

引用格式:程迪,王咏薇,刘寿东,等. 1959~2012年夏季珠三角地区高温热浪的时空分布特征及其城市热岛效应的影响分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(1): 273-283
Cheng di, Wang Yongwei, Liu Shoudong, et al. Spatial and temporal distribution characteristic of summer heat waves in the Pearl River delta region during 1959~2012 and analysis of the impact of urban heat island effect[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(1): 273-283

环境科学、安全科学

1959~2012年夏季珠三角地区高温热浪的时空分布特征及其城市热岛效应的影响分析

程迪¹ 王咏薇^{1,2*} 刘寿东¹ 肖帆²

(南京信息工程大学应用气象学院耶鲁-南京信息工程大学大气环境中心¹, 南京信息工程大学大气物理学院², 南京 210044)

摘要 采用珠三角地区9个观测站点1959~2012年夏季(6~8月)逐日2:00、8:00、14:00、20:00的温度资料研究珠三角地区夏季高温热浪天气日数和强度的时空分布特征;以及暖夜日数的历年变化趋势;并分析了2000~2012年夏季广州市城市热岛效应对高温热浪天气的影响。研究表明:①珠三角地区高温热浪日数及强度的时空分布特征相似,空间分布上呈从北向南递减趋势,时间分布上20世纪60~80年代呈减少趋势,80年代开始呈增加趋势,21世纪之后大幅增加,并在2007年达到峰值;②珠三角地区暖夜日数呈增加趋势,且高值区分布与高温热浪日数和强度的分布相似,均发生在20世纪90年代末以后;③1980~2012年夏季广州站各项要素的增加速度均为最快,说明城市热岛效应对广州市区的高温热浪(暖夜)的强度和持续时间均有增强作用;④2000~2012年夏季广州市6次高温热浪过程中,城区的暖夜日数占总日数的78.6%,郊区的暖夜日数占总日数的14.2%,说明城市热岛效应对城区高温热浪期间夜间温度的影响比白天更为突出。

关键词 珠三角地区 高温热浪 时空分布 城市热岛效应

中图分类号 X17; **文献标志码** B

当前高温热浪在全球,尤其是在社会经济快速发展的中国,已经逐渐成为一种与人类死亡率密切相关的气象灾害。极端高温天气容易引发一系列的热相关疾病,尤其对于本身抵抗能力弱的老弱病人群,长期处于高温天气下可能危及生命健康^[1,2]。目前城市化过程不断加快,城市热岛效应的增温作用对高温天气的时空分布及热浪发生的持续时间和强度产生的影响已经不容忽视。在中国大陆地区,国家级气象台站年平均地面气温的上升趋势中,至少有27.3%可归因于城市化影响^[3]。城市热岛效应的存在使得城市人口相对来说更容易受到高温热浪的威胁,同时城市人口的增多将使易受高温威胁的脆弱人群不断增加。此外,伴随着城市热岛效应出现的城市干燥气候^[4],以及趋于“暖干化”的城市高温热浪天气^[5]也会降低城市居住的舒适度。因

此在研究高温热浪的影响因子时,充分考虑城市热岛效应的影响,对城市居民有效应对高温热浪的发生有一定的指导意义。

选择珠三角地区为研究区域,因为珠三角地区是中国重要的经济支柱地区,其城市人口密度大,且受地理纬度影响,珠三角地区接收的太阳辐射总量大,年平均温度在20℃以上,高温热浪事件发生频率较多,强度较大,对广州等大城市人口健康产生重要影响^[6]。珠三角地区已有的研究中,陈桢华等^[7]在对珠三角高温特征及其主要影响因子的研究中发现,高温日数呈增加的趋势并且存在明显的年际变化和年代际变化;李海鹰等^[8]分析了1965~2004年珠三角高温天气及热带气旋的出现与高温天气的关系,发现珠三角的高温天气受副高及热带气旋外围下沉气流增温作用的影响;许薇等^[9]对1961~2010年广东省的高温天气变化进行了分析,结果表明50年来广东省各地区高温日数呈上升趋势,其中中部增温最明显。以上的研究结果和研究方法推动了对珠三角地区高温热浪的研究,尤其在对珠三角地区高温热浪天气的发展变化趋势分析上取得了长足进步。然而现有的研究主要关注天气系统对珠三角

2018年9月10日收到 国家自然科学基金(41675016)资助
第一作者简介:程迪(1994—),硕士研究生。研究方向:大气边界层与环境。E-mail: 20161212262@nuist.edu.cn。

*通信作者简介:王咏薇(1977—),博士,副教授。研究方向:大气边界层与环境以及陆面过程参数化方案。E-mail: wyw@nuist.edu.cn。

地区高温热浪的影响,较少具体分析城市热岛效应的影响。

基于以上研究背景,研究分析珠三角地区高温热浪在 1959~2012 年夏季的时空分布特征,并探讨城市热岛对高温热浪期间城区白天和夜间温度的影响。本文包含几个新颖元素,首先,珠三角作为一个人口密集且经济发展快速的地区,鲜有研究具体分析该地城市热岛效应对高温热浪的影响;另一方面,本研究不仅考虑了城市热岛效应对夏季高温热浪的影响,还考虑了其对夏季暖夜日数以及高温热浪夜间温度的影响。相比日最高温度,城市热岛效应对日最低温度的影响似乎更大^[10],夜间高温的延续将加重高温热浪的危害。预计该研究对于深入研究高温热浪的发展趋势,为未来气候变化预测提供科学的理论依据,以及政府积极应对极端事件随之而来的社会健康、环境影响等问题有一定的帮助及指导意义。

1 方法与数据

1.1 研究区域与观测数据

珠江三角洲位于广东省的中南部,包括广州、深圳、佛山、惠州、中山、东莞、珠海、江门和肇庆 9 个城市,其位置范围为 21°30′~23°40′N,研究范围及气象观测站点如图 1 所示。



图 1 研究区域以及气象站分布

Fig. 1 Research area and distribution of weather stations

本文共采用 1951~2012 年夏季(6、7、8 月)广宁、高要、广州、增城、台山、佛冈、深圳、惠阳和河源 9 个国家基准气象观测站的气象观测资料,气象观测要素为气温;采用每日 2:00、8:00、14:00、20:00 (北京时间)的气象观测数据。以上 9 个观测站的海拔高度范围为 22.3~70.8 m,所有站点海拔高度均在 100 m 以下,在一定程度上避免了分析城市热岛效应时因为海拔高度差异太大而造成的影响。

为保证所使用数据的可靠性,将所有观测数据中的缺测值除去,如果某站某一天任意时刻出现缺测,则该站在这天的全部观测数据不计入分析中。在表 1 中,站号表示在其左边标示的时期内有观测数据的站号,数据缺测率为某年某月某站的缺测天数占该月有观测数据站点的总观测天数的百分比。通过统计 1951~2012 年共 62 年观测数据缺测值,发现在 1951~1958 年之间分别有不同站点的数据严重缺失;为了分析高温热浪在珠三角整体区域内夏季的时空变化特征,故取 1959 年 6 月~2012 年 8 月共 54 个夏季的温度观测数据。通过对最终选取数据的严格质量控制,最终剔除了 40 个缺测值,全部数据容量为 44 712 个,缺测率为 0.09%。

