

中国南方地区盛夏高温类型及其对应的大尺度环流和海温异常*

贾子康¹ 郑志海^{1,2} 封国林^{1,2}
JIA Zikang¹ ZHENG Zhihai^{1,2} FENG Guolin^{1,2}

1. 兰州大学大气科学学院, 兰州, 730000

2. 国家气候中心, 中国气象局气候研究开放实验室, 北京, 100081

1. *College of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*

2. *Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*

2019-08-13 收稿, 2020-09-03 改回.

贾子康, 郑志海, 封国林. 2020. 中国南方地区盛夏高温类型及其对应的大尺度环流和海温异常. 气象学报, 78(6): 928-944

Jia Zikang, Zheng Zhihai, Feng Guolin. 2020. Midsummer high temperature types in southern China and corresponding large-scale circulation and sea surface temperature anomalies. *Acta Meteorologica Sinica*, 78(6):928-944

Abstract Daily maximum temperature data collected at 2374 stations in China, the NCEP/NCAR atmospheric circulation data and NOAA sea surface temperature (SST) data are used to analyze the main types of midsummer high temperature in the southern China. Large-scale circulations corresponding to these high temperature types and their relation with SST anomalies are explored. The results show that the annual high temperature days in the southern China has a significant increasing trend. Cluster analysis is used to classify the midsummer high temperature in the southern China into three types: Jianghuai type, South China type and Central China type. The Jianghuai type high temperature is centered in the Jianghuai area, with a wide range and high occurrence frequency. When the Jianghuai type high temperature occurs, anomalous anticyclone occurs in the troposphere from low to high levels. Meanwhile, the Western Pacific subtropical high (WPSH) is stronger than normal and shifts to the west with the ridgeline located slightly northward. Therefore, Jianghuai type high temperature is a high temperature type under the control of the WPSH. This type of high temperature is mainly related to the attenuation of the central type El Niño from the pre-winter to the subsequent summer and warmer SST in the equatorial Atlantic in spring. The central area of South China type high temperature occurs from the southern Yangtze River basin to South China. The typical circulation systems are the southward displacement of the East Asian subtropical jet, the stronger and westward shift of the WPSH with a southward shift of the ridgeline. Also, the South China type high temperature is directly under the control of the WPSH, accompanied by a weakened southwesterly monsoon circulation. It has an obvious characteristic of dry heat. This type of high temperature is closely related to the attenuation of the eastern type El Niño and its associated Indian Ocean capacitor effect. The Central China type high temperature is mainly located in Hubei province and Hunan province. The corresponding circulation is that the WPSH is slightly weaker and shifts eastward, which shows a similar pattern to the North Atlantic-Eurasia remote correlation pattern in the middle and high latitudes. It is the high temperature under the control of continental high pressure, which makes the water vapor condition better than the other two types of high temperature. The North Atlantic-Eurasian teleconnection is a possible signal source of Central China type high temperature.

Key words Midsummer high temperature, Clustering analysis, Atmospheric circulation, Sea surface temperature anomaly

* 资助课题: 国家重点研发计划专项(2017YFC1502303)、国家自然科学基金项目(41530531, 41875101, 41875096)。

作者简介: 贾子康, 主要从事气候预测研究。E-mail: jiazk17@lzu.edu.cn

通信作者: 郑志海, 主要从事气候预测研究。E-mail: zhengzh@cma.gov.cn

摘要 利用中国 2374 个站点的日最高气温资料、NCEP/NCAR 大气环流资料以及 NOAA 海表温度资料, 分析了我国南方盛夏高温的主要类型, 比较了各类型高温对应的大尺度环流以及与海表温度异常信号的联系。结果表明: 我国南方地区年高温日数有明显的增多趋势, 利用聚类分析将我国南方盛夏高温分为江淮型、华南型和华中型 3 类。江淮型高温中心区域位于江淮地区, 该类型高温空间范围大、发生频次高, 典型的环流系统为高、低空呈现异常反气旋, 西太平洋副热带高压(西太副高)偏强偏西, 南北位置略偏北。该类型高温是西太副高直接控制下的高温类型, 与前冬到夏季中部型厄尔尼诺衰减和春季赤道大西洋地区海温偏高有关。华南型高温中心区域在江南南部到华南地区, 典型的环流系统是东亚副热带急流的位置偏南, 西太副高偏强、偏西和脊线偏南, 华南型高温也是西太副高直接控制下的高温, 且伴随着西南季风的减弱, 干热特征明显, 该类型高温与东部型厄尔尼诺衰减及其与之相联系的印度洋“电容器”效应密切相关。华中型高温主要位于湖北和湖南两省, 对应的环流型为西太副高偏弱、偏东, 在中高纬度与北大西洋-欧亚遥相关型类似, 是大陆高压控制下的高温, 使得水汽条件比另两类高温好。北大西洋-欧亚遥相关型是华中型高温的可能信号源。

关键词 盛夏高温, 聚类分析, 大气环流, 海温异常

中图法分类号 P466

1 引言

在全球变暖的背景下, 极端高温事件呈现出明显的增多趋势, 高温热浪已经成为主要的气象灾害之一(IPCC, 2013; Easterling, et al, 2000; Alexander, et al, 2006; Dong, et al, 2015; Papalexou, et al, 2018)。高温热浪严重影响人体健康, 加剧能源消耗, 威胁生态环境, 近年来受到越来越多的关注和重视(Easterling, et al, 2000; Valor, et al, 2001; Peng, et al, 2004; 秦大河, 2007; 杨宏青等, 2013; 许霜等, 2014)。例如, 2003 年夏季席卷欧洲的高温热浪和 2010 年夏季俄罗斯的极端高温事件均造成了巨大的损失(Schär, et al, 2004; Alexander, 2011; Dole, et al, 2011)。近年来, 中国高温热浪也表现出频次增多、范围变大、持续时间变长等特征, 尤其是人口密集的东部地区, 高温热浪带来的灾害越来越严重(Hu, et al, 2011; Dong, et al, 2018)。特别是 2013 年夏季, 中国长江流域一带出现历史罕见的持续高温天气, 其高温范围之广、温度之高, 均达到 1951 年以来最强(孙建奇, 2014; Sun, et al, 2014; 杨涵洧等, 2016), 很多研究(高荣等, 2008; Sun, et al, 2014; Guo, et al, 2017)表明, 在未来的情景预估中中国高温热浪的强度还有增长的趋势。

大气中的高压系统是影响高温热浪的直接因素, 高压系统中的反气旋以及伴随的下沉气流能直接加热大气并减少云量和增加到达地表的太阳辐射, 使气温升高(Wang, et al, 2017, 2018; Deng, et al, 2019)。中国中东部地区夏季主要受东亚夏季风的影响, 东亚夏季风由南向北跳跃式推进使得中国南方在雨季结束后高温日数明显增多(Shi, et al, 1996;

Hu, et al, 2011; Zhou, et al, 2014; Lu, et al, 2016)。东亚夏季风系统中的重要成员——西太平洋副热带高压(西太副高)是影响我国南方高温的重要因素, 比如 2013 年我国大范围的高温事件就是受到了西太副高的影响(张小泉等, 2015; 杨涵洧等, 2016), 2003、2006 年的强高温事件也与西太副高的活动密切相关(Wang, et al, 2016)。西太副高的范围、强度和位置存在显著的年际变化, 其与东亚副热带急流(西风急流)以及南亚高压的位置配置会影响高温发生的区域。例如, 东亚副热带急流轴偏南使 2003 年盛夏的高温天气主要发生在长江以南地区(杨辉等, 2005); 而西风急流带扰动偏弱、偏北, 西太副高显著西伸控制川渝地区是 2006 年西南地区高温的主要原因(彭京备等, 2007); 2013 年长江流域盛夏高温日数偏多与西太副高位置偏西、偏北和南亚高压偏强、偏东、偏北密切相关(Wang, et al, 2016)。

中国夏季高温发生的范围很广, 由于地形、地表条件和气候平均流的差异, 不同区域的高温对应的高压环流存在明显不同, 对应的物理过程也存在差异(Black, et al, 2004; García-Herrera, et al, 2005; Lau, et al, 2012; Loikith, et al, 2012; Zuo, et al, 2013; Chen, et al, 2015), 很多研究从典型的高温个例出发, 研究了不同区域高温所对应的大尺度环流特征(彭海燕等, 2005; 尹东屏等, 2006), 其统计代表性存在一定的局限。Chen 等(2015)对中国不同区域高温日对应的环流形势进行了统计和对比分析, 将中国东部不同区域高温对应的环流形势分为典型的副热带型、季风型和焚风型 3 类, 然而, 由于以西太副高为代表的夏季风系统在季节内有

明显的阶段性变化,导致不同区域,尤其是南方和北方的高温时段存在差异,大气基本流也有显著不同,因此在高温最为集中的盛夏时段,高温对应的环流型还需进一步分析。近期,一些研究基于相对阈值,利用经验正交函数(EOF)分解方法对中国的高温进行了分类,并讨论了不同类型高温的大尺度环流特征,以及海表温度和大气内部变率对高温热浪的影响(Wang W W, et al, 2016; Wang P Y, et al, 2017; Deng, et al, 2019),袁媛等(2018)也利用经验正交函数分解方法分析了盛夏南方气温的主模态特征。然而,相对阈值和绝对阈值定义的高温分别关注了高温的不同方面,对实际影响而言,绝对阈值定义下的高温影响更大,因此还需要进一步认识。

本研究从基于绝对阈值定义下的高温出发,利用聚类方法对高温事件频发的中国南方地区盛夏高温进行分类,并分析不同类型高温对应的大尺度环流特征及其与海表温度距平的联系,为更好地认识夏季高温特征及其信号以及高温预测奠定基础。

2 数据和方法

气温数据来自中国气象局发布的中国 2374 站均一化日最高气温资料,时段为 1983—2017 年。环流资料来自美国国家环境预报中心/国家大气研究中心(NCEP/NCAR)再分析资料,要素包括日平均的高度场、风场、比湿场以及月平均高度场、风场和温度场,水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,日平均地面短波辐射,水平分辨率为 T62 高斯网格,南北向从 88.542°N 到 88.542°S 共 94 个格点,东西向为 192 个格点,格距为 1.875° 。海表温度资料使用美国国家海洋和大气局(NOAA)的月海表温度(ERSST V4),水平分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 。

