

# 上海城市集群化发展显著增强局地高温热浪事件<sup>\* 1</sup>

谢志清<sup>1</sup> 杜银<sup>2</sup> 曾燕<sup>1</sup> 高苹<sup>3</sup> 项瑛<sup>1</sup>  
XIE Zhiqing<sup>1</sup> DU Yin<sup>2</sup> ZENG Yan<sup>1</sup> GAO Ping<sup>3</sup> XIANG Ying<sup>1</sup>

1. 江苏省气候中心,南京,210009
2. 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室,南京,210044
3. 江苏省气象服务中心,南京,210008

1. *Jiangsu Climate Center, Nanjing 210009, China*

2. *Key Laboratory of Meteorological Disaster of the Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*

3. *Jiangsu Meteorological Service Center, Nanjing 210008, China*

2015-01-21 收稿,2015-07-13 改回.

谢志清,杜银,曾燕,高苹,项瑛. 2015. 上海城市集群化发展显著增强局地高温热浪事件. 气象学报,73(6):1104-1113

Xie Zhiqing, Du Yin, Zeng Yan, Gao Ping, Xiang Ying. 2015. The exacerbated intensity and duration of the heat waves events over Shanghai as caused by urban clusters expansion. *Acta Meteorologica Sinica*, 73(6):1104-1113

**Abstract** Shanghai urban clusters, the most prosperous areas in China, are experiencing the rapidly spatial growth of circle-shape expansion surrounding the urban center and clusters over suburban areas since 1981. As a result, the urban constructed area proportion about 47.9% was very close to the ecological threshold of 50% in 2013. A regional heat island covering 40 km around the Xuhui district has been induced by the rapid urban clustering expansion, and has affected the spatial distribution of heat waves. An urbanization index, represented by the remote sensing data from the Operational Linescan System instruments of the Defense Meteorological Satellite Program (DMSP/OLS), is proposed to depict the urbanization of Shanghai, which shows stronger clustering urbanization over the Jiading, Qingpu and Pudong districts. Using the Chow test method based the optimal piecewise modeling to detect the structural change in urban heat island intensities, it is found that the urban heat island intensities will occur structural change when the DMSP/OLS urbanization index exceeding 60%. Urban expansion will further induce stronger and wider regional urban heat islands effects and enhanced heat waves after the DMSP/OLS urbanization index exceeding 60%. In the period of 1977–2000, the DMSP/OLS urbanization index was lower than 60%, in which the urban heat island intensities increased significantly over all the suburban areas. However, this tendency has changed since 2001 when the DMSP/OLS urbanization index exceeded 60% in 2000 over the western suburban areas. Urban heat island intensities were decreasing gradually over the western suburban areas during 2001–2013. Compared with the difference in the climate background between western suburban areas and the reference stations of Jiangshan and Nanhui during 1959–1978, the urban clusters expansion exacerbated the difference between the western suburban areas and the reference stations about 1.6 times for heat wave days, enhanced 34.4% for mean temperature and 41.7% for mean maximum temperature. On the basis of the surface temperature data from the Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), the land surface warming cores have expanded westward about 32.8% and thus strengthened local heat waves. All the above results are conducive to assess the climate effects of the urban planning pattern with one center and four sub-centers over Shanghai in the near future.

**Key words** Urban clusters, Heat waves, Climate change

---

\* 资助课题:国家自然科学基金(41205063,41330529)、江苏省自然科学基金(BK2012888)、中国气象局气候变化专项(CCSF201411)。  
作者简介:谢志清,主要从事城市气象、气候变化和防灾减灾研究。E-mail:xiezhiqing9896@163.com  
通讯作者:高苹,主要从事应用气象研究。E-mail:gaoping5268@126.com

**摘要** 上海作为中国城市群化发展的典型代表,经过 30 余年圈层式、集群化扩张,城市建设用地面积比例高达 47.9%,接近 50%的生态阈值。城市群快速扩张诱发了一个以徐家汇为中心覆盖周边 40 km 的区域性热岛,影响高温热浪的时空分布。基于 DMSP/OLS 遥感夜间灯光数据构建的城市发展指数,客观地反映出 1992—2013 年上海西郊嘉定、青浦和东郊的浦东集群化发展特征最凸出。利用 Chow 检验最优分段建模法,研究发现高温热浪期间城市群热岛突变转折与区县城市发展指数超过 60%的年份相对应。城市发展指数超过 60%后,近郊城市继续扩张将缩小城、郊气象站的温差,诱发更大范围热岛,增强高温热浪。1977—2000 年近郊区县城市发展指数低于 60%,高温热浪各要素项城郊差值显著上升,而 2000 年西郊城市发展指数超过 60%后,和市中心差值减小,快速城市化明显增强西郊高温热浪强度和持续时间。1978 年以来上海西郊与远郊高温日数差值增加了 1.6 倍,平均气温差值增加了 34.4%,平均最高气温差值增加了 41.7%。高温热浪期间遥感数据显示,向西郊伸展的城市群地表温度高值区规模扩大了 32.8%,是西郊高温热浪增强的驱动因子。

**关键词** 城市群,高温热浪,气候变化

**中图法分类号** P404 P463.3

## 1 引言

中国城市化高速发展,大量人口涌入城市,大城市朝着集群化方向发展,区域性热岛逐渐凸显,使得城市在遭遇高温热浪时变得非常脆弱(Tan, et al, 2010; Xie, et al, 2010)。虽然 20 世纪 90 年代以前中国东部夏季高温事件呈下降趋势(Zhai, et al, 1999),但在全球变暖和快速城市化共同作用下,中国东部当前遭遇极端高温事件的概率比 20 世纪 50 年代高出 60 倍,未来将更加频繁(Sun, et al, 2014),进而加重能源消耗,危及人体健康(Sailor, 2014)。城市群化发展与高温热浪的相互作用规律及应对策略正逐渐引起学者们的关注。

就中国平均而言,城市热岛对夏季平均最高气温上升趋势的贡献率小于 20%,其中内陆城市热岛贡献率不到 10%;而在城市群化发展的长三角地区则高达 33%,线性增长率为  $0.10^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ (Li, et al, 2010; Ren, et al, 2014),城市化对夏季高温事件的影响已不可忽视。由于大部分城市夏季白天地表热岛强度大于冬季(Zhou, et al, 2014),导致大城市高温热浪频率明显增高(Sun, et al, 2014; Zong, et al, 2015),增大了城市在夏季遭遇高温热浪的风险(Xie, et al, 2010)。例如,京津城市群迅速扩张使得高温热浪强度升高了  $0.6^{\circ}\text{C}$ (Wang, et al, 2013b);长三角城市群区域性热岛改变了地表能量平衡和局地环流,2003—2007 年夏季平均气温升高了  $1.9^{\circ}\text{C}$ (张璐等, 2011; 李欣等, 2011),城市群化发展正在改变长三角地区温度的空间分布格局,需要加强城市群热岛对高温热浪事件时空分布的影响及机理研究(Xie, et al, 2010)。

