

热带大西洋海温异常季节内演变对中国江南地区 夏季持续性高温事件影响的初步研究

王慧美^{1,2} 刘炯^{1,2} 彭京备³ 纪立人³

1 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

3 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029

摘要 中国江南地区是高温热浪灾害的高影响区。以往的一些研究发现了不同海域海温异常在年际或年代际尺度上的变化对中国南方夏季平均温度异常的影响效应。但是, 关于这些关键海域海温季节内尺度变化对江南地区高温事件发生和维持影响的研究尚不多见。为此, 本文利用中国站点观测、NCEP/NCAR 再分析以及 NOAA 海温等资料, 首先以 2016 年江南地区夏季 2 次高温事件为例, 重点探讨了热带大西洋海温季节内变化的可能贡献。在此基础上, 基于 1981~2016 年多高温事件合成结果, 进一步分析了热带大西洋海温季节内变化影响江南高温事件的可能链接过程。研究发现, 热带西大西洋暖海温异常在季节内尺度上的发展与维持有利于在欧亚大陆激发出较为稳定的 Rossby 波列结构, 使东亚及其沿海地区为深厚的高压系统控制, 进而引发江南地区持续性高温事件。这种热带大西洋暖海温的阶段性增强与维持及其相应的稳定 Rossby 波列结构超前于持续性高温事件: 在热带大西洋海温显著升高 1 个月之内, 江南地区可能出现持续性高温事件。在季节内尺度上, 热带大西洋显著暖海温异常出现明显的阶段性增强之后 10 天左右, 北印度洋暖海温也出现了阶段性增强。这暗示热带大西洋热力异常除通过直接激发欧亚大陆 Rossby 波列之外, 还有可能通过影响热带印度洋海温的阶段性异常, 进而对江南地区高温事件的发生和维持产生一定影响。另外, 在厄尔尼诺衰减并向拉尼娜转变阶段, 热带中东太平洋冷海温异常和北印度洋暖海温异常在季节内的协同阶段性变化可能也对持续性高温事件有贡献。上述关键区海温的季节内变化对中国江南地区高温事件具有一定的前期指示意义, 但它们的具体影响过程, 特别是在季节内尺度上的协同影响效应和物理过程, 尚需

收稿日期 2019-10-23; 网络预出版日期

作者简介 王慧美, 女, 1993 年出生, 博士研究生, 主要从事短期气候预测与青藏高原天气气候研究。E-mail: hui_meiw@163.com

通讯作者 刘炯, E-mail: liuge@cma.gov.cn

资助项目 国家重点研发计划 (2018YFC1501706), 气象预报业务关键技术发展专项 (YBGJXM-201904-03), 中国气象科学研究院科技发展基金和基本科研业务费 (2019KJ022, 2019Z008)

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2018YFC1505706), Development Fund of Key Technologies for Meteorological Forecast Operations (Grant YBGJXM2019-04-03), Basic Research Fund of CAMS (Grants 2019KJ022, 2019Z008)

未来进一步研究。

关键词 江南地区 持续性高温事件 季节内 大西洋 印度洋 太平洋

文章编号

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.19235

Preliminary Study on the Effect of Intraseasonal Evolution of the Tropical Atlantic SST Anomalies on Summer Persistent Heatwave Events over the Area South of the Yangtze River

WANG Huimei^{1,2}, LIU Ge^{1,2}, PENG Jingbei³, JI Liren³

1 Collaborative Innovation Centre on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters(CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 State Key Laboratory of Severe Weather and Institute of Climate System(LASW), Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 International Center for Climate and Environment Sciences(ICCES), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The area south of the Yangtze River is an area highly impacted by heatwave disasters. Previous studies have revealed the effects of sea surface temperature anomalies (SSTAs) in several crucial sea regions (e.g., the tropical Atlantic, the North Indian Ocean, and the tropical central-eastern Pacific) on summer mean air temperature anomalies over southern China on interannual or interdecadal time scales. However, there has little research on the impacts of the SSTAs in these key sea regions on the occurrences and maintenances of heatwave events over the area south of the Yangtze River on the intraseasonal time scale. For this reason, using observational data in gauge stations in China, NCEP/NCAR reanalysis, and NOAA SSTs, the present study focuses on the potential contribution of SSTAs in the tropical Atlantic to heatwave events over the area south of the Yangtze River by analyzing two summer heatwave events in 2016. In addition, based on the composites of multiple heatwave events during 1981–2016, a possible physical link that explains the effect of the intraseasonal evolution of SSTAs in the tropical Atlantic on heatwave events over the area south of the Yangtze River is further explored. The results indicate that, the development and

maintenance of warmer SSTAs in the tropical western Atlantic is conducive to stimulate a relatively stable Rossby wave train over Eurasia on the intraseasonal time scale. As a result, a deep high-pressure anomaly governs East Asia and its coastal areas, resulting in long-term persistent (≥ 8 days) heatwave events over the area south of the Yangtze River. This phased increase and maintenance of the SSTAs in the tropical Atlantic and associated steady Rossby wave train are prior to the long-term persistent heatwave events, and the latter might occur in a month since the SSTs in the tropical Atlantic significantly enhanced. On the intraseasonal time scale, there is a clearly phased increase in the SSTs in the North Indian Ocean, around 10 days after the significant increase in the SSTs in the tropical Atlantic Ocean. This implies that in addition to directly exciting the Rossby wave train across Eurasia, it is probably that the SSTAs in the tropical Atlantic may affect the occurrence and maintenance of the heatwave events through modulating the phased variation of the SSTAs in the North Indian Ocean on the intraseasonal time scale. Furthermore, during the period of El Niño decay and transition to La Niña, the synergistic intraseasonal variations accompanied with cooler SSTAs in the tropical central-eastern Pacific and warmer SSTAs in the North Indian Ocean may also contribute to the long-term persistent heatwave events. The intraseasonal variations in the SSTAs in the three key sea regions seem to be able to be used as precursory signals for the heatwave events. Nevertheless, the specific process that explains the intraseasonal effects of the SSTAs in the three key regions, especially the joint effect of the SSTAs in these regions and related physical process, requires further investigation in the future.

Keywords South of the Yangtze River, Persistent heatwave events, Intraseasonal, the Atlantic, the Indian Ocean, the Pacific

1 引言

高温热浪是一种严重的气象灾害，特别是持续时间较长的高温事件不仅给交通运输、城市供水与供电等带来巨大压力，也影响人们的生命财产安全和日常生活。随着全球平均温度不断升高，高温热浪的影响也愈发严重。中国南方地区（长江中下游及其以南地区）是我国人口密集、经济发达的地区，也是高温灾害频发区，特别是持续时间较长（8 天以上）的高温事件往往多发于该地区（Liu et al., 2015）。在高温灾害影响下，该地区遭受的损失也更大，因此这里的高温异常更为人们所关注。21 世纪以来，中国高温热浪的频次明显增多、影响范围变得越

来越广、持续时间也越来越长（邓自旺等, 2000; 林昕和管兆勇, 2008; 叶殿秀等, 2013）。中国南方地区持续性高温事件也频繁出现。例如, 2003 年夏季, 南方地区遭受了大范围热浪袭击, 江南、华南出现的持续性高温天气历时一个月以上（王亚伟等, 2006）。2007 年 7 月, 江南、华南等地出现大范围持续性高温天气, 高温日数比常年同期偏多 5~12 天（宗志平, 2007）。2009 年 7 月和 8 月中国南方地区接连出现了两次大范围持续性高温天气过程, 长江中下游地区高温日数较常年同期偏多近 1 倍（张玛等, 2011）。2013 年夏季, 我国南方地区又出现了少有的持续高温天气, 很多地区的高温日数和最高气温值都突破了历史记录（Peng, 2014）。这些频发的持续性高温事件严重影响了当地经济发展和人们的正常生活, 因此有必要深入研究高温异常的影响因子和相应的物理机制, 进而提高对高温热浪的短期气候预测能力并减少相应的损失。

一些研究表明, 西太平洋副热带高压和南亚高压是造成我国南方地区夏季高温异常的两个关键大气环流系统（张庆云和陶诗言, 1998; 杨辉和李崇银等, 2005; 林建等, 2005; 张玛等, 2011; 陈敏等, 2013）。当西太平洋副热带高压西伸北跳, 并稳定维持时, 长江中下游地区往往出现高温酷暑天气（陶诗言等, 2006; 彭京备等, 2016）。南亚高压东伸加强, 往往也对应着西太平洋副热带高压西进（陈永仁等, 2008）。这种南亚高压和西太平洋副热带高压异常在不同层次上的叠加, 可以在我国南方地区形成深厚的高压异常, 这是导致该地区出现持续性高温异常的直接原因（Peng, 2014; Liu et al., 2016）。