1.2 研究方法

1.2.1 高温热浪与暖夜的定义

不同的研究对于高温热浪的定义各有差异,本文采用中国国家气象局的定义^[11]:日最高温度 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 为一个高温日,高温日持续天数 $\geq 3\text{d}$ 为一次高温热浪过程。对夏季极端暖夜事件的定义采用百分位阈值法,即将某站 1959~2012 年中每年夏季逐日的最低气温资料按升序排列。考虑到本文所用数据资料的时间跨度较长,将序列第 97 个百分位上的值作为判断是否发生暖夜事件的阈值;即小于阈值的事件发生的概率约为 97% (不同于传统定义的 90%)^[12,13]。暖夜日数即为年日最低气温大于 1959~2012 年夏季第 97 个百分位值的日数。通过计算得出 9 个气象站在 1959~2012 年夏季发生极端暖夜事件的阈值(表 2)。对研究所用的一天中 2:00、8:00、14:00、20:00 四次温度观测数据进行对

表 1 观测数据缺测情况

Table 1 Absence of observed data

年月	站号	缺测率
1951/6~1952/6	59287	0
1952/7~1952/8	59287/59293/59298/59493	1952/7=4.83%
1953/6~1956/8	59278/59287/59293/59298/59478/59493	1953/6=2.78%
1957/6~1958/8	59087/59271/59278/59287/59293/59298/59478/59493	0
1959/6~2012/8	59087/59271/59278/59287/59293/59294/59298/59478/59493	1959/6=6.67%, 1962/6=0.74%, 1966/6=0.37%, 1968/6=3.33%, 1968/7=3.58%

表 2 暖夜阈值
Table 2 Threshold of warm night

站号	59087	59271	59278	59287	59293	59294	59298	59478	59493
阈值/℃	28.5	28.2	29.2	29.1	28.5	28.3	28.7	28.3	29.2

比分析,同时控制时间变量的影响,取 14:00 的温度数据作为日最高温度,取 02:00 的温度数据作为日最低温度。

1.2.2 时空分布特征的研究方法

分别从热浪的日数与强度两个方面描述夏季热浪的时空变化特征。高温热浪日数的定义为夏季某站某年在高温热浪期间的累计高温日数;若高温日持续时间不足 3 d,计高温热浪日数为零。高温热浪强度的定义为夏季某站某年在高温热浪期间日最高气温高于 35℃(高温阈值)的累计温度,单位为℃·d。其中某年珠三角地区的平均热浪日数(强度)为该年珠三角地区所有站点夏季热浪日数(强度)之和与总的站点数之商;某站在 1959~2012 年夏季的年平均高温热浪日数(强度)为该站在所有年份的热浪日数(强度)之和与总的年份数之商^[14]。暖夜日数的时间分布特征计算方法同上。

1.2.3 城郊代表站的选择

研究城市热岛效应的影响关键在于城郊区域的划分,本文研究区域内站点数不多,因而选择用定量分析的方法确定城郊站。1980 年之后珠三角地区开始进行快速的城市化建设^[15],以 20 世纪 80 年代为一个时间节点,选取 1980~2012 年、1990~2012 年、2000~2012 年三个阶段的夏季分析确定城郊代表站。下面以 1980~2012 年这一阶段为例说明选取方法。取 9 个站 1980~2012 年夏季 33 年的平均气温序列 x_i ,其中 i 指第 i 个站,范围在 1~9 之间,平均气温序列的平均值为 $\bar{x}$,标准差为 σ 。计算第 i 个站的归一化标准差 $\mu_i = (x_i - \bar{x}) / \sigma$,若 $\mu_i < -1$,那么第 i 站被选择为郊区代表站;反之 $\mu_i > 1$,那么第 i 站被选择为发展快速的城区代表站。该方法参考了气象数据统计分析所用方法,丁硕毅等^[16]在选择珠三角地区城市群中的郊区代表站时曾采用这一方法。

由图 2 可知,若按城市区域划分,对于广州市而言,从 20 世纪 80~90 年代、21 世纪开始佛冈站可一直作为郊区代表站,广州站可一直作为城区代表站,增城站在 21 世纪后可视为郊区代表站。对于肇庆市而言,高要站可一直视为城区代表站。但广宁站从 20 世纪 90 年代后就不可视为郊区代表站。深圳站在三个阶段均可视为城区代表站,但由于其靠近海边,温度受海风及其他因素影响较大,故不做考

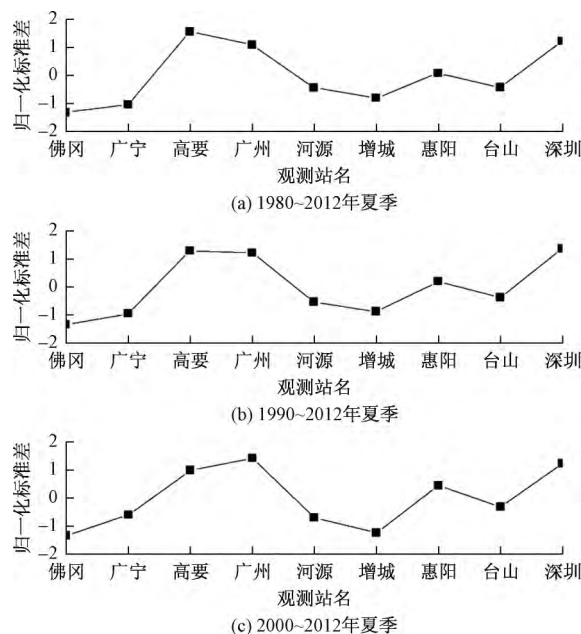


图 2 1980~2012 年夏季气象站点平均气温的标准化序列
Fig. 2 1980~2012 summer, standardized sequence of mean temperature at meteorological stations

虑。根据 2011 年的广东省统计年鉴显示,从 2000~2010 年广州市的常住人口一直为全省第一。虽然早在 1988 年佛冈县被划为清远市管辖,但本研究中的佛冈站点仍设置在广州市境内,且城郊站的选取最好采用就近原则,尽可能降低其他因素对温度的影响。因此本文以广州市为个例,选取广州站、增城站和佛冈站的气温资料分析珠三角城市热岛效应对高温热浪的影响。此外,通过查阅第二次全国土地调查缩编数据成果中增城站附近的土地使用情况,发现截至 2015 年底增城区周围仍保留了大片林地,佛冈县附近林地更多,且在 1990~2005 年期间林地一直是增城的主要土地类型^[17]。在 1988~2006 年期间增城和佛冈的新增建设用地较少,对其土地类型变化的影响不大^[18]。并且广州市中心城区的常住人口数约为 772.72 万,增城作为一个县级市常住人口数只有约 103.67 万,佛冈县的常住人口数约为 30.28 万,由此也可印证本文选用增城站和佛冈站为郊区代表站是可行的。综上所述,本文将以广州市为例探讨城市热岛效应对高温热浪的影响,选取广州站点为城区代表站,佛冈站和增城站为郊区代表站。

