

谭红建, 蔡榕硕. 2015. 2000 年以来福州地区夏季极端高温的新特征及成因探讨 [J]. 大气科学, 39 (6): 1179–1190. Tan Hongjian, Cai Rongshuo. 2015. New characteristics of heat extremes in Fuzhou since 2000 and the possible causes [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (6): 1179–1190, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1503.14343.

2000 年以来福州地区夏季极端高温的新特征及成因探讨

谭红建^{1,2,3} 蔡榕硕^{1,2}

1 国家海洋局第三海洋研究所国家海洋局海洋—大气化学与全球变化重点实验室, 厦门 361005

2 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100029

3 中国科学院大学, 北京 100190

摘 要 近几十年来, 全球气候变暖背景下夏季中国大陆大中城市的极端高温事件趋于频繁, 其时空格局发生了显著变化, 并对社会经济环境造成了严重的影响。中国气象局最近发布的数据表明, 福州市因高温天数最多而被称为中国“第一火炉”, 一度引起热议。本文利用逐日的观测资料建立了多个极端高温指数(极端高温天数、极端最高气温、平均最高气温和炎热指数等)序列, 综合分析了在 1960~2013 年间夏季福州市极端高温的变化趋势, 并与传统的“四大火炉”城市(重庆、武汉、南昌和南京)做了比较。结果表明: 福州市的高温指数在 20 世纪 60、70 年代并不突出, 但在 1970 年代末和 1990 年代初经历两次转折后, 均有显著的上升过程, 其中, 极端高温天数、日最高平均气温和相对湿度在 2000 年左右均发生了一次显著的突变; 进入 21 世纪后, 除了在年平均极端最高气温不如重庆高外, 其他各项极端高温指数均超过传统的“四大火炉”。分析还表明, 21 世纪初以后, 中国东部沿海地区特别是福州市的极端高温是由大气环流变异引起的, 其贡献主要源自低层水平和垂直温度平流的异常, 而局地非绝热加热的贡献较小。此外, 近十年来, 西太平洋副热带高压的明显西伸也有利于夏季中国南方城市的极端高温事件的频繁发生。

关键词 福州 极端高温 气候突变 温度平流

文章编号 1006-9895(2015)06-1179-12

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1503.14343

New Characteristics of Heat Extremes in Fuzhou Since 2000 and the Possible Causes

TAN Hongjian^{1,2,3} and CAI Rongshuo^{1,2}

1 Key Laboratory of Global Change and Marine-Atmospheric Chemistry, Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005

2 Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

Abstract Recent years have seen an exceptionally large number of heat extremes in large- and medium-sized cities around China under global warming, some causing major human suffering and economic damage. The latest data from the China Meteorological Administration show that Fuzhou has become “the first furnace”, according to experiencing the

收稿日期 2014-12-19; **网络预出版日期** 2015-04-24

资助项目 国家海洋局第三海洋研究所基本科研业务费 2013002、2013003, 公益性行业科研专项经费项目 GYHY201006021

作者简介 谭红建, 男, 1985 年出生, 博士研究生, 主要从事区域气候变化研究。E-mail: tanhongjian@tio.org.cn

通讯作者 蔡榕硕, E-mail: cairongshuo@tio.org.cn

largest number of high temperature days, which has triggered intensive discussion. The present study compares the heat in Fuzhou with that of the traditional “four big furnaces” (Chongqing, Wuhan, Nanchang, and Nanjing), in terms of several extreme heat indices (EHIs)—high temperature days, extreme maximum temperature, mean high temperature, and heat index—based on daily observed data. The results indicate that the heat in Fuzhou was not particularly strong in the 1960s and 1970s, but in recent decades, Fuzhou has become one of the hottest cities in China following two stages of increase around the late 1970s and early 1990s. Almost all the extreme heat indices, except the extreme maximum temperature, reveal Fuzhou outpaced the other four cities during the last decade. The EHIs of Fuzhou experienced an abrupt climatic change around 2000, which was associated with the decadal variability of atmospheric circulation over East Asia. The lower horizontal and vertical temperature advection and westward extension of the subtropical high can largely explain the intensive and frequent heat extremes in Fuzhou during the past decade.

Keywords Fuzhou, Heat extreme, Climatic change, Temperature advection

1 引言

近年来,我国多地频繁出现的夏季极端高温事件越来越引起人们的关注。其中,城市由于其密集的人口和特殊的下垫面条件,极端高温发生的程度及影响尤为突出。在我国,对于频繁发生极端高温的大都市有一个形象的描述,即为“火炉”,最为著名的是传统的“四大火炉”(重庆、武汉、南昌和南京)。在气象学上,“火炉”意味着夏季频繁出现的极端高温事件—热浪。热浪的频繁出现对人体健康和社会经济产生了严重的影响。例如,2003年夏季席卷欧洲的热浪事件造成了共约35,000人丧生(Schär et al., 2004)。2013年夏季中国东部发生大范围高温酷暑天气,多地气温突破历史极值,给我国社会和经济带来极大的损失(Sun et al., 2014)。随着全球气候变化和城市化的进展,夏季中国热浪事件也愈发严重和频繁,越来越多的城市成为“火炉”。在2013年中国气象局公布的最新数据表明,位于中国东南沿海地区的福州市已超越传统“四大火炉”城市悄然成为中国的“炉魁”,而曾经作为“四大火炉”之一的南京市却排在十名开外,成功摘掉的“火炉”的帽子。虽然夏季的福州市经常处于高温炎热之中,但由于它地处东南沿海,受海洋气候的调节,给人的感觉不敌传统“四大火炉”。然而,福州市在2000~2009年期间以375个高温天数名列榜首多少让人有些意外(<http://baike.baidu.com/view/317448.htm?fr=aladdin>[2014-12-19])。因此,很多媒体和学者将福州市称为中国“第一火炉”(如,陈斐然, 2013),但是也一度引起不少争议,这是由于仅使用单个指数被认为缺乏说服力。虽然仅争辩福州市“火炉”的座次并无多少意义,但是近年来福州市频繁发生的夏季极端高温事件却是不争的事实,其背后的物理成因及其与气候

背景变化的联系是值得我们关注的。

一直以来,“火炉”在气象学上都没有明确的标准和定义,只是人们直观的感受。中国气象局公布的数据也是以35°C以上高温天数为主要依据,描述某个地方的炎热程度。在国内外的一些关于极端高温事件的研究中,有采用极端高温(日最高气温),连续高温日数,95百分位值和炎热指数等方法(翟盘茂和潘晓华, 2003; 龚志强等, 2009; 孙建奇等, 2011)。其中,炎热指数以人体舒适度为参考,综合考虑了气温和相对湿度,这是因为湿度相对较高时,人体难以排出多余的热量,体温开始升高,与炎热有关的疾病和身心失调也会出现(黄卓等, 2011)。陈辉等(2009)就以炎热指数为指标对引发中暑的气象条件进行了等级划分,结果表明炎热指数可以很好地作为影响人体健康的潜在气象指标。翟盘茂等(2003)也曾用多个指数研究了我国的极端高温事件,指出我国白天极端温度偏高的日数趋于增多。近几十年来,由于快速的城市化进程和城市人口密度的不断提高,夏季城市发生热浪的程度和影响尤为突出。因此,研究城市极端高温的气候特征可以为我国制定城镇发展战略提供一定的科学参考。