鉴于不同定义下的高温其实际影响不同,在此采用绝对阈值定义高温事件,所选区域内超 1/3 的站点日最高气温超过 35°C 则定义为所选区域的高温日。高温日确定后,采用分步聚类方法对高温日的最高气温分布进行聚类分析。聚类分析广泛应用于大气科学的分型研究中,在高温热浪的分型研究中也广泛采用(Stefanon, et al, 2012; Wang, et al, 2018)。具体计算如下:假设共有高温日 n d,将一日的站点温度距平数据看作是一个多维向量,第

一步将欧氏距离最小的两个向量合并归为一类,并将其均值作为类中心,产生 $n-1$ 类,重复上面步骤,在第 $n-1$ 步将高温分为一类。不同强度、范围和不同高温中心的高温变量之间欧式距离较大,因此该聚类方法能很好地将其区别。文中其他的分析方法主要有合成分析、Plumb 波作用通量(Plumb, 1985)和 t 检验。将研究时段(1983—2017 年 35 a)的各变量均值作为气候态,所有变量距平场的计算也是相对于 35 a 气候态进行的。

3 南方高温的时、空变化与分型

3.1 高温的时、空变化

从中国 1983—2017 年年平均高温日数的空间分布(图 1a)可以看出,新疆地区和南方地区是高温的频发区,年均高温日数超过 20 d,华北地区年平均为 8—10 d,其余大部分地区(尤其是东北与青藏高原)高温发生频率较低,年平均高温日数都不足 3 d。中国东部地区高温主要集中在江淮、江汉、江南和华南地区,其中江南地区年均高温日数约 30 d,华南、江淮和江汉地区高温日数约 20 d,基于此,将研究区域选择在 108°E 以东, 33°N 以南的高温频发区域(图中红框标识区域),共 750 个站点。

从不同月份南方地区高温日数的年际变化(图 1b)可见,年总高温日数的变化呈现明显的上升趋势,其中,2003 年与 2013 年是高温日最多的两年。从逐月的高温日数变化可以看出,7 月是高温发生最多的月份,其次是 8 月(有 7 年高温天数超过 7 月),6 月和 9 月的高温日数较少且年变化幅度小。为了更好地进行对比与分析,将研究时段选定在 7—8 月的盛夏时期。所选区域在盛夏时段共有 731 d 发生了高温事件,约为 21 d/a,占盛夏时段的 1/3。

3.2 南方盛夏高温分型

利用聚类分析方法将南方高温日温度距平的空间分布进行分类,通过对比发现将高温分为 3 种类型相对合理,能将不同的高温中心较好地分离,同时类间的区别较大。将高温类型按照相对高温中心所在的区域命名,第一类高温中心区域在江淮地区,简称为江淮型(JH)(图 2a)。江淮型高温发生时,其中心区域日均温度距平接近 3°C ,江南北部和江汉东部地区的最高气温距平也大于 1.5°C 。江淮

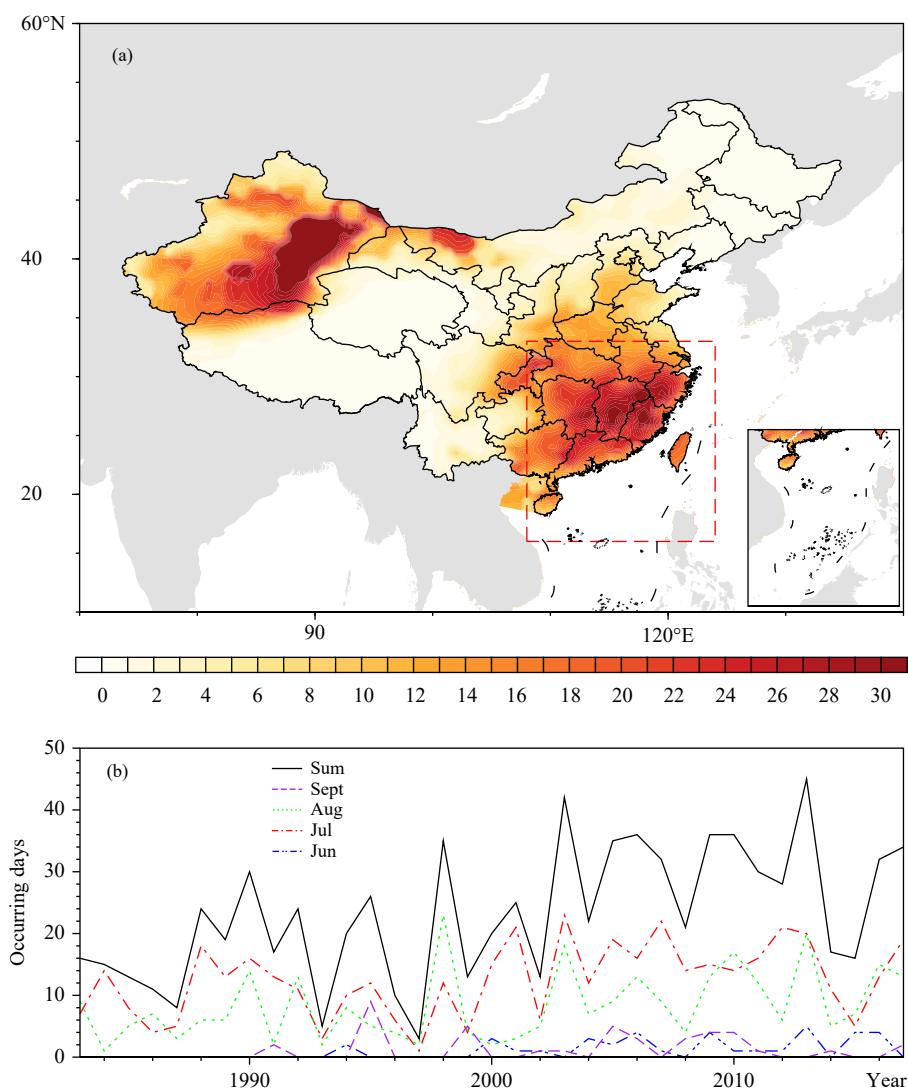


图 1 (a) 1983—2017 年中国年均高温日数的空间分布 (单位: d), (b) 南方地区 6—9 月各月高温日数 (单位: d) 年际变化 (黑色实线为 6—9 月高温日数总和)

Fig. 1 (a) Spatial distribution of annual average number of hot days in China during 1983–2017 (unit: d), (b) interannual variations of high temperature days (unit: d) from June to September in southern China (the black solid line is the sum of high temperature days from June to September)

型高温是出现频率最高的一类高温,在所有高温日数中占比超过 56%,从高温年际变化也可以看出此类高温有明显的增长趋势(图 2d)。2013 年是江淮型高温日数最多的一年,这符合 2013 年江淮地区发生了大范围持续性高温的特点。第二类高温中心区域位于江南南部到华南地区,称之为华南型高温(SC)(图 2b)。华南型高温中心区域主要集中在广东、福建、江西和湖南的南部,中心区域温度距平约为 1.5℃,华南型高温发生时,在江淮地区最高气温为负距平。华南型高温共有 83 d,在所有高温

日数中占比 11.35%,属于发生频率相对较少的高温类型,2003 年是华南型高温发生日数最多的一年,符合 2003 年中国南方尤其是华南持续性高温的特点。第三类高温的中心区域主要在华中地区的湖北省和湖南省,称之为华中型(CC)(图 2c)。由于华中地区最高气温的气候值较高,因此较小的正距平即会出现高温天气,华中型高温发生时,在东部沿海地区最高气温接近气候态。华中型高温共有 238 d,是较为频繁的高温型,在所有高温日数中占比 32.56%。

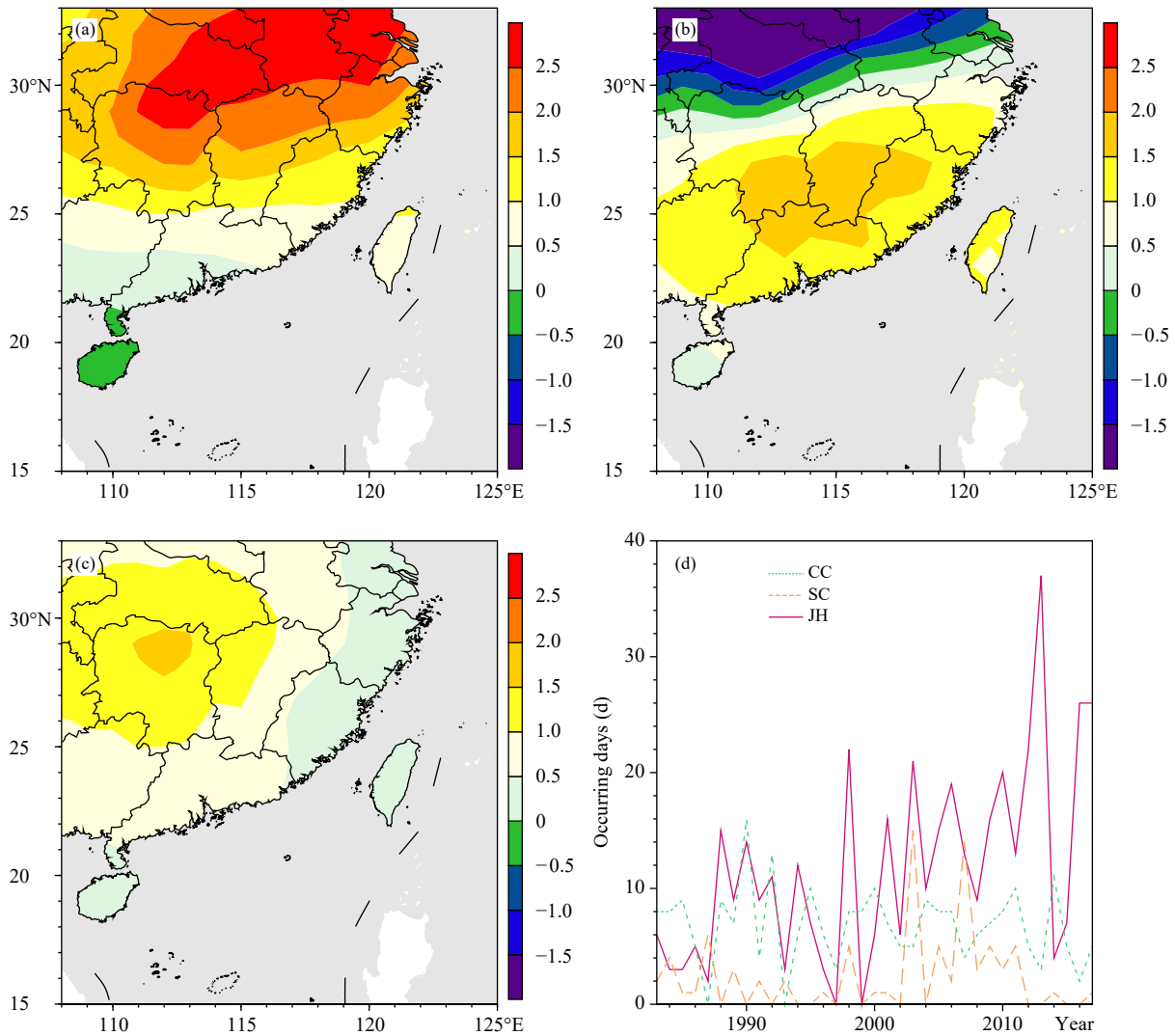


图2 江淮型(a)、华南型(b)和华中型(c)高温日温度距平合成(单位: °C)及3种类型高温日数年际变化(d)

