

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 Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (2): 347–358.

华东极端高温气候特征及成因分析

史军¹ 丁一汇² 崔林丽³

1 上海市气候中心, 上海 200030

2 国家气候中心, 北京 100081

3 上海市卫星遥感与测量应用中心, 上海 201100

摘 要 基于华东气象站点 1960~2005 年逐日最高地面气温和同期西太平洋副高环流指数、赤道太平洋海温和登陆华东及我国的台风个数, 分析了华东极端高温日数和高温日平均最高气温的时空动态变化特征及高温成因。结果表明: 华东每年高温日数和高温日平均最高气温表现出较大的时间动态变化和空间地域差异。在过去 45 年间, 华东高温日数发生了多-少-多的年代际变化, 高温日平均最高气温发生了高-低-高的年代际变化。高温日数在华东中南及西南部较多, 而在华东东部沿海和北部较少。高温日平均最高气温在华东中西部的浙江、安徽和江西大部分地区较高。高温日数和高温日平均最高气温在不同地区表现出不同类型的跃变和跃变时间。在华东南部一些地区, 高温日数与夏季西太平洋副高面积和强度指数、上年下半年 Niño4 区海温和当年登陆我国的台风个数呈显著正相关。城市化也增加了华东高温事件的发生。

关键词 极端高温日数 高温日平均最高气温 气候特征 成因 华东地区

文章编号 1006-9895 (2009) 02-0347-12

中图分类号 P461

文献标识码 A

Climatic Characteristics of Extreme Maximum Temperature in East China and Its Causes

SHI Jun¹, DING Yihui², and CUI Linli³

1 Shanghai Climate Center, Shanghai 200030

2 National Climate Center, Beijing 100081

3 Shanghai Center for Satellite Remote Sensing and Application, Shanghai 201100

Abstract The temporal evolution and spatial distribution of the frequency of extreme maximum temperature (EMT) days as well as mean maximum temperature (MMT) during the EMT days in East China have been analyzed by using daily maximum surface air temperature from 1960 to 2005, the western Pacific subtropical high intensity and area index, the equatorial Pacific sea surface temperature and the number of landfall typhoons. The results show that the EMT days and the MMT during the EMT days have large temporal variation and regional difference. In the past 45 years, the EMT days show more-less-more interdecadal variability and the MMT during the EMT days has a higher-lower-higher interdecadal variability. There are more EMT days in the south-central and southwest parts of East China, and less ones in the east coastland area and the north part. The MMT during the EMT days is relatively higher in the most parts of Zhejiang, Anhui and Jiangxi provinces in the middle and west parts of East China. In ad-

收稿日期 2007-06-28, 2008-02-27 收修定稿

资助项目 国家科技支撑计划课题 2006BAK13B05, 上海市气象局研究型业务专项 YJ200805 和 YJ200803

作者简介 史军, 男, 1975 年出生, 博士, 主要从事气候变化及生态环境研究。E-mail: shij@climate.sh.cn

dition, the EMT days and the MMT during the EMT days show different types of jump change and different jump change time in different areas. In East China, particularly, in its southern part, the EMT days are positively correlated with the western Pacific subtropical high intensity and area index, the Niño 4 SST in the last half part of previous year, and the number of landfall typhoons in China. Urbanization also increases the frequency of EMT days.

Key words extreme maximum temperature (EMT) days, mean maximum temperature (MMT) during the EMT days, climatic characteristics, cause, East China

1 引言

近百年来,地球气候正经历一场以变暖为主要特征的显著变化(王绍武等,1995),而且,气候变暖的趋势将在短期内难以逆转(IPCC,2001)。气候变暖会使天气和气候极端事件的出现频率发生变化(IPCC,2001;丁一汇等,2002)。受全球气候变暖和区域快速城市化、工业化造成的城市热岛效应的双重影响,我国华东地区近50年气温增暖更为显著(徐家良等,2005),在长江流域及其以南地区,近年来几乎每年都会出现持续10天以上的强度大、范围广的极端高温天气。研究区域极端高温气候变化特征,分析高温发生的原因,有助于深入理解区域气候变化规律(任福民等,1998),探讨减缓与适应气候变化的对策和措施。

对华东一些省(市)极端高温气候特征及演变规律,国内学者已有一些研究成果,如邓自旺等(2000)研究了全球气候变暖对长江三角洲极端高温事件概率的影响;尹洁等(2003)对江西省2003年夏季罕见高温干旱的强度、气候历史地位等进行了分析;邹瑾等(2004a;2004b)对山东省夏季极端高温的年代际变化、异常空间分布和时间演变特征等进行了较为详细的诊断分析;张尚印等(2005)探讨了石家庄、南京、福州的高温气候特征及主要影响系统;周后福等(2005)分析了浙江省2003年夏季高温特征及主要原因;彭海燕等(2005)利用南京近百年气温资料,对以江苏为主的长江中下游地区出现的异常高温作了气候特征分析。

西太平洋副热带高压是每年影响华东极端高温天气频次和强度的首要因素。对西太平洋副热带高压与高温的关系,国内开展的研究较多,一些研究认为西太平洋副热带高压与高温天气有很好的对应关系,是影响高温过程的主要天气系统(邹燕等,2001;项素清等,2003),西太平洋副热带高压的偏强和西伸也是我国南方2003年异常高温的重要原

因(周后福等,2005;彭海燕等,2005;杨辉等,2005;林建等,2005)。西太平洋副热带高压是多系统综合作用的结果,海温异常、台风活动及全球增暖大背景都会对其产生影响(陈兴芳等,2000;杨辉等,2005;丁华君等,2007),从而影响到高温的频次和强度。此外,城市化热岛效应(华丽娟等,2006;张丽娟等,2006;郑祚芳等,2006)也在一定程度上影响到高温的分布与变化。

然而,上述研究或者是在空间上针对华东地区特定省或市,缺乏一个对区域高温特征的整体分析和认识,或者是在时间上只对2003年异常高温年的分析,研究结果缺乏地域性和代表性,而且,对高温成因的分析也多是针对特定高温过程时段,如2003年夏季异常高温影响因素的分析(周后福等,2005;彭海燕等,2005;杨辉等,2005;林建等,2005;丁华君等,2007),很少从时间和空间序列上对高温与各影响因素的异常和演变的关系开展研究。本研究基于华东地面气温观测资料,分析了华东高温日数和高温日平均最高气温的时空动态变化特征,并利用西太平洋副热带高压指数、赤道太平洋海温、登陆华东及我国的台风资料,以及上海城区、郊区气象站点地面气温资料,从自然气候变化和人类活动方面对华东高温进行归因分析。

2 研究资料与方法

2.1 研究资料

在本研究中,华东地区包括山东省、江苏省、安徽省、江西省、浙江省、福建省和上海市。研究所用的资料有中国气象局国家气象信息中心提供的1960~2005年华东91个气象站点逐日最高地面气温资料、上海市气候中心提供的1960~2005年上海10个气象站点逐日最高地面气温资料、国家气候中心提供的1960~2005年西太平洋副热带高压环流指数、美国气候预测中心提供的1959~2005年Niño1+2、Niño3、Niño4和Niño3.4区月平均