全球气候变暖和城市热岛效应被认为是诱发城市极端高温的主要因子。先前的一些研究强调了城市热岛效应的影响,他们认为快速的城市化,如密集的人口、城市建筑材料和汽车尾气及空调等,使得城市像一个巨大的热机不断地释放热量,从而改变了城市及周边区域的气候(季崇萍等, 2006; Ren and Zhou, 2014)。然而,最新的研究结果表明,气候背景的变化对不同城市成为“火炉”起到了决定性的作用,热岛效应则在此基础上进一步加剧某些城市的热浪程度(Zhao et al., 2014)。在中国,同为快速发展的福州市和南京市就是很好的对

比实例。福州市在十几年间迅速成为中国的“第一火炉”，而曾经的“四大火炉”之一的南京市在中国气象局的最近数据中却排在十名以外。这表明除了城市化进程等原因之外，气候变化背景可能是重要的原因。此外，关于我国南方极端高温的归因研究中，西太平洋副热带高压的位置和强度变化一直是重要的影响因子（如，邹燕等，2001）。而近年来的研究表明，印度洋的海盆一致性增温（Hu et al., 2012）、北大西洋海温异常（孙建奇，2014）等与我国南方高温也有密切的联系。

在全球变化背景下，气候突变对全球和区域性气候产生了深远的影响。例如，20 世纪 70 年代末的气候突变（Miller et al., 1994），使全球气候进入了一个新的纪元（climate regime）。最近，有不少研究指出全球气候在 20 世纪末又发生了一次突变，并且，此次突变对中国不同区域气候的影响非常显著。例如，黄荣辉等（2013）的研究表明，1999 年以后我国北方地区夏季降水明显减少，而淮河流域的降水明显增多。孙建奇等（2011）指出，我国极端高温事件的年代际变化与东亚上空大气环流型变异是一致的，并强调了低层暖平流的作用。因此，福州市近十多年来频繁发生的夏季极端高温事件可能与 2000 年左右的东亚大气环流的年代际突变有关，但具体的联系及机制还有待进一步研究。

为此，本文利用中国气象局提供的站点观测数据首先定义了多个夏季极端高温指数，然后对比分

析了福州市与传统“四大火炉”城市夏季高温的强弱程度，再进一步分析福州市的极端高温事件在 2000 年前后的突变特征，最后探讨了发生极端高温件的大气环流背景和物理过程。

2 数据和方法

本文使用的观测资料集是中国气象局气象信息中心提供的 756 站逐日数据集，包括逐日的最高气温、平均气温和相对湿度等，时间为 1960 年 1 月 1 日到 2013 年 12 月 31 日，站点的选择是福州（站号 58847），重庆（站号 57516），武汉（站号 57494），南昌（站号 58606），南京（站号 58238）以及福建全省 16 个在上述时间段内有完整记录的基准站数据，所有的站点及地形分布见图 1。可以看出，福州市地处我国东南沿海，面向台湾海峡，背靠武夷山脉，平均海拔在 200 米以下。传统“四大火炉”的城市分布在长江沿岸，地势均处于盆地之中，这种特殊的地形加上长江周边充足的水汽条件对于“火炉”的形成有一定的作用。本文进一步选用了欧洲气象中心最近发布的大气再分析资料（ERA-Interim），包括风场、垂直速度、气温、感热通量、潜热通量、净太阳辐射和长波辐射等要素用于分析大气环流背景的变化，资料的分辨率为 $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ ，时间为 1979~2013 年。如无特殊说明，本文下面的研究均以夏季（6、7 和 8 月）为研究时段。

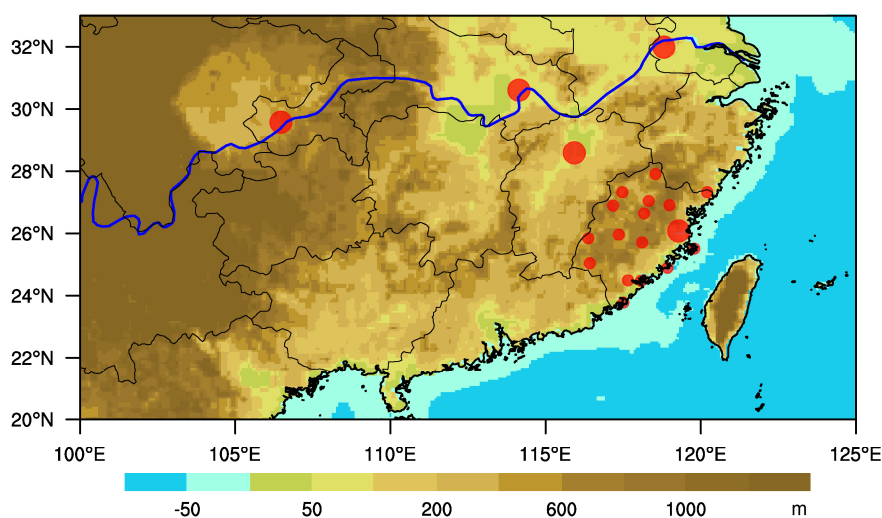


图 1 研究站点及地形分布（彩色阴影，单位：米），其中红色大圆点自西向东分别为重庆、武汉、南昌、南京和福州站点，红色小圆点为福建省内基准站点

Fig. 1 The research sites and topography (shaded, units: m), large red dots (from west to east) represent Chongqing, Wuhan, Nanchang, Nanjing, and Fuzhou, respectively, small red dots represent observation stations in Fujian Province

关于极端高温的定义有很多种,本文选用了国内外研究及预报工作中经常用到的几种极端高温指数,如 35°C 以上高温天数、极端最高气温、平均最高气温和炎热指数等。为了反映长期变化的平均气候状态,我们也选择了日平均气温作为参考。前人的很多关于极端天气的研究中都选择了 95 百分位值的相对指数定义法(如,翟盘茂和潘晓华,2003),该指数可以很好地反映局地发生极端事件的频率,但由于本文主要是对比几个“火炉”级别城市的极端炎热程度,侧重比较各地绝对温度值及持续时间,因此,本文未选择上述定义指数。所选用的各指数的具体定义见表 1,指数均以每年夏季(6、7、8 月)为研究时间,其中,炎热指数(Heat Index, I_H)的定义(Thom, 1959)如下:

$$I_H = 1.8T_a - 0.55(1.8T_a - 26)(1 - RH) + 32, \quad (1)$$

式中, T_a 为空气温度(°C), RH 为相对湿度(%). 此外,在计算炎热指数时,只考虑超过 35°C 的情形,以排除由于阴天或降水而导致的相对湿度单方面高引起的指数异常。

表 1 极端炎热的指数定义

Table 1 Definitions of extreme heat indices

指数	定义
35°C 以上高温天数 (T_{d35})	每年夏季最高气温大于或等于 35°C 的天数
平均气温 (T_{mean})	逐日日平均气温的夏季平均
极端最高气温值 (T_{max})	夏季单日最高气温的最大值
平均最高气温 (T_{max_mean})	夏季平均的逐日最高气温
炎热指数 (I_H)	见公式 (1)

3 结果分析

3.1 与传统“四大火炉”的对比研究

福州市位于我国东南沿海,台湾海峡西侧,属于亚热带季风气候区,夏季为东亚夏季风控制区。西太平洋副热带高压是引起该地区高温的主要天气系统,同时由于地处沿海,受蒸发作用相对湿度较大,给人感觉非常闷热。根据中国气象局的最新(2013 年)数据,福州市多次排在中国“火炉”城市的前列,为进一步确定福州市的炎热程度,我们建立了 5 个极端高温指数序列,用于该序列比较福州与重庆、武汉、南昌和南京等 5 个城市近半个多世纪(1960~2013 年)以来的炎热程度。在分析中,本文主要以福州市为主要对象研究其年际和年代际的变化趋势,并与传统“四大火炉”城市炎热程度的变化做了比较。