1.2.4 城市热岛效应对高温热浪的贡献

对城市热岛效应强度的经典定义为城市与其周

围乡村环境之间的温差,本文将用城区代表站与郊区代表站同一时刻的温差,或者城区站点温度与两个郊区站点同一时刻温度平均值的差值表示城市热岛效应的强度。

2 结果分析

2.1 高温热浪的时间分布特征

2.1.1 高温热浪日数的时间分布特征

图3中可看出,1959~2012年夏季珠三角地区每年的高温热浪日数基本呈先减后增的趋势。20世纪60~70年代中后期,高温热浪的日数为减少趋势;从80年代开始,夏季高温热浪日数基本为增加趋势;尤其到了90年代末,高温热浪日数开始大幅度增加;进入21世纪以后珠三角地区酷热天气持续时间明显增加,多年的平均热浪日数从80年代的0.7 d增加到2.5 d左右。在这54年中有27年珠三角地区没有发生过高温热浪,无高温热浪天气发生的时期主要集中在20世纪70年代中后期、80年代中期以及90年代初~90年代中期,70年代后期的无高温年可能与副热带高压异常偏弱有关^[7]。在发生过高温热浪的阶段,高温热浪日数的最高值出现在2007年,达到了7.11 d。几个明显的高温年(2003、2004、2005、2007年)都发生在21世纪以后,这几年的高温热浪日数都达到了5 d以上,说明珠三角地区进入快速城市化过程后,高温热浪日数在不断增加,有延长高温天气的趋势。且城市热岛效应对高温热浪的影响越来越明显,相比之下其他与高温热浪密切相关的因素,如热带气旋外围下沉气流的增温作用,对珠三角地区高温热浪的影响有减弱趋势^[8]。

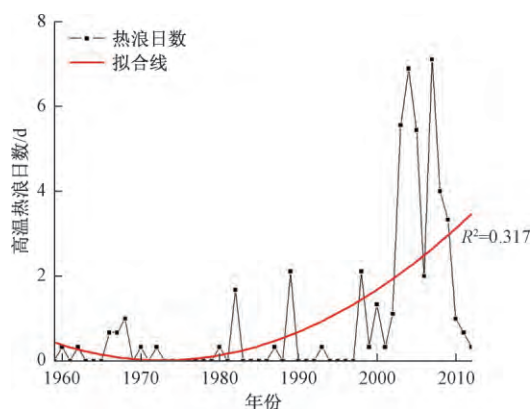


图3 1959~2012年夏季珠三角地区平均高温热浪日数历年分布

Fig. 3 Distribution of average days of heat wave in Pearl River delta region during the summer of 1959~2012

2.1.2 高温热浪强度的时间分布特征

由图4可知,20世纪60~80年代初期,珠三角

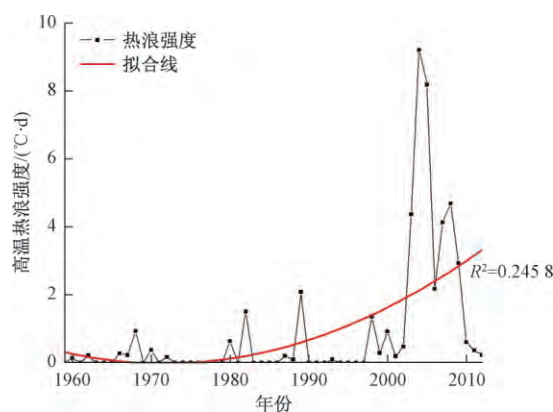


图4 1959~2012年夏季珠三角地区平均高温热浪强度历年分布

Fig. 4 Annual distribution of average high temperature heat wave intensity in the Pearl River delta region during the summer of 1959~2012

地区夏季高温热浪强度十分弱,多年平均高温热浪强度基本为0。同时考虑这一阶段的高温热浪日数分布情况,可知在80年代之前珠三角地区处于偏冷期,即使70年代左右出现过几次热浪过程,但其强度依然很弱,这可能是因为珠三角地区在80年代后工业化和城市化水平才开始迅速提高^[19]。80年代之后珠三角地区夏季高温热浪的强度明显大幅度提高,开始呈现增加趋势。在21世纪之后,出现了这54年里高温热浪强度最大的三年,分别为2004年、2005年和2008年,这三年的强度均在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}^{-1}$ 以上,尤其是2004年,高温热浪的强度高达 $9.21\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}^{-1}$ 。值得关注的是,从80年代中期到90年代中后期只有个别年份发生过高温热浪,且热浪强度基本很弱,考虑这种气温异常现象可能与这一期间发生的几次厄尔尼诺事件有关^[20],两者的具体关系以及其他的影响因素还有待研究。总的来说,珠三角地区高温热浪强度这54年来的变化趋势与高温热浪日数相似,都为先减后增趋势。

2.1.3 夏季暖夜日数的时间分布特征

暖夜日数与高温热浪日数定义存在差异,54年总的高温热浪日数为445 d,占总观测天数的1%;而根据暖夜日数的定义暖夜日数应占总观测天数的3%,两者基数不同,无法直接比较数据大小差异,但可比较两者的历年平均变化趋势。如图5所示,1959~2012年夏季珠三角地区的多年平均暖夜日数为0.8~6 d、最高暖夜日数为16.78 d、最低暖夜日数为0.11 d,且每一年均存在暖夜现象。高温热浪日数有27年均均为0,且高温热浪日数在20世纪80年代之前有微弱的减少趋势,之后再呈快速增长趋势,暖夜日数在此期间一直呈平稳的增加趋势。

说明在同样的温度变化背景下,珠三角地区的夜间增温效果相对于白天更加稳定,即夜间高温更能稳定存在。夜间持续高温天气产生的影响同样不可忽视。20 世纪 60 年代~21 世纪,暖夜日数基本呈增加趋势。90 年代以后暖夜日数基本在 2 d 以上,80 年代之前大多都在 2 d 以下。且暖夜日数的前三个高值分别发生在 1998、2007、2003 年,分别为 16.78 d、8.22 d 和 8.11 d,与高温热浪(图 3、图 4)的分布情况具有相似性,即高值均分布在 90 年代末期到 21 世纪以后。说明在 90 年代后期~21 世纪,珠三角地区的高温事件可能在不同程度上受其城市化过程的影响^[8,19]。

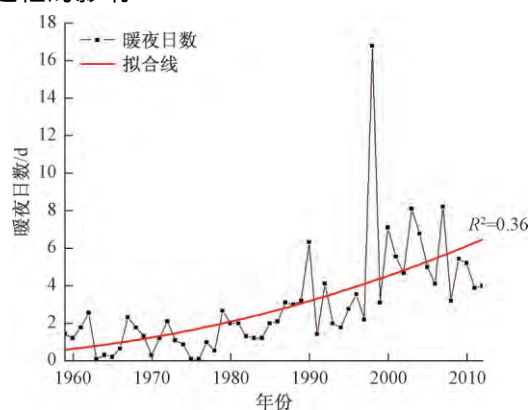


图 5 1959~2012 年夏季珠三角地区平均暖夜日数历年分布

Fig. 5 Annual distribution of average warm night days in the Pearl River delta region during the summer of 1959~2012