实际上, 西太平洋副热带高压和南亚高压的持续性异常往往是对一些关键海域海温异常的响应。一些研究也由此揭示了不同海域海温异常对中国南方温度异常的影响效应。例如, Chen et al. (2017) 研究了热带中东太平洋海温异常演变与我国南方高温异常的联系; Hu 等 (2013) 指出厄尔尼诺-南方涛动 (El Niño-Southern Oscillation, 简称 ENSO) 对长江以南地区 8 月极端高温事件的影响效应。黄荣辉和孙凤英 (1994) 发现西太平洋暖池区海温异常可以通过调节西太平洋副热带高压的南北位置, 进而影响江淮地区的气温和降水。热带印度洋海温异常还可以通过改变局地潜热加热激发下游东亚地区的罗斯贝 (Rossby) 波列, 导致南亚高压和西太平洋副高的异常, 进而引起中国东部夏季高温 (Hu et al., 2013; Liu et al., 2015)。

北大西洋海温异常也可以通过大气遥相关影响到东亚气候 (孙建奇, 2014)。在年代际尺度上, 大西洋多年代际振荡 (Atlantic Multidecadal Oscillation, 简称 AMO) 的暖位相有利于东亚大部分地区增暖 (Wang et al., 2009)。在年际尺度上, 我们的研究 (Wang et al., 2017) 揭示, 前期冬季热带大西洋热力异常对我国南方地区夏季温度异常也有重要贡献。其影响主要通过两种途径: (1) 热带大西洋海气耦合异常可从前期冬季一直持续到夏季, 通过激发北半球中纬度

横跨欧亚大陆的 Rossby 波列影响下游地区的环流，造成西太平洋副热带高压加强西伸，导致该地区夏季高温异常；（2）热带大西洋热力异常还可首先影响热带印度洋环流和海温异常，通过调节印度和阿拉伯海地区的凝结潜热热源引起下游的环流异常，导致西太平洋副热带高压异常偏强并向西扩展以及南亚高压的异常偏强并向东伸展，二者在我国南方地区叠加形成深厚的高压异常，最终影响我国南方地区夏季气温。需要指出的是，该研究（Wang et al., 2017）以及前面回顾的一系列工作主要探讨的是不同海域海温异常在年际或年代际尺度上的变化对中国南方夏季温度异常的影响。然而，季节内尺度上出现稳定的、且较长时间维持的海温异常偏暖，显然也有助于在季节平均尺度上体现出暖海温异常。那么夏季海温异常年际变化的影响是否为季节内尺度上海温异常演变的累积效应呢？换言之，在季节内尺度上，这些关键海域的海温变化是否也对高温事件的发生发展有一定的贡献呢？它们的影响机制是否与年际变化的情况类似？历次高温事件的前期海温异常演变特征及其影响是否存在一致性？更重要的是，是否可以通过对海温异常季节内尺度上影响效应的研究，为夏季江南地区高温事件的季节内预测提供一定参考？这些问题都值得深入分析。

因此，本文在年际尺度研究（Wang et al., 2017）的基础上，重点探讨热带大西洋海温的季节内变化对中国江南地区夏季高温事件的影响及其可能机制。我们首先以 2016 年夏季为例，研究热带大西洋海温的季节内演变与我国江南持续性高温事件的关系。并由此拓展，进一步探讨了历次高温事件中热带大西洋海温季节内变化的可能贡献。同时，也初步分析了太平洋和印度洋关键海域海温的季节内演变与江南夏季高温事件的统计关系，以期对江南持续性高温事件的预测提供一定的参考。

2 资料与方法

本文首先使用国家气候中心提供的 160 站月平均气温和最高气温来确定“江南高温关键区”；其次，使用国家气象信息中心的中国地面气候资料日值数据集(V3.0)包括逐日气温和最高气温，对江南地区“长持续性高温事件”进行统计；此外，还有美国气象环境预报中心（National Centers for Environmental Prediction, 简称 NCEP）和美国国家大气研究中心（National Center for Atmospheric Research, 简称 NCAR）提供的全球格点再分析日平均高度场资料，水平空间分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ （Kalnay et al., 1996）；NCEP/NCAR 的逐日海温资料，水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ （Reynolds et al., 2007）。本文的研究时段为 1981~2016 年，夏季为 6~8 月，气候态为 1981~2010 年平均，其中逐日海温资料因 1981 年数据的不完整，气候态为 1982~2010 年的平均。本文的

气温距平和海温异常均是原始序列减去同期 30 年气候态平均的结果。

本文主要采用相关（包括超前滞后相关）、合成等分析方法，利用双尾学生 t 检验判断相关和合成结果的显著性水平（魏凤英, 1999）。

3 2016 年夏季江南地区高温事件主要特征

图 1a 给出了 2016 年夏季（6~8 月）中国东部气温距平，它显示偏暖异常主要位于江南地区（ $29^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $116^{\circ}\text{E}\sim 122^{\circ}\text{E}$ 和 $26^{\circ}\text{N}\sim 29^{\circ}\text{N}$, $114^{\circ}\text{E}\sim 122^{\circ}\text{E}$ ；见图 1 黑框），该地区平均气温距平超过 1.3°C 。需要指出的是，1981~2016 年该地区夏季平均气温表现出明显的上升趋势（图略）。那么，2016 年该地区的偏暖是否仅为全球变暖背景下的年代际升温的结果呢？为此，我们去除了所有站点气温变化的线性趋势，重新计算 2016 年夏季中国东部气温距平（图 1b）。结果表明，不考虑线性升温趋势时，该地区的温度正距平仍超过了 0.5°C ，说明 2016 年夏季该地区的偏暖在年际尺度上也是存在的。2016 年夏季最高气温分布（图 1c）进一步显示，江南地区是一个明显的高温区，其夏季最高气温在 33°C 以上。实际上，江南地区不仅是 2016 年夏季高温异常区，它也是 1980 年来夏季持续 8 天以上的高温事件多发区（Liu et al., 2015）。因此，本文重点关注该地区。

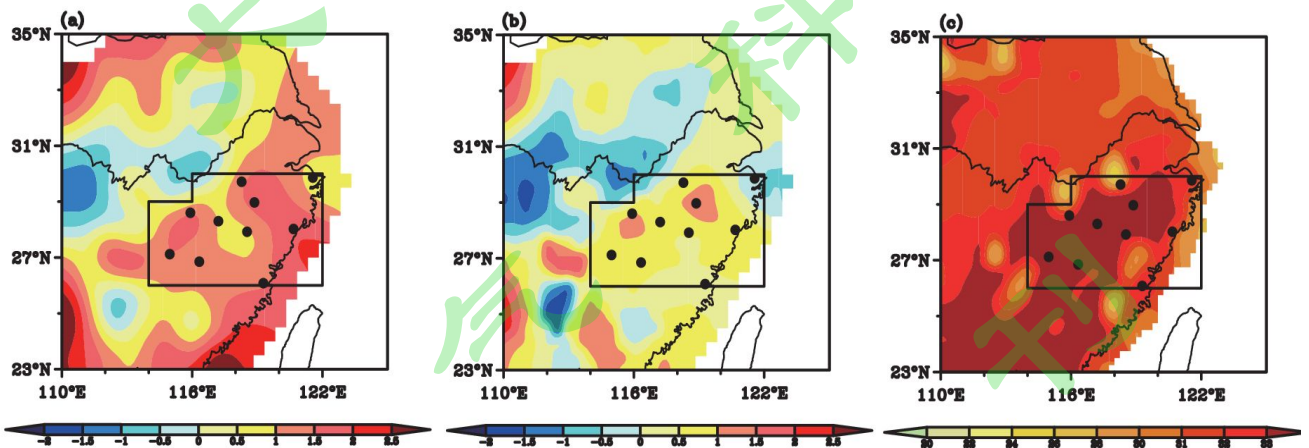


图 1 2016 年中国东部地区夏季（6~8 月）平均 (a) 气温距平，(b) 去趋势后的气温距平，(c) 最高气温空间分布(单位: $^{\circ}\text{C}$)。其中，黑色方框表示江南地区($29^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $116^{\circ}\text{E}\sim 122^{\circ}\text{E}$ 和 $26^{\circ}\text{N}\sim 29^{\circ}\text{N}$, $114^{\circ}\text{E}\sim 122^{\circ}\text{E}$)，黑点表示站点位置

Fig. 1 Spatial distribution of summer (June–August) mean (a) temperature anomalies, (b) detrend temperature anomalies, and (c) maximum temperature in eastern China in 2016 (Units: $^{\circ}\text{C}$). The black boxes represent the Jiangnan region ($29^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $116^{\circ}\text{E}\sim 122^{\circ}\text{E}$ and $26^{\circ}\text{N}\sim 29^{\circ}\text{N}$, $114^{\circ}\text{E}\sim 122^{\circ}\text{E}$), and dark spots denote the locations

of observational stations in the Jiangnan region

“高温热浪”通常指连续多天最高气温超过 35°C 的高温天气。本文重点关注维持时间长且强度较大的长持续性高温事件，具体定义如下：（1）逐日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ ；（2）逐日平均气温 $\geq 30^{\circ}\text{C}$ ；（3）逐日气温距平 $\geq 2^{\circ}\text{C}$ ；同时满足上述 3 个条件且持续时间需达到或超过 8 天。基于上述定义，对照图 2 可以看出，2016 年夏季江南地区发生了 2 次持续性高温事件（图 2 灰色阴影），第一次出现在 7 月 21~31 日，第 2 次出现在 8 月 15~25 日，两次高温事件都持续了 11 天。