图 2a 为福州市与传统“四大火炉”等城市 35°C 以上高温天数(T_{d35})的时间序列,其中,黑色实线代表福州市,黑色虚线表示福州市极端高温指数的 5 年滑动平均。总体而言,福州市的高温天数在近 54 年来呈现上升的趋势,并有显著的年际变化。在 1970 年代中期以前,福州市的高温天数并不突出,夏季的平均天数都在 20 天以下(1960~1970 年期间 16.8 d a^{-1});从 1970 年代中后期至 1990 年代初,福州市的高温天数增速明显(1980~1991 年期间 30.7 d a^{-1}),在 1991 年夏季福州 52 天的高温远远超过其他四个城市;之后至 2000 年左右,福州高温天数似乎又进入了一个低谷(1992~2002 年 24.0 d a^{-1});在 2003 年再一次经历了破纪录的高温天数后(53 d),福州在最近的十一年里平均高温天数也达到了历史最高的 37.1 d a^{-1} 。在同一时期(2003~2013 年),其他四个城市的相应值分别为 35.9 d a^{-1} (重庆), 27.5 d a^{-1} (武汉), 32.3 d a^{-1} (南昌), 19.4 d a^{-1} (南京)。因此,如仅从最近十几年的平均高温天数来看,福州市已成为中国城市中的“第一火炉”,这与中国气象局发布的最新结果基本一致。

极端高温事件的频繁发生通常伴随着平均温度的上升(Mearns et al., 1984)。平均温度包括了白天和夜晚的温度。在过去的几十年里,福州市的夏季平均温度变化(图 2b)整体上呈上升的趋势,平均增温速率为 $0.026 \text{ }^{\circ}\text{C a}^{-1}$, 54 年里平均温度上升了约 1.4°C ;并且,夏季平均气温在 20 世纪 70 年代中后期和 21 世纪初似乎都发生了一次明显的抬升,这可能与上述时间段全球气候背景发生的突变有关。图 2c 为夏季极端最高气温的最大值。可以看出,福州市极端高温的变化趋势(黑色虚线)与高温天数的变化是基本一致的,在 1980 年代以前,福州市的最高气温在所有 5 个城市中相对较低,其历史最高气温在 2004 年是 41.7°C 。而重庆的日最高气温排名相对靠前,尤其是 2006 年的 43°C 和 2011 年的 42.7°C 。如果说单日最高气温能够反映一个地方的极端炎热程度,日最高气温的平均则可以反映夏季白天的平均炎热程度。与单日最高气温不同,福州市的平均最高气温在 1980 年代以后除了个别年份外,如 2006 年和 2013 年比重庆低,大多数时候均位列 5 个城市的首位(图 2d)。

图 2e 为福州市与“四大火炉”炎热指数的时间序列。相对而言,福州市的夏季炎热指数比其他

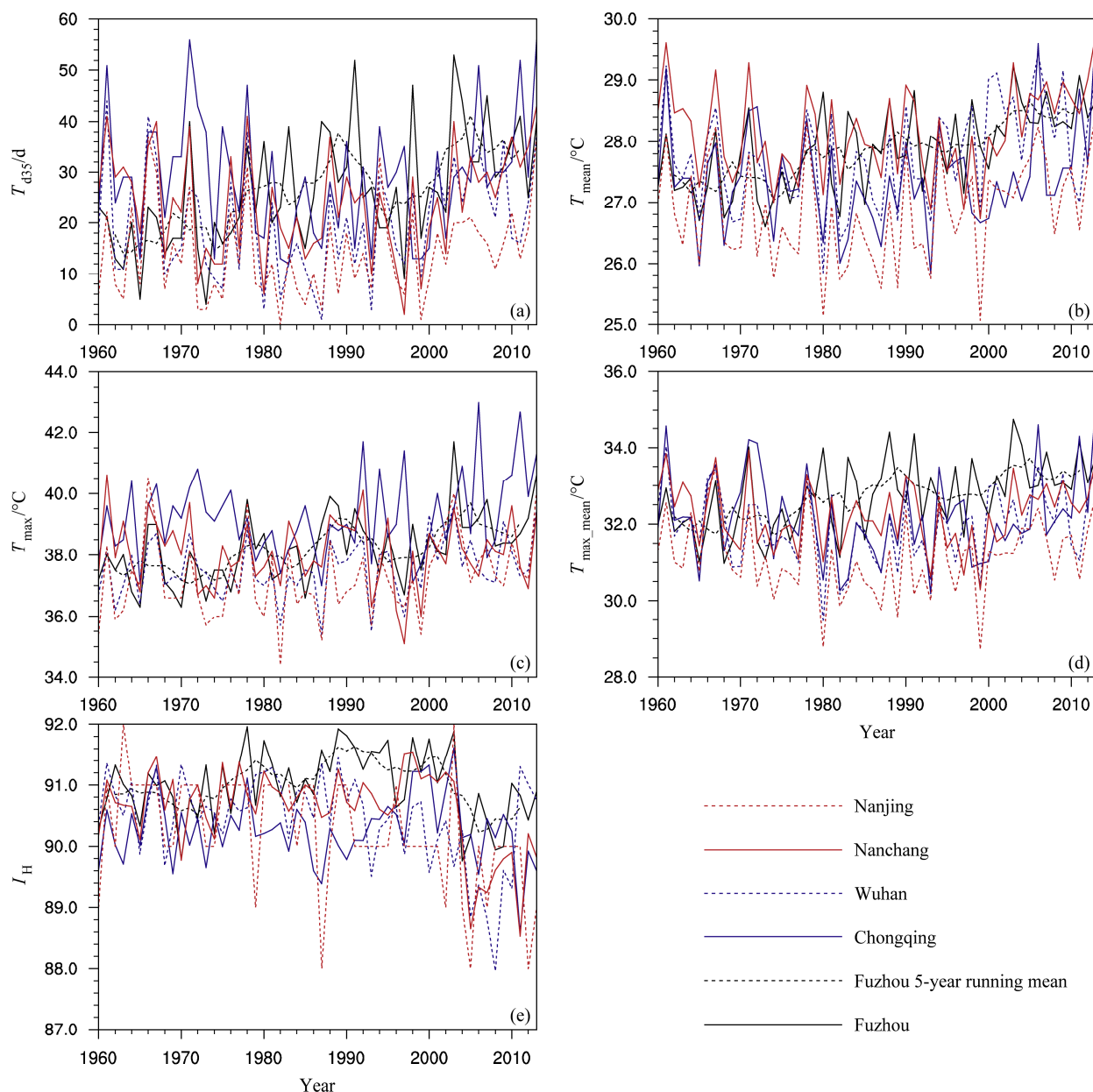


图2 福州与传统“四大火炉”（南京、南昌、武汉和重庆）的5个极端温度指数的时间序列：（a）高温天数（单位：d）；（b）平均气温（单位：℃）；（c）极端最高气温（单位：℃）；（d）平均最高气温（单位：℃）；（e）炎热指数

Fig. 2 Time series of indices for Fuzhou and the traditional “four big furnaces” (Nanjing, Nanchang, Wuhan, and Chongqing): (a) High-temperature days (T_{d35} , number of days that the maximum temperature exceeds 35°C); (b) mean temperature (T_{mean} , the daily mean temperature; °C); (c) maximum temperature (T_{max} , the extreme value of daily maximum temperature; °C); (d) mean maximum temperature ($T_{\text{max_mean}}$, summer mean of daily maximum temperature; °C); (e) heat index (I_H , defined as equation (1))

