

1956–2016 年宁波高温热浪事件变化特征 及其影响因子分析

鹿文涵^{1,2,3}, 刘寿东^{1,2*}, 钱燕珍³, 孙仕强³, 朱宪春³, 郑梅迪³

(1. 南京信息工程大学 气候与环境变化国际合作联合实验室大气环境中心, 南京 210044;

2. 南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气象灾害教育部

重点实验室, 南京 210044; 3. 宁波市气象局, 宁波 315012)

摘 要: 为了更好地发布本地高温热浪预警信息和应急计划, 应深入了解局地高温热浪事件的变化特征及其影响因子。本文利用 1956–2016 年宁波逐日气温资料, 结合中国气象局高温热浪事件标准和上海的高温预警阈值, 改进了宁波市高温热浪的等级标准, 同时引入有效积温概念, 分析了 1956–2016 年宁波高温热浪事件变化特征, 并将其特征值与城市热岛与厄尔尼诺现象进行了相关性分析。结果表明: (1) 宁波 61 年来共有 1082 个高温日, 143 次高温热浪事件, 全部出现在 6–9 月, 其中 7 月最多, 9 月最少; 月有效积温得到同样的月际变化特征。(2) 宁波高温热浪事件的年发生频次和年有效积温呈现相同的阶段性变化: 1950S 后期至 1980S 后期持续走低, 1990S 开始尤其是 2000 年以来明显增多, 引发的炎热程度也明显增强。(3) 厄尔尼诺现象会增加高温热浪事件的炎热程度, 21 世纪以来增强效应更加明显。(4) 城市热岛强度与高温热浪事件的发生频次和有效积温均表现出较好的相关关系, 年相关系数分别为 0.68 和 0.72。

关键词: 高温预警; 高温热浪; 有效积温; 厄尔尼诺; 城市热岛

中图分类号: P49

文献标识码: A

文章编号: 1001-7119(2019)04-0054-06

DOI: 10.13774/j.cnki.kjtb.2019.04.010

Characteristics and Influence Factors of the Heat-wave Events in Ningbo from 1956 to 2016

Lu Wenhan^{1,2,3}, Liu Shoudong^{1,2*}, Qian Yanzen³, Sun Shiqiang³, Zhu Xian-chuan³, Zheng Meidi³

(1. Yale–NUIST Center on Atmospheric Environment, International Joint Laboratory on Climate and Environment Change (ILCEC), Nanjing University of Information Science & Technology,

Nanjing 210044, China; 2. Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education

(KLME) / Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological

Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology,

Nanjing 210044, China; 3. Ningbo Meteorological Administration, Ningbo 315012, China)

Abstract: Based on the daily temperature data of Ningbo from 1956 to 2016, combined with the heat-wave events standard of China Meteorological Administration and the high temperature warning threshold of Shanghai, this paper improves the grade standard of heat-wave events in Ningbo. The paper introduces the concept of effective accumulated temperature and analyzes the characteristics of heat-wave events in

收稿日期: 2018-05-05

基金项目: 浙江省气象局青年项目(2017QN16)。

作者简介: 鹿文涵(1988–), 女, 内蒙古人, 应用气象学研究生; 研究方向: 医疗与环境气象; E-mail: 76292651@qq.com。

* 通信作者: 刘寿东(1963–), 教授。研究方向: 大气环境; E-mail: lsd@nuist.edu.cn。

Ningbo from 1956 to 2016. Correlation analysis between the characteristic values of heat-wave events and urban heat islands and El Niño was carried out. The results show that: (1) Ningbo has a total of 1,082 high-temperature days and 143 high-temperature heat waves in 61 years. The high-temperature heat wave events all occurred in June–September, the most in July, and the least in September. The monthly effective accumulated temperature showed the same inter-monthly variation characteristics. (2) The frequency of occurrence of high-temperature heat wave events in Ningbo and the annual effective accumulated temperature showed the same phase change: from the late 1950s to the late 1980s, the 1990s began to decline, especially since 2000, and the degree of heat generated was also significantly enhanced. (3) The El Niño phenomenon will increase the degree of heat of high-temperature heat waves, and the enhancement effect has become more apparent since the 21st century. (4) The the heat-island intensity and the heat-wave events frequency and effective accumulated temperature show a good correlation, the annual correlation coefficients are 0.68 and 0.72 respectively.