海表面温度资料和中国气象局上海台风研究所提供的 1960~2005 年台风资料。气象站点资料都经过了严格的质量检查,剔除了原有资料中有较大非气象误差(如站点迁移、资料缺测等)的站点,对于极个别月份有缺测值的,由多年平均值代替。

2.2 研究方法

本研究从时间和空间两方面对华东极端高温(日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$)的时空分布特征及变化进行分析,并定性或定量分析了各影响因素与华东高温的关系。文中首先对华东高温日数和高温日平均最高气温的年际变化、距平及空间分布特征进行分析,采用功率谱分析获得高温的变化周期,按照变化周期进行高温日数和高温日平均最高气温的年代际变化分析,并利用 Mann-Kendall 检验方法分析了华东年极端高温日数和高温日平均最高气温的跃变特征;然后,基于华东每年平均高温日数序列、各站点每年高温日数序列和西太平洋副热带高压环流指数、赤道太平洋海温、登陆华东和我国台风个数序列,分析了 1960~2005 年华东高温日数与各影响因素的时空变化关系,利用挑选出的 1960~2005 年期间华东高温日数较多和较少的前 10 年(共 20 年)、前 10 个 7 月(共 20 个月)和 8 月(共 20 个月),作为典型高温和低温期(表 1),对比分析了各影响因素在典型高温和低温期的差异,并分析了城市化对华东高温的影响。

3 研究结果与分析

3.1 华东极端高温的时间分布特征

在 1960~2005 年期间,华东多年平均高温日

数为 15.0 d,其中 1967 年最多,为 28.8 d,其次为 2003 年和 1971 年,都为 26.0 d,而 1997、1975 和 1999 年高温日数较少,分别为 6.7 d、6.9 d 和 7.1 d(图 1a)。与常年(1971~2000 年)的平均高温日数 13.5 d 相比,1971 年前,多数年份高温日数为正距平;1972~1987 年期间,多数年份高温日数为负距平;1988 年以后,多数年份高温日数又为正距平,尤其是从 2000~2005 年,高温日数连续 6 年为正距平。

高温日平均最高气温与高温日数的变化基本相同。1960~2005 年期间,华东多年高温日平均最高气温为 36.3°C ,其中 2003 年最高,为 37.2°C ,其次是 1966 年,为 36.9°C ,而 1999 年最低,为 35.7°C 。与常年(1971~2000 年)的高温日平均最高气温 36.2°C 相比,1971 年以前,高温日平均最高气温为正距平的年份等于负距平的年份;1972~1987 年期间,除在 1978 年和 1983 年为正距平外,其余 14 年高温日平均最高气温都为负距平;1988~2005 年期间,有 11 年高温日平均最高气温为正距平,而有 7 年高温日平均最高气温为负距平(图 1b)。

3.2 华东极端高温的空间分布特征

过去 46 年间,华东极端高温日数表现出较大的空间差异性。在华东中南及西南部,多年平均的极端高温日数较多,而在华东东部沿海和北部,高温日数较少(图 2a)。浙江丽水站极端高温日数最多,多年平均为 43.3 d,其次是福建建瓯、江西贵溪和福建永安站,多年平均极端高温日数分别为 41.9 d、41.4 d 和 40.0 d。

表 1 华东高温日数较多和较少的典型年和月

Table 1 Typical years and months with more and less extreme maximum temperature (EMT) days in East China

全年		7 月		8 月	
多高温日	少高温日	多高温日	少高温日	多高温日	少高温日
1961	1972	1961	1970	1963	1960
1964	1973	1964	1973	1966	1972
1966	1974	1971	1974	1967	1975
1967	1975	1988	1975	1971	1980
1971	1982	1990	1982	1976	1982
1978	1985	1992	1985	1978	1985
1988	1987	1994	1987	1981	1997
1994	1993	2001	1993	1983	1999
2003	1997	2003	1997	1998	2000
2005	1999	2004	1999	2003	2001

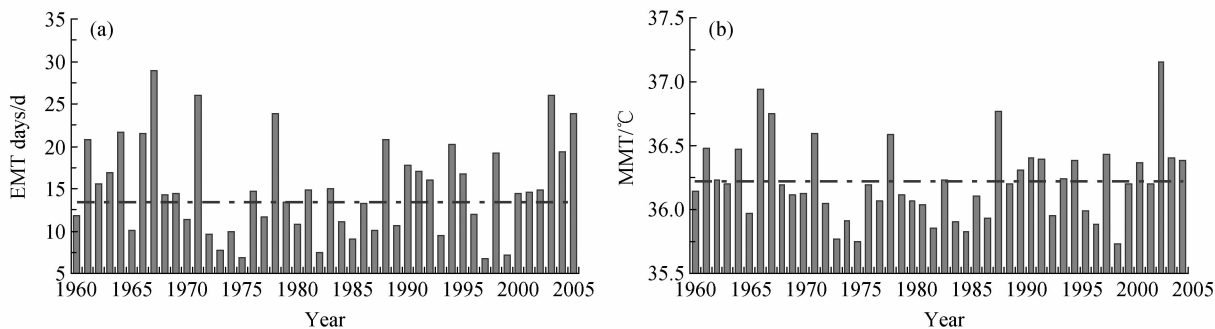


图1 1960~2005年期间华东(a)年极端高温日数及(b)高温日平均最高气温。点虚线:常年值

Fig. 1 (a) Annual EMT days and (b) mean maximum temperature (MMT) during the EMT days in East China from 1960 to 2005. The dashed line is the average from 1971 to 2000