2.2 高温热浪的空间分布特征

2.2.1 高温热浪日数的空间分布特征

统计结果显示(表 3、图 6),近 54 年以来珠三角地区夏季高温热浪的高值区主要分布在肇庆和惠州,都位于北部区域,前两个最高值分别为广宁站(1.63 d)和河源站(1.33 d)。从珠三角地区北部到南部,年均高温热浪日数有很明显的递减趋势。年均高温热浪的低值区主要分布在江门和深圳,分别为台山站(0.13 d)和深圳站(0.11 d)。用高温热浪出现的次数表示高温热浪的频次(表 3),1959~2012 年夏季中珠三角地区的 9 个观测站点均出现过高温热浪天气。其中广宁站和河源站出现高温热浪的次数仍为最高值,台山站和深圳站平均每年出现高温热浪的次数仍为最少。说明珠三角北部高温热浪事件发生频繁且夏季高温天气持续久,即高温热浪的年均频次分布与年均日数分布保持一致性,均存在明显的从北向南递减趋势。沿海地区出现低值中心可能是由于海风对于城市温度有一定的影响^[16]。

表 3 1959~2012 年夏季珠三角地区 9 个站点的高温热浪分布

Table 3 Distribution of heat waves at nine sites in the Pearl River delta region during the summer of 1959~2012

地区	站号	海拔	热浪总日数/d	平均热浪日数/d	平均热浪频次/次	平均热浪强度/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)	最长的一次热浪持续日数/d
佛冈	59087	68.6	58	1.07	0.30	0.99	6
广宁	59271	57.3	88	1.63	0.41	1.56	6
高要	59278	41.0	62	1.15	0.30	0.97	6
广州	59287	41.0	46	0.85	0.22	1.13	5
河源	59293	70.8	72	1.33	0.37	1.16	6
增城	59294	30.8	53	0.98	0.28	0.94	5
惠阳	59298	22.3	53	0.98	0.26	0.82	7
台山	59478	32.7	7	0.13	0.04	0.16	4
深圳	59493	63.0	6	0.11	0.04	0.09	3



图 6 1959~2012 年夏季珠三角地区 9 个站点年平均高温热浪日数分布

Fig. 6 Distribution of annual average heat wave days at nine sites in the Pearl River delta region during the summer of 1959~2012

从高温日数的空间分布状况(图 6)可以看出,沿海城市的平均高温热浪日数与内陆城市差异很大。对于有站点数据的几个城市,肇庆、广州和惠州在夏季的平均高温热浪日数(某市某年夏季的高温热浪日数)最高可以达到 10 d 以上,其中惠州最高可以达到 17 d,广州最高可达 16 d,肇庆最高可达 14 d,表示在这些地方某些年份的高温热浪日数可占到夏季总日数的 15%~18%。一次高温热浪过程的持续时间长短也可以反映高温热浪的严重程度,珠三角地区夏季一次高温热浪最长可延续 5~7 d,但是沿海地区只有 3~4 d,其中惠阳站时间最长为 7 d。

2.2.2 高温热浪强度的空间分布特征

由图 7 可以看出,夏季高温热浪强度高值区主



图7 1959~2012年夏季珠三角地区9个站点年平均高温热浪强度分布

Fig. 7 Annual average heat wave intensity distribution of 9 stations in the Pearl River delta region during the summer of 1959~2012

要分布在肇庆、广州和惠州三个城市。强度最高的三个站点分别为广宁($1.56\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)、河源($1.16\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)、

和广州($1.13\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)。珠三角南部沿海城市仍然为高温热浪强度的低值区,且低值区与高值区强度相差近10倍之多。珠三角地区高温热浪强度的分布趋势与高温热浪日数具有相似性,也是从北向南递减。

2.3 城市热岛效应对高温热浪的影响

2.3.1 城郊高温热浪历年变化对比

图8为广州站、增城站和佛冈站在1980~2012年夏季极端日最高温、高温日数、极端日最低温和暖夜日数的变化趋势图。其中极端日最高(低)温为某年夏季日最高(低)温度的最大值,高温日数为某年夏季日最高温度 $\geq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的日数(不同于热浪日数),暖夜日数见上文定义。由图8可以看出广州市三个气象站点在1980~2012年夏季均表现出了增温趋势,但是各个站的增温幅度并不一致。其中广州站的增温速度最快,其极端日最高温和极端日最低温的增温趋势分别为 $0.46\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 和 $0.14\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$;增城站和佛冈站虽同为郊区站