我们进一步统计了 1981~2016 年（共 36 年）我国江南地区夏季发生的所有持续性高温事件（如表 1）。从表 1 可以看出，这种长持续性高温事件往往发生在 7~8 月。江南地区平均出梅时间在 7 月中旬，梅雨结束后西太平洋副热带高压北抬，有利于这一地区持续性高温事件的发生。通过比较历年持续性高温事件可知，2016 年的高温事件合计持续 22 天，在 36 年中排第 2 位，仅次于 2003 年（2003 年也发生 2 次持续性高温事件，持续时间合计达 25 天）。

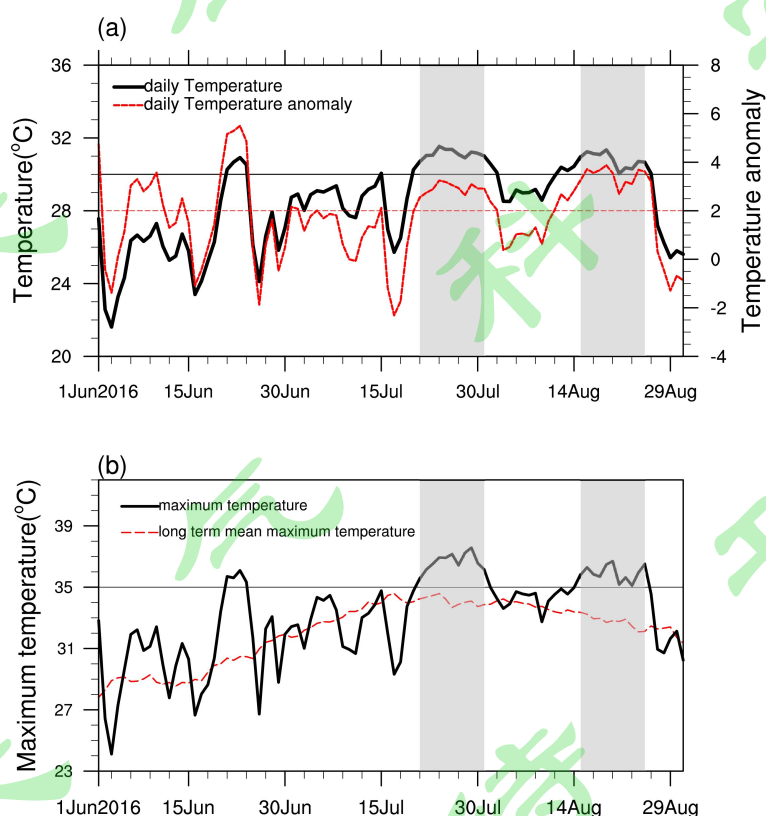


图 2 2016 年夏季江南地区（a）逐日气温（黑色实线）与距平（红色虚线）时间序列；（b）逐日最高气温（黑色实线）与气候平均（红色虚线）时间序列（单位： $^{\circ}\text{C}$ ）。灰色阴影表示持续性高温事件的发生时段，（a）中黑色直线和红色虚直线分别为气温 30°C 线和气温距平 2°C 线，（b）中黑色直线为最高气温 35°C 线

Fig.2 (a) Time series of summer daily temperature (black solid line) and temperature anomaly (red dashed line); (b) as in (a), but for daily maximum temperature in 2016 and climatological mean maximum temperature (Units: °C). Gray shaded bars indicate the periods of two persistent heatwave events, and black straight line and red dash straight line in (a) denote 30°C line of temperature and 2°C line of temperature anomaly respectively, black straight line in (b) denotes 35°C line of maximum temperature

表 1 1981~2016 年江南地区夏季持续性高温事件的起止时间和持续天数

Tab. 1 The start-stop time and duration of summer persistent heatwave events over Jiangnan during 1981–2016

年份	高温期	持续天数	年份	高温期	持续天数
1983	8.8~8.17	10	2007	7.24~8.2	10
1988	7.2~7.20	19	2009	7.16~7.23	8
1989	7.29~8.7	8	2010	7.13~7.20	9
1990	7.16~7.29	14	2011	7.23~7.30	8
1991	7.22~7.29	8	2012	7.2~7.14	13
1998	8.8~8.17	10	2013	8.4~8.14	11
2003	7.10~7.17	25	2016	7.21~7.31	22
	7.19~8.4			8.15~8.25	

4 2016 年高温事件期间大气环流演变特征

图 3a、b 分别为 2016 年 2 次高温事件期间（7 月 21~31 日和 8 月 15~25 日）平均 500hPa 位势高度异常。可以看出，在 2 次事件期间，东亚大陆皆受闭合高压控制，与气候平均态（绿色粗虚线）相比，5880gpm 等高线（黑色粗实线）所指示的西太平洋副热带高压明显偏西，其西伸脊点甚至超过 100°E。相应地，位势高度距平上也在东亚地区表现出大范围的正异常（图 3a、b 阴影）。西太平洋副热带高压的西伸增强，为江南地区高温事件提供了有利的环流背景。

从 2 次高温事件期间平均 200hPa 位势高度异常(图 3c、d)中可见，与气候平均态(12500gpm 绿色粗虚线)相比，南亚高压（12500gpm 黑色粗实线）范围扩大，强度明显增强，也出现了明显的向东扩展，特别是在第 2 次事件期间其东扩范围更大。一些研究指出，南亚高压异常和西太平洋副热带高压异常在不同层次上的叠加，在我国南方地区形成深厚的高压异常，进而造成持续性高温异常（Peng, 2014; Liu et al., 2016）。2016 年 2 次高温事件对应的南亚高压和西太平洋副热带高压异常情况也与上述研究相符。

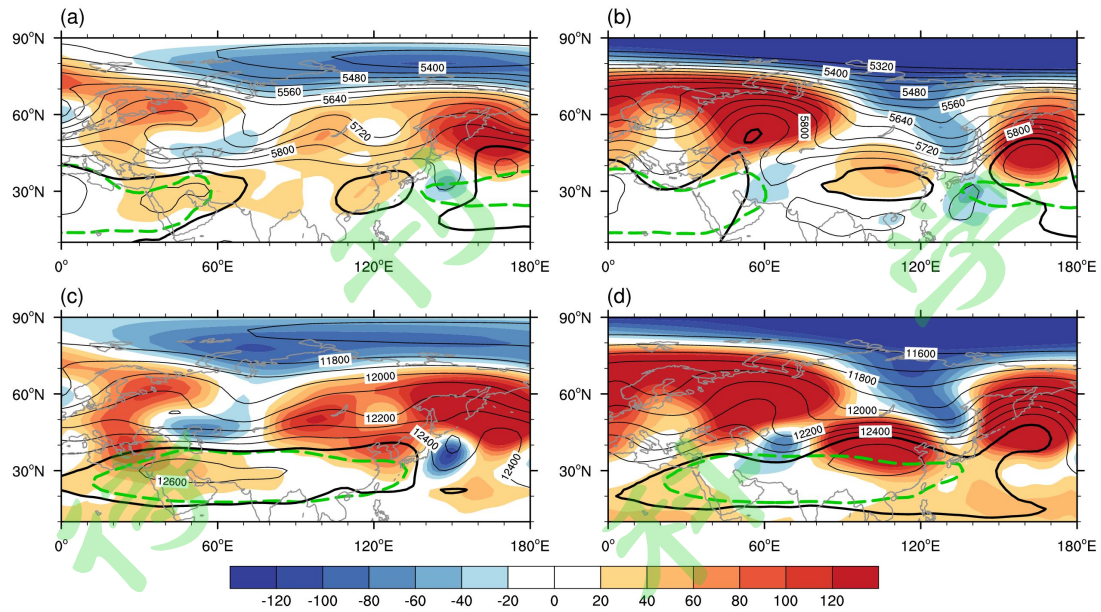


图3 2016年夏季(a)第一和(b)第二次高温事件期间的平均500hPa位势高度场(黑色细实线)及其距平(彩色阴影),单位:gpm;(c)、(d)同(a)、(b)但为200hPa。(a)、(b)中黑色粗实线为5880 gpm线,绿色粗虚线为气候平均5880 gpm线,(c)、(d)中黑色粗实线为12500 gpm线,绿色粗虚线为气候平均12500 gpm线

Fig. 3 500hPa geopotential height (thin solid line) and its anomalies (color shaded) during the periods of (a) the first and (b) the second heatwave events (Units: gpm); (c) and (d) as in (a) and (b), but for 200hPa. Black thick solid contours in (a), (b) and (c), (d) indicate the isolines of 5880 gpm and 12500 gpm, respectively, and green thick dashed lines in (a), (b) and (c), (d) indicate climatological mean isolines of 5880 gpm and 12500 gpm, respectively