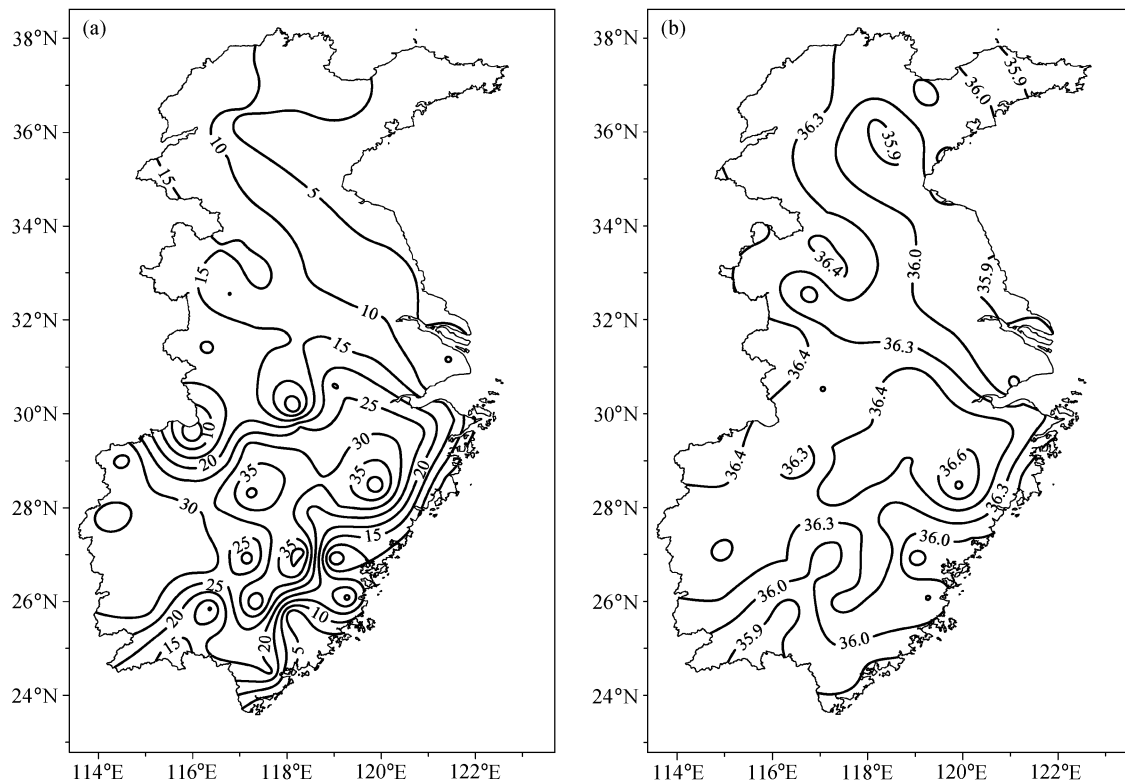


图2 1960~2005年华东(a)年极端高温日数和(b)高温日平均最高气温的空间分布

Fig. 2 Distribution of (a) the annual EMT days and (b) MMT during the EMT days in East China from 1960 to 2005

高温日平均最高气温的空间分布也呈现出较明显的差异。在华东中西部的浙江、安徽和江西大部分地区,高温日平均最高气温都在 36.3°C 以上,个别台站如浙江丽水达到 36.9°C ,而在山东沂源-莒县地区及周边、江苏东部、上海、江西南部部分地区和福建屏南及其南部,高温日平均最高气温较低,多在 36.0°C 以下(图2b)。

3.3 华东极端高温的年代际变化特征

对1961~2005年华东年极端高温日数和高温

日平均最高气温序列作功率谱分析,并取标准谱的显著性水平 $\alpha=0.05$,结果表明,如对序列作5年滑动平均处理,在过去45年间,极端高温日数和高温日平均最高气温都是以12年为第一显著振荡周期,以8年为第二显著振荡周期;如对序列作10年滑动平均处理,极端高温日数和高温日平均最高气温都是以11年为显著振荡周期(图略)。因此,下面以10年为一个年代际(2001~2005年期间为5年),分析1961~2005年期间华东高温日数和高

表 2 五个时期各级极端高温日数及高温日平均最高气温
Table 2 The EMT days and MMT during the EMT days at different ETM levels during five periods

时期	日最高气温≥35℃		日最高气温≥38℃		日最高气温≥40℃	
	出现频数(天/年)	平均最高气温/℃	出现频数(天/年)	平均最高气温(℃)	出现频数(天/年)	平均最高气温/℃
1961~1970	17.5	36.4	1.98	38.8	0.17	40.6
1971~1980	13.5	36.2	0.99	38.6	0.05	40.4
1981~1990	13.0	36.2	0.95	38.6	0.04	40.3
1991~2000	13.9	36.2	1.04	38.6	0.03	40.4
2001~2005	19.7	36.6	2.87	38.9	0.34	40.7

温日平均最高气温变化。

在过去的 45 年间，华东日最高气温≥35℃、≥38℃和≥40℃出现的日数都经历了多-少-多的年代际变化，日最高气温≥35℃、≥38℃和≥40℃期间日平均最高气温也经历了高-低-高的年代际变化(表 2)。在本世纪最初 5 年(2001~2005 年)，华东各级高温日数最多，高温日平均最高气温最高，其次是在 20 世纪 60 年代(1961~1970 年)，各级高温日数较多，高温日平均最高气温较高，而在 20 世纪 70 年代(1971~1980 年)到 90 年代(1991~2000)，各级高温日数较少，高温日平均最高气温较低。

本研究关于华东高温日数的年代际总体变化规律也被其它研究所证实，尽管各地在具体变化时间段上有一些差异。如邹瑾等(2005)研究发现，1951~2003 年期间山东夏季高温经历了一次明显的年代振荡过程，20 世纪 50~60 年代为高温多发期，70~90 年代前期为高温少发期，90 年代中后期到 21 世纪初期开始转为多高温期。高天赤等(2002)对杭州市 1951~2000 年高温气候资料分析得出，杭州多高温年多出现于 20 世纪 50 年代至 70 年代和 90 年代，少高温年基本集中在 70 年代到 80 年代。

3.4 华东极端高温的跃变分析

利用 Mann-Kendall 方法，对华东各站点 1960~2005 年高温日数和高温日平均最高气温作跃变检测，结果表明，在华东沿海及内陆高海拔地区一些站点，极端高温日数多数都没有发生跃变；在江西大部分地区、山东西部、安徽西北和东南部及福建西北部，多数站点极端高温日数都发生一次减少跃变；在江苏南部、上海、浙江大部分地区和安徽、福建一些地区，多数站点极端高温日数都发生一次增加跃变；而在山东东部、苏北、安徽中部、东北部

和福建、浙江西部，多数站点都发生过先减少后增加两次跃变(图 3a)。图 4 给出了极端高温日数四种变化类型的典型站点 Mann-Kendall 统计量曲线。

华东极端高温日数减少跃变主要发生在 20 世纪 80 年代以前，以 60 年代和 70 年代居多；极端高温日数增加跃变则始于 20 世纪 70 年代末期(1978 年)(图略)。在 20 世纪 80~90 年代，发生减少跃变或增加跃变的站点都较少，进入 21 世纪后，发生高温日数增加跃变的站点增多，在 21 世纪最初 5 年，华东就有 29 个站点发生高温日数增加跃变。

在高温日平均最高气温序列完整的 59 个站点中(图 3b)，有 37 个站点高温日平均最高气温在过去 46 年间发生过降低跃变，这些站点多分布在山东西部、安徽北部、江西全省和福建西北部；有 25 个站点发生过高温日平均最高气温增高跃变，这些站点多分布于安徽中部、苏南、上海、浙江全省和福建东部；有 5 个站点高温日平均最高气温没有发生跃变。其中在高温日平均最高气温发生跃变的站点中，有 8 个站点发生了高温日平均最高气温先降低后增高两次跃变。高温日平均最高气温降低跃变时间基本上集中在 20 世纪 60 年代末到 70 年代初，而增高跃变时间多数是在本世纪最初 5 年(图略)。