Fig. 2 Composite daily temperature anomalies for Jianghuai type (a), South China type (b) and Central China type (c), respectively (unit: °C), and interannual variations of high temperature days for the three types (d)

4 各类型高温对应的环流系统

4.1 江淮型高温的环流特征

利用NCEP日环流资料将高温发生日的环流进行合成分析,继而讨论不同类型高温对应的环流配置。江淮型高温发生时的高空环流主要表现在200 hPa高度场有强的正距平,风场上表现为反气旋式异常,覆盖范围很广,控制了(30°—45°N, 90°—130°E)区域(图3a)。在对流层中部的500 hPa强的高度场正距平较200 hPa有所南移,范围也有所减小,主要位于以江淮地区为中心的江南南部到华东南部一带,西太副高显著偏强,且呈现明显的西

伸特征(图3b),脊线位置较气候值略有偏北,江淮地区在强的西太副高控制下盛行下沉气流(图3c),下沉气流能加强非绝热加热使得气温升高,其北侧的华北地区有一上升气流带。在对流层低层的850 hPa,高度场正距平的范围进一步减小,位置南移,江淮地区为异常反气旋环流控制,华南和南海地区西风减弱,在北方地区西风有所增强(图3d),高温中心区域距平高度场纬向平均(高温中心区域10°经度平均)随纬度变化的垂直剖面(图略)呈现高度场正异常随着高度降低而略向南偏移的斜压结构。在反气旋控制下,江淮地区水汽明显偏少,太阳短波辐射明显增强(图3e、f)。高-中-低层的

环流配置对江淮高温非常有利,深厚的反气旋异常及其对应的下沉气流是江淮型高温的主要影响环流因子。江淮高温是西太副高控制下的高温,近年来西太副高的偏西趋势(图略)可能是江淮型高温增长趋势的原因之一(Gu, et al, 2017)。江淮高温对应环流异常是典型的季风型环流异常,除了造成江淮地区的高温,还有利于水汽向中国北方地区输

送,使华北地区水汽明显增多、太阳辐射减少,降水增多。

4.2 华南型高温的环流特征

图4给出了华南型高温对应的环流特征,与江淮型高温不同,在对流层高层,华南型高温对应反气旋的强度和范围均较小,中心位于30°N附近,位置明显偏南,风场上也表现为西风急流的位置偏南

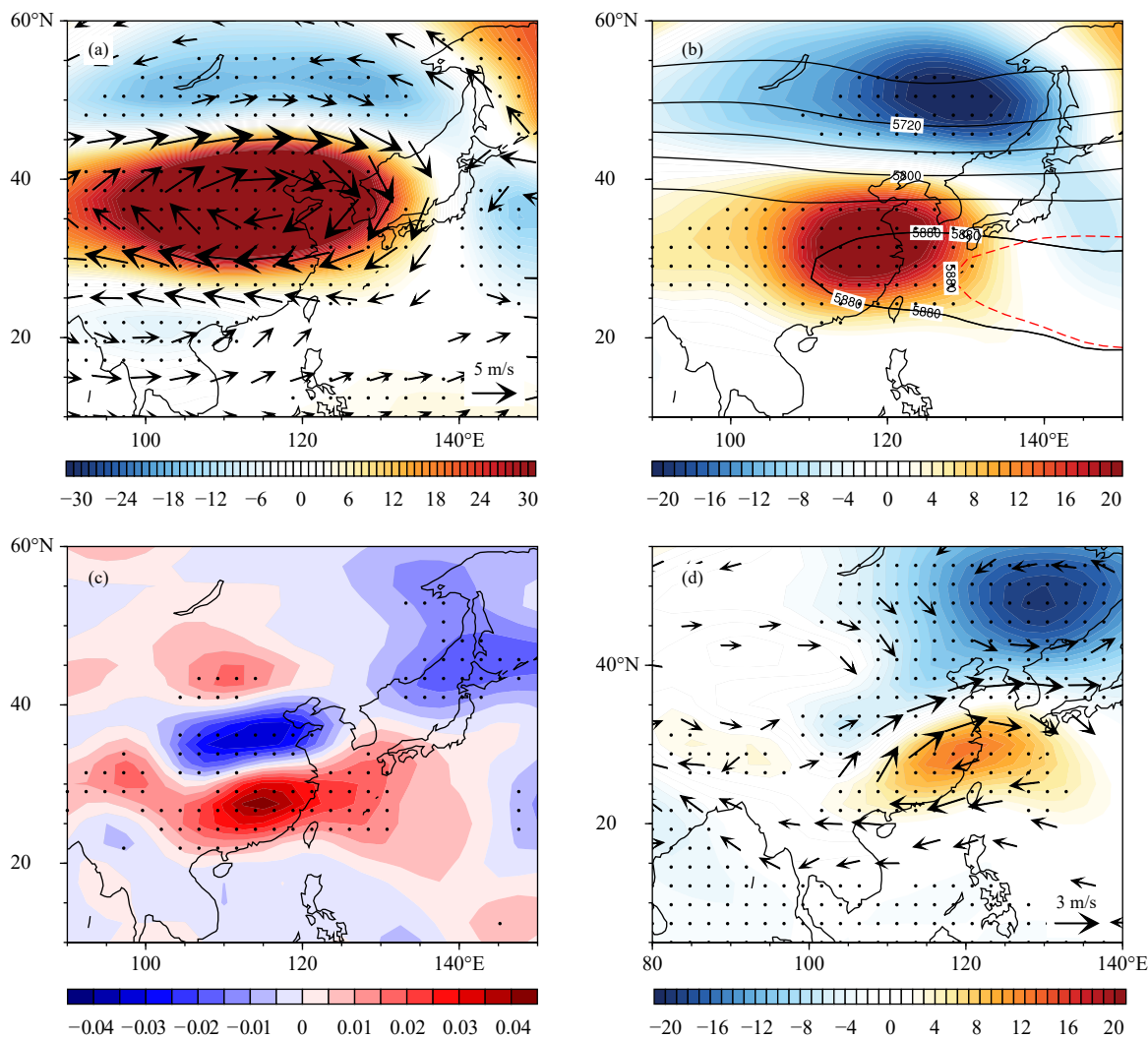
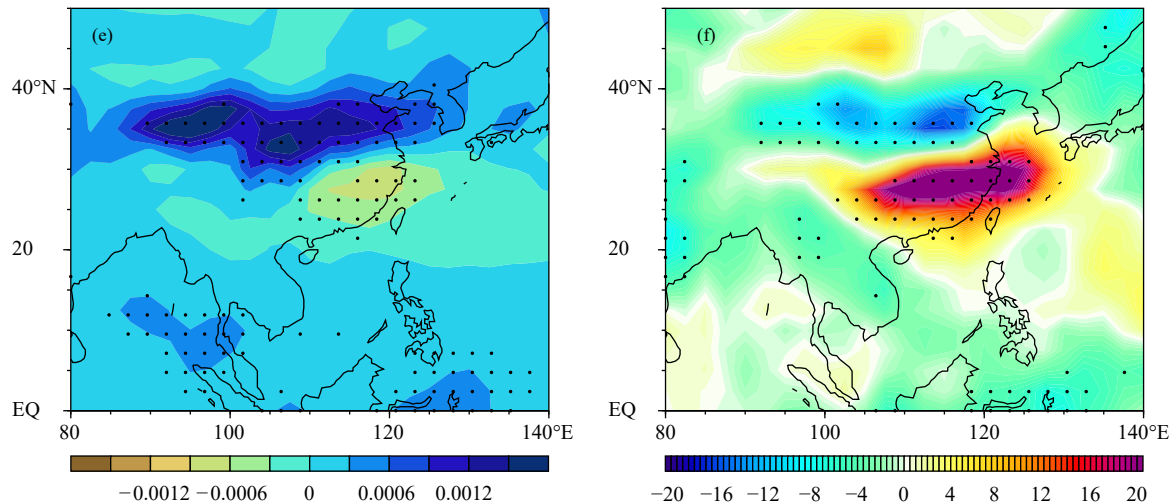


图3 江淮型高温日环流合成 (a. 200 hPa 位势高度距平 (色阶, 单位: gpm) 和风速距平 (矢量), b. 500 hPa 位势高度距平 (色阶, 单位: gpm) 和位势高度 (黑色实线, 单位: gpm, 红色虚线为气候态 5880 gpm 等值线), c. 500 hPa 垂直速度距平 (色阶, 单位: m/s), d. 850 hPa 位势高度距平 (色阶, 单位: gpm) 和风速距平 (矢量), e. 850 hPa 比湿距平 (色阶, 单位: kg/kg), f. 地面短波辐射距平 (色阶, 单位: W/(m²·s)); 打点区域为通过 0.05 显著性水平 *t* 检验, 只有通过 0.05 显著性水平的风场被画出)

Fig. 3 Composite daily circulation corresponding to Jianghuai type high temperature (a. 200 hPa geopotential height anomalies (shaded, unit: gpm) and wind anomalies (vectors); b. 500 hPa geopotential height anomalies (shaded, unit: gpm) and geopotential height (black solid contours, unit: gpm, the red dotted line indicates climatological line 5880 gpm; c. 500 hPa vertical velocity anomalies (shaded, unit: m/s); d. 850 hPa geopotential height anomalies (shaded, unit: gpm) and wind anomalies (vectors); e. 850 hPa specific humidity anomalies (shaded, unit: kg/kg); f. ground short-wave radiation anomalies (shaded, unit: W/(m²·s)); dotted areas are for values significant at 0.05 level by *t*-test, only wind fields that are significant at the 0.05 level by *t*-test are plotted)