为了进一步分析西太平洋副热带高压和南亚高压的演变特征,我们首先给出了2016年夏季27.5°N~32.5°N平均5880gpm等高线的逐日变化(图4a),它可以指示西太平洋副热带高压的东西变动特征。由图4a可知,与气候平均态(红色实线)相比,2016年夏季西太平洋副热带高压(灰色阴影)西扩范围明显偏大,特别是在7月中下旬和8月中下旬的两次向西扩展最为强烈。具体来说,7月19日之后西太平洋副热带高压开始出现明显的加强西伸,7月21日跨过120°E之后甚至到达90°E以西。8月1日之后开始减弱东退,相应地,持续性高温形势有所缓解。其后,在8月15日之前西太平洋副热带高压虽有短暂增强,但持续时间较短且强度不甚强,与高温序列的减弱相对应(图2)。而在8月15日之后,西太平洋副热带高压又出现了明显的西扩现象,伴随着高温事件再次出现。这两次副热带高压的异常西伸与持续性高温事件的发生时间基本吻合。

从 2016 年夏季 $27.5^{\circ}\text{N}\sim 32.5^{\circ}\text{N}$ 平均 12500gpm 等高线逐日变化（图 4b）来看，南亚高压向东扩展的时间比西太平洋副热带高压西伸时间更早，在 6 月中下旬即出现了明显的加强东扩现象，在 7 月下旬到 8 月上旬出现西退，随后在 8 月中下旬又多次出现了加强东扩现象。其中南亚高压的第 2 次加强东扩与西太平洋副热带高压的第 2 次加强西伸相互配合，可形成深厚的高压异常，有利于江南高温事件的发生。而 2016 年夏季的第 1 次江南高温事件可能以西太平洋副热带高压异常调控为主。

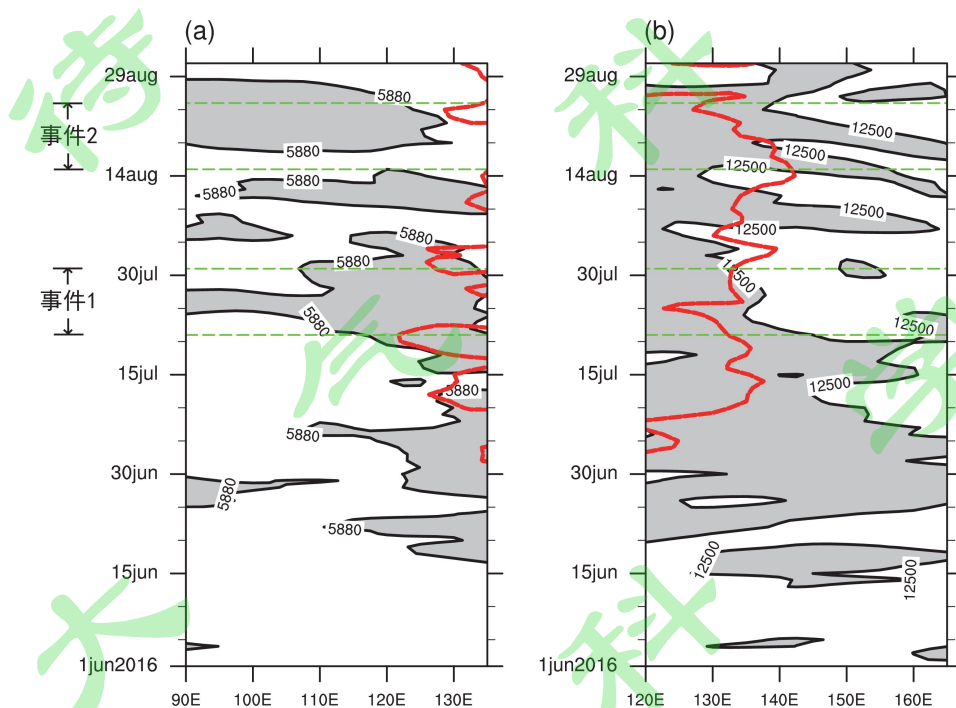


图 4 2016 年夏季 $27.5^{\circ}\text{N}\sim 32.5^{\circ}\text{N}$ 平均 (a) 500hPa 等压面上的 5880 gpm, (b) 200hPa 等压面上的 12500 gpm 等高线的逐日变化。(a)、(b) 中红色实线分别为气候平均 5880 gpm 和 12500 gpm 等高线，绿色虚线分别指示 2016 年两次持续性高温事件的起止时间：7 月 21 日~7 月 31 日和 8 月 15 日~8 月 25 日

Fig. 4 Longitude-time Hovmöller diagram along $27.5^{\circ}\text{N}\sim 32.5^{\circ}\text{N}$ for 5880-gpm (500hPa) and (b) 12500-gpm (200hPa) isolines during the summer of 2016. Red lines in (a) and (b) denote climatological mean isolines of 5880 gpm and 12500 gpm, respectively, and green dash lines indicate start-stop time of two heatwave events in 2016 (July 21st to July 31st and August 15th to August 25th)

另外需要注意的是，在 2016 年夏季高温事件发生期间，北半球中高纬地区对流层上层（200hPa）位势高度场上存在明显的正负相间的波列结构（图 3）。虽然正负异常的中心位置略有差异，但两次高温事件对应的波列结构特征大体上表现出了一定的共性。东欧平原为正异

常，里海以东地区（60°E 附近）为负异常，巴尔喀什湖东南的东亚及其沿海地区为正异常。中国东部地区出现与上述波列正异常区相对应的深厚高压，有利于江南高温事件的发生。另外，上述波列结构与也与 Wang et al. (2017) 揭示的热带大西洋热力异常激发的欧亚 Rossby 波列结构基本一致。这提示我们，热带大西洋海温异常很可能对我国江南夏季持续性高温事件的发生与维持具有一定贡献。

5 热带大西洋海温信号的季节内演变及其影响

以往一些研究已揭示，在年际变化尺度上，有三个关键海域的海温异常对我国南方地区夏季温度异常具有重要的影响，它们分别是热带西大西洋（Wang et al., 2017）、北印度洋（Liu et al., 2015）以及热带东太平洋（Hu et al., 2013; Chen and Zhou, 2017）。图 5 给出了 16 个高温事件发生期的海温异常合成结果，可以看出江南地区出现持续性高温事件期间，热带西大西洋和北印度洋海温明显偏暖，热带中东太平洋海温明显偏冷（图 5 黑框区域），这与年际尺度上的海温关键区基本一致。由此可以推测，在季节内变化尺度上，三个关键海域海温异常可能对江南地区持续性高温事件的发生与维持具有一定贡献，并在季节平均的年际变化尺度上也有所体现。这可能是季节内尺度和季节平均的年际尺度上海温关键区大体一致的根本原因。

本文主要基于 Wang et al. (2017) 年际变化尺度的研究基础上，继续深入探讨热带西大西洋海温异常的季节内变化是否也可调节并引起夏季的持续性高温事件的发生与发展。因此，选取图 5 中热带西大西洋关键区（10°S~10°N, 60°W~35°W，见图 5 三角形黑框区域），重点探讨热带西大西洋海温的季节内演变对江南持续性高温事件的可能影响。

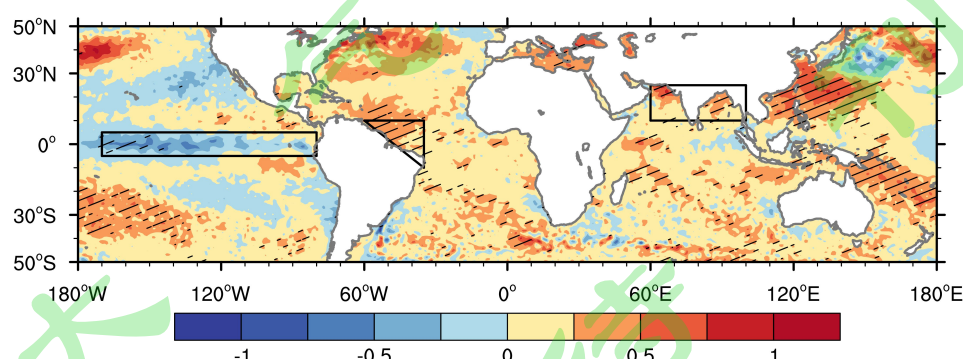


图 5 16 次高温事件发生期合成的海温异常（单位：°C）空间分布。斜线区域表示达到 95% 的显著性水平，黑框为三个关键海域，从左到右分别为热带中东太平洋（5°S~5°N, 170°W~80°W）、热带西大西洋（10°S~10°N, 60°W~35°W）和北印度洋（10°N~25°N, 60°E~100°E）

Fig. 5 Spatial distribution of sea surface temperature anomalies (Units: $^{\circ}\text{C}$) which is the composite of 16 heatwave events. Oblique dashed lines indicate the composite anomalies statistically significant at the 95% confidence level, black boxes denote the three key sea areas: the tropical central-eastern Pacific (5°S – 5°N , 170°W – 80°W), the tropical western Atlantic Ocean (10°S – 10°N , 60°W – 35°W), and the northern Indian Ocean (10°N – 25°N , 60°E – 100°E) from left to right

