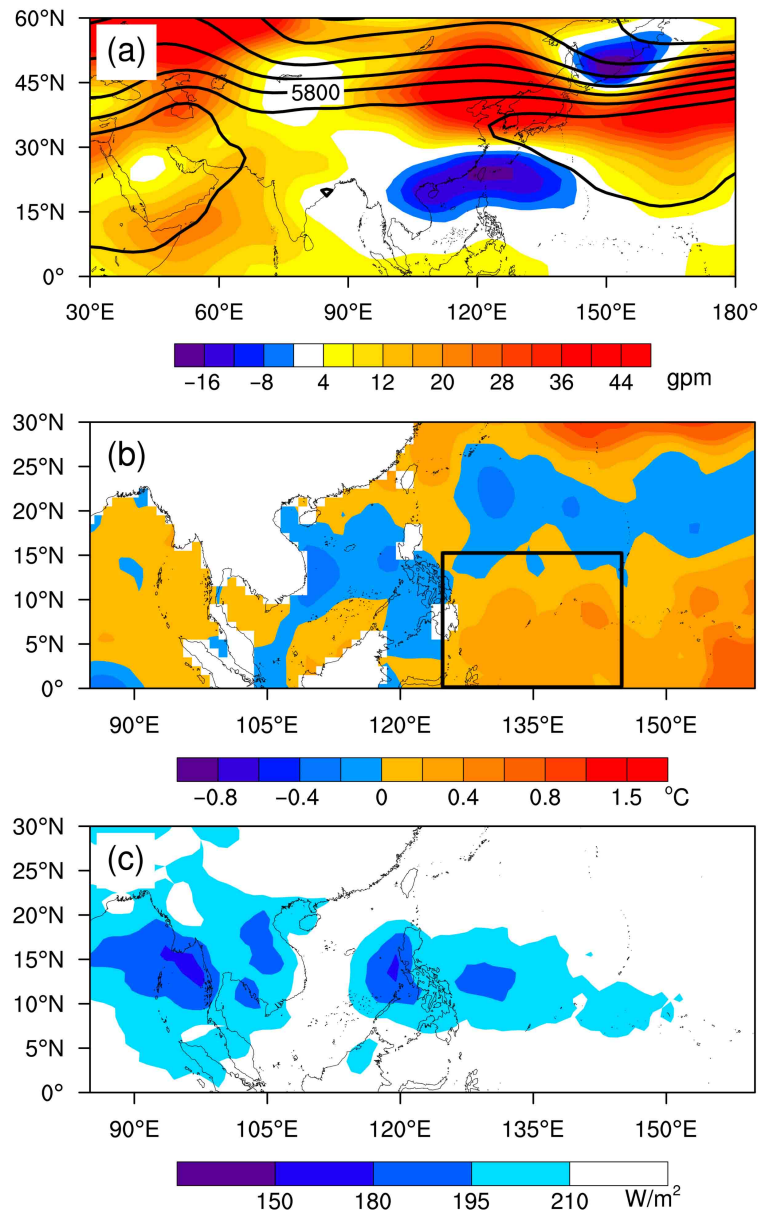


图 11 2018 年 7~8 月平均的 (a) 500 hPa 位势高度 (等值线, 单位: gpm) 和位势高度异常场 (填色, 单位: gpm)、(b) 海表温度异常 (单位: $^{\circ}\text{C}$)、(c) 对外长波辐射场 (OLR, 单位: W/m^2)。图 (b) 中黑色矩形框内为西太平洋暖池 ($0^{\circ}\sim 15^{\circ}\text{N}$, $125^{\circ}\text{E}\sim 145^{\circ}\text{E}$)

Fig. 11 (a) 500-hPa geopotential height (contour, units: gpm) and geopotential height anomalies (shaded, units: gpm), (b) sea surface temperature anomalies (units: $^{\circ}\text{C}$), and (c) outgoing longwave radiation (W/m^2) from 1 July to 31 August 2018. The black rectangular frame in (b) represents the western Pacific warm pool ($0^{\circ}\sim 15^{\circ}\text{N}$, $125^{\circ}\text{E}\sim 145^{\circ}\text{E}$)

(3) 西太平洋副热带高压显著增强有两个原因: 一个是夏季副热带西风急流中准定常 Rossby 波传播到日本岛及其以东地区, 增强该地区的高度场异常。另一个是夏季西太平洋暖池异常增暖使得菲律宾附近对流增强, 激发出 PJ 波列进而使得西太平洋副热带高压位置偏西偏北, 强度偏强。另外一个方面, 夏季 200 hPa 副热带西风急流中准定常 Rossby 波增强, 加强了南亚高压东北边缘的强度,

使其偏东偏北。

参考文献 (References)

- Ambrizzi T, Hoskins B J, Hsu H H. 1995. Rossby wave propagation and teleconnection patterns in the austral winter [J]. *J. Atmos. Sci.*, 52 (21): 3661–3672. doi:10.1175/1520-0469(1995)052<3661:RWPATP>2.0.CO;2
- Black E, Blackburn M, Harrison G, et al. 2004. Factors contributing to the summer 2003 European heatwave [J]. *Weather*, 59(8): 217–223.