城市群化发展使得大城市与近郊卫星城市连

接成片(Xie, et al, 2010),当遭遇大范围高温热浪时,城市群热岛如何影响高温持续时间、强度和覆盖范围?如何增强高温热浪事件?这些问题的研究都将有益于城市群发展的合理规划和高温热浪的应对。虽然中尺度数值模式已能模拟出城市气象要素的时空变化(Zhang, et al, 2010, 2011),但受下垫面类型、太阳辐射、地表粗糙度及人为热源、污染物排放等地气间复杂物质能量交换影响,城市高温热浪事件的模拟还存在较大不确定性。快速城市化引起的下垫面参数年际差异也增加了精确模拟长序列历史高温热浪事件的难度。观测数据包含了与城市发展相关的所有因子的综合影响,不仅能够反映高温热浪期间城、郊温差的时空差异,还可用来评估正在发展的近郊区域热岛变化及其对高温热浪的影响,为数值模拟效果检验和模式发展提供参考。因此,文中拟在已有研究成果的基础上,以上海城市群为研究对象,利用长序列地面气象观测和卫星遥感数据分析城市群热岛效应变化趋势,探寻城市群化发展对高温热浪的增强作用。

## 2 资料和方法

### 2.1 资料

(1)上海城市群内 9 个地面气象站 1959—2013 年逐日平均气温和最高气温。(2)《上海城市总体规划》和《中国城市统计(年报)年鉴》整理的 1981—2013 年上海建成区面积。(3) www.geodata.cn 提供的 20 世纪 80 年代、1995 年土地利用数据,欧洲太空局 2005 年、MODIS 2012 年土地利用数据,1992—2013 年 DMSP/OLS 遥感夜间灯光数据,及 2000—2013 年 MODIS 逐日地表温度,空间分辨率均为  $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 。(4)中国国家气候中心提供的

西太平洋副热带高压指数。

## 2.2 方法

(1) 基于多元分析法的高温热浪观测数据非均一性评估

Multiple Analysis of Series for Homogenization(MASH)均一化检验及订正方法,可以不依赖元数据而同时对日、月、季和年序列进行均一性检验和订正(Szentimrey, 1999)。利用 MASH 方法,结合周边 13 个气象站数据,对上海 9 个气象站平均气温和最高气温进行均一化检验。表 1 列出了最高气温的检验结果,夏季(6—8 月)月最高气温序列共有

35 个断点,20 个集中在 1991—2004 年,16 个集中在 1998—2004 年。1959—2003 年徐家汇、闵行和松江订正后 35℃ 以上高温日数增加了 12.7%—32.1%,南汇和金山减少了 36.0%和 59.5%。在 1998—2004 年数据序列出现非均一性的关键时期,除金山气象站迁往远郊、南汇气象站仪器变更外,其他站未有迁移和观测仪器变更,城市发展可能是气温序列出现非均一变化的主要因素,为了评估城市群化发展对高温热浪的影响,仅对金山和南汇气象站气温序列进行均一性订正,将订正后的两站气温平均值作为上海城市群气候背景变化的参考序列。

表 1 基于 MASH 法的月平均最高气温非均一性检验(0.01 信度水平) (“-”表示无断点;单位:℃)  
Table 1 The homogenization test of the monthly averaged maximum temperature based on the MASH method with the 0.01 significance level (“-”denotes without breaking points; unit:℃)

月份	6	7	8	6—8
徐家汇	1959—1979 年/-0.41	1959—1981 年/-0.58	1959—1986 年/-0.33	1959—1981 年/-0.40
	1980—1991 年/-0.30	1982—1999 年/-0.22		1982—1991 年/-0.17
闵行	-	1979—1998 年/-0.21	1959—1976 年/-0.31	1959—1964 年/-0.30
			1977—1991 年/-0.57	1965—1991 年/-0.26
松江		1959—1972 年/-0.64	1992—2004 年/-0.26	1992—1998 年/-0.16
	1959—2003 年/-0.30	1973—1982 年/-0.33	1959—1971 年/-0.46	1959—1972 年/-0.47
		1983—2003 年/-0.60	1972—1982 年/-0.21	1983—2002 年/-0.39
南汇	1959—2001 年/0.34	1959—1999 年/0.32	1959—2002 年/0.46	1959—2002 年/0.25
金山	1959—2003 年/0.80	1959—2003 年/0.77	1959—2002 年/0.45	1959—2003 年/0.71
宝山	-	1959—1971 年/0.25	-	-
奉贤	-	1959—1989 年/0.27	-	-
青浦	-	1959—1973 年/-0.17	-	-
嘉定	-	-	-	-

(2) 基于 DMSP/OLS 遥感夜间灯光数据的城市发展指数

DMSP/OLS 遥感夜间灯光数据是目前单一遥感平台连续观测全球城市发展时间最长的遥感产品。从乡村到城市  $dN$  像素值区间为 0—63,  $dN/dN_{\max}$  作为度量城市发展水平和人类活动强度的基本指标已得到广泛应用(Zhang, et al, 2013)。以城市化较慢,  $dN$  值年际变化小的安徽亳州为参考区, 2010 年为基准年, 应用 Elvidge 等(2009)提出的一元二次回归订正方法, 对上海夜间灯光数据进行订正, 以减小星载传感器年际衰减对数据质量的影响。参考 Ma 等(2012)的方法, 构建基于 DMSP/OLS 数据的上海各区县城市发展指数

$$I_{\text{urban}} = \frac{S_{\text{urban}}}{\sum \Delta S} \times 100\% \quad (1)$$