极端高温日数发生跃变的现象也被其他研究者发现，如邹瑾等(2005)利用 Mann-Kendall 检测方法分析得出山东夏季高温日数在 1969 年前后发生了一次由多到少的显著跃变。高天赤等(2002)采用均值差异假设检验方法分析杭州市 1951~2000 年高温年际变化的跃变特征，发现杭州市高温在 1967 年和 1990 年两次发生了明显变化，即在 20 世纪 60 年代末由相对偏多期转为相对偏少期，在 90 年代初期又由相对偏少期转变为相对偏多期。华东极端高温日数增加跃变略晚于年平均气温变暖跃变，丁一汇等(2008)研究表明，淮河地区年平均

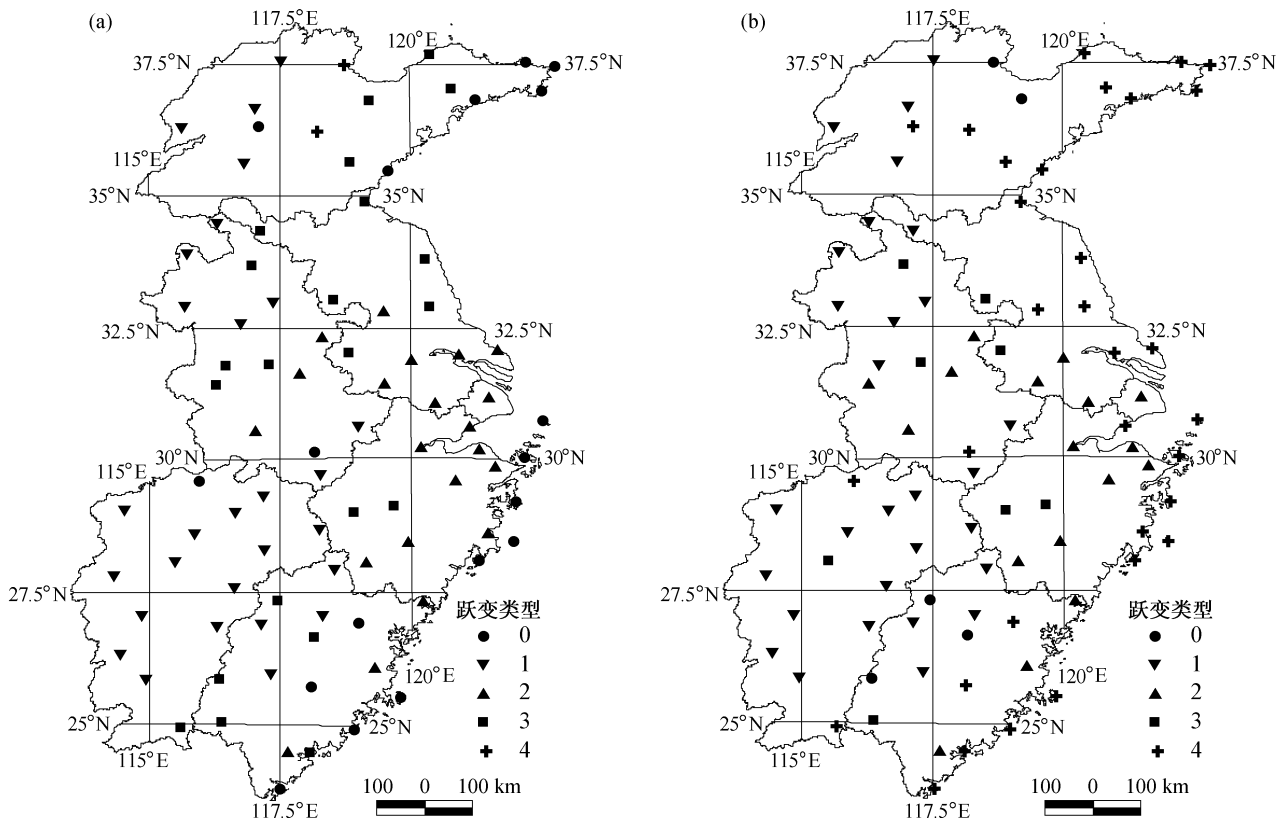


图3 1960~2005年华东(a)极端高温日数和(b)高温日平均最高气温的跃变类型。0:没有发生跃变;1:只发生一次减少跃变;2:只发生一次增加跃变;3:发生两次跃变,先减少跃变后增加跃变;4:有待于进一步检验或时间序列不完整

Fig. 3 Types of climatic jump change of (a) the annual EMT days and (b) MMT during the EMT days in East China from 1960 to 2005.

0: no jump; 1: only one decreasing jump; 2: only one increasing jump; 3: two jumps, firstly decreasing, then increasing; 4: further test is needed or there is not integrated time series

气温变暖跃变发生在20世纪90年代初,长江中下游和华南地区年平均气温变暖跃变基本上都发生在20世纪90年代中期左右。

3.5 华东极端高温变化的影响因素分析

3.5.1 西太平洋副热带高压

夏季西太平洋副热带高压的活动与我国东部天气有十分密切的关系,是影响华东夏季高温的一个重要因素。项素清等(2003)对1954~2000年舟山市定海观测站6~9月气温资料分析发现,副热带高压的强弱和位置与高温天气有很好的对应关系。邹燕等(2001)对1961~1999年福建7~9月各高温过程环流背景的统计分析表明,西太平洋副热带高压是影响福建省高温过程的主要天气系统。尹洁等(2005)也研究表明,夏季副高异常强盛稳定、西伸脊点明显偏西、东亚500 hPa环流异常型呈“正负正”分布是江西2003年夏季罕见高温的主要环流背景。

对比分析华东1960~2005年期间7月和8月高温日数较多和较少的前10月(共40个月,表1)所对应的西太平洋副热带高压指数(包括副高面积指数、强度指数、脊线、北界和西伸脊点),结果表明(表3),无论是在7月还是在8月,当高温日数较多时,副高面积指数和强度指数较高,脊点西伸;相反,当高温日数较少时,副高面积指数和强度指数较小,脊点东退。副高脊线和北界在多少高温月和少高温月之间没有明显规律性差异。基于1960~2005年期间华东每年各站点高温日数与夏季西太平洋副高指数(6~8月总和)序列分析表明,在华东东南部包括江苏南部、上海、浙江和福建的大部分地区,高温日数与夏季西太平洋副高强度指数都在0.05水平上显著正相关,在江苏南部、上海、浙江和福建东部,高温日数与夏季西太平洋副高面积指数也都在0.05水平上显著正相关,而高温日数与副高西伸脊点、脊线位置和北界位置相