续图 3

Fig. 3 Continued

(图 4a)。在对流层中层,高度场正距平位于江南到华南地区,该地区盛行下沉气流,西太副高表现为偏强西伸的特征,脊线位置偏南,主要控制中国江南和华南东部地区(图 4b、c)。在对流层低层以华南为中心呈现显著的反气旋式异常,该反气旋异常的强度相对江淮型偏南、偏弱,与西太副高的位置和强度相对应。江淮地区有西风加强,同时在中国南海地区有东北风异常(图 4d)。对比水汽异常(图 4e)可以看出,华南型高温水汽最少,水汽明显偏少的地区从华南延伸到中南半岛和孟加拉湾,而长江中下游地区水汽含量偏高,北方大部分地区水汽含量明显偏低。孟加拉湾是华南地区夏季水汽最重要的来源,华南型高温发生时西南季风明显较弱,孟加拉湾到中国南海的水汽源地对华南的水汽输送减少,造成了华南地区的干热和强烈的太阳辐射(图 4d、f)(Chen, et al, 2015),华南型高温中心区域比湿距平百分率为 -7.66% ,而华中型和江淮型高温中心区域的比湿距平百分率分别为 -1.80% 和 -4.31% ,因此华南型高温的干热特征更为明显。华南型高温也是西太副高直接控制下的高温,与季风环流密切相关,副高偏南、东亚夏季风偏弱以及东亚副热带急流偏南导致高温发生在华南地区。

4.3 华中型高温的环流特征

图 5 给出了华中型高温对应的高、中、低层环流形势。在对流层高层的反气旋主要位于中国的北方地区,其主体均在大陆上,反气旋的南北位置介于江淮型和华南型之间,东西位置则表现为更偏

西的特征(图 5a)。在对流层中层华中和华南西部地区有一个正距平中心,西太副高偏弱偏东(图 5b),华中地区并未受到西太副高的直接控制,而是受大陆高压的控制,高度场正距平强度弱于江淮型和华南型,对应的下沉气流也较弱(图 5c),低层反气旋更弱(图 5d),距平高度场的垂直分布(图略)显示华中型高温对应的反气旋异常主要位于对流层中上层,低层的异常并不明显,且低层的水汽也接近正常,并未显著减少(图 5e),太阳短波辐射有所减小(图 5f),但减小的程度并不显著。因此,华中型高温为大陆高压控制下的高温,其环流异常强度相对西太副高直接控制下的江淮型和华南型高温强度较弱,由于水汽条件好于江淮型和华南型高温,因此华中型高温更为闷热。

5 高温环流异常与海表温度的联系

5.1 江淮型高温的海表温度异常

前面的分析发现,江淮型高温对应的环流特征主要体现为西太副高偏强、偏西,脊线接近常年到略偏北。因此,将西太副高偏强、偏西,脊线略偏北,且江淮型高温较为频发年(1990、1995、2007、2010 和 2013 年)进行合成分析显示,气温的距平与江淮型高温对应的距平不论是在位置还是相对强度上均较为一致(图 6a),并且在江淮地区通过显著性检验,对应的盛夏 500 hPa 高度场距平也和符合发生江淮型高温时的高度场距平类似(图 6b)。这些年份能较好地代表江淮型高温的特性,因此,进