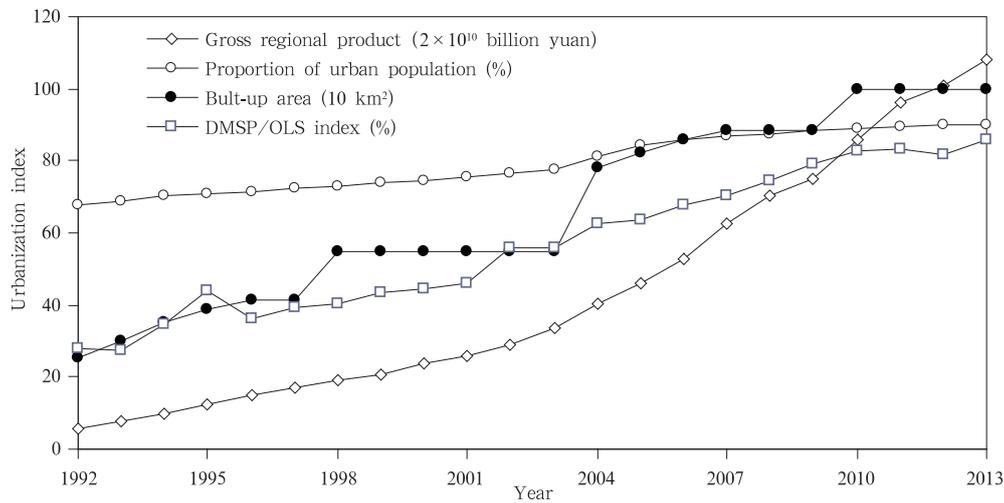
$$S_{\text{urban}} = \sum \left( \frac{dN}{dN_{\max}} \Delta S \right) \quad (2)$$

式中,  $\Delta S$  为经纬度单元格面积,  $S_{\text{urban}}$  为城市规模,  $dN \geq 12$ ,  $dN_{\max} = 63$ 。

与城市人口比例、建成区面积和地区生产总值等统计数据相比,  $I_{\text{urban}}$  最接近建成区面积的变化趋势, 能够度量人类活动年际波动和空间分布, 具有时空连续的特点(图 1、3b)。由于常规统计时空尺度和行政区划调整的限制, 城市人口比例、建成区面积和地区生产总值等城市发展指标则难以反映城市建设空间扩张过程。

(3) 时间序列线性倾向估计和突变检测

中国气象局将高温热浪定义为日最高气温不低于 35℃ 且持续 3 d 以上的事件。依据该标准, 以徐家汇气象站日最高气温不低于 35℃ 且持续 3 d 以

图1 1992—2013年上海城镇人口比例、建成区面积、地区生产总值及DMSP/OLS  $I_{urban}$  城市发展指数Fig. 1 Variations of the urban population proportion, built-up area, GDP and DMSP/OLS  $I_{urban}$  during 1992 - 2013

上为挑选上海城市群高温热浪事件的依据,以城市群高温热浪期间城、郊温差表征高温热浪背景下的城市群热岛强度。采用线性倾向估计法对热岛强度变化趋势进行判别。结合 Chow 检验和线性倾向原理,采用可统计检验的最优分段建模法(高仁祥等,1997; Xie, et al, 2010),检测城市群热岛的突变特征,分析不同时期热岛效应变化趋势,确定用来研究城市群化发展影响高温热浪时空分布的关键时段。

### 3 城市群化发展对高温热浪的增强作用

#### 3.1 西太平洋副热带高压主导下的高温热浪长期变化及城市群化发展影响

1959—2013年城市群中心(徐家汇)多年平均高温日数为12.5 d,郊区7.2 d。城、郊高温日数长期变化趋势一致,但气候倾向率差异明显。城市群中心高温日数增长率为3.8 d/(10 a),郊区仅为1.9 d/(10 a),均通过95%统计信度检验。城市群中心高温事件以持续3 d以上的高温热浪为主,占年高温日数的69.83%,年高温热浪日数与年高温日数长期变化趋势一致,相关系数达到0.96,表明上海城市群高温事件以持续3 d以上的高温热浪为主。

上海城市群高温热浪事件是盛夏西太平洋副热带高压(简称副高)控制下的晴好天气。副高控制区盛行下沉气流,太阳辐射强、风速小、气温持续上升,易出现高温天气。1959—2013年副高脊线和北界指数年际变化基本一致,出现年代际南北移动(图2b)。以1988年为转折点,1959—1988年副高逐渐

南移,上海城市群渐渐处于副高外围,高温热浪日数减少。1989—2013年副高逐渐北抬,上海城市群再次被副高覆盖,高温热浪日数和年代际频次均显著增加(图2a)。值得注意的是,同样是在副高控制下的20世纪60年代和21世纪最初10年,高温热浪日数城、郊差异却非常明显,1959—1988年城市群中心与郊区高温热浪日数差异较小,而城市群快速扩张的1989—2013年却明显高于周边区县(图2a)。因此,虽然副高年代际变化主导着上海城市群高温热浪事件的长期趋势,但城市群化发展诱发的区域性热岛很大程度上增强了市区高温热浪持续时间,影响高温热浪时空分布。

城市建设数据显示,1959—1980年上海建成区面积约为141 km<sup>2</sup>,其后每10 a翻一番,先后呈现圈层式、集群化扩张。20世纪80年代为单中心圈层式扩张,90年代圈层式扩张与郊区城市化并行,建成区面积从1990年的250 km<sup>2</sup>增加到2000年的550 km<sup>2</sup>。2000年后呈集群化发展,2013年全市3034 km<sup>2</sup>建设用地规模占总面积的47.9%,接近50%的生态阈值。城市群空间扩展过程显示(图3a),20世纪80年代—1995年沿中心城区向外呈圈层式扩张,1995—2005年不仅中心城区呈圈层式扩张,还伴随着浦东、青浦和金山的快速城市化。2001年提出多轴、多层、多核的“1主4副”城市规划布局催生了上海城市群化发展,形成一个连接周边区县、半径40 km的城市群(图3a中圆圈)。1992—2013年近郊区县  $dN/dN_{max}$  指数迅速升高(图3b),

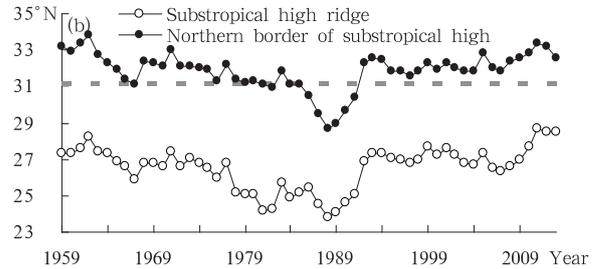
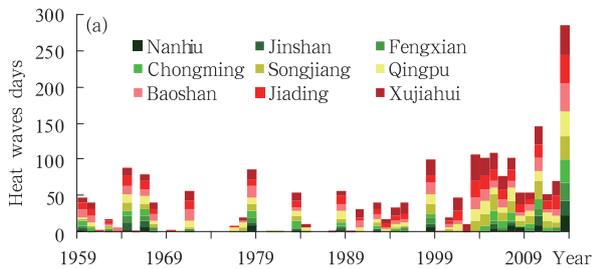