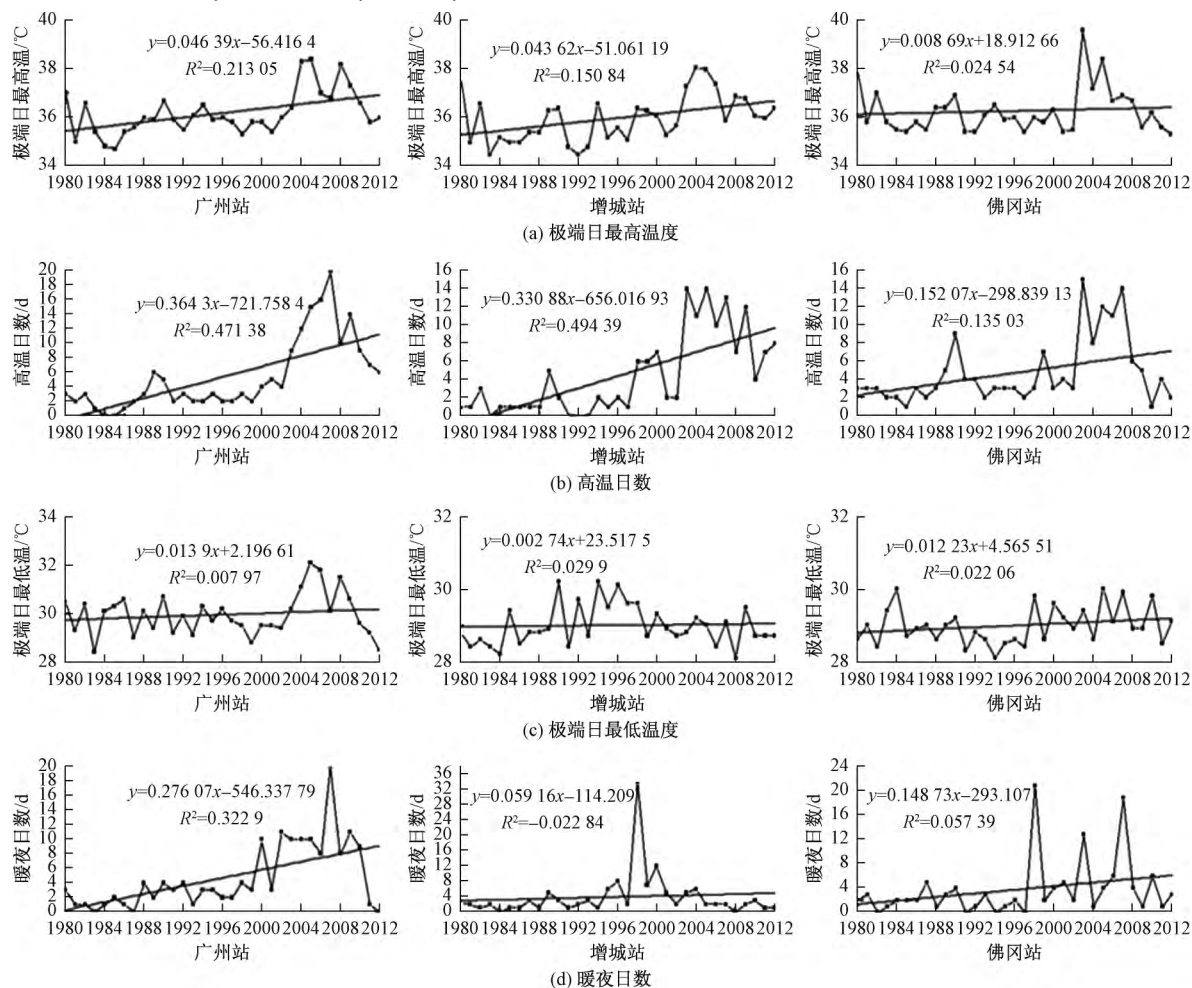


图8 广州市3个气象站点1980~2012年夏季极端日最高、最低温度及高温、暖夜天数

Fig. 8 The number change of extreme days with maximum, minimum temperature, high temperature days and the days with warm night of three meteorological stations in Guangzhou, 1980~2012 summer

点, 升温速度也有差异, 就极端日最高温度而言, 增城站的升温趋势为 $0.44\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$, 与广州站接近, 而佛冈站的升温趋势为 $0.09\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$, 远低于其他两站; 就极端日最低温度而言, 增城站的升温趋势为 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$, 佛冈站的升温趋势为 $0.12\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$, 两个郊区站点的昼夜升温速度快慢相反, 增城站极端日最高温度的升温速度更快, 佛冈站夜间极端日最低温度的升温速度更快。从高温日数的增速来看, 广州站为 $3.64\text{ d}\cdot(10\text{ a})^{-1}$, 仍是最快的, 增城站与之接近, 为 $3.31\text{ d}\cdot(10\text{ a})^{-1}$, 佛冈站最慢, 增加速度为 $1.52\text{ d}\cdot(10\text{ a})^{-1}$; 3 个站点暖夜日数的增速差异更明显, 广州站最快为 $2.76\text{ d}\cdot(10\text{ a})^{-1}$, 增城站最慢为 $0.59\text{ d}\cdot(10\text{ a})^{-1}$, 佛冈站为 $1.49\text{ d}\cdot(10\text{ a})^{-1}$, 3 个站点暖夜日数的增速均低于高温日数。

综上可知, 从 20 世纪 80 年代开始广州市的温度呈增加趋势, 影响其温度增长的原因有很多, 比如全球变暖、副热带高压偏西偏强、台风外围环流影响、降水量偏少以及城市热岛效应^[7], 等等。通过城郊站对比发现, 广州站的各项要素的增加速度均为最快, 可见城市热岛效应对广州市区的高温热浪(暖夜)的强度和持续时间均有增强作用。广州站极端日最低温度的年平均值明显高于其他两站, 极端日最高温度的年平均值与其他两站相近, 在高温热浪的众多影响因子中只有城市热岛效应存在夜间热岛作用增强现象^[21], 说明城市热岛效应主要对暖夜强度有影响。夜间极端日最低温度(暖夜日数)的增加速度明显低于极端日最高温度(高温日数)的增加速度, 说明在长时间序列中城市热岛效应的增温作用并不是很强, 高温热浪天气的发生主要还是受天气系统等其他因素的影响, 因此受城市热岛效应影响较大的暖夜强度在城市化过程中增长幅度不明显。此外, 从 2003 年开始三个气象站点的高温日数均出现了一个明显的增加趋势, 广州站最多的一年增加到了 20 d, 明显高于其他两个站, 说明 21 世纪后城郊高温日数差距拉大, 城市化的影响逐步明显。三个气象站的极端日最高温度也在 2003 年左右有明显增加趋势, 只有广州站在 21 世纪后夜间极端日最低温度和暖夜日数明显增加, 说明 21 世纪后受城市化影响, 城市热岛效应对高温热浪天气影响的比重有所增加。

2.3.2 城市热岛效应对高温热浪强度和持续时间的影响

根据 1.2.3 节温度归一化的结果, 以及 2.3.1 节的分析结果, 以下选取 2000~2012 年夏季为研究时间, 对广州市在此期间发生的高温热浪过程做具

体分析。

图 9 为广州市 3 个气象站点高温热浪日数和强度的历年变化, 其中高温热浪日数和强度的计算方法与 1.2.2 节相同。由图 9 可以看出, 城市热岛效应对城郊代表站高温热浪日数的影响并不明显, 对高温热浪强度的影响似乎更明显。例如 2005、2007、2008 年, 这几年城郊站的高温热浪日数差异不大或者城区高温热浪日数低于郊区, 但城区站高温热浪强度甚至超过了郊区站或者两者差距缩小。2007 年佛冈站高温热浪日数异常偏高达到 11 d, 广州站仅为 9 d, 根据劳汉琼等^[22]研究表明 2007 年广州市的长时间、大范围高温主要与副热带高压偏西、偏强有关, 其下沉气流的增温作用可能是导致佛冈站高温日数异常偏多的主要原因。但当年广州市 3 个气象站点的高温热浪强度却偏低, 广州站与佛冈站的热浪强度差异缩小到仅相差 $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 说明城市热岛效应对城区某一年高温热浪强度的影响可能大于对高温热浪日数的影响。为进一步探讨城市热岛效应对高温热浪强度和日数的影响, 下文将对 2000~2012 年夏季广州市发生的高温热浪过程做具体分析。

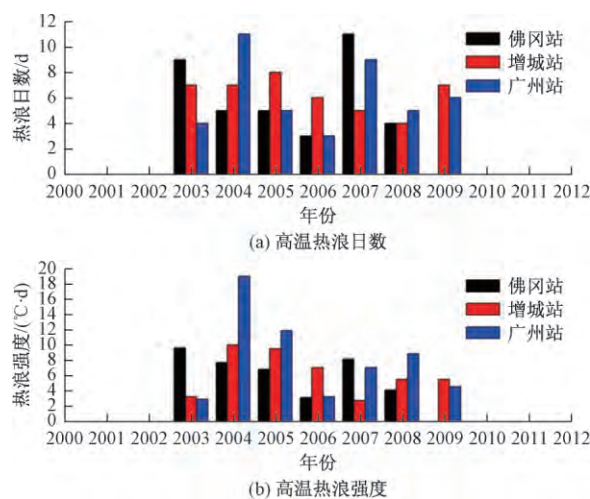


图 9 2000~2012 年城郊代表站历年累计高温热浪
Fig. 9 Accumulated high temperature heat wave over the years from 2000 to 2012