四个城市要高，尤其是 1990 年代以后，福州的平均炎热指数一直处于前列。值得注意的是，福州市的炎热指数在 1970 年代中期和 1980 年代中期均有一个显著的抬升，并且在 1990 年代达到平均最高水平，而在 21 世纪初存在一个明显的下降趋势。在计算炎热指数时，本文均以日最高温度大于或等

于 35°C 为先决条件。由公式 (1) 可知，炎热指数是由最高气温和相对湿度决定的。根据前面的分析，福州市的最高温度和平均温度在 2000 年以后均呈上升趋势，因此，可以初步推断该市炎热指数在 2000 年初以后的下降趋势可能是由相对湿度的减少引起的。通过计算分析，福州市在 1990~2002

年期间的夏季平均相对湿度为 79%，而在 2003～2013 年期间为 72.5%。与传统“四大火炉”相对湿度主要源于长江水汽不同，福州地处东南沿海地区，较高的相对湿度来自于海洋的水汽输送。福州市的炎热指数在 2000 年初以后的降低可能与大气环流变异引起的相对湿度减少有关，本文将给出后续的相关分析。

表 2 2000～2013 年福州与重庆各指数的平均值
Table 2 Comparison of five indices between Fuzhou and Chongqing averaged for the period 2000–2013

指数	福州	重庆
T_{d35}/d	34.5	32.9
$T_{mean}/^{\circ}C$	28.4	27.7
$T_{max}/^{\circ}C$	39.1	40.0
$T_{max_mean}/^{\circ}C$	33.3	32.5
I_H	90.7	90.2

上述分析可见，福州市的大多数极端高温指数中均排在前列，尤其是 2000 年以后似乎只有重庆市能够与之相近。为了进一步量化福州市与重庆市的比较，本文统计了 2000 年以来福州与重庆各极端高温指数的平均水平（表 2）。其中， T_{max} 可以理解为 2000～2013 年期间年平均的夏季极端最高气温， T_{max_mean} 为年平均的夏季日最高气温平平均， T_{mean} 为年平均的夏季白天和夜晚平均温度。由此可见，福州市除了每年平均极端最高温度 39.1℃ 不如重庆市的 40.0℃ 高外，其他几项指数均超过重庆市。福州市和重庆市虽然夏季都非常炎热，但由于他们的地理位置及气候背景的差异，使得造成他们

炎热的因素也就可能不同。福州市地处东南沿海，夏季在西太平洋副热带高压控制下，晴朗少云阳光直射强烈使得该地的温度迅速升高，而重庆市位于我国西南四川盆地，受青藏高原和西太平洋副热带高压共同影响，其主城区地处两江谷底，空气难以迅速流通，使得热量在此处聚集而引起高温（彭京备等，2007）。

综合各项指数的分析结果表明，福州市在 2000 年以后除了极端最高气温值不及重庆市外，其他指数均已超过传统“四大火炉”。由于篇幅和数据限制，本文只是比较了福州市与传统“四大火炉”城市之间的炎热程度，不可否认中国还存在很多其他的“火炉”如杭州市和西安市等，综合全面的比较可能会使结果更具有说服力。

3.2 福州夏季极端高温的年代际气候背景

由上述分析可见，福州市的夏季高温天数和平均温度等指数在 20 世纪 70 年代末和 2000 年左右都有一次明显的抬升，与此同时，全球气候尤其是东亚地区在上述时间发生了显著的气候突变。那么福州的极端高温天气是否也在 2000 年左右发生了突变，2000 年以后福州一跃成为中国“第一火炉”是否也与这次突变有关呢？为回答上述问题，本文应用滑动 t 检验对福州市及其他一些城市的极端指数进行了突变检验。图 3 为对福州和重庆夏季平均温度、高温天数和平均相对湿度指数的 9 年滑动 t 检验。未选择对炎热指数的 t 检验是因为该指数与温度和相对湿度两个变量有关，前面已经有对温度的检验。另外，对相对湿度的分析也是为了进

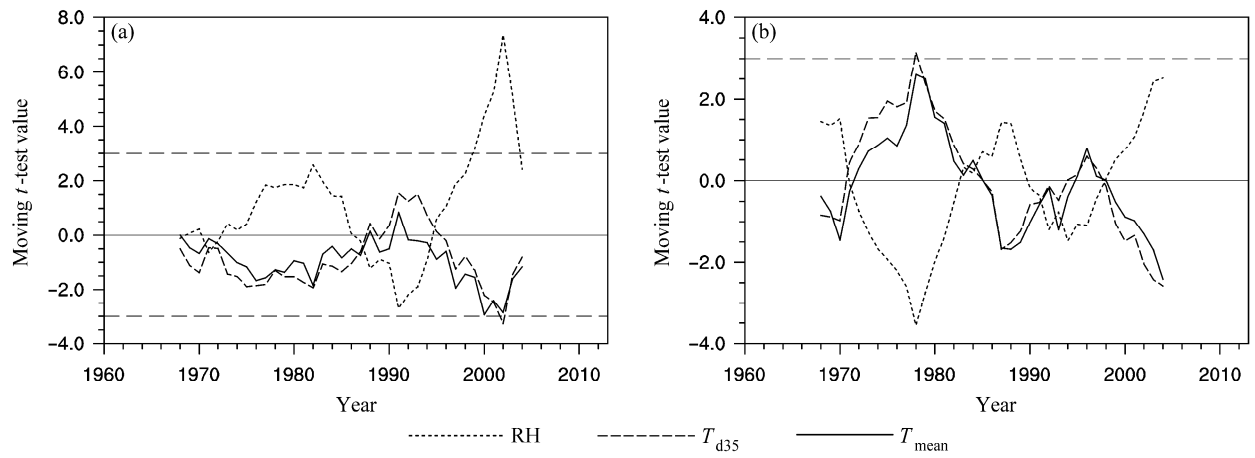


图 3 (a) 福州和 (b) 重庆高温天数、平均温度和相对湿度的 9 年滑动 t 检验，水平黑色虚线为 95% 信度水平临界值，绝对值大于黑色虚线值表示可能发生了气候突变
Fig. 3 Nine-year moving t -test of the high temperature days, mean temperature, and relative humidity (RH) for (a) Fuzhou and (b) Chongqing. Absolute values exceeding the 95% confidence level (dashed lines) indicate a significant climatic jump

一步验证上一节中提出的福州市在进入 21 世纪初后炎热指数下降是由于相对湿度的变化引起的。由图 3 可以看出, 福州市在 2000 年以后夏季平均温度、高温天数和相对湿度均发生了气候突变, 且突变的时间点大约在 2002 年, 而重庆市各指数在上述时间里没有发生突变。前面我们已经提到, 福州市在 1990 年代以后高温天数有一个明显地减少, 1992~2002 年期间平均为 24.0 d a^{-1} , 这一数据并不高, 而在 2003 年以后的 11 年里达到 37.1 d a^{-1} , 从而一举排在全国首位。因此, 可以推测福州市在 2000 年以后一跃成为中国的“第一火炉”可能与在 2000 年左右发生的突变有关。