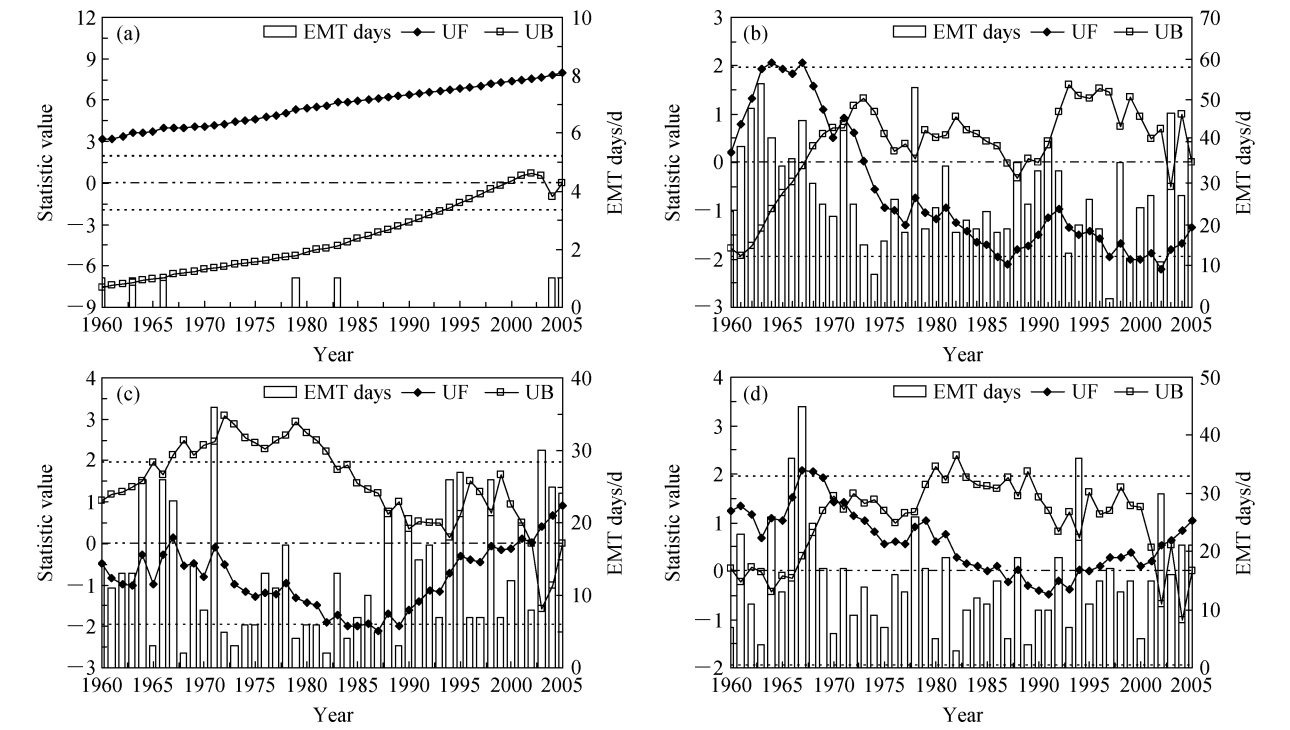


图4 典型站点极端高温日数的 Mann-Kendall 统计量曲线：(a) 福建崇武站；(b) 江西宜春站；(c) 江苏溧阳站；(d) 安徽宿州站。UF 和 UB 曲线分别为极端高温日数的顺序时间序列和逆序时间序列的秩序列，点虚线为 $\alpha=0.05$ 显著性水平临界值

Fig. 4 Mann-Kendall statistic curves of annual EMT days at typical stations of East China: (a) Chongwu station in Fujian Province; (b) Yichun station in Jiangxi Province; (c) Liyang station in Jiangsu Province; (d) Suzhou station in Anhui Province. Curves UF and UB are the rank sequences of EMT days in positive and negative time sequence, respectively; dash-dotted line; $\alpha=0.05$ significance level

表 3 华东典型高温月与低温月西太平洋副高指数及距平

Table 3 The characteristic indexes of the western Pacific subtropical high and their anomalies in the months with more and less EMT days in East China

副高指数	7 月				8 月			
	多高温月		少高温月		多高温月		少高温月	
	指数	距平	指数	距平	指数	距平	指数	距平
面积指数	24.8	2.8	20.5	−1.5	25.1	3.1	18.7	−3.3
强度指数	47.9	7.9	34.4	−5.6	46.2	8.2	29.0	−9.0
脊线	26.4	1.4	25.1	0.1	27.7	1.7	29.1	3.1
北界	31.8	2.8	30.7	1.7	32.8	2.8	34.4	4.4
西伸脊点	114.1	−7.9	126.1	4.1	109.0	−15.0	126.2	2.2

关性较差，只在个别站点相关显著（图略）。

3.5.2 赤道太平洋海温

海表温度是影响大气环流的重要因子之一。海温通过影响副高活动而影响高温天气，高温相对于海温异常则有数月之久的滞后性（陈兴芳等，2000）。尹洁等（2005）研究发现，江西夏季高温与上年 9~11 月的月海温距平场在赤道太平洋中部略偏东处正相关；丁华君等（2007）对 2003 年夏季江

南异常高温天气分析表明，赤道东太平洋关键区（即 Niño3 区）海温与江南高温呈 6 个月的正相关；纪忠萍等（2005）对 2003 年夏季异常高温气候背景的分析也得出，2002 年 12 月~2003 年 2 月西北太平洋海温在 Niño3、Niño4 区均为正距平。

对比分析华东高温日数较多和较少的前 10 年（表 1）从上年 7 月到当年 6 月 Niño 区月海表温度距平，结果表明（表略），在高温日数较少年，

Niño3 区和 Niño3.4 区海温在上年 8~11 月基本都为负距平,而在高温日数较多年, Niño4 区海温在上年 7~12 月基本都为正距平, Niño1+2 海区在当年 2~6 月也多为负距平,其它海区则没有明显的时间变化规律性,因此,华东高温与 Niño4 区和 Niño3.4 区海温关系最密切。

利用 1960~2005 年期间华东年平均高温日数和华东各站点的年高温日数序列,分别分析其与 Niño 区各月海温的关系,结果表明,在过去 46 年期间,华东每年平均高温日数与上年下半年 Niño4 区海温在 0.01 水平上显著相关,与上年下半年 Niño3.4 区海温在 0.05 水平上显著相关;空间上,在华东大部分地区,包括福建、浙江、上海、安徽南部、江苏中部和南部及江西东部,高温日数与上年下半年 Niño4 区海温都在 0.05 水平上显著正相关,在苏南、上海和浙江东部,高温日数与上年下半年 Niño4 区海温都在 0.01 水平上显著正相关(图 5b)。

项素清等(2002)根据开始出现海温异常偏高

的区域是在赤道东太平洋的东部(115°W 以东)还是在中(150°W~115°W)、西部(150°W 以西),将 El Niño 事件分别划分为第 1 类和第 2 类,并得出在第 1 类 El Niño 事件影响年,舟山不易出现高温天气,而在第 2 类 El Niño 事件影响年高温天气多发,与本研究结果具有很好的一致性。

3.5.3 登陆台风

西太平洋副热带高压往往会因为热带气旋或台风的活动而被削弱、东退(黄仕松,1978)。一些研究(尹洁等,2003;周后福等,2005;杨辉等,2005)认为,2003 年我国华东一些省份出现的异常高温与台风个数偏少、影响程度偏轻有关。然而,任素玲等(2007)对西太平洋副热带高压和台风相互作用的数值试验研究表明,台风和副高的影响是双向的,在西行台风的西北方向气压增加,进而使西太平洋副高加强西伸。李海鹰等(2005)对热带气旋与珠江三角洲高温天气的关系研究也发现,当在珠江三角洲东北偏东方至东南方(60°~150°)、