- doi:10.1256/wea.74.04
- Branstator G. 2002. Circumglobal teleconnections, the jet stream waveguide, and the North Atlantic Oscillation [J]. *J. Climate*, 15(14): 1893–1910. doi:10.1175/1520-0442(2002)015<1893:CTTJSW>2.0.CO;2
- Branstator G, Teng H Y. 2017. Tropospheric waveguide teleconnections and their seasonality [J]. *J. Atmos. Sci.*, 74(5): 1513–1532. doi:10.1175/JAS-D-16-0305.1
- Chen H S, Teng F D, Zhang W X, et al. 2017. Impacts of anomalous midlatitude cyclone activity over East Asia during summer on the decadal mode of East Asian summer monsoon and its possible mechanism [J]. *J. Climate*, 30(2): 739–753. doi:10.1175/JCLI-D-16-0155.1
- Chen W, Lu R Y. 2014. A decadal shift of summer surface air temperature over Northeast Asia around the mid-1990s [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 31(4): 735–742. doi:10.1007/s00376-013-3154-4
- Cruz R V, Harasawa H, Lal M, et al. 2007. Asia Climate Change, 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate. Cambridge: Cambridge University Press, 469–506
- Ding T, Qian W H. 2011. Geographical patterns and temporal variations of regional dry and wet heatwave events in China during 1960–2008 [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 28(2): 322–337. doi:10.1007/s00376-010-9236-7
- Dong B W, Sutton R T, Chen W, et al. 2016. Abrupt summer warming and changes in temperature extremes over Northeast Asia since the mid-1990s: Drivers and physical processes [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 33(9): 1005–1023. doi:10.1007/s00376-016-5247-3
- Dong B W, Sutton R T, Shaffrey L. 2017. Understanding the rapid summer warming and changes in temperature extremes since the mid-1990s over western Europe [J]. *Climate Dyn.*, 48(5-6): 1537–1554. doi:10.1007/s00382-016-3158-8
- Enomoto T. 2004. Interannual variability of the Bonin high associated with the propagation of Rossby waves along the Asian jet [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 82(4): 1019–1034. doi:10.2151/jmsj.2004.1019
- Enomoto T, Hoskins B J, Matsuda Y. 2003. The formation mechanism of the Bonin high in August [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 129(587): 157–178. doi:10.1256/qj.01.211
- Freychet N, Tett S, Wang J, et al. 2017. Summer heat waves over eastern china: Dynamical processes and trend attribution [J]. *Environmental Research Letters*, 12(2): 024015. doi:10.1088/1748-9326/aa5ba3
- Hong X W, Lu R Y, Li S L. 2017. Amplified summer warming in Europe-West Asia and Northeast Asia after the mid-1990s [J]. *Environmental Research Letters*, 12(9): 094007. doi:10.1088/1748-9326/aa7909
- 黄荣辉, 孙凤英. 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气候异常的影响 [J]. *大气科学*, 18(2): 141–151.
- Huang Ronghui, Sun Fengying. 1994. Impacts of the thermal state and the convective activities in the tropical Western Warm pool on the summer climate anomalies in East Asia [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 18(2): 141–151. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1994.02.02
- Kunkel K E, Changnon S A, Reinke B C, et al. 1996. The July 1995 heat wave in the Midwest: A climatic perspective and critical weather factors [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77(7): 1507–1518. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<1507:TJHWIT>2.0.CO;2
- Liang X Z, Wang W C. 1998. Associations between China monsoon rainfall and tropospheric jets [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 124(552): 2597–2623. doi:10.1002/qj.49712455204
- Lin Z D, Lu R Y, Zhou W. 2010. Change in early-summer meridional teleconnection over the western North Pacific and East Asia around the late 1970s [J]. *Int. J. Climatol.*, 30(14): 2195–2204. doi:10.1002/joc.2038
- Liu B Q, Wu G X, Mao J Y, et al. 2013. Genesis of the South Asian high and its impact on the Asian summer monsoon onset [J]. *J. Climate*, 26(9): 2976–2991. doi:10.1175/JCLI-D-12-00286.1
- Lu R Y, Oh J H, Kim B J. 2002. A teleconnection pattern in upper-level meridional wind over the North African and Eurasian continent in summer [J]. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 54(1): 44–55. doi:10.3402/tellusa.v54i1.12122
- Meehl G A, Tebaldi C. 2004. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century [J]. *Science*, 305(5686): 994–997. doi:10.1126/science.1098704
- Palecki M A, Changnon S A, Kunkel K E. 2001. The nature and impacts of the July 1999 heat wave in the midwestern United States: Learning from the lessons of 1995 [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 82(7): 1353–1368. doi:10.1175/1520-0477(2001)082<1353:TNAIOT>2.3.CO;2
- Park C K, Schubert S D. 1997. On the nature of the 1994 East Asian summer drought [J]. *J. Climate*, 10(5): 1056–1070. doi:10.1175/1520-0442(1997)010<1056:OTNOTE>2.0.CO;2
- Park J Y, Jhun J G, Yim S Y, et al. 2010. Decadal changes in two types of the western North Pacific subtropical high in boreal summer associated with Asian summer monsoon/El Niño-Southern Oscillation connections [J]. *J. Geophys. Res.*, 115(D21): D21129. doi:10.1029/2009JD013642
- Perkins S E, Alexander L V, Nairn J R. 2012. Increasing frequency, intensity and duration of observed global heatwaves and warm spells [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 39(20): L20714. doi:10.1029/2012GL053361
- Reiter E R, Gao D Y. 1982. Heating of the Tibet Plateau and movements of the South Asian high during spring [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 110(11): 1694–1711. doi:10.1175/1520-0493(1982)110<1694:HOTTPA>2.0.CO;2
- 任芝花, 余予, 邹凤玲, 等. 2012. 部分地面要素历史基础气象资料质量检测 [J]. *应用气象学报*, 23(6): 739–747. Ren Zhihua, Yu Yu, Zou Fengling, et al. 2012. Quality detection of surface historical basic meteorological data [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 23(6): 739–747. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2012.06.011
- Stainforth D A, Chapman S C, Watkins N W. 2013. Mapping climate change in European temperature distributions [J]. *Environmental Research Letters*, 8(3): 034031. doi:10.1088/1748-9326/8/3/034031