本文进一步检验了福建省 16 个基准站在 2000 年左右的突变情况以确定福州市的突变不是由于个别年份数据误差引起的。图 4 表明福建省包括福州市在内的几乎所有基准站的平均气温在 2000 年左右均发生了突变。或许由于各地的地理差异或者滑动 t 检验方法自身的误差, 各站点发生的突变时间点有所不一致, 但突变点均在集中 2000 年和 2002 年这两年。例如, 福鼎和屏南等站点突变点均在 2000 年, 也有一些城市如厦门的突变点在 2002 年。为了便于显示, 本文统一认为它们在 2000 年左右发生了突变。同样, 福建省各站点的极端高温天数在 2000 年左右也发生了突变, 突变的时间点也存在上述问题。值得一提的是, 发生高温天数突变的站点数量比平均气温要少一些, 因为有些站点如平潭和九仙山等由于地处海岛或者高山上夏季最高气温没有或者少有超过 35°C 的, 因此统计未包括这些站点。平均温度的突变使得福州在 2000 年以后气温上升明显, 在一个偏暖的背景下, 发生极端高温事件的频率会升高, 高温天数也会相应的增加。因此, 福州极端高温事件在 2000 年以后频繁发生并成为中国“第一火炉”可能是由于包含整个福建省在内的更大区域的气候突变引起的。由于不是本文的重点, 本研究并未给出 2000 年以后中国夏季气温发生突变的具体区域, 相关研究将另文讨论。

3.3 福州夏季年代际高温异常的环流背景

在前面的分析中, 我们指出中国的东南沿海区域(福建省)的极端高温事件的发生频率在 2000 年以后有了明显的增加, 并且这种变化与平均温度的突变是一致的。气候突变通常是在较大的背景下发生的, 福州市在 2000 年以后增加的极端高温强

度和频率也是与大尺度环流背景的变化有关。已有研究指出, 低层的温度平流和对流层中层的位势高度异常(西太平洋副高)是影响我国南方夏季高温的主要环流因子(孙建奇等, 2011)。因此, 本文下面将从上述两个方面进一步分析 2000 年前后我国南方夏季大气环流异常。

图 5 为 1990~1999 年(图 5a)和 2003~2013 年(图 5b)东亚地区夏季对流层低层(925 hPa)风场(箭头)、气温(红线)和降水(阴影)的异常分布。时间段的选择主要考虑以下两个方面:(1)福州的温度和相对湿度自 1990 年代初开始至 21 世纪初均有一致下降的变化趋势(图 1、图 3a);(2)福建省的温度突变发生在 2000 年和 2002 年之间, 因此 2000~2002 年间可以认为是气候转折的过渡期而不予考虑。考虑到再分析资料中一致性的全球变暖, 图 5 中的气温已经去除了线性趋势。由图 5 可见, 2003 年以后我国夏季温度异常的分布主要呈现“十+十”的三极子模态, 南方的正异常中心主要位于长江下游以南的上海、浙江和福建区域。温度的异常分布与环流和降水的分布是相匹配的。近 10 年来, 我国东南沿海、华南地区和南海北部处于一个异常的反气旋环流控制之下(图 5b), 使得该地区夏季盛行风(南风)变弱, 这不利于水汽从南海地区向其北部地区的输送, 导致后者降水的条件变弱, 而且反气旋范围内异常的下沉运动和减弱的风速不利于蒸发潜热的释放和热量的扩散。其次, 对于我国东南沿海地区来说, 该地区在 2000 年初以后 7、8 月份降水的减少也加剧了其高温炎热程度。

另外, 我国江淮流域以及黄河下游以南的区域(东北部分地区和蒙古国东部)夏季降水在最近的十年里有所增加(减少), 相应的该地区温度为负(正)异常。黄荣辉等(2013)的研究指出中国东部夏季降水在 20 世纪 90 年代末发生了一次年代际突变, 具体表现为淮河流域的降水增加以及东北地区降水的减少。图 5b 的相关结果与前人的结论是基本一致的。

为了进一步探索东亚低层大气环流变异对我国东南沿海极端高温的影响, 本文诊断了 925 hPa 等压面上的热力学方程各项在 2000 年左右前后的变化。 p 坐标系下热力学方程可以写成以下形式:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -V \cdot \nabla T - \left(\frac{P}{P_0}\right)^{\frac{R}{c_p}} \cdot \omega \frac{\partial \theta}{\partial p} + \frac{Q}{c_p} \quad (2)$$

上式表示温度的局地变化分别由水平温度平流、垂直平流和非绝热加热等决定。(2) 式中, T 为温度; θ 为位温; ω 为 p 坐标系下的垂直速度; c_p 为定压

比热; Q 为非绝热加热, 包括潜热、感热、净的长波辐射和短波辐射; $p_0=1000$ hPa; $p=925$ hPa。

图 6 给出了 2003~2013 年与 1990~1999 年热力方程各项的合成分析结果。由图 6 可以看出, 水平温度平流有利于我国东南沿海地区出现正的温度异常 (图 6a), 正异常中心位于广东沿海以及台湾海峡西岸的福建地区, 负异常中心位于江淮流域。该结果与图 5 中我国南方 (江淮流域) 在 2003~2013 年温度偏暖 (冷) 相符合。其次, 垂直温度平流也有利于我国东南沿海福建等地高温事件的频发, 正异常中心位于长江口以及浙江和福建等地 (图 6b)。相比而言, 非绝热加热对于我国东南沿海温度异常的贡献几乎为零, 非绝热加热显著的正异常区主要位于我国北方中部地区, 有利于该地区的升温 (图 6c)。非绝热加热中对于我国陆地气温的影响主要以潜热和感热加热的贡献为主, 净的长波和短波辐射相对较小 (图略)。综上所述, 我国东南沿海夏季的温度异常主要由水平和垂直温度平流引起的, 我国北方中部的升温则主要由非绝热加热引起 (图 6d)。一方面, 这与图 5 的结果相一致; 另一方面, 也表明 21 世纪初以后, 我国东南沿海地区极端高温事件的突变主要是大气环流变异的结果, 而与局地非绝热加热的关系较小。

除了对流层低层的热平流作用, 中高层的环流异常对我国南方夏季的温度异常也起到很重要的

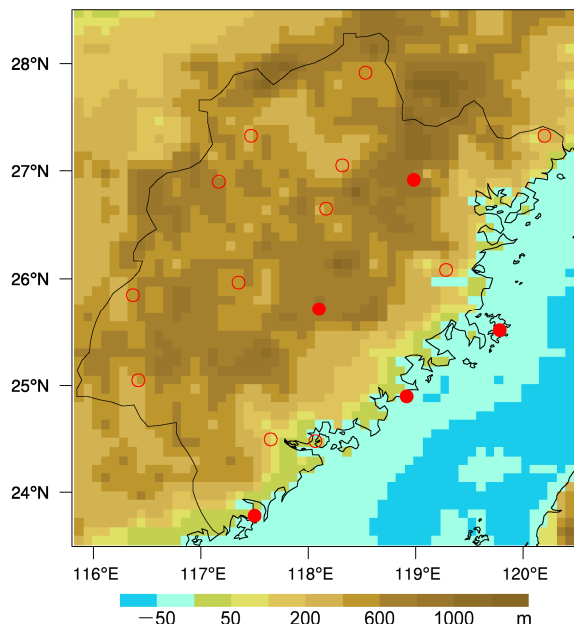


图 4 福建各基准站在 2000 年左右发生突变的站点。红色空心圆为 T_{d35} 和 T_{mean} 均发生突变的站点, 实心圆为仅 T_{mean} 发生突变的站点, 彩色阴影为地形高度 (单位: m)

Fig. 4 Stations experiencing a climatic jump around 2000. Red circles denote both T_{d35} and T_{mean} pass the moving t -test, red dots indicate that only T_{mean} passes the moving t -test, color shading denotes topography (units: m)

