

黄卓, 陈辉, 田华. 高温热浪指标研究[J]. 气象, 2011, 37(3): 345-351.

高温热浪指标研究^{* 1}

黄卓¹ 陈辉^{2,3} 田华^{2,3}

1 中国气象局预报与网络司, 北京 100081

2 国家气象中心, 北京 100081

3 中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081

提 要: 根据热浪所具有的气温异常偏高(或为高温闷热)及通常要持续一段时间这两个特征, 研究设计了综合表征炎热程度和过程累积效应的热浪指数作为热浪的判别指标, 并提出了热浪的分级标准。利用 1994 和 1995 年 7—8 月武汉市逐日中暑人数和 2003 年 7—8 月上海市逐日死亡人数资料对热浪指标和分级标准进行了验证分析, 结果表明, 热浪指数可以有效地判别热浪天气, 在实际预报与评价业务中具有一定的应用价值。

关键词: 高温热浪, 热浪指数, 分级

Research on the Heat Wave Index

HUANG Zhuo¹ CHEN Hui^{2,3} TIAN Hua^{2,3}

1 Department of Forecasting and Information System, China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 National Meteorological Center, Beijing 100081

3 The Public Weather Service Center of CMA, Beijing 100081

Abstract: Heat waves appear usually accompanied by both the abnormal high temperature (or high temperature and muggy weather) and a persistent period of high temperature weather. According to these two characteristics, heat-wave index is designed as an identification index of heat wave weather to show the torridity extent and accumulative effect of high-temperature process, and the classification standard of heat waves is established. Heat-wave index and meteorological grades were tested by daily numbers of heat-stroke sufferers in Wuhan during July to August of 1994 and 1995 and daily numbers of death in Shanghai during July to August of 2003. The results show that the heat-wave index is a valid index to predict heat wave weather. The method on grading of heat wave can be applied to the actual operation.

Key words: heat waves, heat-wave index, classification

引 言

由于全球气候变化和城市热岛效应, 热浪逐渐成为了世界范围内频繁发生的极端天气事件。热浪对人体健康会造成直接严重的影响, 伴随着热浪过程中持续的高温炎热天气, 人体常出现因体温调节功能障碍而引发中暑, 严重时可导致人体死亡^[1]。同时, 高温热浪对交通、建筑、农业、旅游等社会经济

以及重大社会活动都会带来重大影响^[2-8]。

世界各国对高温热浪的研究很多, 不同国家和地区依据不同的研究方法, 分别对高温热浪进行了不同的描述。如世界气象组织建议日最高气温高于 32 °C 且持续 3 天以上的天气过程为热浪; 荷兰皇家气象研究所认为热浪为一段最高温度高于 25 °C 且持续 5 天以上(其间至少有 3 天高于 30 °C)的天气过程^[9]; 美国国家天气局、加拿大、以色列等国家气象部门依据综合考虑了气温和相对湿度对人体影响

* 本文由推荐性国家标准项目“高温热浪等级”课题提供资助
2010 年 2 月 19 日收稿; 2010 年 7 月 23 日收修定稿
第一作者: 黄卓, 从事天气预报工作. Email: huangz@cma.gov.cn

的热浪指数发布高温警报,当白天热浪指数预计连续两天有 3 小时超过 $40.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或者热浪指数预计在任一时间超过 $46.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,发布高温警报^[10];我国根据气候和环境特点,将每日极端最高气温分为 3 个等级:高温 $\geq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$,危害性高温 $\geq 38\text{ }^{\circ}\text{C}$,强危害性高温 $\geq 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。每个站连续出现 3 天 $\geq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温或连续 2 天出现 $\geq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 并 1 天 $\geq 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 定义为一次高温过程,连续出现 8 天 $\geq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或连续 3 天 $\geq 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温定义为强高温过程^[9]。

以上各种对热浪的定义虽然不尽相同,但有两点基本为大家所认可,首先热浪是气温异常偏高或为高温闷热,同时这种高温闷热天气要持续一段时间。本文基于热浪的这两个特征,从热浪对人体健康影响的角度出发,初步研究了热浪的判别指标及其分级标准,并通过对我国 10 个城市极端最高温度与热浪等级的对比分析,及利用武汉、上海两个城市部分中暑或死亡人数数据与热浪等级的比较,对热浪的指标及分级的合理性进行了验证分析。

1 资料说明

本文中使用的气象资料为国家气象信息中心提供的北京、沈阳、成都、西安、武汉、重庆、上海、杭州、福州、广州 10 个城市 1996—2005 年逐日极端最高温度和日平均相对湿度的整编资料。文中所使用的中暑人数和死亡人数数据分别来自于武汉区域气象中心提供的武汉市 1994 年 7—8 月和 1995 年 7—8 月全市逐日中暑人数和上海市城市环境气象中心提供的 2003 年 7—8 月全市死亡人数资料。