Keywords: temperature warning; heat wave; effective accumulated temperature; El Niño; heat island effect

IPCC 第五次气候变化报告指出^[1],在过去的—个世纪全球气候正发生着以全球变暖为主要特征的重大变化。随着全球平均温度的上升,极端热事件显著增多^[2,3];随着中国城市化进程的快速发展,城市热岛现象愈加严重,导致城市更易遭遇高温热浪事件的侵袭^[4–6]。21 世纪以来全球范围出现了越来越多的极端高温热浪事件^[7],国际上 2003 年欧洲热浪事件和 2010 年俄罗斯热浪事件导致死亡人数上万^[8,9],2006 年加州热浪事件死亡人数多达 600 人^[10,11],并导致超过 16,000 次医院急诊部门的过度就诊^[12];国内 2003 年的持续高温热浪天气造成了数千人死亡^[13],2006 年四川、重庆遭受罕见高温热浪袭击,因高温干旱直接造成的经济损失超过 150 亿元^[14]。2013 年我国长三角地区发生了罕见的持续高温热浪事件,造成了严重的经济损失,对居民健康也产生了很大的影响^[15]。

宁波作为中国长三角南翼重要城市,地理位置紧靠沿海,公众普遍认为海洋效应对宁波夏季高温炎热有降温作用,这让这座城市的高温热浪现象没有得到相应的重视。但相关研究表明事实并非如此,从气候角度看,1996–2005 年的气象数据计算得到宁波的炎热临界值达到 89.6℃^[16],杭州为 89.6℃,上海为 89.0℃,广州 88.8℃^[17],宁波位列中国发达城市前列。从气温发展趋势看,近 61 年来宁波气温有明显上升趋势^[18],其中 2013 年宁波出现了罕见的连续极端高温天气^[19],极端高温多次居全国之首。高温热浪事件已成为宁波最严重的气象灾害之一,气候变化和城市发展增加了局地高温热浪事件发生的风险,且高温热浪有明显的局地特征。因此,本文利用 1956–2016 年宁波气温资料,引用有

效积温、高温热浪等级划分和厄尔尼诺指数等方法和数据进行了相关分析,得到了宁波市近年来高温热浪事件的时间变化特征和相关影响因子,以期得到的结论为更好发布本地高温热浪预警和制定高温热浪应急计划提供可靠有效的决策依据,同时也为其他城市高温热浪研究提供一定的参考。

1 数据与方法

气象资料由中国气象局国家气象信息中心提供的,并经过均一性检验的 1956–2016 年宁波鄞州基本气象站和石浦基准气象站逐日气温资料。

目前国际上关于高温热浪的定义不完全统计,主要从气温和从温湿两个标准去定义,世界气象组织和中国从气温上定义了高温热浪事件^[20],美国 and 加拿大从温湿的角度定义了高温热浪事件^[21]。我国根据日极端最高气温 $T_{\max}$ 的大小将高温日划分为 3 个等级判别标准: $T_{\max} \geq 35^{\circ}\text{C}$ 为一般高温日, $T_{\max} \geq 38^{\circ}\text{C}$ 为危害高温日, $T_{\max} \geq 40^{\circ}\text{C}$ 为强危害高温日^[22]。基于上述高温日和高温热浪事件的判别标准,改进宁波本地统计判别标准^[23],具体为把高温热浪事件划分为一般高温热浪事件($3 \text{ d} \leq \text{一般高温日} < 5 \text{ d}$ 且危害高温日 $< 3 \text{ d}$ 且强危害高温日 $= 0 \text{ d}$)、危害高温热浪事件($5 \text{ d} \leq \text{一般高温日} < 8 \text{ d}$ 或 $3 \leq \text{危害高温日} < 5 \text{ d}$ 且强危害高温日 $= 0 \text{ d}$)和强危害高温热浪事件($\text{一般高温日} \geq 8 \text{ d}$ 或危害高温日 $\geq 5 \text{ d}$ 或强危害高温日 $> 0 \text{ d}$) 3 个等级,并引入高温热浪事件有效积温概念(EATH),即一次高温热浪事件中每日 $T_{\max}$ 与 35°C 的差值相加。综合考虑高温热浪事件发生频次与高温热浪事件有效积温来展示高温