图2 1951—2013年上海城市群(图中阴影区)各站高温热浪日数(a)和盛夏副高南北位置的年际变化(b)  
Fig.2 Variation of the heat wave days in all the stations (a) and the meridional position of the western Pacific subtropical high during 1951 - 2013 (b) (The shadow denotes the location of Shanghai urban clusters)

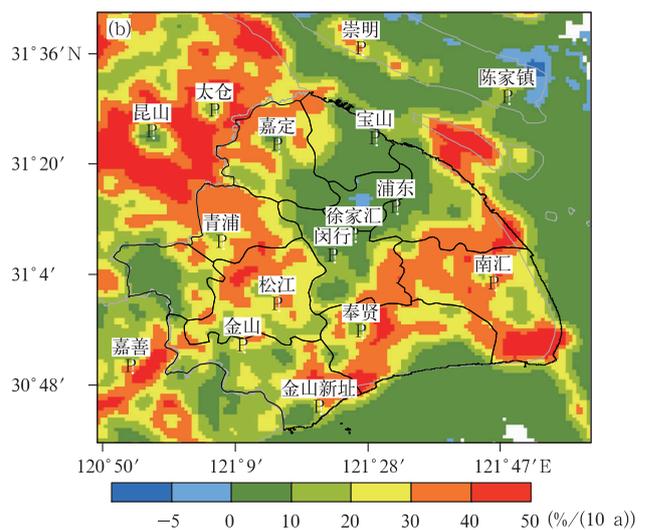
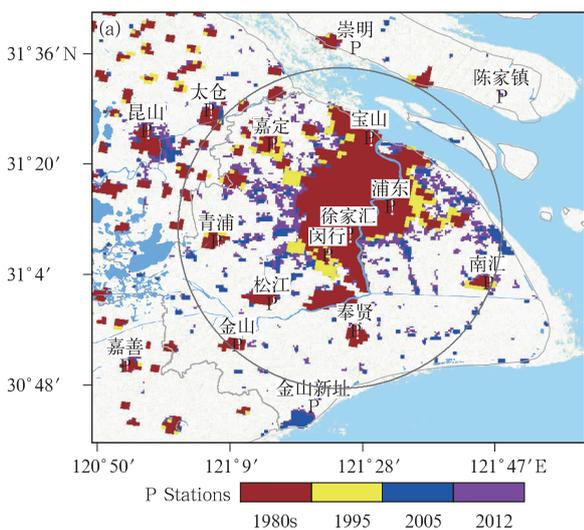


图3 (a) 上海城市群化发展过程, (b) 1992—2013年DMSP/OLS  $dN/dN_{max}$  指数线性增长率  
Fig.3 Urban expansions from 1980s to 2012 (a) and the DMSP/OLS  $dN/dN_{max}$  index linear increasing rate during 1992 to 2013 (b)

嘉定、青浦、昆山和太仓  $dN/dN_{max}$  指数线性增长率最大((30%—50%)/(10 a)),表明上海西郊城市化迅速增强。其次为浦东和奉贤,线性增长率为(20%—40%)/(10 a),松江南部、南汇南部和金山西部  $dN/dN_{max}$  指数变化较小,徐家汇附近略有下降。

### 3.2 城市群化发展与高温热浪突变转折的对应关系

1992—2013年近郊6个气象站2 km内  $I_{urban}$  迅速增大,气象观测环境受城市化影响明显(图4a)。其中,南汇、松江和金山站受城市化影响相对较小,1992—2002年  $I_{urban}$  小于50%,2003—2013年逐渐增大到80%。嘉定、青浦和松江气象站  $I_{urban}$  在2001年超过80%。1992—2013年南汇、奉贤和金山区  $I_{urban}$  变化趋势基本一致,2002年前稳定在20%左

右,其后逐渐增大,2007年后超过60%(图4b)。青浦、嘉定区  $I_{urban}$  分别在1998和2002年超过60%。根据气象站及其所在区县  $I_{urban}$  相近原则,将近郊气象站分为两类:受城市群化发展影响明显的青浦、嘉定西郊气象站;城市发展相对较弱的金山、奉贤和南汇3个南郊气象站。以徐家汇代表城市群中心,计算高温热浪期间南郊(金山、奉贤和南汇平均值)和西郊(青浦和嘉定平均值)高温日数、平均气温和平均最高气温与城市群中心的差值(图4c—h)。采用基于Chow检验最优分段建模法,检测城市群高温热浪各要素项及城郊差值的突变特征和不同时期的线性变化趋势(表2)。