通过对 2000~2012 年夏季广州市内三个气象站点发生的高温热浪过程进行筛选, 选出同时覆盖城郊代表站的 6 次高温热浪过程(图 10)。筛选除了仅发生在城市代表站或者仅发生在郊区代表站的高温热浪过程(如 2006 年, 佛冈站和增城站在 7 月 23 日~25 日发生过一次高温热浪, 广州站在 8 月 16 日~18 日发生过一次高温热浪), 对一次高温热浪过程的研究时间以其在三个气象站点中的最早发生时间到最晚结束时间为准。图 10 中, 城市热岛

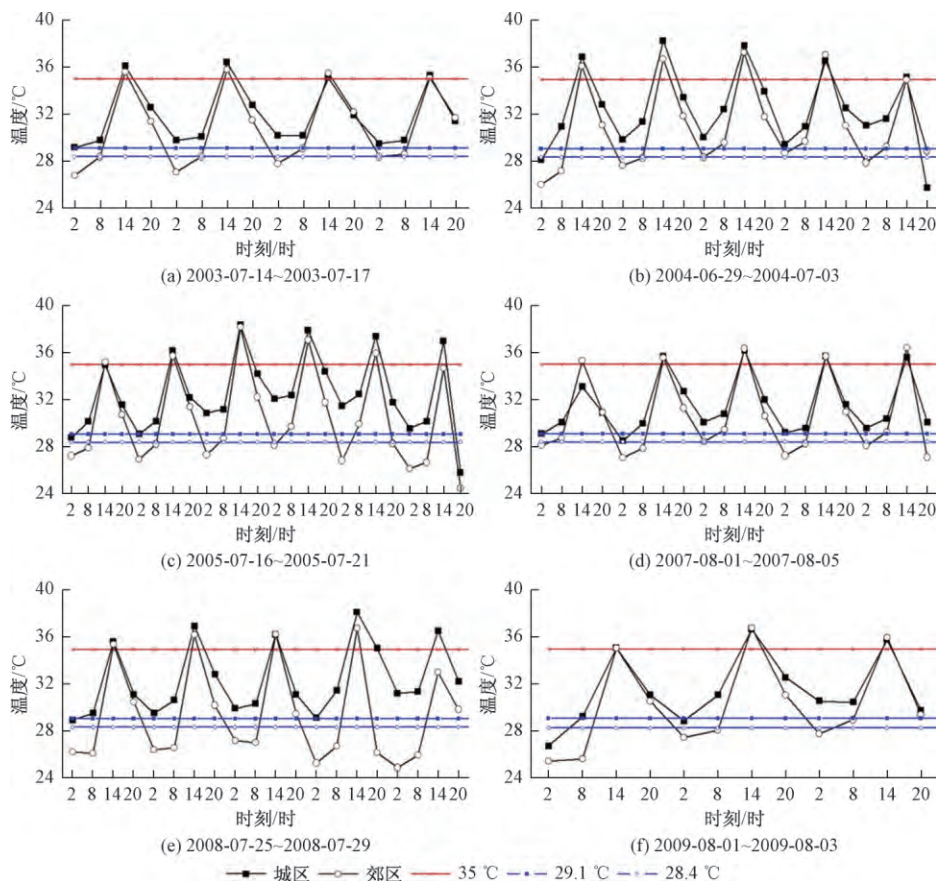


图10 2000~2012年广州市夏季6次高温热浪过程中城郊温度变化比较

Fig. 10 Comparison of suburban temperature changes during the six high-temperature heat waves in Guangzhou in 2000 ~ 2012

效应的强度用城郊代表站同时刻的温度差值表示, 郊区代表站温度为增城站和佛冈站温度的平均值, 其中2009年佛冈站没有出现高温热浪天气, 因此郊区代表站仅用增城站温度表示。根据1.2.1节, 以 35°C 作为白天发生高温天气的阈值, 以 29.1°C 作为城区夜间发生高温天气的阈值, 以 28.4°C (即佛冈站和增城站夜间高温阈值的平均值) 作为郊区夜间发生高温天气的阈值。特别地, 以 28.3°C (增城站夜间高温阈值) 作为2009年郊区夜间发生高温天气的阈值。

从图10可以看出, 在每次高温热浪过程中城郊代表站每日的温度变化趋势均一致只是增减幅度不同, 城区温度基本位于郊区之上, 只有几个点出现了郊区温度高于城区温度的情况, 本文将其视为异常点。经过统计发现一共有10个这样的异常点, 总的样本容量为112, 因此出现这样异常情况的概率为8.9%, 这说明在高温热浪期间有90%以上的时间城区温度是高于郊区温度的。此外, 异常点中有7个点分布在14:00温度处 (即日最高温度处), 其余3个点分布在20:00温度处, 且在高温热浪过程中夜间的城郊温差明显高于白天的城郊温差, 考虑到

城市热岛效应在夜间强度更大^[21], 本文认为城市热岛效应对高温热浪期间城区夜间温度的影响强于其对城区日最高温度的影响。2005年7月16日~7月21日是6次热浪过程中持续时间最长的一次热浪过程, 在这次热浪过程中城区每日14:00温度比郊区高 $-0.2\sim 2.3^{\circ}\text{C}$; 城区夜间2:00温度 (夜间城市热岛效应最强) 比郊区高 $1.55\sim 4.65^{\circ}\text{C}$; 城区的高温热浪天气持续了6d, 郊区只持续了5d; 且城区持续5d夜间2:00温度高于暖夜阈值, 郊区几乎每个夜间2:00温度都远低于暖夜阈值。2009年8月1日~8月3日是6次热浪过程中持续时间最短的一次热浪过程, 在这次热浪过程中城区每日14:00温度比郊区高 $-0.2\sim 0^{\circ}\text{C}$; 城区夜间2:00温度比郊区高 $1.3\sim 2.6^{\circ}\text{C}$; 城区有一日夜间温度超过了暖夜阈值, 郊区仍然每夜温度都低于暖夜阈值。经计算, 城区的暖夜日数占总日数的78.6%, 郊区的暖夜日数占总日数的14.2%。以上均说明城市热岛效应不仅会城区高温热浪的持续时间, 也会增加城区高温热浪昼夜的强度, 且对于城区高温热浪期间夜间温度的影响更为突出, 使城区在夜间不能像郊区一样快速冷却, 从而延长了城区每日的高温时间。

表 4 为上文 6 次高温热浪过程中广州站、增城站和佛冈站的对比分析。由表 4 可知,这 6 次热浪过程共历时 28 d,城郊站暖夜日数的差异为 12 ~ 18 d,高温日数的差异为 2 d,城市热岛效应对城郊暖夜日数的影响约为白天高温日数的 6 ~ 9 倍;城郊站 14:00 平均温度的差异为 0 ~ 0.01 °C,2:00 平均温度的差异为 0.05 ~ 0.13 °C,夜间城郊的平均温差近乎白天平均温差的 5 ~ 13 倍;城郊每日 14:00 温度极值的差异为 0 ~ 0.3 °C,城郊每日 2:00 温度极值的差异为 2.7 ~ 2.9 °C,城郊夜间极端温度的差异约为白天的 9 倍;城郊站 14:00 极端温度的差是其平均温度差的 30 倍,城郊站 2:00 极端温度差是其平均温度差的 20 倍以上;以上不仅印证了上文城市热岛效应对高温热浪影响的分析,也说明城市热岛效应对城区极端温度的影响要大于对平均温度的影响。由于无法对城郊高温热浪日数差异和强度差异做直接比较,本文无法定论城市热岛效应对高温热浪强度的影响大于对其日数的影响。