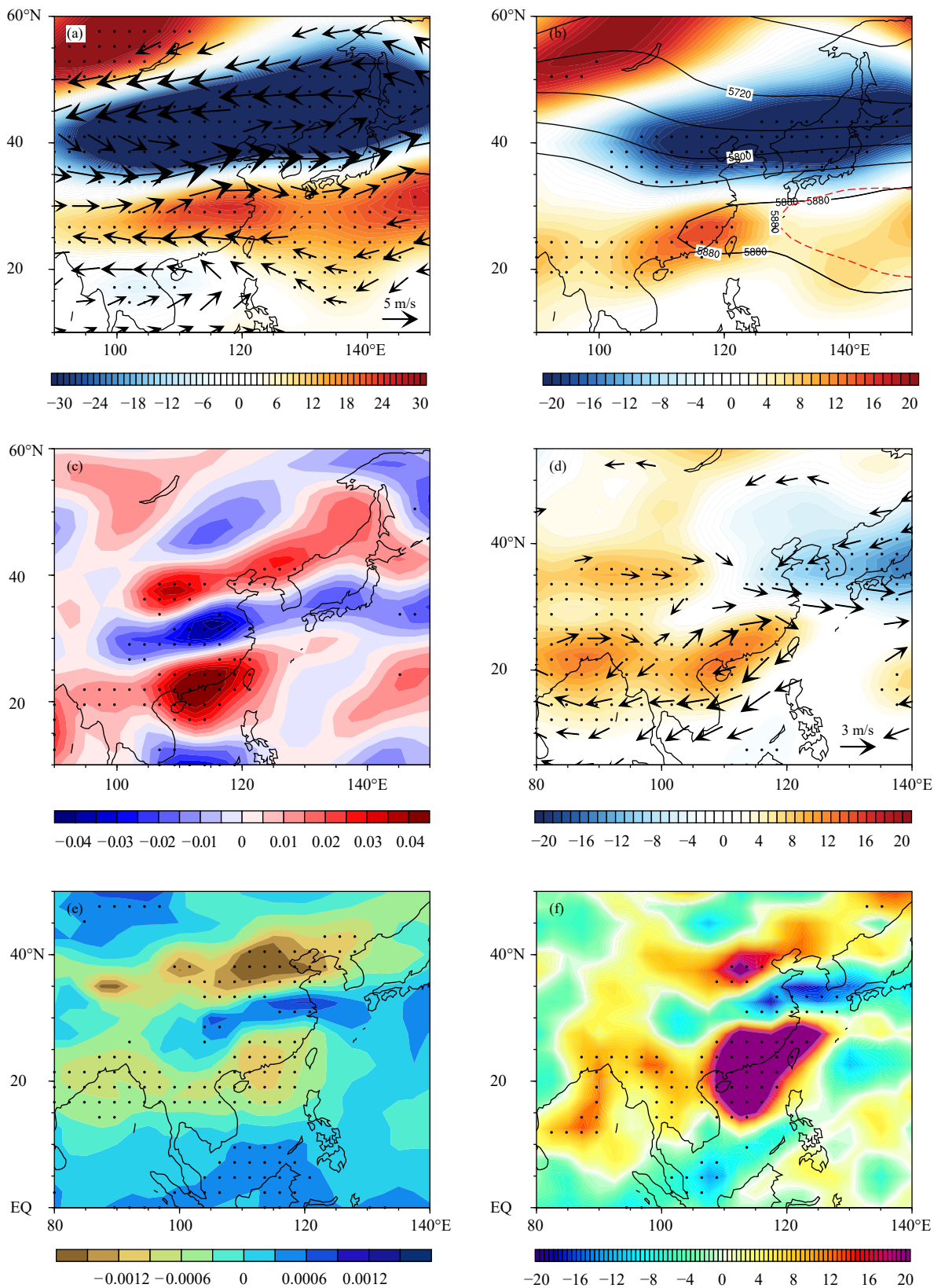


图4 同图3, 但为华南型

Fig. 4 Same as Fig. 3 but for South China type

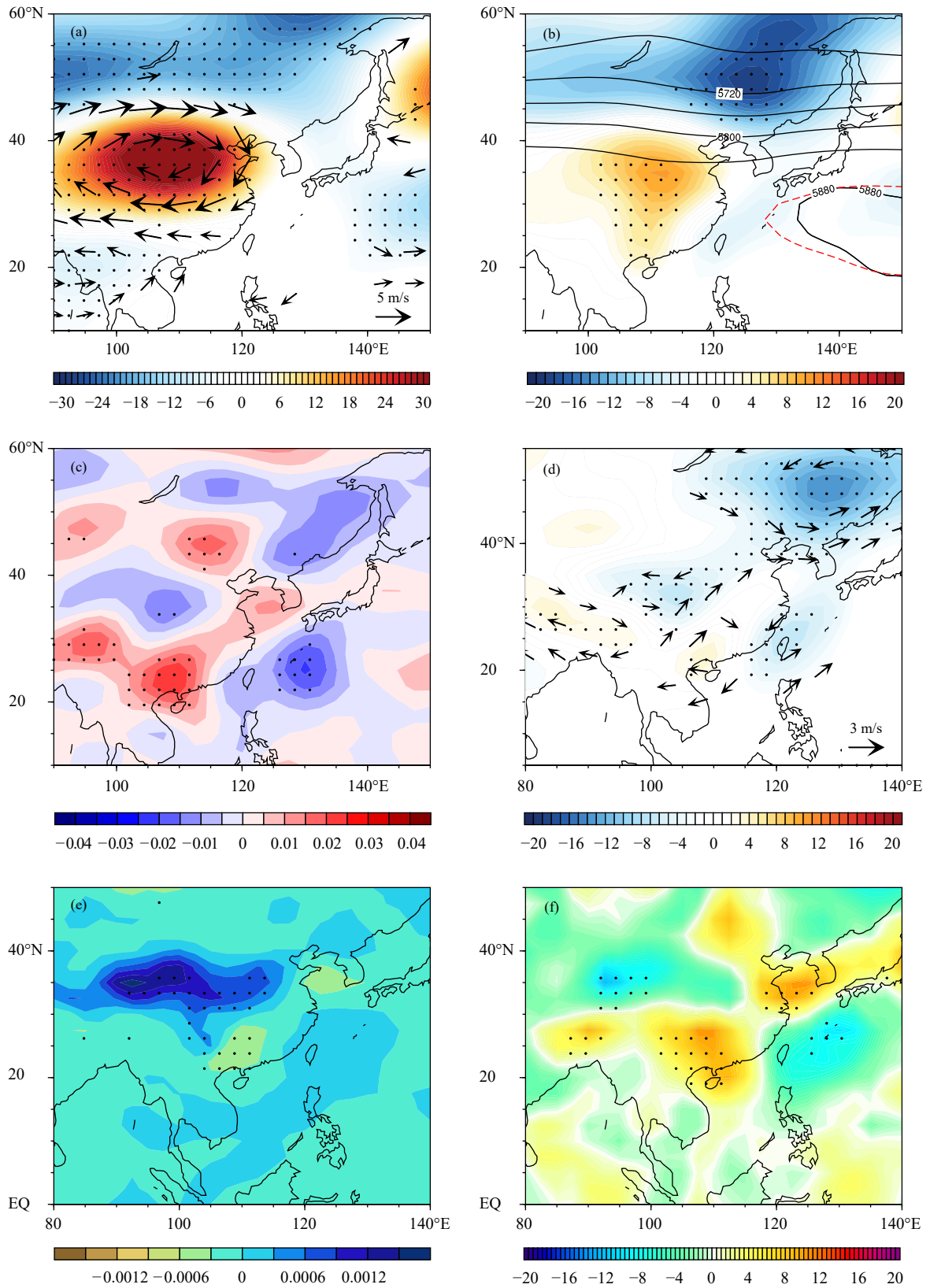


图5 同图3,但为华中型

Fig. 5 Same as Fig. 3 but for Central China type

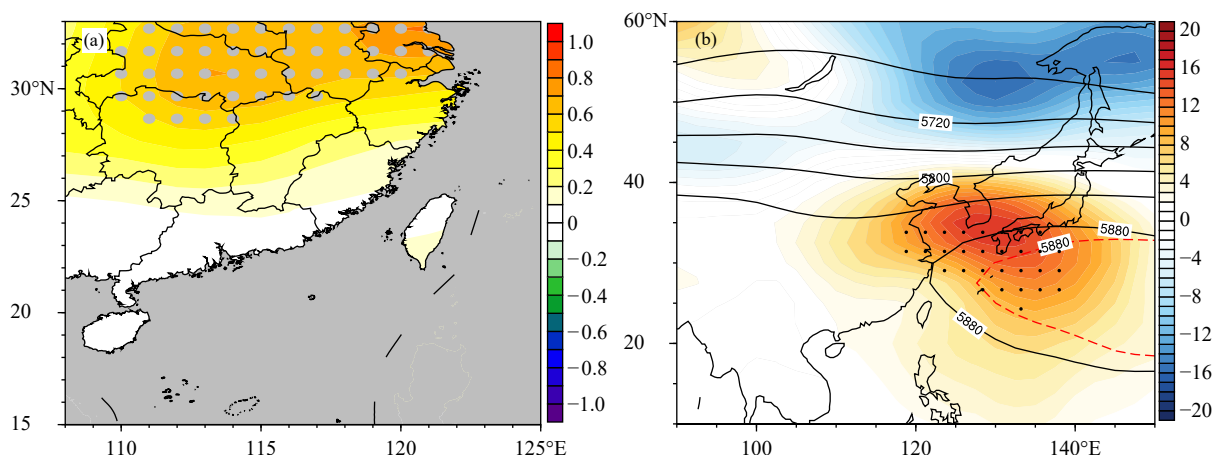


图6 江淮型高温年盛夏 (a) 温度距平 (单位: °C) 合成、(b) 500 hPa 位势高度距平 (色阶, 单位: gpm) 和位势高度 (黑色实线, 单位: gpm; 红色虚线是气候态 5880 gpm 等值线) 合成 (打点区域通过 0.1 显著性水平 t 检验)

Fig. 6 (a) Composite midsummer temperature anomalies (unit: °C), (b) composite 500 hPa geopotential height anomalies (shaded, unit: gpm) and geopotential height (black solid contours, unit: gpm; the red dotted line denotes climatological line 5880 gpm) for Jianghuai type high temperature years (dotted areas are for values significant at 0.1 level by t -test)

一步合成了相同年份的前冬、春季和夏季海表温度距平(图7),其海表温度演变在赤道中太平洋地区呈现出前冬到夏季逐渐降低的特征,前冬在赤道中太平洋地区海表温度偏高,春季衰弱,同时在赤道东太平洋地区海表温度负距平从春季到夏季不断加强,表现出中太平洋型厄尔尼诺衰减的特征。除赤道中太平洋外,春季赤道大西洋地区海表温度也偏高。为了进一步说明海表温度的影响,图8a给出了合成显著的前冬赤道中太平洋区域(10°S—10°N, 180°—160°W)平均海表温度与500 hPa高度的回归分析,结果显示前冬赤道中太平洋海表温度偏高时,盛夏中国南方大部分地区为高度场正距平控制,西太副高偏强,正距平中心主要在日本南部,其南北位置与西太副高的气候态接近。厄尔尼诺衰减年通常伴随着夏季赤道西太平洋地区海表温度偏高,赤道西太平洋地区对流活动加强,局地哈得来环流加强,从而在西太平洋副热带地区产生异常下沉气流,有利于西太副高的加强(Lu, 2001; Sui, et al, 2007; Wu, et al, 2010; Chung, et al, 2011)。在中太平洋型厄尔尼诺衰减年,西太副高的位置相对东部型厄尔尼诺衰减年偏北(Karori, et al, 2013; Feng, et al, 2013; Wang, et al, 2013; Zhou, et al, 2014),东亚季风相对东部型偏弱(Shi, et al, 2018),因此使得高温主要在中国江淮地区发生。20世纪末以来中太平洋型厄尔尼诺有所增多(Yeh, et al, 2009),

江淮型高温的发生频率也呈上升趋势。此外,春季赤道大西洋地区海温的异常偏高也有利于西太副高的加强,从给出的合成显著的春季赤道大西洋区域(0—20°N, 50°—20°W)平均海表温度与500 hPa高度场的回归(图8b)可以看出,春季赤道大西洋海表温度偏高时中国东部地区距平位势高度偏强,且高压中心在江淮的东部地区,这和已有研究(Lu, et al, 2005; Hong, et al, 2014)指出的春季赤道大西洋地区海表温度的异常偏高可以通过影响赤道印度洋-西太平洋东风异常和减少赤道中太平洋地区潜热两个途径影响加强西太副高的结果一致。

5.2 华南型高温的海表温度异常

前面的分析发现,华南型高温对应的西太副高特征为偏强、偏西和偏南,将西太副高偏强、偏西和偏南年(1983、1998、2003、2014、2017年)进行合成分析发现,对应的气温距平呈现东南和华南地区气温偏高,长江以北大部分地区气温正常(图9a),与华南型高温的分布类似,其500 hPa高度场的距平分布与华南型高温对应的500 hPa高度场的距平分布基本一致(图9b),表明西太副高偏强、偏西、偏南的特征有利于华南型高温的发生。因此,为了分析华南型高温对应的海表温度距平特征,以西太副高偏强、偏西、偏南的年份合成前期冬季到夏季的海表温度分布(图10),从合成的海表温度演变可以看出,从冬季到夏季赤道中东太平洋海表温度呈

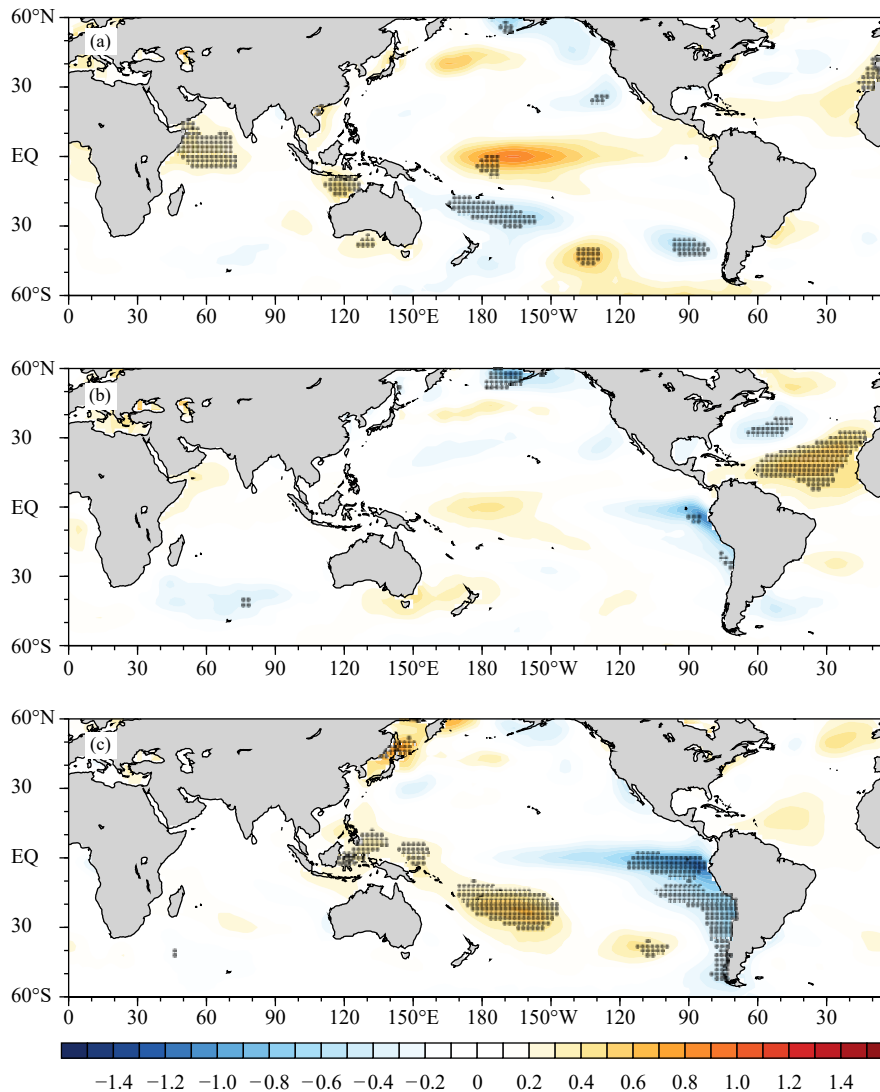


图7 江淮型高温年份前冬(a)、春季(b)和夏季(c)海温距平合成(单位: $^{\circ}\text{C}$; 打点区域通过0.1显著性水平 t 检验)

Fig. 7 Composite sea surface temperature anomalies (unit: $^{\circ}\text{C}$) in the pre-winter (a), spring (b) and summer (c) for Jianghuai type high temperature years (dotted areas are for values significant at 0.1 level by t -test)

现厄尔尼诺衰减型的特征,赤道中东太平洋海表温度在冬季显著偏高,春季减弱,夏季进一步减弱。另外,印度洋海表温度异常在前冬和春季不明显,但到夏季呈现显著偏高的特征,热带西太平洋海表温度为正距平。这种海表温度演变是东部型厄尔尼诺衰减的典型特征,在东部型厄尔尼诺衰减的夏季,西太副高强度偏强且位置偏西、偏南,异常反气旋控制中国的江南、华南地区(Chang, et al, 2000; Wang, et al, 2000),同时,在东部型厄尔尼诺衰减期,印度洋的海洋“电容器”效应使得西太副高在盛夏依然维持偏强、偏南的特征(Xie, et al, 2009; Du, et al, 2009),通过计算合成显著的前冬赤道中

东太平洋区域的平均海表温度和500 hPa高度场回归分析发现,显著正相关区域位于华南地区(图略),与已有的研究结果(Chang, et al, 2000; Wang, et al, 2000)一致。因此,在东部型厄尔尼诺衰减的盛夏,更易发生华南型高温。