热浪事件的炎热情况。高温热浪事件的统计是按照起始日期划分月份的,例如一次高温热浪事件是从 6 月 28 号到 7 月 15 号,那么该次高温热浪事件归为 6 月份统计。本文高温热浪事件的统计中使用了高温热浪事件月平均发生次数和月平均有效积温等概念,具体公式如下:月高温热浪月平均发生次数=月出现的全部的高温热浪事件发生次数/61 年。月平均有效积温=月出现的全部的高温热浪事件有效积温/61 年。

2 高温热浪事件特征分析

2.1 高温热浪事件的分布情况

通过对 1956-2016 年宁波气温数据的计算和分析发现,1956-2016 年宁波夏季高温日(日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$)共有 1082 d,其中 846 d 满足高温热浪标准。按照上述高温热浪标准发现宁波高温热浪事件均发生在 6~9 月,因此本文下述所有关于 6~9 月宁波高温热浪事件的分析信息表示了宁波全部的高温热浪事件信息。

图 1 为 1956-2016 年宁波高温热浪事件的分布情况。1956-2016 年宁波共发生 143 次高温热浪事件(846 d 高温日:713 d 一般高温日、116 d 危害高温日、17 d 强危害高温日),70 次一般高温热浪事件(232 d 高温日:225 d 一般高温日、7 d 危害高温日),35 次危害高温热浪事件(202 d 高温日:177 一般高温日、25 d 危害高温日),38 次强危害高温热浪事件(412 d 高温日:311 d 一般高温日、84 d 危害高温日,17 d 强危害高温日)。高温热浪事件平均有效积温:一般高温热浪事件 3.5°C ,危害高温热浪事件 8.5°C 和强危害高温热浪事件 25.2°C 。可见强危害高温热浪事件除发生次数外,高温日数和有效

积温上均显著大于其他高温热浪事件的影响。

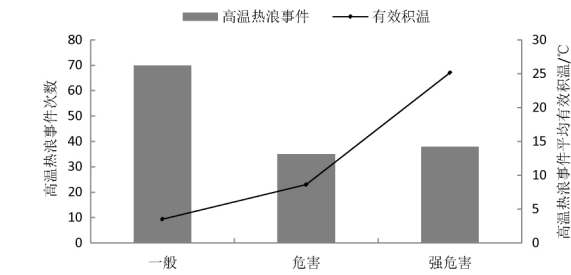


图 1 1956-2016 年宁波高温热浪事件的分布情况
Fig.1 Distribution of heat-wave events from 1956 to 2016 in Ningbo

2.2 高温热浪事件的年变化特征

宁波高温热浪事件的变化特征主要分析了高温热浪事件的发生频次和有效积温。图 2 为 1956-2016 年宁波高温热浪事件的年发生频次和年有效积温的逐年变化。从长时间来看,两者均表现出较明显的增长趋势。90 年代前均为较低的低年发生频次和年有效积温,1990 年以来高温热浪事件的两个特征值有明显增长趋势,年发生频次 5~7 和年有效积温超过 40°C 的年份均出现在 1990 年之后。21 世纪以来高温热浪事件的年发生频次和年有效积温又有所发展,比 90 年代平均增长了 36% 和 118%。

2.3 高温热浪事件的月变化特征

由表 1 可知,宁波 143 次高温热浪事件中,6 月发生 20 次高温热浪事件(12 次一般性、2 次危害性和 6 次强危害性);7 月发生 80 次高温热浪事件(30 次一般性、25 次危害性和 35 次强危害性),发生总次数和各分次数均居首;8 月发生 41 次高温热浪事件(25 次一般性、8 次危害性和 7 次强危害性);9 月只发生了 2 次高温热浪事件,均为一般高温热浪事件。从高温热浪事件的月平均有效积温来看,6 月为 3.8°C ;7 月为 13.7°C ,居于首位;8 月为 5.2°C ;