表 4 6 次高温热浪过程中广州市 3 个气象站点的平均温度、极端温度及高温日数对比

Table 4 Comparison of average temperature, extreme temperature and high temperature days of three meteorological stations in Guangzhou during the above six high temperature heat waves

气象站点	广州站	增城站	佛冈站
14:00 平均温度/°C	36.05	36.06	36.04
14:00 温度极大值/°C	38.4	38.1	38.4
2:00 平均温度/°C	28.08	27.95	28.03
2:00 温度极大值/°C	32.1	29.2	29.4
暖夜阈值/°C	29.1	28.3	28.5
14:00 温度≥35 °C 的日数/d	27	25	25
2:00 温度≥暖夜阈值的日数/d	22	4	6
总日数/d	28	28	28

3 结论及讨论

采用珠三角地区 9 个观测站点 1959 ~ 2012 年夏季(6 ~ 8 月)逐日 2:00、8:00、14:00、20:00 的温度资料研究高温热浪及暖夜日数和强度的时空分布特征,并分析了 2000 ~ 2012 年夏季广州市城市热岛效应对高温热浪天气的影响。

(1) 1959 ~ 2012 年夏季(6 ~ 8 月)珠三角地区高温热浪日数和强度均为先增后减趋势。高温热浪日数在 20 世纪 80 年代之前呈微弱的减少趋势,70 年代处于谷值,80 年代开始呈增加趋势,但在 80 年代到 90 年代仍存在多个无高温年,21 世纪后呈大幅增加趋势,并在 2007 年达到峰值。高温热浪强度的变化趋势与高温热浪日数相似,只是高温热浪强

度在 2004 年达到峰值。多高温年均发生在 21 世纪后,说明城市化对高温热浪天气的发生有影响。空间分布上,珠三角地区平均高温热浪日数、频次、强度均呈从北向南递减趋势,且递减明显。

(2) 20 世纪 60 年代 ~ 21 世纪珠三角地区暖夜日数呈增加趋势,且高值区分布与高温热浪日数和强度的分布相似,均发生在 90 年代末以后,说明城市热岛效应对夏季极端暖夜日数也有影响。此外,每一年均存在暖夜现象,高温热浪日数有 27 年均为 0,说明同样变温背景下,夜间高温的存在比白天高温更稳定。

(3) 1980 ~ 2012 年夏季广州站各项要素的增加速度均为最快,可见城市热岛效应对广州市区的高温热浪(暖夜)的强度和持续时间均有增强作用。夜间极端日最低温度(暖夜日数)的增加速度明显低于极端日最高温度(高温日数)的增加速度,但 21 世纪后广州站的夜间极端日最低温度和暖夜日数明显增加,说明广州市的高温热浪天气主要受天气系统等其他因素的影响,21 世纪后城市热岛效应对高温热浪天气影响的比重有所增加。

(4) 2000 ~ 2012 年夏季广州市 6 次高温热浪过程中,城区的暖夜日数占总日数的 78.6%,郊区的暖夜日数占总日数的 14.2%,说明城市热岛效应对城区高温热浪期间夜间温度的影响比白天更为突出。此外,城郊站 14:00 极端温度的差是其平均温度差的 30 倍,2:00 极端温度差是其平均温度差的 20 倍以上,可见城市热岛效应对城区极端温度的影响要大于对其平均温度的影响。

(5) 对珠三角地区高温热浪的研究仍存在许多不足。首先,描述高温热浪时空分布的站点数据并未覆盖整个珠三角地区,缺少佛山市、中山市、珠海市和东莞市的数据,需在后续研究中补充;在对珠三角地区高温热浪日数及强度的时间分布特征分析中发现,20 世纪 60 ~ 70 年代两者均有微弱的减少趋势,其原因的确定还需后续研究进一步探讨;其次,除城市热岛效应还有许多其他因素与珠三角地区的高温热浪天气密切相关^[7],本文只有每日的温度数据,对于其他因素的具体分析还需后续研究进一步探讨;Schatz 等的研究显示,极端高温天气与城市热岛效应之间具有相互作用关系^[10],结论中城市热岛效应对极端温度影响较大的原因还需后续研究进一步探讨;由于时间限制,无法印证城市热岛效应对高温热浪强度的影响是否大于对其日数的影响,也未能精确量化城市热岛效应在高温热浪中的贡献值,后续研究将使用 WRF 模拟做进一步探讨。