5.3 华中型高温的海表温度异常

华中型高温对应环流特征是西太副高偏东,华中地区为大陆高压控制,与江淮型高温和华南型高温类似,根据典型的华中型高温对应的环流特征挑选出华中型高温典型年(2000、2001、2006、2016年)。其温度距平特征与华中型高温特点一致(图11a),华中型高温偏强,而东部沿海地区高温并

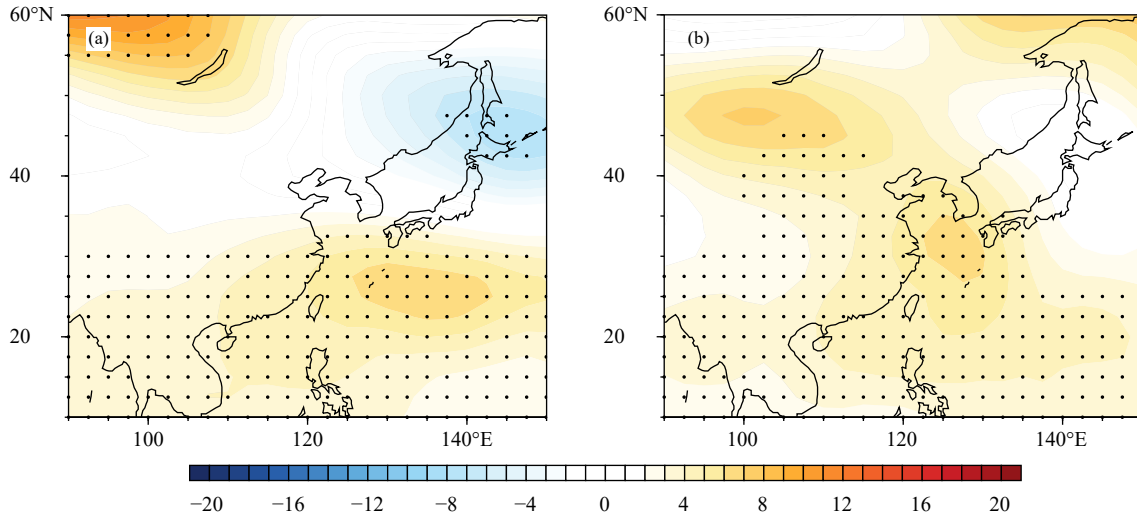


图 8 1983—2017 年前冬赤道中太平洋海温距平 (a)、春季赤道大西洋海温距平 (b) 回归的盛夏 500 hPa 位势高度距平场 (单位: gpm, 打点区域通过 0.05 显著性水平 *t* 检验)

Fig. 8 The pre-winter SST anomalies in the central equatorial Pacific (a) and spring SST anomalies in the equatorial Atlantic (b) regressed to the midsummer 500 hPa geopotential height anomalies from 1983 to 2017 (unit: gpm; dotted areas are for values significant at 0.05 level by *t*-test)

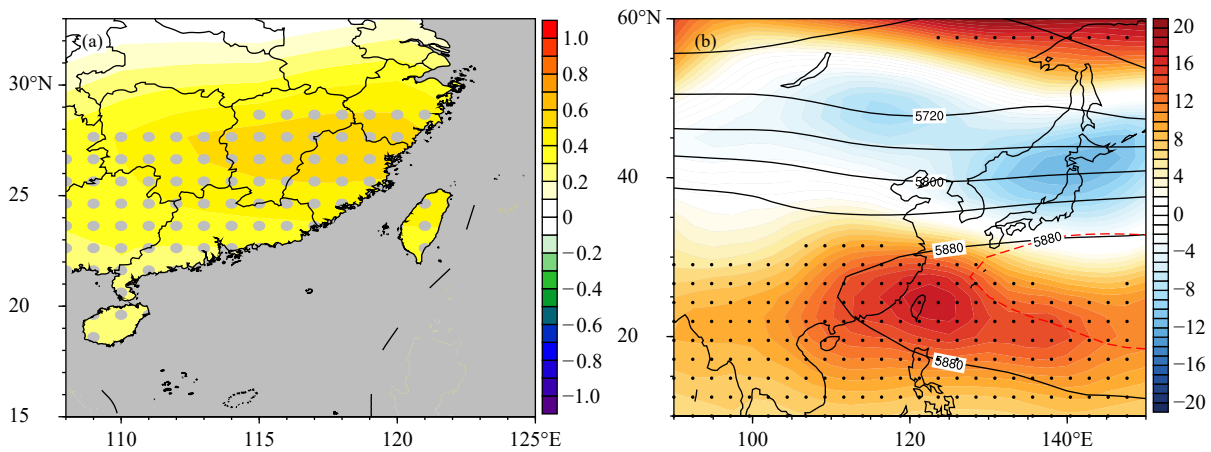


图 9 同图 6, 但为华南型

Fig. 9 Same as Fig. 6 but for South China type

不显著。其环流特征为中国北方为高度场正距平中心, 该正距平南伸到华中地区, 该高度场正距平并不是孤立存在的, 同时在副热带北大西洋、东欧、中东地区为高度场正距平, 而在巴尔喀什湖附近为负距平, 显示出明显的纬向传播的波列特征 (图 11b), 该波列传播特征与夏季的北大西洋-欧亚遥相关型非常类似 (Li, et al, 2018), 而与环球遥相关不论是在波数还是正距平位置都存在不同 (Ding, et al, 2005), Plumb 波作用通量显示在北半球中纬度尤其是欧亚大陆上空存在向东传播的波

能, 证明了各中心之间存在联系 (图 11b)。从进一步给出的华中型高温对应的海温异常的合成场 (图 12) 可以看出, 以中高纬度系统影响为主的华中型高温与可以影响深对流的赤道地区海温联系并不紧密, 北大西洋-欧亚遥相关型是大尺度的罗斯贝波列, 其在中国北方地区的高压中心可能是造成华中地区高温的重要因子 (Li, et al, 2018; Deng, et al, 2019), 但该波列与海表温度异常是否存在明确的物理联系还有待进一步研究, 也暗示受中高纬度波列影响的华中型高温的可预报性相对较低。

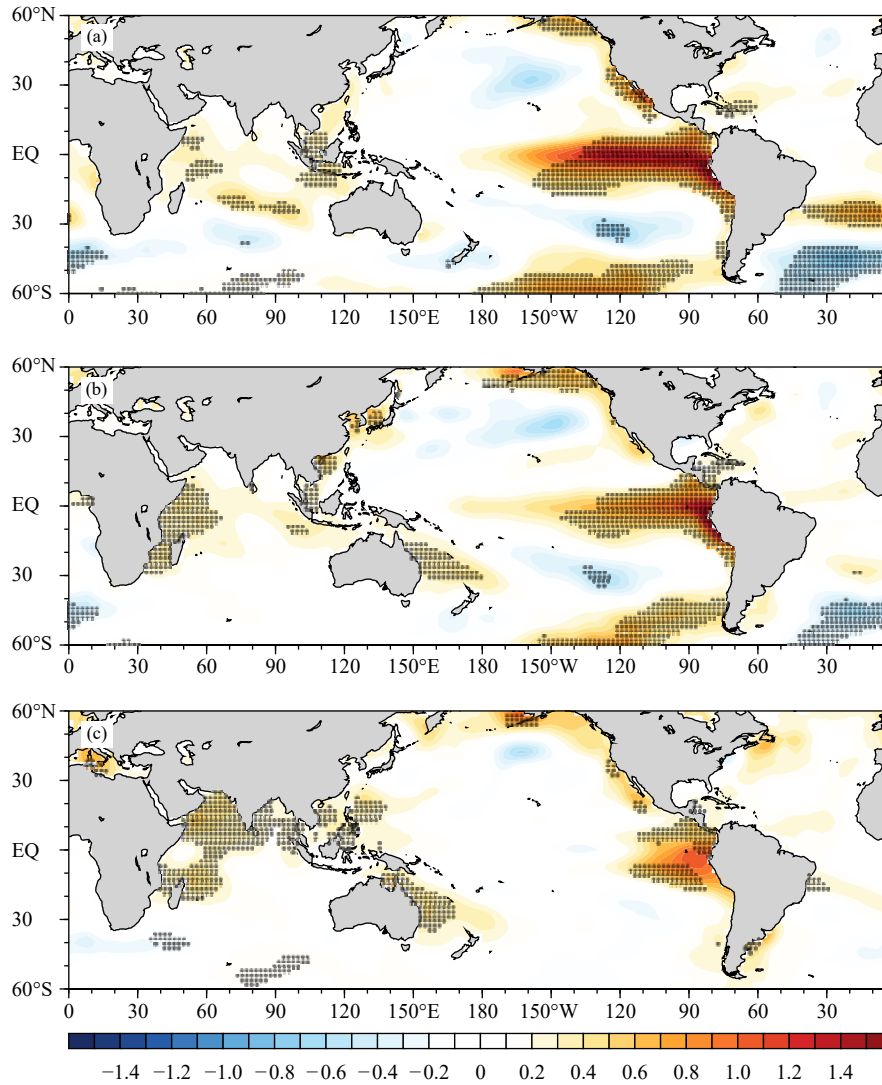


图 10 同图 7, 但为华南型
Fig. 10 Same as Fig. 7 but for South China type

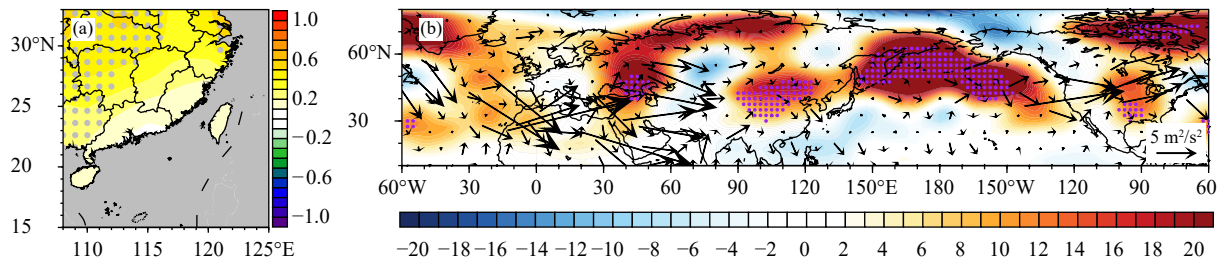


图 11 华中型高温年 (a) 温度距平合成场 (色阶, 单位: °C)、(b) 500 hPa 位势高度距平场 (色阶, 单位: gpm) 和 Plumb 波作用通量合成场 (箭头, 单位: m^2/s^2)
(打点区域通过 0.1 显著性水平 t 检验)