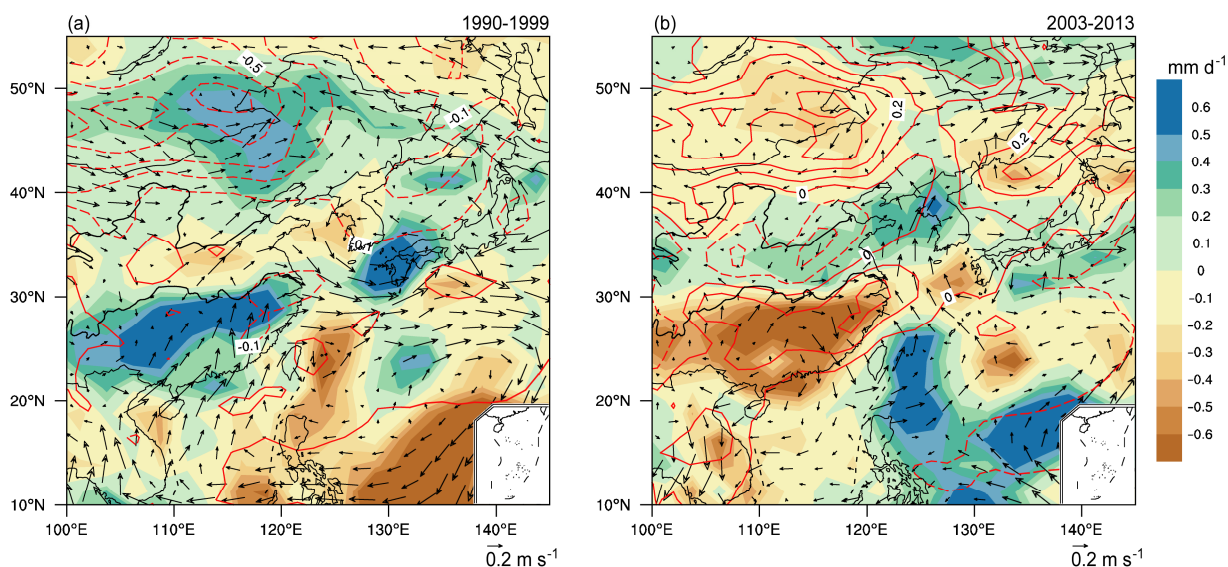


图 5 东亚夏季降水异常 (阴影; 单位: mm d^{-1})、水平风场异常 (箭头; 单位: m s^{-1}) 和温度异常 (红线; 单位: $^{\circ}\text{C}$) 的分布: (a) 1990~1999; (b) 2003~2013。图 (a) 和 (b) 红色等值线间隔分别为 0.2 和 0.1

Fig. 5 Distributions of mean summer precipitation anomaly (shaded; units: mm d^{-1}), wind anomaly (vectors; units: m s^{-1}), and temperature anomaly (red contours; units: $^{\circ}\text{C}$): (a) 1990~1999; (b) 2003~2013. The red contour interval in (a) and (b) are 0.2 and 0.1, respectively

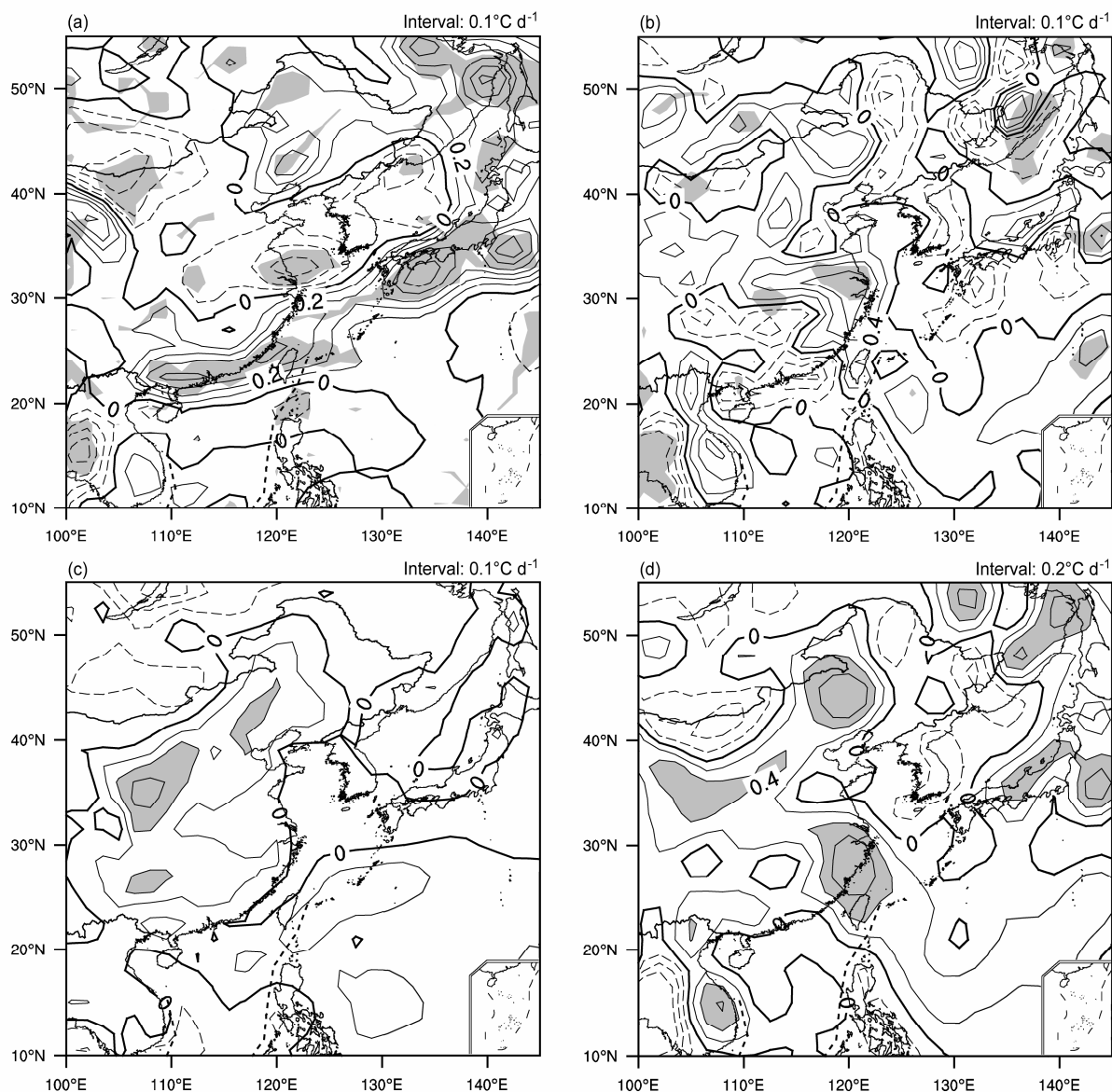


图 6 (a) 水平温度平流、(b) 垂直温度平流、(c) 非绝热加热以及 (d) 他们的总和在 2003~2013 年和 1990~1999 年两个时间段的合成分析。阴影区域通过了 90% 的信度检验

Fig. 6 Composite analysis of (a) horizontal temperature advection, (b) vertical temperature advection, (c) diabatic heating, and (d) summary of the three during the periods 2003–2013 and 1990–1999. Shaded areas are above 90% confidence level