我们首先以 2016 年的江南持续性高温事件为例进行分析。图 6a 给出了 2016 年热带大西洋 10°S – 10°N 平均海温距平的逐日变化，它反映了热带西大西洋海温异常强度和范围的演变特征。由图 6a 可见，热带西大西洋地区在夏季整体表现为海温正异常，其中暖海温异常在 7 月初即出现了明显的阶段性增强，比江南地区第 1 次持续性高温事件提前约 20 天左右。在 7 月中旬以后，该地区海温出现了更为明显且持续的增暖过程。相应地，江南地区出现了第 2 次持续性高温异常事件。2016 年 6 月 1 日~8 月 30 日热带西大西洋关键区区域平均海温距平序列与江南气温距平序列的超前滞后相关（图 6b）进一步显示，热带西大西洋海温异常超前江南高温 23 天时，两者的正相关系数达到最大（0.58），超过 99% 的显著性水平。上述结果暗示，热带西大西洋海温季节内异常增暖的发展过程可能是引发 2016 年我国江南地区高温事件发生、发展的一个原因，且比高温事件提前约 20 天，具有一定的前期指示意义。

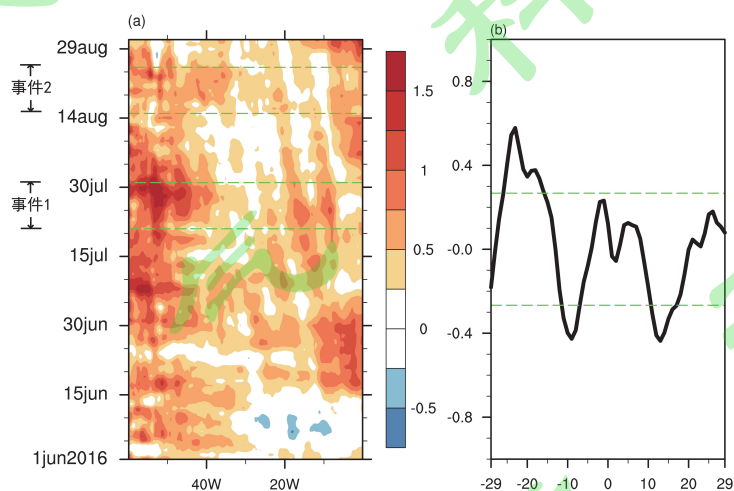


图 6 (a) 2016 年夏季热带大西洋 (10°S – 10°N) 海温距平逐日演变 (单位: $^{\circ}\text{C}$)；(b) 2016 年夏季热带西大西洋 (10°S – 10°N , 60°W – 35°W) 海温距平与江南逐日气温距平序列的超前滞后相关。(a) 中绿色虚线分别指示 2016 年两次持续性高温事件的起止时间，(b) 中绿色虚线表示达到 99% 的显著性水平

Fig. 6 (a) Longitude-time Hovmöller diagram along 10°S – 10°N for sea surface temperature anomalies (units: $^{\circ}\text{C}$) in the tropical Atlantic Ocean during the summer of 2016; (b) Lead-lag correlation coefficient between the tropical

western Atlantic sea surface temperature anomaly (10°S – 10°N , 60°W – 35°W) and Jiangnan daily temperature anomaly for the summer of 2016. Green dash lines in (a) indicate start-stop time of two heatwave events in 2016, and green dash lines in (b) indicate lead-lag correlation coefficients statistically significant at the 99% confidence level

为了进一步考察历次持续性高温事件中热带西大西洋海温的可能影响效应是否具有一定的共性，我们统计了 1981~2016 夏季所有江南夏季持续性高温事件（共 16 次；见表 1）发生期间对应的热带西大西洋海温异常（见表 2）。结果显示，16 个高温事件发生阶段大部分对应着热带西大西洋的暖异常，只有 3 年出现了冷异常。其中，超过 0.30°C 的明显偏暖也有 8 次之多，它们分别是 1998、2003-2、2009、2010、2011、2013、2016-1、2016-2 事件（见表 2）。这里根据江南地区夏季持续性高温事件的发生时间，对这 8 次事件的海温距平进行了合成分析。具体合成方法如下：以事件持续期的中间时间点为基点（见图 7a 灰色横虚线），自基点起向前扩展 60 天（图 7a 纵坐标-60）、向后延长 20 天（图 7a 纵坐标+20）进行逐日合成，从而得到热带大西洋在高温事件发生前后平均海温距平的时间-经度演变（图 7a）。由于高温事件的持续时间并不相同，因此讨论高温前后日期时具有 5 天左右的不确定性。合成结果（图 7a）表明，高温事件（基点）前 30 天左右，热带西大西洋暖海温异常出现了显著的阶段性增强，且显著区范围明显向东扩展，并在事件发生期达到了范围最大状态，这一合成结果与 2016 年的情况基本一致（图 6a）。同样的，类似图 6b，对这 8 次事件所在年份的夏季超前滞后相关结果也进行合成，结果如图 7b 所示，热带西大西洋海温异常超前江南高温 25 天时，两者的正相关系数达到最大（0.41），仍然超过 99% 的显著性水平。这进一步说明，热带西大西洋海温的季节内变化对我国江南地区持续性高温事件的影响效应不仅仅是个别现象，它具有一定的代表性。热带西大西洋海温季节内的阶段性增强似乎可以作为我国江南地区持续性高温事件发生的重要前期信号。在该海域暖海温出现大范围增强的 1 个月之内，江南地区即可能出现持续性高温事件。

表 2 江南高温事件期间热带大西洋、北印度洋和热带中东太平洋海温异常（单位： $^{\circ}\text{C}$ ），该异常基于 1982~2010 年气候平均的同期海温

Tab. 2 Sea surface temperature anomalies (SSTAs) in the tropical Atlantic, North Indian Ocean, and the tropical central-eastern Pacific during the periods of heatwave events over Jiangnan (Unit: $^{\circ}\text{C}$), and the SSTAs are based on the climatological (1982–2010) mean of SST during the same periods

高温事件	热带西大西洋	北印度洋	热带中东太平洋
1983	0.25	0.43	0.69
1988	0.21	0.54	-1.76
1989	-0.21	-0.27	-0.43
1990	0.04	-0.45	-0.08
1991	-0.44	-0.03	0.58
1998	0.72	0.52	-0.59
2003-1	0.21	0.29	-0.07
2003-2	0.38	0.37	0.30
2007	0.19	0.56	-0.62
2009	0.37	0.37	0.85
2010	0.63	0.87	-0.89
2011	0.40	0.18	0.03
2012	0.11	0.06	0.34
2013	0.36	-0.36	-0.56
2016-1	0.78	0.45	-0.47
2016-2	0.56	0.51	-0.43

注：三个关键海区范围见图 5 黑框

The domains of the three key sea areas are shown as the black boxes in Fig. 5

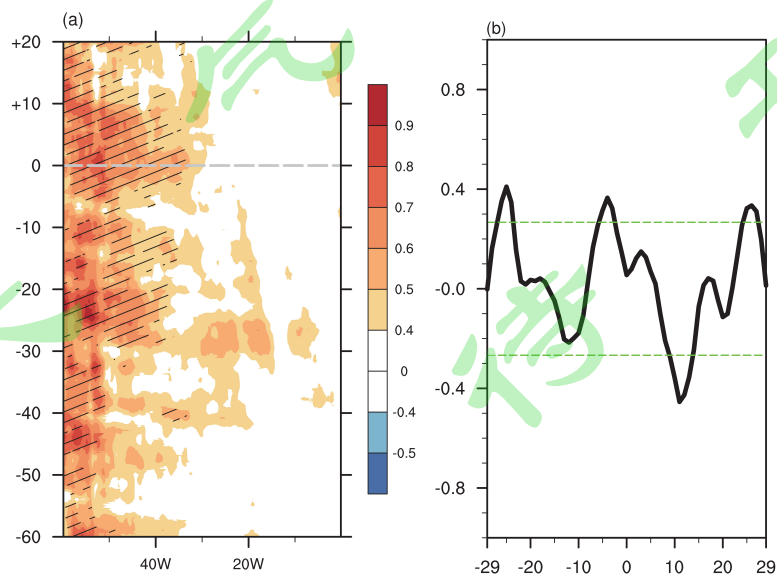


图 7 (a) 同图 6 (a), 但为热带西大西洋强暖异常 ($\geq 0.30\text{ }^{\circ}\text{C}$) 对应的 8 次高温事件的合成; (b) 同图 6 (b), 但为热带西大西洋强暖异常 ($\geq 0.30\text{ }^{\circ}\text{C}$) 所在的 7 个年份的合成。(a) 中斜线区域表示达到 99% 的显著性水平, 灰色虚线表示高温事件发生期中点, (b) 中绿色虚线表示达到 99% 的显著性水平