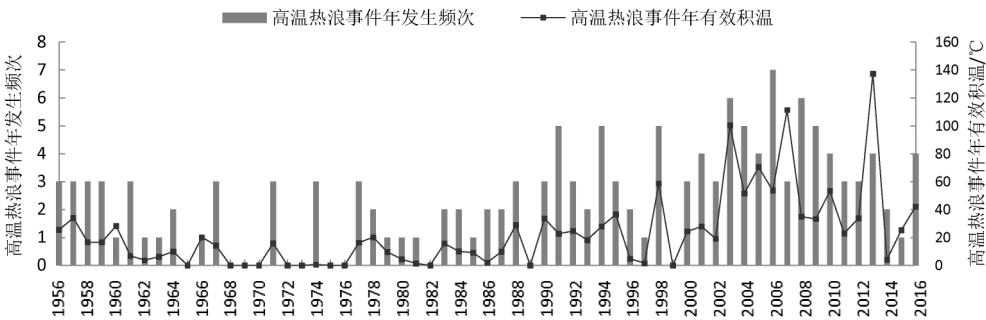


图 2 1956-2016 年宁波高温热浪事件年发生频次和年有效积温的逐年变化
Fig.2 The annual frequency and the annual effective accumulated temperatures of heat-wave events from 1956 to 2016 in Ningbo

表 1 1956–2016 年宁波高温热浪事件发生频次和高温热浪事件有效积温的月际分布情况

Table 1 The monthly frequency and the monthly effective accumulated temperatures of heat-wave events from 1956 to 2016 in Ningbo

月份	高温热浪事件次数 (有效积温/℃)	一般高温热浪事件 (有效积温/℃)	危害高温热浪事件 (有效积温/℃)	强危害高温热浪事件 (有效积温/℃)	月平均发生次数 (月平均有效积温)/℃
6 月	20(233. 4)	12(54. 8)	2(29)	6(149. 6)	0. 3(3. 8)
7 月	80(838. 7)	30(100. 1)	25(206. 7)	35(531. 9)	1. 3(13. 7)
8 月	41(318. 7)	25(81. 5)	8(66. 5)	7(170. 7)	0. 7(5. 2)
9 月	2(9. 7)	2(9. 7)	0(0)	0(0)	0. 03(0. 2)

9 月只有 0. 2 ℃。上述特征值均表明 7 月是宁波市最炎热的月份。

3 高温热浪事件的影响因子分析

3.1 厄尔尼诺现象对高温热浪事件的影响

厄尔尼诺现象是由于海气耦合,从而引起大气环流变化,导致全球气候异常的现象^[24]。目前国内外关于厄尔尼诺现象对气温影响的研究做了很多相关工作,尤其是对冬季气温的影响已经有了比较深入的研究^[25–28]。但厄尔尼诺现象对于极端最高气温及高温热浪事件的影响,目前研究较少^[24,29],尤其国内针对厄尔尼诺现象影响高温热浪事件的研究相对空白。

为方便计算和分析,根据厄尔尼诺现象的强度,定义弱、中、强、超强,权重分别赋值为 1、2、3、4 比例进行分析^[29],由此通过计算分析得到厄尔尼诺指数与极端最高气温、高温热浪事件年发生频次及高温热浪事件年有效积温的时间序列图(图 3)。从图 3 中可发现一部分厄尔尼诺现象对当年的极端最高气温、高温热浪事件年发生频次及高温热浪事件年有效积温有明显增强作用,另一部分对第二年均有明显增强作用。1956 年至 2016 年一共发生在 6~9 月的厄尔尼诺事件共 22 次,其中 12 次对当年的极端

最高气温有明显的增强作用,占比达 54. 5%,11 次对第二年最高气温有明显增强作用,占比达 50%。1997 年发生的厄尔尼诺现象对当年和第二年的最高气温都有增强作用;8 次对当年高温热浪事件年有效积温有明显的增强作用,14 次对第二年的高温热浪事件年有效积温有明显的增强作用;6 次对当年高温热浪事件年发生频次有明显的增强作用,10 次对第二年的高温热浪事件有明显的增强作用。