Fig. 11 (a) Composite midsummer temperature anomalies (shaded, unit: °C), (b) composite 500 hPa geopotential height anomalies (shaded, unit: gpm) and Plumb wave flux (vector, unit: m^2/s^2) for Central China type high temperature years (dotted areas are for values significant at 0.1 level by t -test)

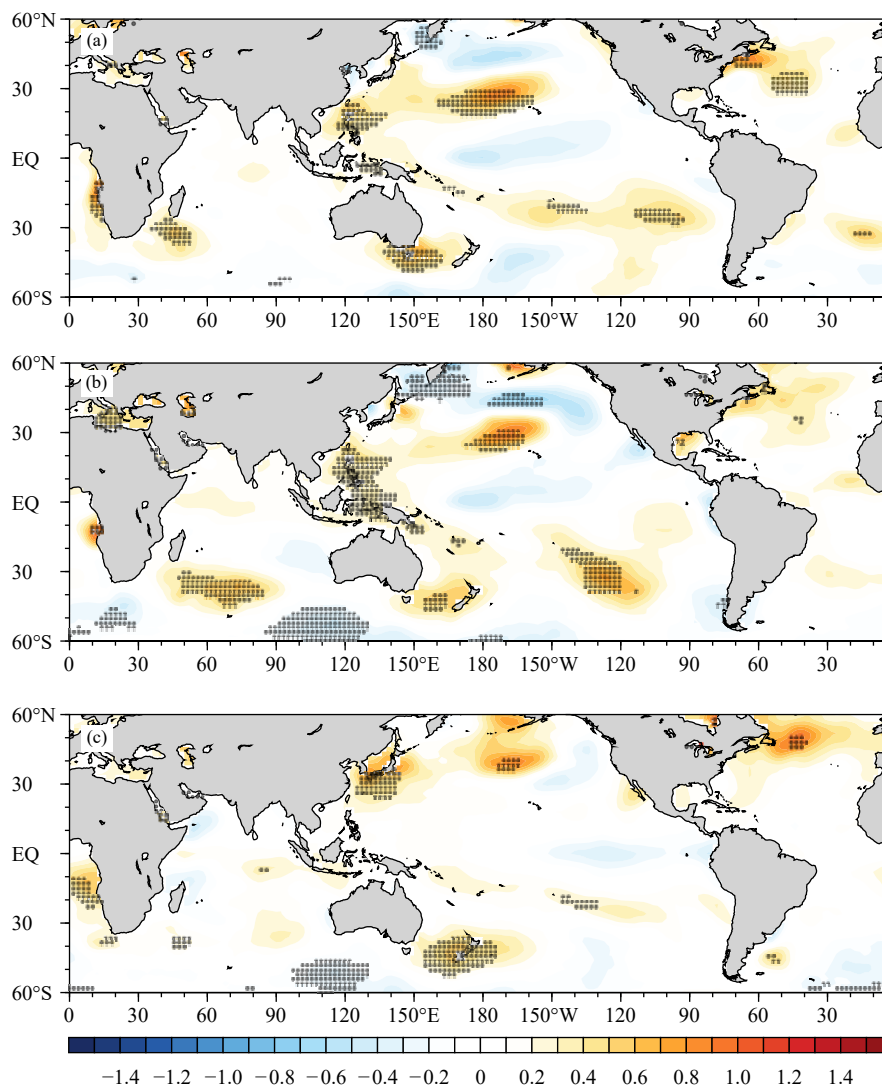


图 12 同图 7, 但为华中型

Fig. 12 Same as Fig. 7 but for Central China type

6 总结与讨论

盛夏是中国高温的高发期, 不同地区高温的环流特征和影响因子存在差异, 利用台站和再分析数据, 研究中国南方地区盛夏高温的时、空变化及其主要的空间分布特征, 分析了不同高温类型的主要环流特征及其与海温异常的可能联系。结论如下:

(1) 中国南方是高温的频发区, 高温日数呈现出显著的增多趋势。将高温日最高温度距平进行聚类分型可主要分为江淮型、华南型和华中型 3 类。江淮型高温中心区域位于江淮地区, 相对强度最强, 范围最广, 是出现频率最高的一类高温, 其年高温日数有明显增多趋势; 华南型高温中心区域

在江南南部到华南地区, 强度较强, 是出现频率最低的一类高温; 华中型高温主要位于湖北和湖南省, 相对强度最弱, 出现频率较高。

(2) 图 13 总结了 3 种高温类型的特点及其对应的大尺度环流和海温异常的异同点。从环流对比看, 江淮型高温发生时对应着高低空的反气旋异常, 在对流层中层体现为西太副高偏强, 南北位置接近常年到略偏北的特点, 显示其为西太副高控制下的高温; 影响华南型高温成因的主要环流系统是西太副高偏强、西伸和脊线偏南, 西风急流的位置偏南, 华南型高温也是西太副高直接控制下的高温, 与季风环流密切相关, 且由于西南季风的偏弱, 华南的水汽输送显著偏少, 华南地区的高温干热特

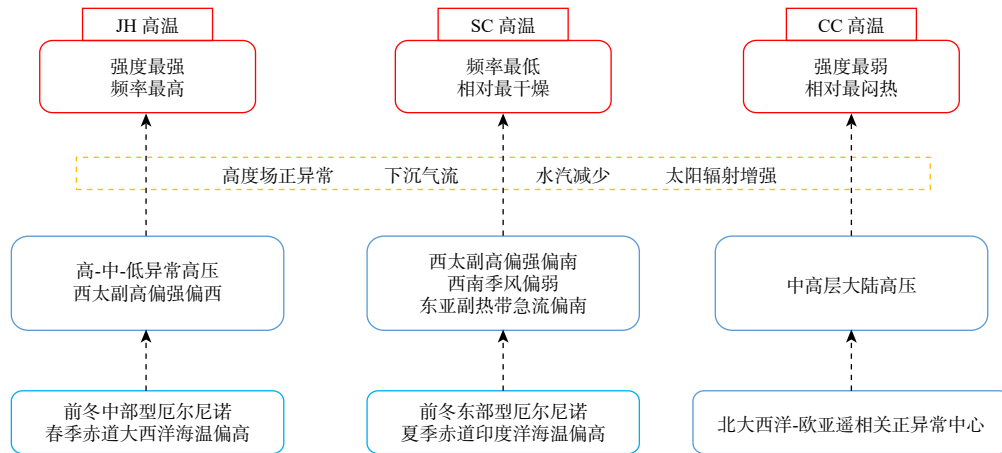


图 13 3 种高温型的特点及其与环流和海温的联系

Fig. 13 Characteristics of three high temperature types and their relationships with circulation and SST

征最为明显; 华中型高温主要受中高层的大陆高压控制, 西太副高偏弱偏东, 由于水汽条件好于江淮型和华南型, 其表现为更闷热的高温。

(3) 从海表温度对比看, 影响江淮型高温环流系统的主要海表温度异常是从前冬到夏季中太平洋型厄尔尼诺衰减, 春季赤道大西洋地区海表温度偏高, 两个地区海表温度异常均有利于西太副高的偏强西伸, 脊线位置呈现略偏北的特征, 使得江淮地区受高度场正距平控制, 盛行下沉气流, 气温偏高; 华南型高温的环流异常主要发生在厄尔尼诺衰减的夏季, 热带太平洋、热带印度洋的海表温度演变有利于西太副高强度偏强且位置偏西偏南, 异常反气旋控制中国的江南、华南地区, 易发生华南型高温; 华中型高温与热带海温异常的关系并不明显, 北大西洋-欧亚遥相关型可能是造成华中地区高温的重要因子。

通过分析得出, 聚类分型能较好地将中国南方地区的不同强度、范围和中心的高温分离出来, 其成因、主导环流与海表温度外强迫有显著的差异, 这对高温预测的改进有一定的指示意义。但是影响高温环流的因子还有很多, 除了海表温度影响外, 一些研究指出, 大气内部低频变率, 例如, 北大西洋涛动通过影响中高纬度环流系统而对中国的高温造成影响 (Deng, et al, 2019), 北极变暖通过改变罗斯贝波的传播速度也会影响高温热浪的持续时间 (Francis, et al, 2012; Screen, et al, 2014), 这些都还需要进一步研究。同时, 不同物理机制影响下的高温事件, 其可预报性的差异也有待进一步认识。

参考文献

- 高荣, 王凌, 高歌. 2008. 1956—2006 年中国高温日数的变化趋势. *气候变化研究进展*, 4(3): 177-181. Gao R, Wang L, Gao G. 2008. The trend of variation in high temperature days during 1956—2006 in China. *Adv Climate Change Res*, 4(3): 177-181 (in Chinese)
- 彭海燕, 周曾奎, 赵永玲等. 2005. 2003 年夏季长江中下游地区异常高温的分析. *气象学报*, 25(4): 355-361. Peng H Y, Zhou Z K, Zhao Y L, et al. 2005. The analysis of abnormal high temperature in 2003 summer. *Sci Meteor Sinica*, 25(4): 355-361 (in Chinese)
- 彭京备, 张庆云, 布和朝鲁. 2007. 2006 年川渝地区高温干旱特征及其成因分析. *气候与环境研究*, 12(3): 464-474. Peng J B, Zhang Q Y, Bueh C. 2007. On the characteristics and possible causes of a severe drought and heat wave in the Sichuan-Chongqing region in 2006. *Clim Environ Res*, 12(3): 464-474 (in Chinese)
- 秦大河. 2007. 气候变暖中国经济面临严峻挑战. *中国气象报*, 2007-03-18(1). Qing D H. 2007. China's economy faces severe challenges from climate change. *China Meteorological News*, 2007-03-18(1) (in Chinese)
- 孙建奇. 2014. 2013 年北大西洋破纪录高海温与我国江淮-江南地区极端高温的关系. *科学通报*, 59(27): 2714-2719. Sun J Q. 2014. Record-breaking SST over mid-North Atlantic and extreme high temperature over the Jianghuai-Jiangnan region of China in 2013. *Chinese Sci Bull*, 59(27): 2714-2719 (in Chinese)
- 许霜, 付加锋, 居辉等. 2014. 华北地区能源行业产出对气象条件变化的敏感性分析. *资源科学*, 36(3): 538-548. Xu S, Fu J F, Ju H, et al. 2014. Sensitivity analyses of the energy output impacted by meteorological disasters in North China. *Resour Sci*, 36(3): 538-548 (in Chinese)
- 杨涵涌, 封国林. 2016. 2013 年盛夏中国持续性高温事件诊断分析. *高原气象*, 35(2): 484-494. Yang H W, Feng G L. 2016. Diagnostic analyses of characteristics and causes of regional and persistent high temperature event in China. *Plateau Meteor*, 35(2): 484-494 (in Chinese)
- 杨宏青, 陈正洪, 谢森等. 2013. 夏季极端高温对武汉市人口超额死亡率的定量评估. *气象与环境学报*, 29(5): 140-143. Yang H Q, Chen Z H, Xie