作用。西太平洋副热带高压是整个东亚地区夏季气候的主要控制系统。天气学上, 通常采用 500 hPa 位势高度 5880 等值线的范围来描述西太平洋副高的位置和大小, 由于再分析资料中系统性的偏差, 多数研究中都采用 5870 等值线 (如 Zhou et al., 2009)。图 7 为西太平洋副高分别在 1990~1999 年 (虚线), 2003~2013 年 (点虚线) 以及气候态 1990~2013 年 (实线) 的夏季代表月 7 月份平均位置。我们的分析表明, 由于副高的位置 (如西边界

和北界) 存在明显的季节内变化, 而 2000 年前后 6 月份副高位置与 7、8 月份表现出明显的差异 (图略), 且 7、8 月是高温的频发月份, 因此, 本文选择了 7 月这个有代表性的月份。由图 7 可以看出, 西太平洋副高在 2003 年以后位置明显偏西, 平均西脊点在 115°E 以西, 控制区域主要位于长江中下游以南地区, 福建省夏季一般都在副高的控制区域内。在 2003 年夏季福州市的极端高温事件中 (夏季 53 天最高气温超过 35°C, 最高气温 41.7°C), 副

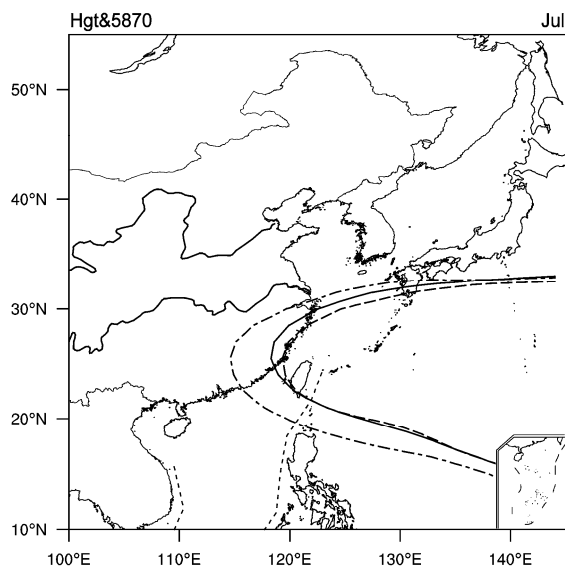


图7 东亚地区7月份500 hPa上5870 gpm等高线平均位置: 实线表示1990~2013年; 虚线表示1990~1999年; 点虚线表示2003~2013年

Fig. 7 Contour lines for 5870 gpm of the 500-hPa geopotential height for 1990–2013 (solid line), 1990–1999 (dashed line), and 2003–2013 (dot-dashed line)

高西伸达到 105°E 左右, 脊线维持在 27°N 附近, 福建省地区上空500 hPa位势高度达5900 gpm以上(图略)。副高控制区域内天气晴朗少云, 更多的太阳辐射到达地面, 盛行的下沉运动可能是引起图6b中正的垂直温度平流的主要因子, 副高的强盛和稳定控制对福建等地近地面的加热作用明显, 并引发持续的极端高温事件。

关于西太平洋副高对我国夏季南方高温事件的影响和机理, 前人已给出了大量的研究。例如, 西太平洋副高的强弱和位置的变化与我国南方高温天数有紧密的联系。史军等(2009)的研究表明, 当西太平洋副高异常强盛稳定且位置偏西时, 我国南方高温日数就是明显偏多, 反之亦然。另外, 作为北太平洋夏季最主要的天气系统, 西太平洋副高在不同时间尺度对东亚夏季的气候影响显著, 同时它又与其他全球大尺度海气因子密切联系。在季节尺度上, 副高的北跳与维持, 直接决定了其控制区域内的降水和气温的异常变化(Tao and Chen, 1987); 在年际尺度上, 副高的强弱又与ENSO、西太平洋暖池热力异常等相联系, 它是其他因子影响东亚气候的中介(He et al., 2013); 在年代际尺度上, 西太平洋副高年代际的西伸和加强又是东亚气候

长期变化的重要环流背景(Zhou et al., 2009)。鉴于前人已有丰富的研究成果, 本文在此就不做深入探讨。

综上所述, 大气环流低层热平流异常和中层西太平洋副高位置的偏西是造成2000年左右以后我国东南沿海包括福州市夏季极端高温事件频发的主要因素。水平暖平流有利于我国东南沿海的高温异常, 而由副高下沉运动引起的垂直温度平流也有利于极端高温的发生。此外, 还有一些其他因子(如ENSO、印度洋海温异常等)可以通过上述两个因子直接或间接影响我国南方的高温异常。例如, Hu et al. (2012)的研究表明, 印度洋海盆一致性模态可以激发出一个暖的Kelvin波列, 这可引起我国南方夏季尤其是8月份异常的下沉运动, 进而引发极端高温事件的频发。而登陆我国南方的台风个数也与高温天数有着密切的联系, 台风登陆前期外围强烈的下沉过程会对地面有明显的增温(李海鹰等, 2005)。

4 结论与讨论

近几十年来, 在全球变暖背景下, 夏季极端高温事件的发生趋于频繁, 并对我国国民经济和社会造成严重的影响。中国气象局基于高温日数的统计结果表明, 福州市在2000年以后的夏季高温天数位列全国第一, 因而被称为中国“第一火炉”。本文基于多个极端高温指数(极端高温天数、极端最高气温、平均最高气温和炎热指数等)的定义, 利用逐日的观测资料综合分析了福州在最近50多年以来(1960~2013年)极端高温的变化趋势及其特点与环流背景得到了以下几点结论。

福州市的极端高温指数在2000年左右之后, 经历了一次明显的上升后, 各项极端高温指数位居全国前列。具体而言, 福州在最近的11年里(2003~2013年)夏季平均高温天数为 37.1 d a^{-1} , 均超过了同期的传统“四大火炉”。极端温度的上升也伴随着平均温度的升高, 福州市的夏季平均温度在近几十年来上升了约 1.4°C 。进入21世纪, 福州市除了在年平均极端最高气温略微低于重庆外, 其他各项指数均超过传统“四大火炉”。进一步的分析表明, 福州市在2000年左右以后一跃成为中国“第一火炉”可能与整个福建省夏季气候在2000年左右经历了一次显著的气候突变有关。

东亚大气环流在2000年前后的年代际突变是

引起我国南方包括福州在内的大范围极端高温事件频发的主要因素。近十年来,一方面,我国南方夏季盛行的北风异常不利于水汽的输送使得降水减少,另一方面,减弱的风速也不利于蒸发潜热的释放和热量的扩散,从而增加了极端高温事件发生的潜在可能性。对热力学方程各项在 2003~2013 年和 1990~1999 年的合成分析表明,对流层低层的水平和垂直温度平流均有利于我国南方气温的上升,正异常中心位于我国东南沿海地区,而局地非绝热加热的贡献较小。此外,西太平洋副热带高压在近十年来明显的西伸对于我国南方夏季极端高温事件的维持也起到正贡献。