21 世纪以来发生的 5 次厄尔尼诺现象中,有 4 次厄尔尼诺现象对第二年的最高气温增强作用较明显,极端最高气温平均提高 1. 9 ℃,5 次全部对第二年的高温热浪事件年有效积温增强作用明显,高温热浪事件年有效积温平均提高 40. 9 ℃;有 2 次对第二年的高温热浪事件年发生频次有增强作用。从厄尔尼诺现象对最高气温、高温热浪事件年有效积温和热浪事件年发生频次的总体效果来看,对于高温热浪事件的评价,高温热浪事件有效积温的引入也是十分必要的。

3.2 城市热岛效应对高温热浪事件的影响

城市热岛效应会加剧高温热浪事件的发生发展已经被前人多次证明^[30–32]。宁波城市热岛强度定义为城区观测站日平均气温(鄞州基本气象站)减去郊区观测站日平均气温(石浦基准气象站)得到。鄞州站要素的变化是由自然和人为共同影响的结

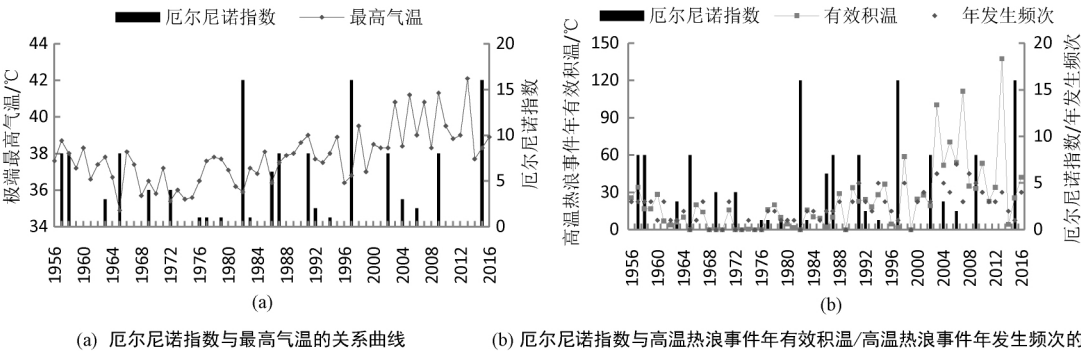


图 3 1956–2016 年厄尔尼诺指数与极端最高气温/高温热浪事件年有效积温/高温热浪事件年发生频次的关系曲线图

Fig.3 The relationship between the El Niño index and the annual maximum temperature/the annual effective accumulated temperatures of heat-wave events / the annual frequency of heat-wave events from 1956 to 2016 in Ningbo

果,代表城市气候;石浦站要素变化受人为影响较小,可代表区域背景气候。将宁波市高温热浪事件特征值与城市热岛强度之间的关系进行相关性分析。

图 4 为 1956–2016 年宁波高温热浪事件的年发生频次(年有效积温)和高温热浪事件月发生频次(月有效积温)分别与城市热岛强度的散点趋势图。宁波城市热岛强度与高温热浪事件的发生频次和有效积温均表现出明显变化趋势一致性。90 年代前城市热岛强度较小(城市热岛效应弱),对应的高温热浪事件的发生频次和有效积温水平也较低,90 年代后尤其是 21 世纪后,城市热岛效应呈现增强趋势,相应高温热浪事件两个特征值也显著增加。经计算,城市热岛强度与高温热浪事件的发生频次和有效积温均显示较好的正相关性,年相关系数分别为 0.68 和 0.72,月相关系数分别为 0.55 和 0.71,相关系数都通过 0.01 的显著性检验。

4 结论

通过对宁波 1956–2016 年高温热浪事件相关分析,得到以下主要结论:

(1) 宁波发生高温热浪事件总计 143 次,其中

强危害高温热浪事件在高温日数和有效积温中都明显高于一般高温热浪事件和危害高温热浪事件。

(2) 宁波高温热浪事件年、月变化有明显的阶段性特征。1990 年之前高温热浪事件年发生频次和年有效积温都较少,1990 年尤其是 2000 年之后,高温热浪事件年发生频次和年有效积温增长趋势明显;宁波高温热浪事件发生频次和有效积温两者均在 7 月达到最高。