城市群高温热浪期间,高温日数城郊差值的变化趋势一致,1959—1977年高温日数城郊差值小于5 d,年际波动小,西郊和南郊差异也不大(图4c)。

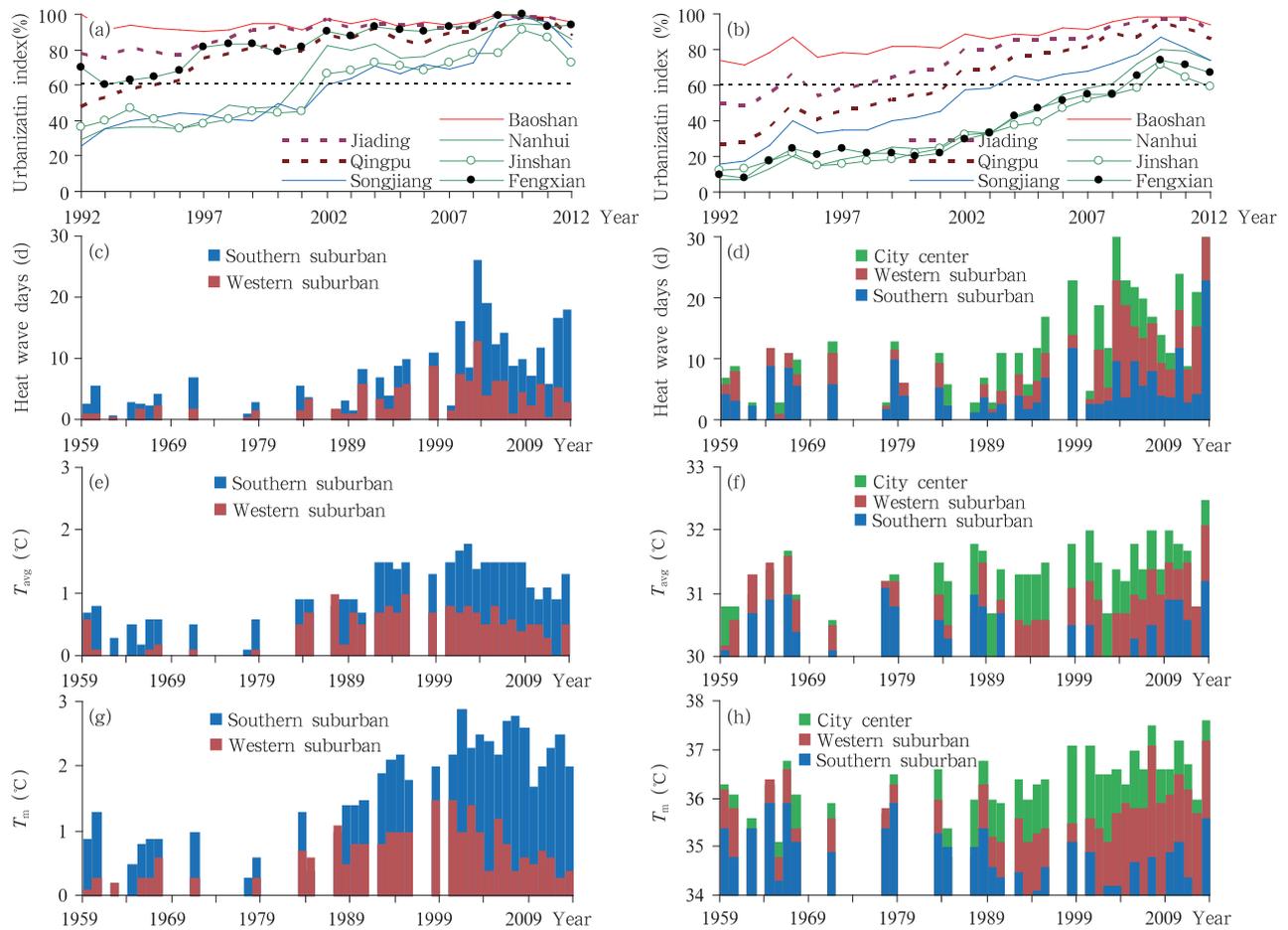


图 4 1992—2013 年气象站周边 2 km 范围内(a)和区县(b) DMSPP/OLS  $I_{urban}$  年际变化, 以及 1959—2013 年高温日数、平均气温和平均最高气温的城郊差值(c,e,g)和原始值(d,f,h)年际变化  
 Fig. 4 Variations of the DMSPP/OLS  $I_{urban}$  within 2 km of each weather station (a) and the suburban counties (b); variations of the difference (c, e, g) between the city center and suburban areas and the original values (d, f, h) of heat wave days, mean temperature ( $T_{avg}$ ) and mean maximum temperature ( $T_m$ ) during 1959—2013

1977—2003 年高温日数城、郊差值迅速增大,但南郊和西郊线性增长率差异较大,南郊为 5.30 d/(10 a),西郊为 3.10 d/(10 a)。2003—2013 年南郊和西郊高温日数差异明显变大,2003、2013 年两个异常高温年西郊高温日数比南郊高 15 d。城市群中心、西郊和南郊高温日数长期变化非常一致(图 4d),相关系数均超过 0.8,表明气候背景主导着上海城市群高温日数变化趋势。

1977—2013 年是城市群高温热浪趋多增强的关键期,1993 和 2001 年则是高温热浪发生转折的关键年。1977—1993 年南郊平均气温城、郊差显著增大(0.60°C/(10 a)),1994—2013 年则维持在 1.1—1.8°C(图 4e-f,表 2)。西郊平均气温城、郊差值在 2000 年发生转折,2000 年前以 0.27°C/(10 a)

的增长率增大,2001—2013 年则显著下降(-0.40°C/(10 a))。城市群中心平均气温无明显转折,线性增长率为 0.16°C/(10 a),西郊和南郊平均气温以年际波动为主(表 2、图 4f)。南郊平均最高气温城、郊差值也在 2001 年发生转折,1977—2001 年以 0.92°C/(10 a)的线性增长率显著增大,其后维持在 2.1—3.0°C 高位。1977—2000 年西郊平均气温城、郊差值线性增长率为 0.55°C/(10 a),而 2001—2013 年显著下降(图 4g)。2000 年后西郊、南郊平均最高气温城、郊差值变化趋势明显不同,1959—2013 年城市群中心平均最高气温显著升高(0.18°C/(10 a)),而南郊则以 -0.20°C/(10 a)的线性递减率下降(图 4h)。

综合来看,虽然气候大背景主导着城市群高温

热浪的长期变化,但城市发展空间差异仍然使得城、郊高温日数、平均气温和平均最高气温出现明显差别,2000—2013年西郊城市发展对高温热浪有明显增强作用。高温热浪突变转折与区县城市发展指数DMSP/OLS  $I_{urban}$  的对应关系显示,  $I_{urban}$  超过60%的年份,城、郊温差发生转折,其后区县城市继续扩张,城、郊温差缩小,局地高温热浪增强。2001年嘉定和青浦  $I_{urban}$  超过60%,与市中心差值达到峰值,其

后  $I_{urban}$  继续升高,差值逐渐减小,当前高温热浪各要素项已接近市中心。而南郊城、郊差值在2000年后持续稳定在高位,但当南汇和金山区2009年  $I_{urban}$  超过60%后,城、郊差值也开始下降,郊区热岛显现,参考站开始受到城市化影响(图4b)。因此,上海区县  $I_{urban}$  超过60%的年份是区县是否受城市化诱发的热岛效应影响的关键年份。

表2 基于Chow检验最优分段建模法的上海城市热岛强度突变特征及线性倾向率(0.05信度水平)  
Table 2 Structural changes in high temperature days, mean temperature and mean maximum temperature using the optimal piecewise linear modeling approach based on the Chow test (at the 0.05 significance level)