参 考 文 献

- 栾桂杰,李涪涪,殷 鹏,等. 2010 年北京市高温热浪对居民死亡的影响[J]. 环境卫生学杂志, 2015, 5(6): 525~529
Luan Guijie, Li Tiantian, Yin Peng, et al. Heat wave impact on mortality in Beijing in 2010 [J]. Journal of Environmental Hygiene, 2015, 5(6): 525-529
- 徐金芳,邓振镛,陈 敏. 中国高温热浪危害特征的研究综述[J]. 干旱气象, 2009, 27(2): 163-167
Xu Jinfang, Deng Zhenyong, Chen Min. A summary of studying on characteristics of high temperature and heat wave damage in China [J]. Journal of Arid Meteorology, 2009, 27(2): 163-167
- 任玉玉,任国玉,张爱英. 城市化对地面气温变化趋势影响研究综述[J]. 地理科学进展, 2010, 29(11): 1301-1310
Ren Yuyu, Ren Guoyu, Zhang Aiyong. An overview of researches of urbanization effect on land surface air temperature trends [J]. Progress in Geography, 2010, 29(11): 1301-1310
- 李国栋,张俊华,程弘毅,等. 全球变暖和城市化背景下的城市热岛效应[J]. 气象科技进展, 2012, 2(6): 45-49
Li Guodong, Zhang Junhua, Cheng Hongyi, et al. Urban heat island effect against the background of global warming and urbanization [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2012, 2(6): 45-49
- 侯依玲,陈葆德,陈伯民,等. 上海城市化进程导致的局地气温变化特征[J]. 高原气象, 2008(增刊 1): 131-137
Hou Yiling, Chen Baode, Chen Bomin, et al. Characteristics of local air temperature variation influenced by Shanghai urbanization [J]. Plateau Meteorology, 2008(s1): 131-137
- 杜尧东. 广东完成高温热浪健康风险区别[J]. 中国气象报, 2013(3): 7-11
Du Yaodong. Guangdong completes the difference in health risks of high temperature heat waves [J]. China Meteorological Daily, 2013(3): 7-11
- 陈桢华,马 慧,汤 沛. 珠三角盛夏高温特征及其原因分析[J]. 气象研究与应用, 2011, 32(1): 22-24
Chen Zhenhua, Ma Hui, Tang Pei. Characteristics and causes of the summer high temperature in Pearl River delta [J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2011, 32(1): 22-24
- 李海鹰,余江华,唐仰华. 热带气旋与珠江三角洲高温天气的关系[J]. 气象科技, 2005, 33(6): 501-504
Li Haiying, Yu Jianghua, Tang Yanghua. Relationship between tropical cyclone and high temperature in Pearl River delta [J]. Meteorological Science and Technology, 2005, 33(6): 501-504
- 许 薇,汤 强,陈欢欢. 1961~2010 年广东省高温天气时空变化特征分析[J]. 气象与环境学报, 2013, 29(6): 68-74
Xu Wei, Tang Qiang, Chen Huanhuan. Temporal and spatial distribution of high temperature weather from 1961 to 2010 in Guangdong Province [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2013, 29(6): 68-74
- Schatz J, Kucharik C J. Urban climate effects on extreme temperatures in Madison, Wisconsin, USA [J]. Environmental Research Letters, 2015, 10(9): 094024
- 海南省人民政府公报. 气象灾害预警信号发布与传播办法[EB/OL]. [2007-06-12]. http://www.cma.gov.cn/2011zwxx/2011zflfg/2011zbmzg/201110/t20111027_135190.html
- 王 琼,张明军,王圣杰,等. 1962~2011 年长江流域极端气温事件分析[J]. 地理学报, 2013, 68(5): 611-625
Wang Qiong, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Extreme temperature events in Yangtze River Basin during 1962~2011 [J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(5): 611-625
- 李庆祥,黄嘉佑. 环渤海地区城市化对夏季极端暖夜的影响[J]. 气象学报, 2013, 71(4): 668-676
Li Qingxiang, Huang Jiayou. Effects of urbanization in the surrounding bobal area on extreme summer warmest night temperatures [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2013, 71(4): 668-676
- 李 琪,苏 欢,史雨涵,等. 1961~2010 年江浙沪地区夏季高温热浪时空变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(3): 506-513
Li Qi, Su Huan, Shi Yuhuan, et al. Temporal spatial change characteristics of summer heatwaves in Jiangsu Zhejiang Shanghai region during 1961~2010 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(3): 506-513
- 许学强,张 蓉. 珠江三角洲的工业化与城市化[J]. 地理与地理信息科学, 1995, 11(1): 1-8
Xu Xueqiang, Zhang Rong. Industrialization and urbanization in the Pearl River delta [J]. Geography and Geo-information Science, 1995, 11(1): 1-8
- 丁硕毅,乔冠瑾,郭媛媛,等. 珠三角城市群热岛及其气象影响因子研究. 热带气象学报, 2015, 31(5): 681-690
Ding Shuyi, Qiao Guanjin, Guo Yuanyuan. Study on the heat island of the Pearl River delta urban agglomeration and its meteorological impact factors [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2015, 31(5): 681-690
- 吴宇静. 珠三角城郊土地利用变化研究——以广州市增城区为例[J]. 资源与人居环境, 2014(6): 35-37
Wu Yujing. Study on land use change in suburbs of the pearl river delta——Taking Zengcheng district of Guangzhou as an example [J]. Resources and Habitat Environment, 2014(6): 35-37
- 叶玉瑶,张虹鸥,刘 凯,等. 1988—2006 年珠三角建设用地扩展的空间差异分析[J]. 热带地理, 2012, 32(5): 493-500
Ye Yuyao, Zhang Hongou, Liu Kai, et al. Spatial analysis of construction land expansion in the Pearl River delta during 1988~2006 [J]. Tropical Geography, 2012, 32(5): 493-500
- 封 静,潘安定,李 冰. 珠三角地区近 40 年的气温变化特征分析[J]. 热带农业工程, 2011, 35(5): 60-64
Feng Jing, Pan Anding, Li Bing. Air temperature variation in recent 40 years over Pearl River delta region [J]. Tropical Agricultural Engineering, 2011, 35(5): 60-64
- 刘黎明,陈创买. 广东省 1954~1990 年的气候特征及异常[J]. 热带气象学报, 1996(4): 289-296
Liu Liming, Chen Chuangmai. The climatic characteristics and anomalies in Guangdong province during 1954~1990 [J]. Journal of Tropical Meteorology, 1996(4): 289-296
- 蒙伟光,张艳霞,李江南,等. WRF/UCM 在广州高温天气及城市热岛模拟研究中的应用[J]. 热带气象学报, 2010, 26(3): 273-282

Meng Weiguang , Zhang Yanxia , Li Jiangnan , et al. Application of wrf/ucm in the simulation of a heat wave event and urban heat island around Guangzhou city [J]. Journal of Tropical Meteorology , 2010 , 26(3) : 273-282

22 劳汉琼, 吴德平, 侯雪梅. 南海 OLR 异常与 2007 年广东省高温

天气的关系 [J]. 气象与减灾研究, 2009, 32(2) : 38-43

Lao Hanqiong , Wu Deping , Hou Xuemei. Relationship between OLR abnormality over the South China sea and the 2007 high temperature event in Guangdong [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research , 2009 , 32(2) : 38-43

Spatial and Temporal Distribution Characteristic of Summer Heat Waves in the Pearl River Delta Region during 1959 ~ 2012 and Analysis of the Impact of Urban Heat Island Effect

CHENG Di¹ , WANG Yong-wei^{1 2*} , LIU Shou-dong¹ , XIAO Fan²

(Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment Nanjing University of Information Science and Technology¹ ,
School of Atmospheric Physics , Nanjing University of Information Science and Technology² , Nanjing 210044 , China)

[Abstract] The temperature data of 9 observation sites in the Pearl River delta region from 1959 to 2012 (June–August) at 2:00 , 8:00 , 14:00 and 20:00 was used , and studied the temporal and spatial distribution characteristics of summer hot and cold weather days and intensity in the Pearl River delta region , as well as warm nights. The trend of the number of days has been analyzed over the years , and the impact of the urban heat island effect of Guangzhou in the summer of 2000 ~ 2012 on the hot and cold weather is analyzed. The research shows these as follows. ①The spatial and temporal distribution characteristics of the number and intensity of high temperature heat waves in the Pearl River delta region are similar , and the spatial distribution decreases from north to south , the time distribution decreases from the 1960s to the 1980s , and the trend begins to increase in the 1980s. after the 21st century , it increased sharply and reached its peak in 2007. ②The number of warm night days in the Pearl River delta region showed an increasing trend , and the distribution of high-valued areas was similar to the distribution of high-temperature heat waves and intensity , which occurred after the late 1990s. ③In the summer of 1980 ~ 2012 , the increase rate of various elements in Guangzhou Station was the fastest , indicating that the urban heat island effect enhanced the intensity and duration of the high temperature heat wave (warm night) in Guangzhou. ④Summer 2000 ~ 2012 during the 6 high-temperature heat waves in Guangzhou , the number of warm night days in the city accounted for 78. 6% of the total number of days , and the number of warm night days in the suburbs accounted for 14. 2% of the total number of days , indicating that the effect of urban heat island effect on nighttime temperature during urban heat wave is more prominent than during the day.

[Key words] Pearl River delta Region heat waves temporal and spatial distribution urban heat island effect