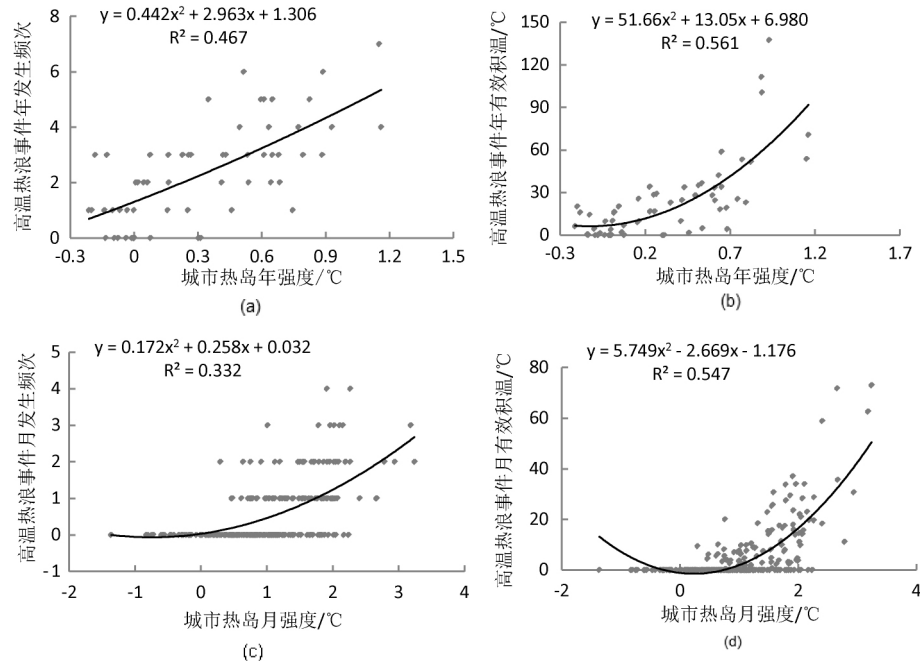
(3) 厄尔尼诺现象对当年的热浪有效积温或第二年的热浪有效积温有明显的增强效果;同时宁波城市热岛一定程度加剧了高温热浪事件的发生发展。

参考文献:

[1] 沈永平,王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点 [J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068–1076.

[2] Metz B. Climate change 2007: mitigation of climate change: contribution of Working Group III to the Fourth assessmentreport of the Intergovernmental Panel on Climate Change [J]. Computational Geometry, 2007, 18 (2): 95–123.

[3] 中华人民共和国国家统计局. 中华人民共和国 2005 年国民经济和社会发展统计公报 [J]. 中国统计,



(a) 高温热浪事件年发生频次和城市热岛年强度的散点趋势图(b) 高温热浪事件年有效积温和城市热岛年强度的散点趋势图
(c) 高温热浪事件月发生频次和城市热岛月强度的散点趋势图(d) 高温热浪事件月有效高温和城市热岛月强度的散点趋势图
图 4 195 6–2016 年宁波市年/月高温热浪事件发生频次/有效积温与城市热岛强度的散点趋势图

Fig.4 A scatter trend chart of the heat-island intensity and the annual/monthly effective accumulated temperatures of heat-wave events / the annual /monthly frequency of heat-wave events from 1956 to 2016 in Ningbo