要素	城、郊差值		原始值		
	南郊	西郊	市中心	南郊	西郊
高温日数(d/(10 a))	1977—2003年 5.30	1977—2003年 3.10	1959—2013年 2.95	1959—2013年 -	1959—2013年 2.04
平均气温(°C/(10 a))	1977—1993年 0.60	1959—2000年 0.27	1959—2013年 0.16	1959—2013年 -	1959—2013年 -
		2001—2013年 -0.40			
最高气温(°C/(10 a))	1977—2001年 0.92	1977—2000年 0.55	1959—2013年 0.18	1959—2013年 -0.20	1989—2013年 0.58
		2001—2013年 -0.72			

注:“—”表示无显著(0.05信度水平)增减趋势。

### 3.3 城市群化发展增强西郊高温热浪事件

从图3b、4a和4b可以看出,1992—2013年,金山和南汇气象站所在区县城市发展速度相对较慢,将两站经过均一性订正后的逐日平均气温、最高气温作为上海城市群郊区气候背景的参考序列。计算历年高温热浪期间城市群中心、西郊和参考站平均值的差值,评估城市群化发展对上海西郊高温热浪事件的影响。

1959—1978年上海城市建设发展缓慢,建成区面积维持在141 km<sup>2</sup>左右,与之相对应,高温热浪期间市中心、西郊与参考站差值也比较平稳,高温日数差值为5和4 d,平均气温差值为0.7和0.6°C,平均最高气温差值为1.5和1.3°C,可作为城市群化发展前市中心、西郊和参考站间的自然背景差异。1978年后城市群发展导致市中心、西郊和参考站差值迅速增大,市中心线性增长率是西郊的2倍左右(图5)。高温日数差值分别增加了11.3和6.3 d,平均气温差值增大了0.8和0.2°C,平均最高气温差值增大了1.2和0.6°C。其中城市群中心区呈圈层式扩展的1979—1990年,市中心与参考站高温热浪各要素项差值迅速增大,1990年达到峰值后持续保持到2009年,西郊与参考站的差值则在1979—2009年持续增大,到2009年已非常接近市中心与参考站的差值。与1959—1978年的自然背景值差异相比,西郊高温日数

差值增大了1.6倍,平均气温差值增大了34.4%,平均最高气温差值增大了41.7%,显示出城市快速扩展明显增强了西郊高温热浪强度和持续时间。

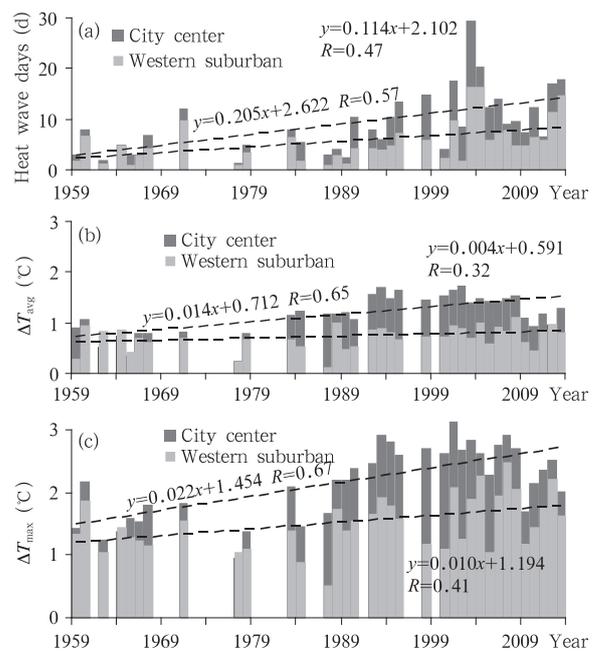


图5 高温热浪期间市中心、西郊与参考站的差值 (a. 高温日数, b. 平均气温, c. 平均最高气温)

Fig. 5 Difference in heat wave days (a), mean temperature (b) and averaged maximum temperature (c) between the stations in the urban center and western suburban areas and the reference stations during the heat wave events

#### 4 地面加热场变化在城市群高温热浪空间扩展中的作用

##### 4.1 城市群化发展过程中的两个典型高温热浪时期

下垫面改变是城市热岛增强和范围扩大的主要因素(岳文泽等,2008)。城市下垫面高温区扩大将影响高温热浪的分布。城市群化发展初期的2003—2005年和当前的2010、2012—2013年为上海两段高温热浪高发期(图4)。两个时段的高温热浪期间,城市群中心高温日数、平均最高气温和平均气温差别都不大,高温日数分别为27和28.7 d,平均最高气温为36.6和36.9℃,平均气温为31.5和31.7℃;西郊则差异明显,西郊高温日数为19.2和23.8 d,平均日最高气温为35.8和36.5℃,平均气温为30.8和31.4℃。考虑到城市群中心2003—2005和2010、2012—2013年的高温热浪特征值比较接近,可比较两个时段城市群地表热岛空间分布差异,分析城市发展对城市群高温热浪的影响。

##### 4.2 地面加热场热空间变化在城市群高温热浪向西扩展中的作用

MODIS 地表温度数据显示,城市群化发展已

明显改变高温热浪期间的地表温度场,地温升高,范围扩大(图6)。2010、2012—2013年310 K以上地温高值区面积4356.3 km<sup>2</sup>,比2003—2005年的3279.6 km<sup>2</sup>高出32.8%。以徐家汇为中心点,结合近郊6个气象站将城市群分成6个扇区(图6虚线),统计各扇区内地表温度随距离变化。2010、2012—2013年高温热浪期间,地表温度在离徐家汇5—15 km处达到最高值,15—40 km迅速下降,40 km以外变化较小,表明地面热岛分布在以徐家汇为中心的40 km范围内(图略)。南汇和金山气象站位于热岛外围,城、郊温差超过8℃,接近最大差值9.1和9.6℃,受城市热岛影响较小。而嘉定气象站受城市热岛效应影响程度最大,其城、郊温差仅为2.0℃,远小于该方向的最大温差7.7℃(表3),20—40 km地表温度高于其他方向,对局地大气的加热作用更强。金山和青浦方向地表温度空间递减率最大,为(-3.7—-4.0℃)/(10 km)。2003—2005年城市群地表温度在距离徐家汇10—15 km处达到最高值,同样在15—40 km内迅速下降,40 km以外变化较小,城、郊温差极值以宝山最小,南汇、青浦和嘉定较大,超过8.0℃。