- S, et al. 2013. Quantitative assessment of impact of extreme high temperature in summer on excess mortality in Wuhan. *J Meteor Environ*, 29(5): 140-143 (in Chinese)
- 杨辉, 李崇银. 2005. 2003 年夏季中国江南异常高温的分析研究. *气候与环境研究*, 10(1): 80-85. Yang H, Li C Y. 2005. Diagnostic study of serious high temperature over South China in 2003 summer. *Clim Environ Res*, 10(1): 80-85 (in Chinese)
- 尹东屏, 严明良, 裴海瑛等. 2006. 副热带高压控制下的高温天气特征分析. *气象科学*, 26(5): 558-563. Yin D P, Yan M L, Pei H Y, et al. 2006. Synoptic character analysis on high temperature appearing under the control of subtropical high. *Sci Meteor Sinica*, 26(5): 558-563 (in Chinese)
- 袁媛, 丁婷, 高辉等. 2018. 我国南方盛夏气温主模态特征及其与海温异常的联系. *大气科学*, 42(6): 1245-1262. Yuan Y, Ding T, Gao H, et al. 2018. Major modes of midsummer air temperature in Southern China and their relationship with sea surface temperature anomalies. *Chinese J Atmos Sci*, 42(6): 1245-1262 (in Chinese)
- 张小泉, 王文, 傅帅等. 2015. 副高和南亚高压对 2013 年夏季浙江省异常高温的影响. *浙江大学学报(理学版)*, 42(S1): 101-105. Zhang X Q, Wang W, Fu S, et al. 2015. The influence of subtropical high and the South Asia high on abnormal high temperature in Zhejiang Province in the summer of 2013. *J Zhejiang Univ (Sci Ed)*, 42(S1): 101-105 (in Chinese)
- Alexander L. 2011. Extreme heat rooted in dry soils. *Nat Geosci*, 4(1): 12-13
- Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J Geophys Res*, 111(D5): D05109
- Black E, Blackburn M, Harrison G, et al. 2004. Factors contributing to the summer 2003 European heatwave. *Weather*, 59(8): 217-223
- Chang C P, Zhang Y S, Li T. 2000. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part I: Roles of the subtropical ridge. *J Climate*, 13(24): 4310-4325
- Chen R D, Lu R Y. 2015. Comparisons of the circulation anomalies associated with extreme heat in different regions of Eastern China. *J Climate*, 28(14): 5830-5844
- Chung P H, Sui C H, Li T. 2011. Interannual relationships between the tropical sea surface temperature and summertime subtropical anticyclone over the western North Pacific. *J Geophys Res*, 116(D13): D13111
- Deng K Q, Yang S, Ting M F, et al. 2019. Dominant modes of China summer heat waves driven by global sea surface temperature and atmospheric internal variability. *J Climate*, 32(12): 3761-3775
- Ding Q H, Wang B. 2005. Circumglobal teleconnection in the Northern Hemisphere summer. *J Climate*, 18(17): 3483-3505
- Dole R, Hoerling M, Perlwitz J, et al. 2011. Was there a basis for anticipating the 2010 Russian heat wave?. *Geophys Res Lett*, 38(6): L06702
- Dong S Y, Xu Y, Zhou B T, et al. 2015. Assessment of indices of temperature extremes simulated by multiple CMIP5 models over China. *Adv Atmos Sci*, 32(8): 1077-1091
- Dong S Y, Sun Y, Aguilar E, et al. 2018. Observed changes in temperature extremes over Asia and their attribution. *Climate Dyn*, 51(1-2): 339-353
- Du Y, Xie S P, Huang G, et al. 2009. Role of air-sea interaction in the long persistence of El Niño-induced North Indian Ocean warming. *J Climate*, 22(8): 2023-2038
- Easterling D R, Meehl G A, Parmesan C, et al. 2000. Climate extremes: Observations, modeling, and impacts. *Science*, 289(5487): 2068-2074
- Feng J, Li J P. 2013. Contrasting impacts of two types of ENSO on the boreal spring Hadley circulation. *J Climate*, 26(13): 4773-4789
- Francis J A, Vavrus S J. 2012. Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes. *Geophys Res Lett*, 39(6): L06801
- García-Herrera R, Díaz J, Trigo R M, et al. 2005. Extreme summer temperatures in Iberia: Health impacts and associated synoptic conditions. *Ann Geophys*, 23(2): 239-251
- Gu B H, Zheng Z H, Feng G L, et al. 2017. Interdecadal transition in the relationship between the western Pacific subtropical high and sea surface temperature. *Int J Climatol*, 37(5): 2667-2678
- Guo X J, Huang J B, Luo Y, et al. 2017. Projection of heat waves over China for eight different global warming targets using 12 CMIP5 models. *Theor Appl Climatol*, 128(3-4): 507-522
- Hong C C, Chang T C, Hsu H H. 2014. Enhanced relationship between the tropical Atlantic SST and the summertime western North Pacific subtropical high after the early 1980s. *J Geophys Res*, 119(7): 3715-3722
- Hu K M, Huang G, Huang R H. 2011. The impact of tropical Indian Ocean variability on summer surface air temperature in China. *J Climate*, 24(20): 5365-5377
- IPCC. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 1535pp
- Karori M A, Li J P, Jin F F. 2013. The asymmetric influence of the two types of El Niño and La Niña on summer rainfall over Southeast China. *J Climate*, 26(13): 4567-4582
- Lau N C, Nath M J. 2012. A model study of heat waves over North America: Meteorological aspects and projections for the twenty-first century. *J Climate*, 25(14): 4761-4784
- Li J P, Ruan C Q. 2018. Corrigendum: The North Atlantic-Eurasian teleconnection in summer and its effects on Eurasian climates. *Environ Res Lett*, 13(2): 024007
- Loikith P C, Broccoli A J. 2012. Characteristics of observed atmospheric circulation patterns associated with temperature extremes over North America. *J Climate*, 25(20): 7266-7281
- Lu R Y. 2001. Interannual variability of the summertime North Pacific subtropical high and its relation to atmospheric convection over the warm pool. *J Meteor Soc Jpn*, 79(3): 771-783
- Lu R Y, Dong B W. 2005. Impact of Atlantic sea surface temperature anomalies on the summer climate in the western North Pacific during 1997—1998. *J Geophys Res*, 110(D16): D16102
- Lu R Y, Chen R D. 2016. A review of recent studies on extreme heat in China. *Atmos Ocean Sci Lett*, 9(2): 114-121
- Papalexiou S M, Aghakouchak A, Trenberth K E, et al. 2018. Global, regional, and megacity trends in the highest temperature of the year:

- Diagnostics and evidence for accelerating trends. *Earth's Future*, 6(1): 71-79
- Peng S B, Huang J L, Sheehy J E, et al. 2004. Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *Proc Natl Acad Sci USA*, 101(27): 9971-9975
- Plumb R A. 1985. On the three-dimensional propagation of stationary waves. *J Atmos Sci*, 42(3): 217-229
- Schär C, Vidale P L, Lüthi D, et al. 2004. The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, 427(6972): 332-336
- Screen J A, Simmonds I. 2014. Amplified mid-latitude planetary waves favour particular regional weather extremes. *Nat Climate Change*, 4(8): 704-709
- Shi J, Qian W H. 2018. Asymmetry of two types of ENSO in the transition between the East Asian winter monsoon and the ensuing summer monsoon. *Climate Dyn*, 51(9-10): 3907-3926
- Shi N, Zhu Q G. 1996. An abrupt change in the intensity of the East Asian summer monsoon index and its relationship with temperature and precipitation over East China. *Int J Climatol*, 16(7): 757-764
- Stefanon M, D'Andrea F, Drobinski P. 2012. Heatwave classification over Europe and the Mediterranean region. *Environ Res Lett*, 7(1): 014023
- Sui C H, Chung P H, Li T. 2007. Interannual and interdecadal variability of the summertime western North Pacific subtropical high. *Geophys Res Lett*, 34(11): L11701
- Sun Y, Zhang X B, Zwiers F W, et al. 2014. Rapid increase in the risk of extreme summer heat in Eastern China. *Nat Climate Change*, 4(12): 1082-1085
- Valor E, Meneu V, Caselles V. 2001. Daily air temperature and electricity load in Spain. *J Appl Meteor*, 40(8): 1413-1421
- Wang B, Wu R G, Fu X H. 2000. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate?. *J Climate*, 13(9): 1517-1536
- Wang P Y, Tang J P, Sun X G, et al. 2017. Heat waves in China: Definitions, leading patterns, and connections to large-scale atmospheric circulation and SSTs. *J Geophys Res*, 122(20): 10679-10699
- Wang P Y, Tang J P, Wang S Y, et al. 2018. Regional heatwaves in china: A cluster analysis. *Climate Dyn*, 50(5-6): 1901-1917
- Wang W W, Zhou W, Li X Z, et al. 2016. Synoptic-scale characteristics and atmospheric controls of summer heat waves in China. *Climate Dyn*, 46(9-10): 2923-2941
- Wang X, Jiang X W, Yang S, et al. 2013. Different impacts of the two types of El Niño on Asian summer monsoon onset. *Environ Res Lett*, 8(4): 044053
- Wu B, Li T, Zhou T J. 2010. Relative contributions of the Indian Ocean and local SST anomalies to the maintenance of the western North Pacific anomalous anticyclone during the El Niño decaying summer. *J Climate*, 23(11): 2974-2986
- Xie S P, Hu K M, Hafner J, et al. 2009. Indian Ocean capacitor effect on Indo-Western Pacific climate during the summer following El Niño. *J Climate*, 22(3): 730-747
- Yeh S W, Kug J S, Dewitte B, et al. 2009. El Niño in a changing climate. *Nature*, 461(7263): 511-514
- Zhou T J, Wu B, Dong L. 2014. Advances in research of ENSO changes and the associated impacts on Asian-Pacific climate. *Asia-Pacific J Atmos Sci*, 50(4): 405-422
- Zuo J Q, Li W J, Sun C H, et al. 2013. Impact of the North Atlantic sea surface temperature tripole on the East Asian summer monsoon. *Adv Atmos Sci*, 30(4): 1173-1186