- Sutton R T, Dong B W. 2012. Atlantic Ocean influence on a shift in European climate in the 1990s [J]. *Nature Geoscience*, 5(11): 788–792. doi:10.1038/ngeo1595
- Wang W W, Zhou W, Li X Z, et al. 2016. Synoptic-scale characteristics and atmospheric controls of summer heat waves in China [J]. *Climate Dyn.*, 46(9-10): 2923–2941. doi:10.1007/s00382-015-2741-8
- 肖安, 周长艳. 2017. 基于超热因子的中国热浪事件气候特征分析 [J]. *气象*, 43(8): 943–952. Xiao An, Zhou Changyan. 2017. Characteristic analysis of the heat Wave Events over China based on excess heat factor [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 43(8): 943–952. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2017.08.005
- Xoplaki E, González-Rouco J F, Luterbacher J, et al. 2003. Mediterranean summer air temperature variability and its connection to the large-scale atmospheric circulation and SSTs [J]. *Climate Dyn.*, 20(7-8): 723–739. doi:10.1007/s00382-003-0304-x
- Yan Z W, Xia J J, Qian C, et al. 2011. Changes in seasonal cycle and extremes in China during the period 1960–2008 [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 28(2): 269–283. doi:10.1007/s00376-010-0006-3
- Zhang P Q, Song Y, Kousky V E. 2005. South Asian high and Asian–Pacific–American climate teleconnection [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 22(6): 915–923. doi:10.1007/BF02918690
- Zhao P, Zhang X D, Li Y F, et al. 2009. Remotely modulated tropical–North Pacific ocean–atmosphere interactions by the South Asian high [J]. *Atmospheric Research*, 94(1): 45–60. doi:10.1016/j.atmosres.2009.01.018
- Zhou C L, Wang K C. 2016. Coldest temperature extreme monotonically increased and hottest extreme oscillated over Northern Hemisphere land during last 114 years [J]. *Scientific Reports*, 6(1): 25721. doi:10.1038/srep25721
- Zhu Q G, He J H, Wang P X. 1986. A study of circulation differences between East-Asian and Indian summer monsoons with their interaction [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 3(4): 466–477. doi:10.1007/BF02657936