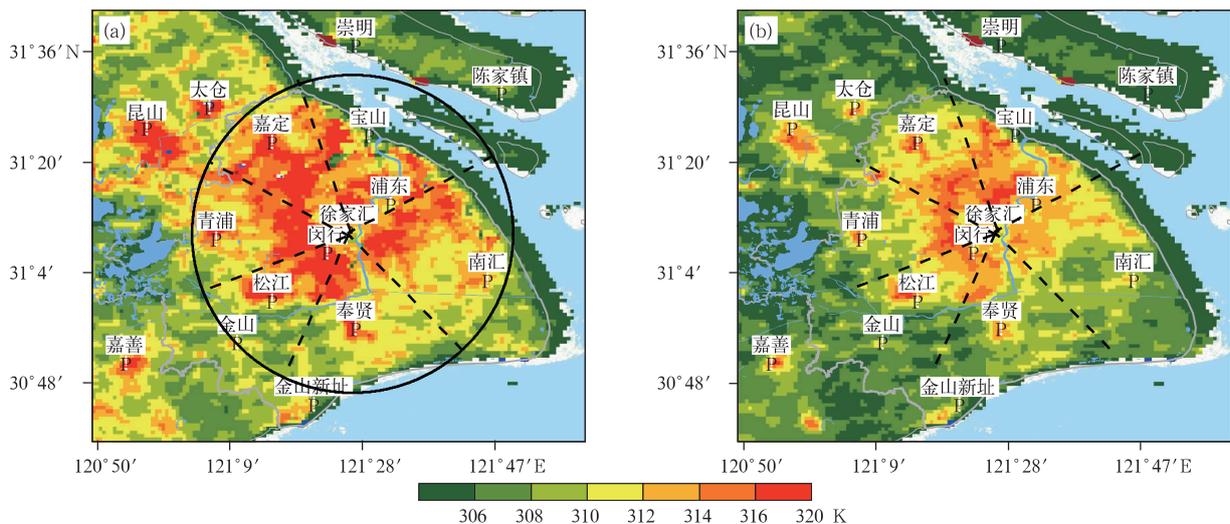


图6 2003—2005年(a)和2010、2012—2013年(b)高温热浪期间MODIS地表温度分布

Fig. 6 Spatial distribution of the MODIS surface temperature in 2003—2005 (a) and 2010, 2012—2013 (b)

2010、2012—2013年和2003—2005年高温热浪期间各气象站所在方向地表温度的差异显示,嘉定方向升高了4.0℃,青浦方向高2.5—4.0℃(表3),表明这些区域城市化发展导致热岛强度增

大,高温区向外扩展。比较各扇区40 km内DMSP/OLS城市发展指数( $I_{urban}$ )及310 K以上高温区面积比例,宝山方向城市化水平最高,地面加热场和城市变化不明显, $I_{urban}$ 和高温区面积变化不大,而其

他方向随着城市迅速发展高温区面积也显著增大,其中青浦、嘉定 2010、2012—2013 年  $I_{\text{urban}}$  超过 90%,310 K 以上高温区面积比例达到 87% 和 96%,表明西郊近 10 年快速城市化导致地表温度大范围升高,高温区向外扩展明显,是西郊高温热浪增

强的驱动因子。此外,2003—2005 年和 2010—2013 年 MODIS 地表热岛面积与 DMSP/OLS 城市发展指数提取的同期上海城市群规模(3071.4 和 4348.8 km<sup>2</sup>)基本一致。

表 3 2003—2005 和 2010、2012—2013 年高温热浪期间 MODIS 地表热岛强度(单位:°C)  
Table 3 The MODIS's UHI Intensity and the DMSP/OLS urbanization index in 2003—2005 and 2010, 2012—2013

热岛强度	年份	宝山	南汇	奉贤	松江	金山	青浦	嘉定	南郊平均	西郊平均
10—40 km 区间地表	2010—2013	-1.8	-2.8	-1.9	-3.7	-3.7	-4.0	-2.7	-3.0	-3.4
温度递减率(°C/(10 km))	2003—2005	-2.2	-2.3	-1.8	-2.7	-2.7	-3.7	-2.4	-2.4	-3.1
UHI <sub>Station</sub>	2010—2013	5.4	8.2	3.7	6.1	9.3	6.3	2.0	6.8	4.2
	2003—2005	5.6	7.2	3.8	4.3	7.5	6.4	3.1	5.7	4.8
UHI <sub>max</sub>	2010—2013	5.4	9.1	7.6	9.6	9.6	8.2	7.7	9.0	8.0
	2003—2005	5.6	8.0	6.6	7.7	7.7	8.8	8.4	7.5	8.6
DMSP/OLS $I_{\text{urban}}$	2010—2013	94	59	57	62	62	72	82	80	93
城市发展指数(%)	2003—2005	97	81	81	79	79	90	95	59	77
40 km 区间内 310 K 以	2010—2013	71	71	71	57	57	87	96	66	91
上高温区面积比例(%)	2003—2005	72	39	34	42	42	47	73	38	60

## 5 结论与讨论

(1)1959—1980 年上海城市化发展缓慢,1981 年以来建成区面积每 10 a 增长 1 倍,先后呈现圈层式、集群化扩张格局。20 世纪 80 年代上海以单中心圈层式快速扩张为主。90 年代以开发浦东为标志,进入圈层式扩张与郊区城市化并行时期,中心城区向浦东、宝山拓展,工业区建设带动近郊城市化。2001 年后上海城市群化发展,使得全市建设用地规模接近 50% 的生态阈值,诱发了区域性热岛,影响高温热浪时空分布。

(2)DMSP/OLS 城市发展指数很好地反映了上海城市发展的时空分布,1992—2013 年城市化集中在嘉定、青浦、浦东、昆山和太仓。高温热浪期间城市群热岛突变转折与区县城市发展指数超过 60% 的年份相对应。1977—2000 年高温热浪各要素项城、郊差值均显著上升,当 2000 年西郊城市发展指数超过 60% 后,与市中心高温热浪差异减小。与自然背景值相比,当前上海西郊高温日数增加了 1.6 倍,平均气温升高了 34.4%,平均最高气温升高了 41.7%,显示出城市快速扩展诱发了更大范围热岛,明显增强西郊高温热浪强度和持续时间。

(3)西郊近 10 年快速城市化导致地表温度升高,高温区向西扩展,是局地高温热浪增强的直接驱动因子。与 2003—2005 年相比,2010、2012—2013

年西郊地表温度高值区明显扩大,形成以徐家汇为中心覆盖周边 40 km 的区域性热岛,城市集群化发展已明显改变了高温热浪期间地表热岛空间分布。而且,地表热岛面积与 DMSP/OLS 城市发展指数提取的同期城市群规模基本一致,表明利用 DMSP/OLS 城市发展指数定量分析城市集群化发展特征具有相当好的合理性,也证明热岛中心范围扩大与城市空间集群化发展有很好的对应关系。