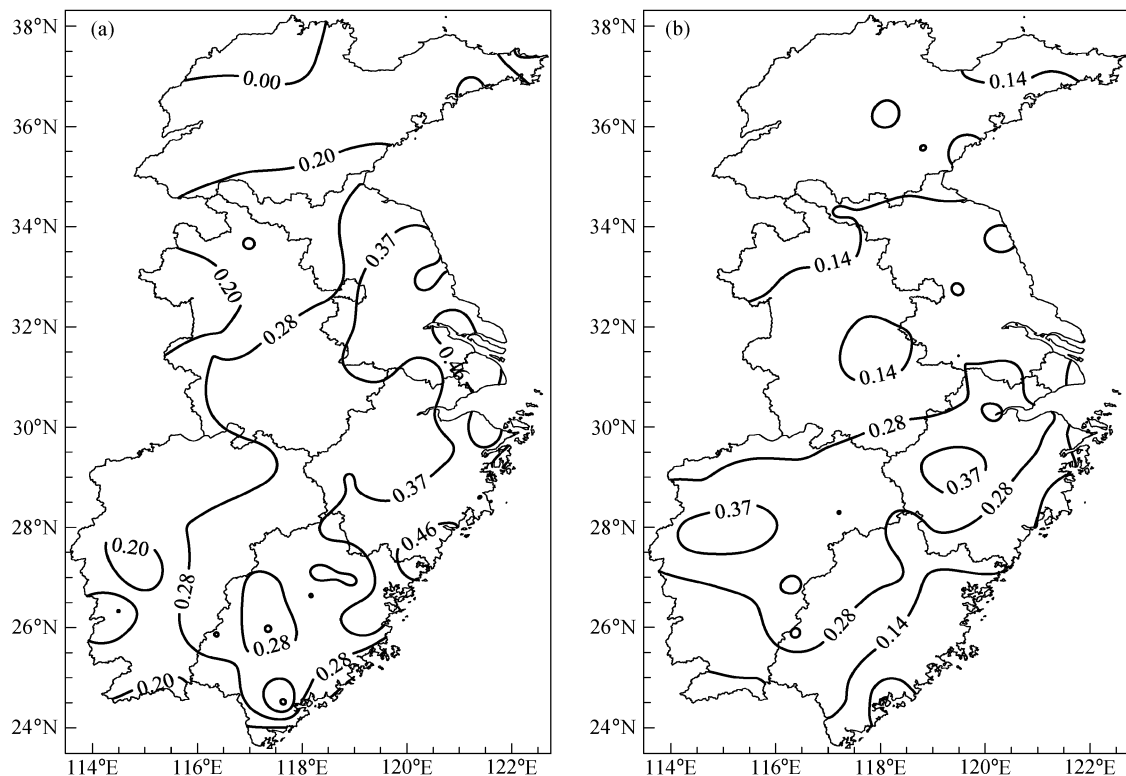


图 5 华东高温日数与上年下半年 Niño4 区海温 (a) 和当年登陆中国台风个数 (b) 的相关性。0.28 线为通过 0.05 显著性水平检验, 0.37 线为通过 0.01 显著性水平检验, 0.46 线为通过 0.001 显著性水平检验

Fig. 5 Correlation coefficients between annual EMT days in East China and (a) Niño 4 SST in the last half part of previous year and (b) the number of landfall typhoons in China. 0.28 isoline; correlation is significant at the 0.05 level; 0.37 isoline; correlation is significant at the 0.01 level; 0.46 isoline; correlation is significant at the 0.001 level

距离珠江三角洲为 500~2000 km 的扇形弧面中有热带气旋出现时,其外围的下沉气流对珠江三角洲有明显的增温作用。

对比分析 1960~2005 年期间华东高温日数较多和较少的前 10 年、7 月和 8 月(表 1)登陆华东和我国台风个数的平均值,结果表明(表 4),在高温日数较多的年及 7 月,登陆华东的台风数都较高温日数较少时偏少,而登陆我国的台风数都较高温日数较少时期偏多;在 8 月,高温日数较多时,登陆华东和我国的台风数都偏少。对 1960~2005 年期间华东各站高温日数与登陆华东和我国的台风个数序列分析表明,在华东多数站点,每年高温日数与登陆华东台风个数之间相关关系在统计上都不显著(图略);而在华东南部从浙江西北到江西西部和福建西部区域内,每年高温日数与登陆我国的台风个数则在 0.05 水平上显著正相关(图 5b)。由于台风是一个暖性的低压系统,在台风外围,气流强

烈下沉过程中会增温加热;而且由于台风对外围水汽的抽吸作用,使外围天气晴空少云,太阳辐射不受阻挡,地面气温也会明显升高(李海鹰等, 2005)。这可以从某种程度上理解华东南部高温日数与登陆我国台风个数之间关系,当然,深层次的机理研究分析还有待于进一步开展。

3.5.4 城市化

华东高温虽然与前述各因素有密切关系,人类活动则使极端高温天气出现的风险大大增加(Stott et al., 2004)。图 6 是 1961~2005 年期间上海 10 个气象站的高温日数变化,可以看出,在 20 世纪 80 年代以前,站点间的高温日数差异不是很大,从 80 年代以后,站点间高温日数差异逐渐增大,到 21 世纪最初 5 年(2001~2005 年),高温日数在市区(徐家汇)、近郊(宝山、嘉定、闵行、青浦和松江)和远郊(金山、崇明、奉贤和南汇)之间的差异已非常明显。20 世纪 60 年代,上海市区、近郊和远郊的每年高温日数分别为 7、6 和 4 天,到 21 世纪最初 5 年,分别增至 27、17 和 7 天。利用上海市区高温日数减去当年远郊四区平均高温日数,得到 1961~2005 年期间城市化所增加的高温日数序列,结果表明,1961~2005 年期间,上海城市化对高温日数的贡献值为 3.2 d/10 a,而从 1981~2005 年期间,城市化对高温日数的贡献值为 6.6 d/10 a,两个期间高温日数增加趋势都极显著,相关系数都超

表 4 华东多高温期与少高温期登陆台风个数差异
Table 4 Numbers of landfall typhoons in the periods with more and less EMT days in East China

登陆地点	高温日较多			高温日较少		
	全年	7 月	8 月	全年	7 月	8 月
华东	0.8	0.0	0.0	0.9	0.2	0.5
中国	4.5	1.0	0.4	2.9	0.5	1.0