Fig. 7 (a) As in Fig. 6(a), but for the composite of 8 heatwave events that corresponds to strongly warmer ($\geq 0.30\text{ }^{\circ}\text{C}$) anomalies in the tropical western Atlantic Ocean; (b) As in Fig. 6(b), but for the composite of 7 years that corresponds to strongly warmer ($\geq 0.30\text{ }^{\circ}\text{C}$) anomalies in the tropical western Atlantic Ocean. Oblique dashed lines in (a) indicate the composite anomalies statistically significant at the 99% confidence level, and gray dashed horizontal line in (a) denotes the time middle point for the period of heatwave events, green dash lines in (b) indicate lead-lag correlation coefficients statistically significant at the 99% confidence level

上述 8 次事件发生期合成的位势高度场 (图 8) 显示, 中高纬度地区出现的“正 (欧洲) - 负 (里海东侧) - 正 (东亚)”位势高度异常波列结构与 2016 年高温事件发生期间的结构 (图 3a、b) 也基本一致, 同时也与 Wang et al. (2017) 揭示的在年际变化尺度上大西洋热力异常激发的夏季平均欧亚 Rossby 波列结构大体相符。另外, 我们也给出了热带西大西洋海温强暖异常状态下高温事件发生前 40 天内每 10 天平均的 200hPa 高度场合成 (图 9)。可以看出, 高温事件发生前 1~10 天 (图 9d)、11~20 天 (图 9c) 以及 21~30 天 (图 9b), 在欧亚大陆中高纬度大体上都维持与图 8a 类似的波列结构。特别是在前 1~10 天, 中国东部及其沿海地区已经出现了显著高压异常, 说明引起我国南方地区高温事件的环流背景已形成。而追溯到更前期的 31~40 天 (图 9a), 这种结构则并不清晰。上述过程也与热带西大西洋海温暖异常出现并发展的过程基本匹配。

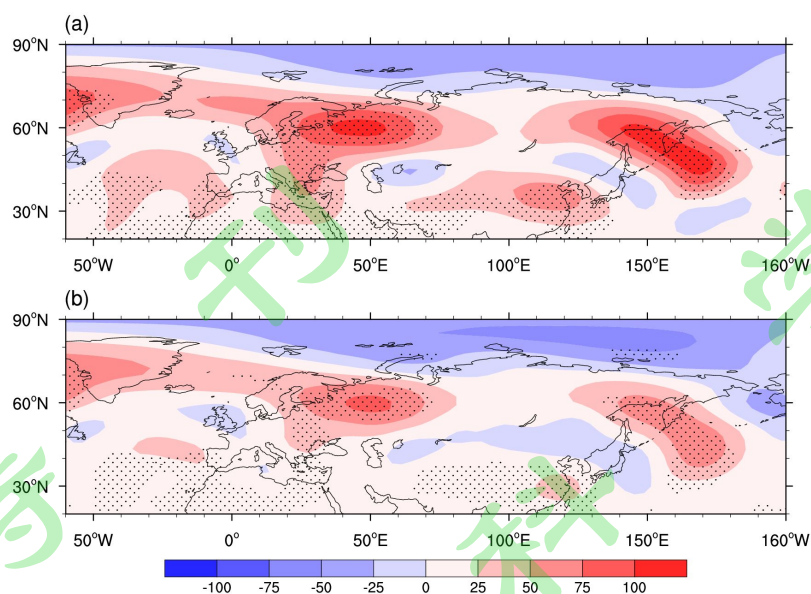


图 8 热带西大西洋强暖异常 ($\geq 0.30\text{ }^{\circ}\text{C}$) 对应的 8 次高温事件发生期间合成的 (a) 200hPa 和 (b) 500hPa 位势高度异常 (阴影; 单位: gpm)。打点区域表示超过 95% 的显著性水平

Fig. 8 Composited (a) 200-hPa and (b) 500-hPa geopotential height anomalies (shaded; Units: gpm) for the 8 heatwave events corresponding to strongly warmer ($\geq 0.30\text{ }^{\circ}\text{C}$) anomalies in the tropical western Atlantic Ocean. The dots represent the composite anomalies statistically significant at the 95% confidence level

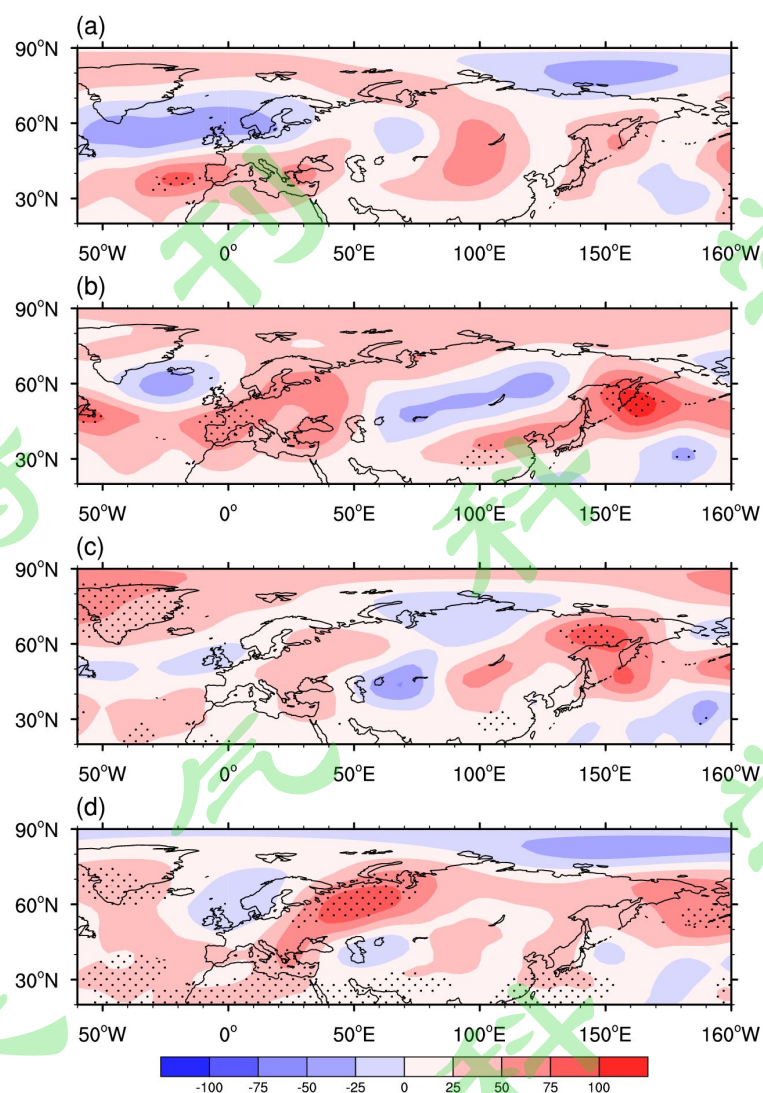


图9 同图8(a), 但为高温事件发生前(a) 31~40天, (b) 21~30天, (c) 11~20天, (d) 1~10天合成的200hPa平均位势高度异常(阴影; 单位: gpm)

Fig. 9 As in Fig. 8(a), but for those during (a) 31~40, (b) 21~30, (c) 11~20 and (d) 1~10 days prior to the 8 heatwave events(shaded; Units: gpm)

上述结果暗示, 热带西大西洋暖海温异常在季节内尺度上的发展与维持有利于在欧亚大陆激发出较为稳定的波列结构, 使东亚及其沿海地区为深厚的高压系统控制(图3), 进而导致我国江南地区出现持续性高温事件。由于热带西大西洋暖海温异常在季节内尺度上的维持时间较长, 所以也有利于在季节平均尺度上体现出来, 进而形成了夏季平均尺度上热带西大西洋暖海温异常与江南夏季平均高温的同期关联。从季节内演变的角度可以进一步发现, 这种热带大西洋暖海温的阶段性增强与发展及其激发的相对稳定的欧亚波列结构比持续性高温事件提前

21~30 天左右，可视为我国江南地区持续性高温事件发生的一个重要前期信号。

6 小结与讨论

中国江南地区是高温热浪灾害的高影响区。以往的一些研究发现了不同海域海温异常在年际或年代际尺度上的变化对中国南方夏季平均温度异常的影响效应。但是，关于这些关键海域海温季节内尺度变化对高温事件发生发展影响的研究尚不多见。为此，本文首先以 2016 年夏季 2 次持续性高温事件为例，分析了高温事件发生维持的直接环流背景，重点探讨热带西大西洋海温的季节内变化对 2016 年江南地区夏季高温事件的影响及其可能机制。同时，基于我们之前（Wang et al., 2017）在年际变化尺度的研究，采用多个事件合成分析方法，进一步研究了热带西大西洋海温季节内变化对高温事件的可能贡献。得到的主要结论如下：

（1）2016 年夏季，中国江南地区发生了 2 次持续性（持续 8 天或以上）高温事件，2 次高温事件共计持续 22 天，持续时间在 1918~2016 年中排第 2 位（仅次于 2013 年）。在 2016 年的 2 次持续性高温事件中，西太平洋副热带高压都表现出了异常的加强西伸，是引起高温异常事件发生和维持的重要原因。在第 2 次高温事件期间，南亚高压也明显加强东扩，并与西太平洋副热带高压加强西伸配合，形成深厚的高压异常，共同导致了此次江南持续性高温事件的发生。