由于数据和篇幅的限制,本文只比较了福州市与传统“四大火炉”的炎热程度,不可否认,中国还有很多较为炎热的地区,如能综合全面的比较当然将会更有说服力。本文的研究还表明,由大尺度环流背景的年代际变化引起的区域气候突变在福州市的极端高温变异中起到了重要的作用,本文仅分析了与福州市高温直接相关的中低层环流因子,需要注意的是上述因子也是受到大尺度海气因子的调控,如 ENSO、NAO (North Atlantic oscillation) 和印度洋海温,深入探索这些因子对我国南方高温的局地环流异常的影响机制也有助于提高我国高温事件的预报准确性。另外,“热岛效应”也是城市极端高温事件频发的重要因子(季崇萍等, 2006)。虽然福州的夏季平均极端最高气温达到 39℃ 以上,但是距离福州市区百余公里的海岛县平潭的夏季最高气温却鲜有超过 35℃ 的情况。近年来,随着城市化的进展,福州市靠海一侧高楼林立,减弱了从海洋吹进市区的海风,使得城市中的热量难以扩散,这也说明“热岛效应”的确能够加剧城市的炎热程度。比较分析大气环流变异和“热岛效应”对城市极端高温事件的相对贡献将是下一步研究的重点。最后需要指出的是,究竟谁是“第一火炉”并不重要,但可权当是一次“警钟”,以期提醒人们认真考虑未来城市规划和建设中的问题。

致谢 感谢两位审稿人对本文提出的宝贵意见以及编辑认真细致的工作;感谢中国气象局气象信息中心提供的气象站点资料。

参考文献 (References)

陈斐然. “第一火炉”福州高温探因——以厦门为参照的气候差异比较 [J]. 科技创新与生产力, 2013 (8): 61–62. Chen Feiran. 2013. On how Fuzhou became the “Hottest Place”—Xiamen as the comparison reference

- on climatic differences [J]. Sci-tech Innovation and Productivity (in Chinese), 2013, (8): 61–62.
- 陈辉, 黄卓, 田华, 等. 2009. 高温中暑气象等级评定方法 [J]. 应用气象学报, 20 (4): 451–457. Chen Hui, Huang Zhuo, Tian Hua. 2009. An evaluation method of heatstroke grade with meteorological approaches [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 20 (4): 451–457.
- 龚志强, 王晓娟, 支蓉, 等. 2009. 中国近 58 年温度极端事件的区域特征及其与气候突变的联系 [J]. 物理学报, 58 (6): 4342–4353. Gong Zhiqiang, Wang Xiaojuan, Zhi Rong, et al. 2009. Regional characteristics of temperature changes in China during the past 58 years and its probable correlation with abrupt temperature change [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 58 (6): 4342–4353.
- He C, Zhou T J, Zou L W, et al. 2013. Two interannual variability modes of the northwestern Pacific subtropical anticyclone in boreal summer [J]. Science China: Earth Sciences, 56 (7): 1254–1256, doi:10.1007/s11430-012-4443-y.
- Hu Kaiming, Huang Gang, Qu Xia, et al. 2012. The impact of Indian Ocean variability on high temperature extremes across the southern Yangtze River valley in late summer [J]. Adv. Atmos. Sci., 29 (1): 91–100, doi:10.1007/s00376-011-0209-2.
- 黄荣辉, 刘永, 冯涛. 2013. 20 世纪 90 年代末中国东部夏季降水和环流的年代际变化特征及其内动力成因 [J]. 科学通报, 58 (8): 617–628. Huang R H, Liu Y, Feng T. 2013. Interdecadal change of summer precipitation over eastern China around the late-1990s and associated circulation anomalies, internal dynamical causes [J]. Chinese Sci. Bull., 58 (8): 617–628.
- 黄卓, 陈辉, 田华. 2011. 高温热浪指标研究 [J]. 气象, 37 (3): 345–351. Huang Zhuo, Chen Hui, Tian Hua. 2011. Research on the heat wave index [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 37 (3): 345–351.
- 季崇萍, 刘伟东, 轩春怡. 2006. 北京城市化进程对城市热岛的影响研究 [J]. 地球物理学报, 49 (1): 69–77. Ji Chongping, Liu Weidong, Xuan Chunyi. 2006. Impact of urban growth on the heat island in Beijing [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 49 (1): 69–77.
- 李海鹰, 余江华, 唐仰华. 2005. 热带气旋与珠江三角洲高温天气的关系 [J]. 气象科技, 33 (6): 501–504. Li Haiying, Yu Jianghua, Tang Yanghua. 2005. Relationship between tropical cyclone and high temperature in Pearl River Delta [J]. Meteor. Sci. Technol. (in Chinese), 33 (6): 501–504.
- Mearns L O, Katz R W, Schneider S H. 1984. Extreme high-temperature events: Changes in their probabilities with changes in mean temperature [J]. J. Climate Appl. Meteor., 23 (12): 1601–1613.
- Miller A J, Cayan D R, Barnett T P, et al. 1994. The 1976–77 climate shift of the Pacific Ocean [J]. Oceanography, 7 (1): 21–26.
- 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 [J]. 气候与环境研究, 12: 464–474. Peng Jingbei, Zhang Qingyun, Buhe Cholaw. 2007. On the characteristics and possible causes of a severe drought and heat wave in the Sichuan–Chongqing region in 2006 [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 12 (3): 464–474.
- Ren G Y, Zhou Y Q. 2014. Urbanization effect on trends of extreme temperature indices of national stations over mainland China, 1961–2008 [J]. J. Climate, 27 (6): 2340–2360.
- Schär C, Vidale P L, Lüthi D, et al. 2004. The role of increasing temperature

- variability in European summer heatwaves [J]. *Nature*, 427 (6972): 332–336.
- 史军, 丁一汇, 崔林丽. 2009. 华东极端高温气候特征及成因分析 [J]. *大气科学*, 33 (2): 347–358. Shi Jun, Ding Yihui, Cui Linli. 2009. Climatic characteristics of extreme maximum temperature in East China and its causes [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 33 (2): 347–358.
- 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. 2014. Record-breaking SST over mid-North Atlantic and extreme high temperature over the Jianghuai–Jiangnan region of China in 2013 [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 59 (27): 2714–2719, doi:10.1007/s11434-014-0425-0.
- 孙建奇, 王会军, 袁薇. 2011. 我国极端高温事件的年代际变化及其与大气环流的联系 [J]. *气候与环境研究*, 16 (2): 199–208. Sun Jianqi, Wang Huijun, Yuan Wei. 2011. Decadal variability of the extreme hot event in China and its association with atmospheric circulations [J]. *Climatic Environ. Res.* (in Chinese), 16 (2): 199–208.
- Sun Y, Zhang X B, Zwiers F W, et al. 2014. Rapid increase in the risk of extreme summer heat in eastern China [J]. *Nat. Climate Change*, 4: 1082–1085, doi:10.1038/NCLIMATE2410.
- Tao S Y, Chen L X. 1987. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China [M]// Chang C P, Krishnamurti T N. *Monsoon Meteorology*. London: Oxford University Press, 60–92.
- Thom E C. 1959. The discomfort index [J]. *Weatherwise*, 12(2): 57–61.
- 翟盘茂, 潘晓华. 2003. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化 [J]. *地理学报*, 58 (增刊): 1–10. Zhai Panmao, Pan Xiao hua. 2003. Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the second half of the 20th century [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 58 (Supplement): 1–10.
- Zhao Lei, Lee Xuhui, Smith R B, et al. 2014. Strong contributions of local background climate to urban heat islands [J]. *Nature*, 511 (7508): 216–219, doi:10.1038/nature13462.
- Zhou Tianjun, Yu R C, Zhang J, et al. 2009. Why the western Pacific subtropical high has extended westward since the late 1970s [J]. *J. Climate*, 22 (8): 2199–2215.
- 邹燕, 周信禹, 林毅, 等. 2001. 福建省夏季高温成因分析 [J]. *气象*, 27 (9): 26–30. Zou Yan, Zhou Xinyu, Lin Yi, et al. 2001. Cause of high-temperature weather in summer in Fujian Province [J]. *Meteor. Mon.* (in Chinese), 27 (9): 26–30.