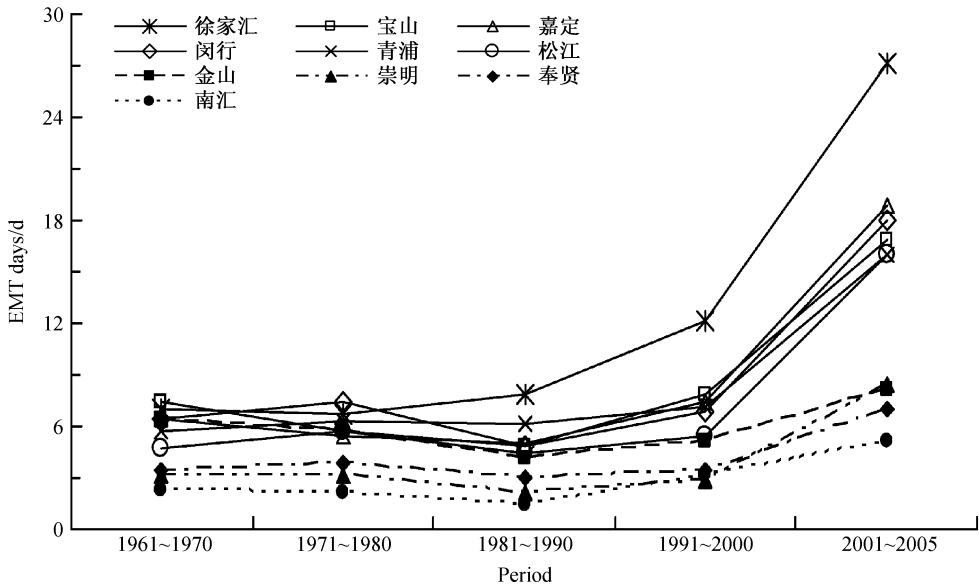


图 6 1961~2005 年期间上海不同区(县)高温日数的变化
Fig. 6 Change of the annual EMT days in different regions of Shanghai from 1960 to 2005

过 0.001 的显著性水平。

随着经济和人口的不断增加,华东城区范围有很大的扩张,相应的城市下垫面环境也有很大的改变。城市化对城市气温、湿度、能见度、风和降水都产生影响,其中以“热岛效应”最为突出,是高温日数分布悬殊加大的原因之一(张丽娟等,2006)。王朝春等(2006)认为,近年来福州出现的夏季高温主要原因是由于副热带高压滞留在福州上空和城市的“热岛效应”引起的。郑祚芳等(2006)应用中尺度 MM5v3 模式,开展了地形及城市下垫面对北京夏季高温影响的数值模拟研究,结果表明,在不同的城市地表环境中,下垫面可能是通过所获得的感热和释放的潜热的不同来影响近地面层温度的。华东城市化、下垫面改变及城市“热岛效应”,也是华东高温增加的原因之一。

4 结论

在全球气候变暖和区域城市化的双重影响下,华东极端高温日数和高温日平均最高气温变化明显。本文通过对华东过去 46 年间极端高温气候及影响因素进行分析,得到以下一些主要结论:

(1) 过去 46 年间,华东多年平均高温日数为 15.0 d,高温日平均最高气温为 36.3℃。在 1972~1987 年期间,华东高温日数和高温日平均最高气温在多数年份为负距平;而在 1971 年前和 1988 年后,多数年份都为正距平。极端高温日数在华东中南及西南部较多,而在华东东部沿海和北部较少。高温日平均最高气温在华东中部和西部的大部分地区较高,而在华东东北部和东南部较低。

(2) 华东高温日数和高温日平均最高气温分别具有多-少-多和高-低-高的年代际变化规律。在 21 世纪最初 5 年和 20 世纪 60 年代,高温日数较多,高温日平均最高气温较高;而在 20 世纪 70~90 年代,高温日数较少,高温日平均最高气温较低。

(3) 华东高温日数和高温日平均最高气温的跃变类型具有地域差异性,但二者空间变化格局基本一致。高温日数减少跃变和高温日平均最高气温降低跃变时间主要集中于 20 世纪 60~70 年代,高温日数增加跃变和高温日平均最高气温升高跃变时间以本世纪最初 5 年为主。

(4) 过去 46 年间,华东高温日数与副高强度和面积指数在华东东南部呈显著正相关,与上年下

半年 Niño4 区海温在福建、浙江、上海、安徽南部、江苏中部和南部及江西南部显著正相关,与登陆我国的台风个数在华东南部从浙江西北到江西西部和福建西部区域内都呈显著正相关。华东城市化、下垫面改变及城市热岛效应,也是高温日数增加的原因之一。

参考文献 (References)

- 陈兴芳,赵振国. 2000. 夏季降水气候分析 [M]// 中国汛期降水预测研究及应用. 北京:气象出版社,48-64. Chen Xingfang, Zhao Zhenguo. 2000. Climate analysis of the rainfall during summer [M]// Study and Application of Rainfall Prediction during Rainy Season over China (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 48-64.
- 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]. 南京气象学院学报, 23 (1): 42-47. Deng Ziwan, Ding Yuguo, Chen Yeguo. 2000. Effects of global warming on the probability of extreme high temperature event in the Yangtze Delta [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 23 (1): 42-47.
- 丁华君,周玲丽,查贲,等. 2007. 2003 年夏季江南异常高温天气分析 [J]. 浙江大学学报(理学版), 34 (1): 100-105, 120. Ding Huajun, Zhou Lingli, Zha Ben, et al. 2007. An analysis on the abnormal high temperature weather in the south Yangtze valley during summer 2003 [J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition) (in Chinese), 34 (1): 100-105, 120.
- 丁一汇,张锦,宋亚芳. 2002. 天气和气候极端事件的变化及其与全球变暖的联系 [J]. 气象, 28 (3): 3-7. Ding Yihui, Zhang Jin, Song Yafang. 2002. Changes in weather and climate extreme events and their association with the global warming [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 28 (3): 3-7.
- 丁一汇,张莉. 2008. 青藏高原与中国其他地区气候突变时间的比较 [J]. 大气科学, 32 (4): 794-805. Ding Yihui, Zhang Li. 2008. Intercomparison of the time for climate abrupt change between the Tibetan Plateau and other regions in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (4): 794-805.
- 高天赤,方汉杰,马瑞青,等. 2002. 杭州市高温气候特征分析 [J]. 浙江气象, 23 (2): 1-3. Gao Tianchi, Fang Hanjie, Ma Ruiqing, et al. 2002. Climatic characteristics of high temperature in Hangzhou [J]. Journal of Zhejiang Meteorology (in Chinese), 23 (2): 1-3.
- 华丽娟,马柱国,曾昭美. 2006. 中国东部地区大城市和小城镇极端温度及日较差变化对比分析 [J]. 大气科学, 30 (1): 80-92. Hua Lijuan, Ma Zhuguo, Zeng Zhaomei. 2006. The comparative analysis of the changes of extreme temperature and extreme diurnal temperature range of large cities and small towns in eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (1): 80-92.