- 2006(3):4–8.
- [4] Tan J, Zheng Y, Tang X, *et al.* The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2010, 54(1): 75.
- [5] Xie Z Q, Du Y, Zeng Y, *et al.* Accelerated human activities affecting the spatial pattern of temperature in the Yangtze River Delta [J]. *Quaternary International*, 2010, 226(1): 112–121.
- [6] 谢志清, 杜银, 曾燕, 等. 上海城市群化发展显著增强局地高温热浪事件 [J]. *气象学报*, 2015(6): 1104–1113.
- [7] Meehl G A, Tebaldi C. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. [J]. *Science*, 2004, 305(5686): 994–7.
- [8] Otto F E L, Massey N, Oldenborgh G J V, *et al.* Reconciling two approaches to attribution of the 2010 Russian heat wave [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(4): 81–83.
- [9] Robine J M, Michel J P, Herrmann F R. Excess male mortality and age – specific mortality trajectories under different mortality conditions: a lesson from the heat wave of summer 2003. [J]. *Mechanisms of Ageing & Development*, 2012, 133(6): 378–386.
- [10] Guirguis K, Gershunov A, Tardy A, *et al.* The Impact of Recent Heat Waves on Human Health in California [J]. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 2014, 53(1): 3–19.
- [11] Ostro B D, Roth L A, Green R S, *et al.* Estimating the mortality effect of the July 2006 California heat wave. [J]. *Environmental Research*, 2009, 109(5): 614–9.
- [12] Margolis, H G, Gershunov, *et al.* 2006 California Heat Wave High Death Toll: Insights Gained from Coroner’s Reports and Meteorological Characteristics of Event [J]. *Epidemiology*, 2008, 19(6): S363–S364.
- [13] 徐昌盛, 刘文革. 热射病研究进展 [J]. *中华急诊医学杂志*, 2005, 14(7): 609–611.
- [14] 丁雪松. 江苏省高温热浪时空分布特征及其对人体健康的影响 [J]. *南京信息工程大学*, 2010.
- [15] 王文, 许金萍, 蔡晓军, 等. 2013 年夏季长江中下游地区高温干旱的大气环流特征及成因分析 [J]. *高原气象*, 2017(6): 1595–1607.
- [16] 孙仕强, 俞科爱, 郭建民, 等. 城市高温特征及热浪指标分析——以宁波市为例 [J]. *农业与技术*, 2016, 36(16): 215–215.
- [17] 黄卓, 陈辉, 田华. 高温热浪指标研究 [J]. *气象*, 2011, 37(3): 345–351.
- [18] 涂小萍, 陈正洪. 宁波市气温及其变化的若干特征分析 [J]. *大气科学研究与应用*, 2007(2): 83–90.
- [19] 卢晶晶, 吕劲文, 钱峥. 宁波市高温中暑气象等级评定方法研究 [J]. *气象与环境学报*, 2016, 32(4): 91–97.
- [20] 谈建国, 黄家鑫. 热浪对人体健康的影响及其研究方法 [J]. *气候与环境研究*, 2004, 9(4): 680–686.
- [21] 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.
- [22] 张尚印, 张海东, 徐祥德, 等. 我国东部三市夏季高温气候特征及原因分析 [J]. *高原气象*, 2005, 24(5): 829–835.
- [23] 陈敏, 耿福海, 马雷鸣, 等. 近 138 年上海地区高温热浪事件分析 [J]. *高原气象*, 2013, 32(2): 597–607.
- [24] 贾艳青, 张勃, 张耀宗, 等. 长江三角洲地区极端气温事件变化特征及其与 ENSO 的关系 [J]. *生态学报*, 2017, 37(19): 6402–6414.
- [25] CHEN, XiaoQing, WANG. The combined effects of the ENSO and the Arctic Oscillation on the winter climate anomalies in East Asia [J]. *Science Bulletin*, 2013, 58(12): 1355–1362.
- [26] 梁苏洁, 丁一汇, 赵南, 等. 近 50 年中国大陆冬季气温和区域环流的年代际变化研究 [J]. *大气科学*, 2014, 38(5): 974–992.
- [27] 马露, 杨东, 曾婷. 1961–2012 年山东省气候变化特征及其与 ENSO 的关系 [J]. *中国农学通报*, 2015, 31(16): 241–249.
- [28] 伍红雨, 潘蔚娟, 王婷. 华南冬季气温异常与 ENSO 的关系 [J]. *气象*, 2014, 40(10): 1230–1239.
- [29] Zhou Y, Wu Z. Possible impacts of mega - El Niño/ Southern Oscillation and Atlantic Multidecadal Oscillation on Eurasian heatwave frequency variability [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2016, 142(697): 1647–1661.
- [30] 谈建国, 郑有飞, 彭丽, 等. 城市热岛对上海夏季高温热浪的影响 [J]. *高原气象*, 2008(b12): 144–149.
- [31] 杨续超, 陈葆德, 胡可嘉. 城市化对极端高温事件影响研究进展 [J]. *地理科学进展*, 2015, 34(10): 1219–1228.
- [32] 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.