（2）在 2016 年夏季高温事件发生期间，欧亚大陆中高纬地区对流层上层存在清晰的 Rossby 波列结构，中国东部地区出现与上述波列下游正异常区相对应的深厚高压，有利于江南高温事件的发生。其中，热带大西洋暖海温异常在季节内阶段性增强可能是上述波列稳定维持的一个重要原因。从 2016 年高温事件来看，热带大西洋在季节内尺度上的阶段性异常增暖及其激发的较为稳定的 Rossby 波列结构比江南地区高温事件提前约 20 天。

（3）2016 年所反映的热带大西洋暖海温异常在季节内尺度上的可能影响效应并不只是个例。通过分析 1981~2016 年多次事件的合成结果发现，实际上上述情况较为普遍。合成结果显示，热带大西洋季节内阶段性的显著升温与维持有利于在欧亚大陆激发出较为稳定的 Rossby 波列结构，进而影响下游大气环流，最终引起江南地区的持续性高温事件。合成结果也显示，这种热带大西洋暖海温的阶段性增强与维持及其激发的相对稳定的 Rossby 波列结构比江南地区持续性高温事件更早出现。在海温显著升高 1 个月之内，江南地区可能出现持续性高温事件。因此，热带大西洋暖海温异常季节内的阶段性增强可作为江南地区出现持续性高温事件的一个重要前期信号。

Wang et al. (2017) 的研究结果显示, 从季节平均来看, 维持至夏季的热带西大西洋暖海温异常对应江南地区夏季同期平均温度偏高。本文在此基础上, 从热带西大西洋海温异常季节内演变的角度发现了其对江南高温事件滞后影响的物理链接过程, 这进一步说明了季节平均尺度上热带西大西洋海温异常与江南高温关系的本质是这种季节内影响效应的平均结果。同时, 这种季节内尺度上的时滞影响效应也为我国江南地区高温事件的预测提供了部分线索, 是对之前季节平均尺度研究的一个拓展与补充。

另外, 除了热带大西洋海温异常季节内变化的影响效应, 图 5 也表明江南高温事件期间热带中东太平洋和北印度洋也呈现明显的海温异常特征。因此, 我们选取热带中东太平洋 ($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$, $170^{\circ}\text{W}\sim 80^{\circ}\text{W}$, 图 5 黑色矩形方框) 和北印度洋关键区 ($10^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ}\text{E}\sim 100^{\circ}\text{E}$, 图 5 黑色矩形方框), 初步分析了印度洋和太平洋海温异常的季节内演变与江南持续性高温事件的联系。首先选取了北印度洋关键区 (图 5) 海温明显偏暖 (区域平均海温异常超过 0.3°C) 所对应的 9 次高温事件 (1983、1988、1998、2003-2、2007、2009、2010、2016-1、2016-2, 见表 2) 进行合成分析 (图 10a)。其结果显示, 高温事件 (基点) 前 20 天, 北印度洋孟加拉湾地区 (80°E 以东) 海温即开始出现显著增暖, 而阿拉伯海附近 (70°E 以西) 暖海温异常在高温事件 (基点) 前 10 天左右出现了显著的阶段性增强。另外, 在北印度洋海温偏暖所对应的 9 次高温事件中, 有 6 次事件同时也是热带西大西洋偏暖对应的高温事件。与图 7 对比发现, 热带西大西洋显著暖海温异常先出现明显的阶段性增强, 而北印度洋海温的阶段性增强在其之后 10 天左右出现。由此推测, Wang et al. (2017) 在年际变化尺度上发现的“热带大西洋热力异常除通过激发欧亚大陆 Rossby 波列之外, 还可首先影响热带印度洋环流和海温异常, 进而调节我国南方地区夏季气温”这一机制在季节内尺度上可能也是适用的。也就是说, Wang et al. (2017) 指出的热带大西洋热力异常年际变化尺度上影响我国南方地区夏季平均气温的两条途径, 在季节内尺度上可能也都存在。当然, 对于通过印度洋海温异常中转这一途径来说, 仅为基于时间先后做出的初步推测, 显然还需要进一步研究验证。

另外, 分析 16 次高温事件期间热带中东太平洋的海温异常特征发现, 其中有 8 次出现了小于 -0.30°C 的冷海温异常, 5 次出现大于 0.3°C 的暖海温异常 (见表 2)。可见, 热带中东太平洋海温对高温事件的影响较为复杂, 不能仅根据该地区的海温冷、暖异常对江南高温事件的发生与否进行简单地判断。进一步考察 16 次高温事件前期海温演变特征可知, 有 8 次事件前期出现了厄尔尼诺事件衰减并向拉尼娜事件转变的情况, 它们是 1983、1988、1998、2007、2010、2011、2016-1、2016-2 事件。对这 8 次高温事件对应的太平洋海温异常进行合成分析发现, 在

高温事件（基点）前 20 天，热带中东太平洋海温冷异常显著增强（图 10b），同时对应着北印度洋孟加拉湾地区暖海温的异常增强（图 10a）。一些研究（Hu et al., 2013; Chen and Zhou, 2017）发现，厄尔尼诺衰减年伴随着北印度洋海温异常增暖，会造成我国南方夏季高温异常。而我们的研究进一步暗示，在季节内尺度上，厄尔尼诺衰减并向拉尼娜转变阶段，热带中东太平洋冷海温异常和北印度洋暖海温异常的协同阶段性变化可能对江南地区持续性高温事件的发生也具有一定的指示意义。

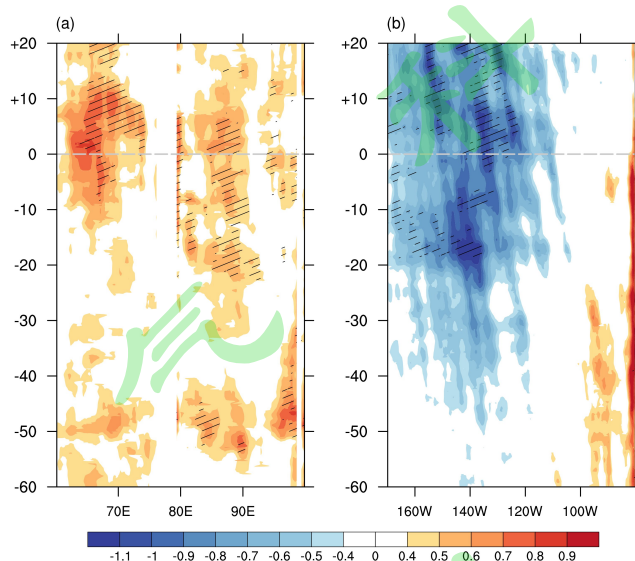


图 10 (a) 北印度洋强暖异常 ($\geq 0.30\text{ }^{\circ}\text{C}$) 对应的 9 次高温事件合成的 $10^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$ 纬度平均海温异常 (单位: $^{\circ}\text{C}$) 逐日演变; (b) 热带中东太平洋出现厄尔尼诺衰减并向拉尼娜转变过程对应的 8 次高温事件合成的 $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$ 纬度平均海温异常 (单位: $^{\circ}\text{C}$) 逐日演变。斜线区域表示达到 99% 的显著性水平, 灰色虚线表示高温事件发生期中点

Fig. 10 (a) Longitude-time Hovmöller diagram along $10^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$ for sea surface temperature anomalies (Units: $^{\circ}\text{C}$), which is the composite of 9 heatwave events that corresponds to strongly warmer ($\geq 0.30\text{ }^{\circ}\text{C}$) anomalies in the North Indian Ocean; (b) As in (a), but for that along $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$ for sea surface temperature anomalies (Units: $^{\circ}\text{C}$), which is the composite of 8 heatwave events that corresponds to the period of El Niño decay and transition to La Niña in the tropical central-eastern Pacific. Oblique dashed lines indicate the composite anomalies statistically significant at the 99% confidence level, and gray dashed horizontal line denotes the time middle point for the period of heatwave events

本文在季节内尺度上, 重点探讨了热带大西洋海温异常阶段性增强对我国江南地区夏季持

续性高温事件的可能影响,发现热带大西洋暖海温异常的发展与维持,一方面可以激发出欧亚大陆稳定的 Rossby 波列异常,另一方面可能对印度洋暖海温异常阶段性增强也有一定的贡献,进而通过这两条途径,引起我国江南地区的夏季持续性高温事件的发生。我们也初步分析了与高温事件相对应的太平洋和印度洋的前期海温异常季节内协同演变特征。然而,太平洋和印度洋的前期海温异常季节内演变影响高温事件的具体过程尚不清楚,在未来的研究中,需特别关注它们对大气环流季节内变化的影响效应。而且,在季节内尺度上,大西洋、太平洋、印度洋海温异常三者的相互作用是怎样的呢?它们是否对江南高温事件存在协同影响?它们各自以及协同影响的具体过程是怎样的?这些问题都显然都需要进一步分析。