- 黄仕松. 1978. 有关副热带高压活动及其预报问题 [J]. 大气科学, 2: 159–168. Huang Shisong. 1978. Problems on the activity of the subtropical high and its prediction [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 2: 159–168.
- IPCC. 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis [M]. Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al., Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 881.
- 纪忠萍, 林钢, 李晓娟, 等. 2005. 2003 年广东省夏季的异常高温天气及气候背景 [J]. 热带气象学报, 21 (2): 207–216. Ji Zhongping, Lin Gang, Li Xiaojuan, et al. 2005. High temperature anomalies in Guangdong in summer 2003 and its climatic background [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 21 (2): 207–216.
- 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]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 33 (6): 501–504.
- 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.
- 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 [J]. 气象科学, 25 (4): 355–361. Peng Haiyan, Zhou Zengkui, Zhao Yongling, et al. 2005. The analysis of abnormal high temperature in 2003 summer [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 5 (4): 355–361.
- 任福民, 翟盘茂. 1998. 1951~1990 年中国极端气温变化分析 [J]. 大气科学, 22 (2): 217–227. Ren Fumin, Zhai Panmao. 1998. Study on changes of China's extreme temperatures during 1951–1990 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 22 (2): 217–227.
- 任素玲, 刘屹岷, 吴国雄. 2007. 西太平洋副热带高压和台风相互作用的数值试验研究 [J]. 气象学报, 65 (3): 329–340. Ren Suling, Liu Yimin, Wu Guoxiong. 2007. Interactions between typhoon and subtropical anticyclone over western Pacific revealed by numerical experiments [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 65 (3): 329–340.
- Stott P A, Stone D A, Allen R. 2004. Human contribution to the European heatwave of 2003 [J]. Nature, 432: 610–614.
- 王朝春. 2006. 城市气候高温化的成因与对策——以福州市城区为例 [J]. 城市问题, (9): 98–102. Wang Chaochun. 2006. Causes and countermeasures of urban high temperature climate: Exemplified by the urban area of Fuzhou City [J]. Urban Problems (in Chinese), (9): 98–102.
- 王绍武, 叶谨林. 1995. 近百年全球气候变暖的分析 [J]. 大气科学, 19 (5): 545–553. Wang Shaowu, Ye Jinlin. 1995. An analysis of global warming during the last one hundred years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 19 (5): 545–553.
- 项素清, 张荫廉, 曹美兰. 2002. 舟山市气候与厄尔尼诺事件的相关性 [J]. 气象科技, 30 (4): 226–228. Xiang Suqing, Zhang Linlian, Cao Meilan. 2002. Relativity of climate and El Niño event in Zhoushan City [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 30 (4): 226–228.
- 项素清, 毛俊萱, 曹美兰. 2003. 舟山市高温天气气候特征分析 [J]. 气象科技, 31 (3): 160–162, 166. Xiang Suqing, Mao Junxuan, Cao Meilan. 2003. Analysis of the climate characteristics and effect factors of high temperature in summer in Zhoushan City [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 31 (3): 160–162, 166.
- 徐家良, 柯晓新, 周伟东. 2005. 长江三角洲城市地区近 50 年气候变化及其影响 [M]// 大气科学研究与应用. 北京: 气象出版社, 8–16. Xu Jialiang, Ke Xiaoxin, Zhou Weidong. 2005. Climate variation and its influence in cities of the Changjiang Delta in recent 50 years [M]// Atmospheric Science Research and Application. Beijing: China Meteorological Press, 8–16.
- 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. 2005. Diagnostic study of serious high temperature over South China in 2003 summer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (1): 80–85.
- 尹洁, 张传江, 张超美, 等. 2003. 江西 2003 年夏季罕见高温气候特征及成因分析 [J]. 江西气象科技, 26 (4): 19–22. Yin Jie, Zhang Chuanjiang, Zhang Chaomei, et al. 2003. Climate attribute and clause analysis of Jiangxi abnormal high temperature in summer in 2003 [J]. Jiangxi Meteorological Science & Technology (in Chinese), 26 (4): 19–22.
- 尹洁, 张传江, 张超美. 2005. 江西 2003 年夏季罕见高温气候诊断分析 [J]. 南京气象学院学报, 28 (6): 855–861. Yin Jie, Zhang Chuanjiang, Zhang Chaomei. 2005. Climatic diagnostic analysis of the exceptional high temperature in summer 2003 in Jiangxi Province [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 28 (6): 855–861.
- 张丽娟, 姬鸿丽, 李倩倩, 等. 2006. 2005 年 6 月洛阳持续高温天气成因分析 [J]. 河南气象, (2): 44–45. Zhang Lijuan, Ji Hongli, Li Qianqian, et al. 2006. Analysis of the forming of the durative high temperature weather occurred in Luoyang in June 2005 [J]. Meteorology Journal of Henan (in Chinese), (2): 44–45.
- 张尚印, 张海东, 徐祥德, 等. 2005. 我国东部三市夏季高温气候特征及原因分析 [J]. 高原气象, 24 (5): 829–835. Zhang Shangyin, Zhang Haidong, Xu Xiangde, et al. 2005. Climatic character and cause analysis of summer high temperature in main cities of East China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 24 (5): 829–835.

- 郑祚芳, 王迎春, 刘伟东. 2006. 地形及城市下垫面对北京夏季高温影响的数值研究 [J]. 热带气象学报, 22 (6): 672 - 676.
- Zheng Zuofang, Wang Yingchun, Liu Weidong. 2006. Numerical simulation study for the effects of terrain and landuse to summer heat wave in Beijing [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 22 (6): 672 - 676.
- 周后福, 陈海燕, 黄克慧, 等. 2005. 浙江省 2003 年夏季异常高温气候及其成因分析 [J]. 科技通报, 21 (5): 524 - 528. Zhou Houfu, Chen Haiyan, Huang Kehui, et al. 2005. Anomalous climate of high temperature and its reason analysis in summer, 2003 in Zhejiang [J]. Bulletin of Science and Technology (in Chinese), 21 (5): 524 - 528.
- 邹瑾, 冯晓云, 高凤姣, 等. 2004a. 山东省夏季高温气候变化特征分析 [J]. 山东气象, 24 (1): 16 - 18. Zou Jin, Feng Xiaoyun, Gao Fengjiao, et al. 2004a. Analysis of climatic character of the estival high temperature in Shandong Province [J]. Journal of Shandong Meteorology (in Chinese), 24 (1): 16 - 18.
- 邹瑾, 冯晓云, 胡桂芳, 等. 2004b. 山东省夏季极端高温异常气候变化特征分析 [J]. 气象科技, 32 (3): 182 - 186. Zou Jin, Feng Xiaoyun, Hu Guifang, et al. 2004. Characteristic analysis of extreme high temperature anomaly in summer in Shandong Province [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 32 (3): 182 - 186.
- 邹瑾, 王启. 2005. 山东夏季高温异常变化特征分析 [J]. 山东气象, 25 (1): 5 - 8. Zou Jin, Wang Qi. 2005. Interdecadal variability of summer high-temperature anomaly in Shandong Province [J]. Journal of Shandong Meteorology (in Chinese), 25 (1): 5 - 8.
- 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]. Meteorological Monthly (in Chinese), 27 (9): 26 - 30.