研究表明,中国北方快速城市化更多地影响夜间最低气温,升温贡献率最高在 44%—48%,对夏季高温的影响则不明显(Li, et al, 2013, 2014; Ren, et al, 2014; Wang, et al, 2013a)。而华东地区城市化对夏季高温影响显著,升温贡献率大的区域集中在长三角城市带,达 33.0%,这可能和华东城市群化发展及大城市大量释放人为热源有关(Li, et al, 2010; Ren, et al, 2014)。虽然上海城市群滨江沿海的独特环境使得城市集群化发展对高温热浪的影响局限在近郊约 40 km 范围内,但昆山、太仓与上海连片发展的趋势也已经显现,将进一步影响高温热浪时空分布。城市集群化发展对高温热浪的影响与其所在气候区和城市发展类型有关(Zhao, et al, 2014)。由于太阳辐射、地形地貌及人为热源和局地环流等地气间复杂的物质能量交换都会影响夏季城市高温热浪,深入了解城市群发展与高温热浪的相互作用规律,还需要更多高时空分辨率观测数据和

数值模拟研究做支撑。

## 参考文献

- 高仁祥, 张世英, 刘豹. 1997. 基于 Chow 检验的最优分段建模. 信息与控制, 26(5): 340-345+359. Gao R X, Zhang S Y, Liu B. 1997. Chow test based optimal piecewise modeling. Inform Control, 26(5): 340-345+359 (in Chinese)
- 李欣, 杨修群, 汤剑平等. 2011. WRF/NCAR 模拟的夏季长三角城市群区域多城市热岛和地表能量平衡. 气象科学, 31(4): 441-450. Li X, Yang X Q, Tang J P, et al. 2011. Multiple urban heat islands and surface energy balance during summer in Yangtze River Delta city cluster region simulated with WRF/NCAR. J Meteor Sci, 31(4): 441-450 (in Chinese)
- 岳文泽, 徐建华. 2008. 上海市人类活动对热环境的影响. 地理学报, 63(3): 247-256. Yue W Z, Xu J H. 2008. Impact of human activities on urban thermal environment in Shanghai. Acta Geographica Sinica, 63(3): 247-256 (in Chinese)
- 张璐, 杨修群, 汤剑平等. 2011. 夏季长三角城市群热岛效应及其对大气边界层结构影响的数值模拟. 气象科学, 31(4): 431-440. Zhang L, Yang X Q, Tang J P, et al. 2011. Simulation of urban heat island effect and its impact on atmospheric boundary layer structure over Yangtze River Delta region in summer. J Meteor Sci, 31(4): 431-440 (in Chinese)
- Elvidge C D, Ziskin D, Baugh K E, et al. 2009. A fifteen year record of global natural gas flaring derived from satellite data. Energies, 2(3): 595-622
- Li Q X, Li We, Si P, et al. 2010. Assessment of surface air warming in northeast China, with emphasis on the impacts of urbanization. Theor Appl Climatol, 99(3-4): 469-478
- Li Q X, Huang J Y. 2013. Effects of urbanization on extreme warmest night temperatures during summer near Bohai. Acta Meteor Sinica, 27(6): 808-818
- Li Q X, Huang J Y, Jiang Z H, et al. 2014. Detection of urbanization signals in extreme winter minimum temperature changes over Northern China. Climatic Change, 122(4): 595-608
- Ma T, Zhou C H, Pei T, et al. 2012. Quantitative estimation of urbanization dynamics using time series of DMSP/OLS nighttime light data: A comparative case study from China's cities. Remote Sens Environ, 124: 99-107
- Ren G Y, Zhou Y Q. 2014. Urbanization effect on trends of extreme temperature indices of national stations over mainland China, 1961-2008. J Climate, 27(6): 2340-2360
- Sailor D J. 2014. Risks of summertime extreme thermal conditions in buildings as a result of climate change and exacerbation of urban heat islands. Build Environ, 78: 81-88
- Sun Y, Zhang X B, Zwiers F W, et al. 2014. Rapid increase in the risk of extreme summer heat in Eastern China. Nat Climatic Change, 4(12): 1082-1085
- Szentimrey T. 1999. Multiple analysis of series for homogenization (MASH)//Proceedings of the Second Seminar for Homogenization of Surface Climatological Data. Budapest, Hungary: WMO, WCDMP, 41: 27-46
- Tan J G, Zheng Y F, Tang X, et al. 2010. The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai. Int J Biometeorol, 54(1): 75-84
- Wang J, Yan Z W, Li Z, et al. 2013a. Impact of urbanization on changes in temperature extremes in Beijing during 1978-2005. Chin Sci Bull, 58(36): 4679-4686
- Wang M N, Yan X D, Liu J Y, et al. 2013b. The contribution of urbanization to recent extreme heat events and a potential mitigation strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan area. Theor Appl Climatol, 114(3-4): 407-416
- Xie Z Q, Du Y, Zeng Y, et al. 2010. Accelerated human activities affecting the spatial pattern of temperature in the Yangtze River Delta. Quatern Int, 226(1-2): 112-121
- Zhai P M, Su A J, Ren F M, et al. 1999. Changes of climate extremes in China. Climatic Change, 42(1): 203-218
- Zhang N, Gao Z Q, Wang X M, et al. 2010. Modeling the impact of urbanization on the local and regional climate in Yangtze River Delta, China. Theor Appl Climatol, 102(3-4): 331-342
- Zhang N, Zhu L F, Zhu Y. 2011. Urban heat island and boundary layer structures under hot weather synoptic conditions: A case study of Suzhou city, China. Adv Atmos Sci, 28(4): 855-865
- Zhang Q, Seto K C. 2013. Can night-time light data identify typologies of urbanization? A global assessment of successes and failures. Remote Sens, 5(7): 3476-3494
- Zhao L, Lee X H, Smith R B, et al. 2014. Strong contributions of local background climate to urban heat islands. Nature, 511(7508): 216-219
- Zhou D C, Zhao S Q, Liu S G, et al. 2014. Surface urban heat island in China's 32 major cities: Spatial patterns and drivers. Remote Sens Environ, 152: 51-61
- Zong S W, Wu Z F, Xu J W, et al. 2015. Comparative analysis of the characteristics of extreme temperature changes between cities and mountains in China. Theor Appl Climatol, 119(3-4): 523-537