需要特别注意的是,在 1981~2016 年的 16 次江南夏季持续性高温事件中,有 4 次事件(分别发生在 1989、1990、1991 和 2012 年)与上述各个关键海域海温的季节内演变情况不符。这暗示了除上述海温外强迫之外,可能还有目前尚不清楚的其他外强迫因子(如其他关键海域的海温异常、青藏高原积雪、北极海冰异常等)也起到了一定贡献。此外,大气内部变率本身也可能对这些高温事件的发生具有一定的作用(潘婕等, 2009; Chen and Zhou, 2017)。今后需进一步深入研究这些事件的成因,从而为持续性高温事件的预测提供更多的参考。

参考文献 (Reference)

- 陈敏, 耿福海, 马雷鸣等. 2013. 近 138 年上海地区高温热浪事件分析 [J]. 高原气象, 32(2): 597-607. Chen Min, Geng Fuhai, Ma Leiming et al. 2013. Analyses on the heat wave events in Shanghai in recent 138 years [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 32(2): 597-607. doi:10.7522/j.issn.10000-0534.2012.00058
- Chen X., Zhou T.. 2017. Relative contributions of external SST forcing and internal atmospheric variability to July-August heat waves over the Yangtze River valley [J]. Climate Dynamics, (1):1-17. doi:10.1007/s00382-017-3871-y
- 陈永仁, 李跃清. 2008. 南亚高压活动特征及其天气气候影响研究进展 [J]. 气象科技, 36(2): 174-179. Chen Yongren, Li Yueqing. 2008. Advances in Researches on Activities and influences of South Asia High on weather and climate [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 36(2): 174-179. doi:CNKI:SUN:QXKJ.0.2008-02-011
- 邓自旺, 丁裕国, 陈业国. 2000. 全球气候变暖对长江三角洲极端高温事件概率的影响 [J]. 大气科学学报, 23(1): 42-47. Deng Ziwang, Ding Yuguo, Chen Yeguo. 2000. Effects of global warming on the probability of extreme high temperature event in the Yangtze Delta [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese),

23(1): 42-47. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2000.01.007

Hu, K., Huang, G., Wu, R. 2013. A strengthened influence of ENSO on august high temperature extremes over the southern Yangtze River Valley since the late 1980s. *Journal of Climate*, 26(7), 2205-2221. doi:10.1175/JCLI-D-12-00277.1

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:CNKI:SUN:DQXK.0.1994-02-001

Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds B., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo KC, Ropelewski C, Wang J, Jenne R, Joseph D. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc*, 77, 437-471. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2

林建, 毕宝贵, 何金海. 2005. 2003 年 7 月西太平洋副热带高压变异及中国南方高温形成机理研究 [J]. *大气科学*, 29(4): 594-599. Lin Jian, Bi Baogui, He Jinhai. 2005. Physical mechanism responsible for western pacific subtropical high variation and hot wave in southern China in July 2003 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 29(4): 594-599. doi:CNKI:SUN:DQXK.0.2005-04-009

林昕, 管兆勇. 2008. 中国华东地区夏季高温的时空特征和年际变化 [J]. *大气科学学报*, 31(1): 1-9. Lin Xin, Guang Zhaoyong. 2008. Temporal-spatial characters and interannual variations of summer high temperature in east China [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31(1): 1-9, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2008.01.001

Liu, G., Wu, R., Sun, S., & Wang, H. 2015. Synergistic contribution of precipitation anomalies over northwestern India and the South China Sea to high temperature over the Yangtze River Valley. *Advances in Atmospheric Sciences*, 32(9), 1255-1265. doi:CNKI:SUN:DQJZ.0.2015-09-008

Liu, G., Wu, R., Wang, H., & Ji, L. 2016. Effect of tropical Indian ocean thermal condition during preceding winter on summer high temperature anomalies over the southern Yangtze River Valley. *International Journal of Climatology*, 37, 3478-3490. doi:10.1002/joc.4932

潘婕, 纪立人, 布和朝鲁. 2009. 夏季欧亚中高纬持续流型的季节内气候特征 [J]. *大气科学*, 33(2): 300-312. Pan Jie, Ji Liren, Bueh Cholaw. 2009. Intraseasonal climate characteristics of the summertime persistent anomalous circulation over Eurasian middle and high latitudes [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33(2): 300-312. doi:CNKI:SUN:DQXK.0.2009-02-009

- Peng, J. B. 2014. An investigation of the formation of the heat wave in southern China in summer 2013 and the relevant abnormal subtropical high activities [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 7(4), 286-290. doi: 10.3878/j.issn.1674-2834.13.0097
- 彭京备, 刘舸, 孙淑清. 2016. 2013 年我国南方持续性高温天气及副热带高压异常维持的成因分析 [J]. *大气科学*, 40(5): 897-906. Peng Jingbei, Liu Ge, Sun Shuqing. 2016. An analysis on the formation of the heat wave in southern China and its relation to the anomalous western Pacific subtropical high in the summer of 2013 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 40 (5): 897-906. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1512.14334
- Reynolds, Richard W., Thomas M. Smith, Chunying Liu, Dudley B. Chelton, Kenneth S. Casey, Michael G. Schlax. 2007. Daily High-Resolution-Blended Analyses for Sea Surface Temperature. *Journal of Climate*, 20, 5473-5496.
- 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 [J]. *科学通报*, 59(27): 2714-2719. Sun J Q. Record-breaking SST over mid-North Atlantic and extreme high temperature over the Jianghuai-Jiangnan region of China in 2013. *Chin Sci Bull*, 2014, 59: 3465-3470. doi:10.1360/csb2014-59-27-2714
- 陶诗言, 卫捷. 2006. 再论夏季西太平洋副热带高压的西伸北跳[J]. *应用气象学报*, 17(5): 513-525. Tao Shiyan, Wei Jie. 2006. The westward, northward advance of the Subtropical High over the west Pacific in summer [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 17(5): 513-525. doi:CNKI:SUN:YYQX.0.2006-05-000
- Wang H., Liu G., Chen J.. 2017. Contribution of the tropical western Atlantic thermal conditions during the preceding winter to summer temperature anomalies over the lower reaches of the Yangtze River basin-Jiangnan region [J]. *International Journal of Climatology*, 37(13). doi:10.1002/joc.5111
- Wang Y., Li S, Luo D. 2009. Seasonal response of Asian monsoonal climate to the Atlantic Multidecadal Oscillation [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 114(D2), 356-360. doi:10.1029/2008JD010929
- 王亚伟, 翟盘茂, 田华. 2006. 近 40 年南方高温变化特征与 2003 年的高温事件 [J]. *气象*, 32(10): 27-33. Wang Yawei, Feng Guolin, Tianhua. 2006. Extreme high temperatures in southern China in 2003 under the background of climate change [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 32(10): 27-33. doi:CNKI:SUN:QXXX.0.2006-10-003
- 魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术(第二版) [M]. 北京: 气象出版社, 27-29. Wei Fengying. 2007. *Modern climate statistical diagnosis and Prediction Technology* (2nd Edition) (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 27-29.
- 杨辉, 李崇银. 2005. 2003 年夏季中国江南异常高温的分析研究 [J]. *气候与环境研究*, 10(1):80-85. Yang Hui,

- Li Chongyin. 2003. Diagnostic study of serious high temperature over south China in 2003 summer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10(1):80-85. doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2005.01.008
- 叶殿秀, 尹继福, 陈正洪等. 2013. 1961-2010 年我国夏季高温热浪的时空变化特征. 气候变化研究进展, 9(1): 015-020. Ye Dianxiu, Yin Jifu, Chen Zhenghong et al. 2013. Spatiotemporal change characteristics of summer heatwaves in China in 1961-2010 [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 9(1): 015-020. doi: 10.3969/j.issn.1673-1719.2013.01.003
- 张玛, 高庆九, 蒋薇. 2011. 2009 年夏季中国高温分析 [J]. 气象科学, 31(5): 582-590. Zhang Ma, Gao Qingjiu, Jiang Wei. 2011. The preliminary analysis of heat wave in summer of 2009 in China [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 31(5): 582-590. doi:P457.32
- 张庆云, 陶诗言. 1998. 亚洲中高纬度环流对东亚夏季降水的影响 [J]. 气象学报, 56(2): 199-211. Zhang Qingyun, Tao Shiyan. 1998. Influence of Asian mid-high latitude circulation on east Asian summer rainfall [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 56(2): 199-211. doi:CNKI:SUN:QXXB.0.1998-02-006
- 宗志平. 2007. 淮河流域出现流域性大洪水江南华南等地持续高温干旱——2007 年 7 月 [J]. 气象, 33(10): 118-123. Zong Zhiping. 2007. Heavy Flood in the Huaihe River Valley Continued Hot and Dry in the Jiangnan Area and South China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 33(10): 118-123. doi:10.3969/j.issn.1000-0526. 2007.10.018