2 热浪的判别指标

分析各国对热浪的定义,首先热浪是人体感觉高温炎热的天气。气象环境对人体舒适度的影响是综合性的,气温虽然是一个非常重要的因子,但空气湿度和风速同样可通过影响人体热散失速率来影响人体舒适感觉。因此,评价人体对环境高温炎热的感觉,应使用综合性的气象指标。其次,热浪是一个持续一段时间的过程,对热浪的判别和评价应考虑持续过程中的累积效应。基于以上两点,我们设计了综合表征炎热程度和过程累积效应的热浪指数作为热浪的判别指标。热浪指数(H_i)的计算公式如下:

$$H_i = 1.2(E_T - E'_T) + 0.35 \sum_{i=1}^{N-1} 1/nd_i \times (E_{Ti} - E'_T) + 0.15 \sum_{i=1}^{N-1} 1/nd_i + 1$$

式中 E_T 为当日的炎热指数,其代表了人体对气象环境的舒适感, E'_T 为炎热临界值,大于其值表示感觉炎热, E_{Ti} 为当日之前第 i 日的炎热指数, nd_i 为当日之前第 i 日距当日的日期数, N 为炎热天气过程的持续时间。

公式中的第一项表示了当日的炎热指数与炎热临界值之差,表征了当日天气的炎热程度。公式的第二项和第三项表示了炎热天气过程累积效应。其中,第二项表示了当日之前连续的炎热指数大于炎热临界值的过程炎热程度累积量,第三项表示了当日之前连续的炎热指数大于炎热临界值的过程持续时间的长短。增加第三项的作用主要是当两次高温炎热过程的炎热程度累积量相同时,可使持续时间较长的过程的热浪指数高于持续时间较短的过程。这在一定程度上表征了长炎热过程对人体不舒适感的影响要强于短炎热过程的现象。第四项为常数“1”,表示当日的持续时间为 1 天。在考虑炎热天气持续的累积效应时,我们设计了一个与当日相距时间长短有关的权重系数($1/nd_i$)。这一权重系数可使距当日相近的炎热天气对热浪指数的贡献大于距当日较远的炎热天气。式中前三项的权重系数分别为 1.2、0.35 和 0.15,权重系数的取值主要考虑各项对热浪指数的不同贡献而依据经验确定的。

通过对以上各项权重系数的选取,使得热浪指数与当日的炎热程度和炎热天气的持续时间具有了较好的相关性。图 1 为西安 1997 年 7 月 20—30 日逐日热浪指数与极端最高温度的对比图。从图中可以看出,热浪指数随时间的变化趋势与极端最高温度的变化趋势基本相同。西安在 7 月 27 日最高温度达到这一次过程的最高值 $38.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,同样当日的热浪指数也达到了 7.7 的高值。但是,在图中也可看出,7 月 23 日温度为这次过程的低值 $36.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,但由

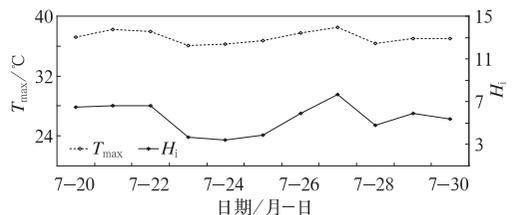


图 1 西安 1997 年 7 月 20—30 日热浪指数与极端最高温度对比图

Fig. 1 The relationship between heat-wave index and extreme maximum temperature at Xi'an during 20—30 July 1997

于前几日炎热的累积效应,热浪指数的最低值出现在了7月24日,相对温度稍有滞后现象。这主要是由于热浪计算时考虑了前几日炎热的累积量所带来的缺点,通过调整各订正项的权重系数,我们认为已将该缺点减到较低的程度。

2.1 炎热指数的计算

在对热浪的判别时,我们使用了炎热指数作为评价气象环境对人体舒适感影响的综合气象指标。炎热指数是热应力的舒适指标,最初由 Tom 提出, Bosen 又作了发展^[12]。该指标主要考虑气温和相对湿度对人体舒适状况的综合影响。传统的炎热指数(E_T)的计算公式如下:

$$E_T = 1.8T_a - 0.55(1.8T_a - 26)(1 - RH) + 32$$

式中, T_a 为环境温度(°C), RH 为空气相对湿度(%)。

炎热指数由于引入了相对湿度因子,其对高温高湿天气使人体所产生的异常闷热感觉进行了较为恰当的表征。但对于我国北方地区常出现的高温干热天气,计算得到的炎热指数值往往较低,而这种天气同样也会对人体健康产生严重影响。例如,谢静芳等^[12]研究得出,吉林省的中暑事件多发生在晴热高温天气,相对湿度对发病率的影响不大,在中暑多发期间,相对湿度仅为50%左右。因此,我们认为当空气相对湿度较低时,温度是影响人体舒适程度的主要因子。在这种条件下,相同温度、不同相对湿度的气象条件对人体产生的影响是基本等效的。基于以上考虑,我们对传统的炎热指数计算公式进行了调整:约定当相对湿度小于60%时,均以60%作为相对湿度的常数项带入炎热指数计算公式。这样可使高温干热的天气也会得到较大的炎热指数,从而可将炎热指数作为高温的判别指标基本等效地衡量高温干热和高温闷热对人体健康的影响。调整后用于热浪判别的炎热指数计算公式如下:

$$E_T = 1.8T_a - 0.55(1.8T_a - 26) \times (1 - 0.6) + 32 \quad \text{当 } RH \leq 60\% \text{ 时}$$

$$E_T = 1.8T_a - 0.55(1.8T_a - 26) \times (1 - RH) + 32 \quad \text{当 } RH > 60\% \text{ 时}$$

式中, T_a 为环境温度(°C), RH 为空气相对湿度。在判断当日是否炎热时,一般均考虑当日最热的条件,因此,我们在计算炎热指数时, T_a 一般取当日极端最高温度。

2.2 炎热临界值的确定

热浪指数公式中的炎热临界值,主要是作为判断是否为高温炎热天气。当炎热指数大于该临界值时,表示当日已达到高温炎热级别,应开始计算热浪指数。

我国地域幅员辽阔,不同地区气候背景的差异决定了人们对高温的耐受力也会存在较大的不同。因此,对炎热临界值的确定不能全国使用统一的量值,而应考虑地域上的差异。目前,我国高温预警信号的发布标准是最高温度高于35°C^[14],世界气象组织建议日最高气温高于32°C作为判别热浪的指标,我们综合以上两个指标,确定温度在33°C以上开始计算炎热指数。在计算不同地区炎热临界值时,我们的具体做法为:首先利用当地1996—2005年5—9月逐日气象资料,计算其中最高温度大于33°C样本的炎热指数,并将该炎热指数序列作升序排列,选取第50分位数作为当地的炎热临界值。分位数的计算采用下面的经验公式^[15]:

$$\begin{aligned} \hat{Q}_i(p) &= (1 - \gamma)X_j + \gamma X_{j+1} \\ j &= \text{int}[pn + (1 + p)/3] \\ \gamma &= pn + (1 + p)/3 - j \end{aligned}$$

式中, $\hat{Q}_i(p)$ 为第 i 个分位值, X 为升序排列后的炎热指数样本序列, p 为分位数(这里取0.50), n 为序列总数, j 为第 j 个序列数, γ 为第 $j+1$ 个序列数权重。

表1为按此方法计算得到的沈阳、北京、西安、成都、重庆、武汉、上海、杭州、福州及广州10个城市炎热临界值及此临界值在相对湿度分别为60%、70%、80%和90%时所对应的最高温度值。

表1 10城市炎热临界值及其在不同相对湿度时所对应温度

Table 1 Statistics on torridity critical value of ten cities and their corresponding temperature with different relative humidity

城市	炎热临界值/°C	炎热临界值所对应的温度/°C			
		$RH \leq 60\%$	$RH = 70\%$	$RH = 80\%$	$RH = 90\%$
沈阳	86.0	34.4	33.1	31.9	30.9
北京	87.3	35.3	33.9	32.7	31.7
成都	88.1	35.9	34.5	33.2	32.1
西安	88.1	35.9	34.5	33.2	32.1
武汉	88.7	36.3	34.9	33.6	32.5
重庆	89.5	36.9	35.4	34.1	33.0
上海	89.0	36.5	35.1	33.8	32.7
杭州	89.6	37.0	35.5	34.2	33.0
福州	89.5	36.9	35.4	34.1	33.0
广州	88.8	36.4	34.9	33.7	32.6

人数与热浪指数的相关关系,并结合各级热浪在历史样本中出现频次而确定的经验值。在下文中分别从热浪分级与温度和中暑人数等方面验证了热浪分级的阈值选取是基本合理的。

根据热浪的分级标准,我们计算了沈阳、北京等 10 个城市 1996—2007 年 6—8 月逐日的热浪级别,表 3 为 10 个城市 1996—2007 年不同热浪等级逐年的分布统计。

从表中可以看出,福州、杭州、武汉、重庆、广州

等南方城市的热浪天数明显高于沈阳、北京等北方城市。福州的热浪天数最多,其 3 个等级的热浪天数共有 271 天。10 个城市中除福州年热浪天数分布较均匀外,其余城市均存在 1~2 个热浪天数高值年份,而在其他年份热浪天数并不很多且分布较均匀。如西安在 1997 年热浪天数达到了 32 天,占 12 年总热浪天数的 21%,而其余年份的热浪天数基本均在 10 天以下。因此,热浪天数较多的城市主要是由个别气候异常年份持续高温造成,而在其余年份

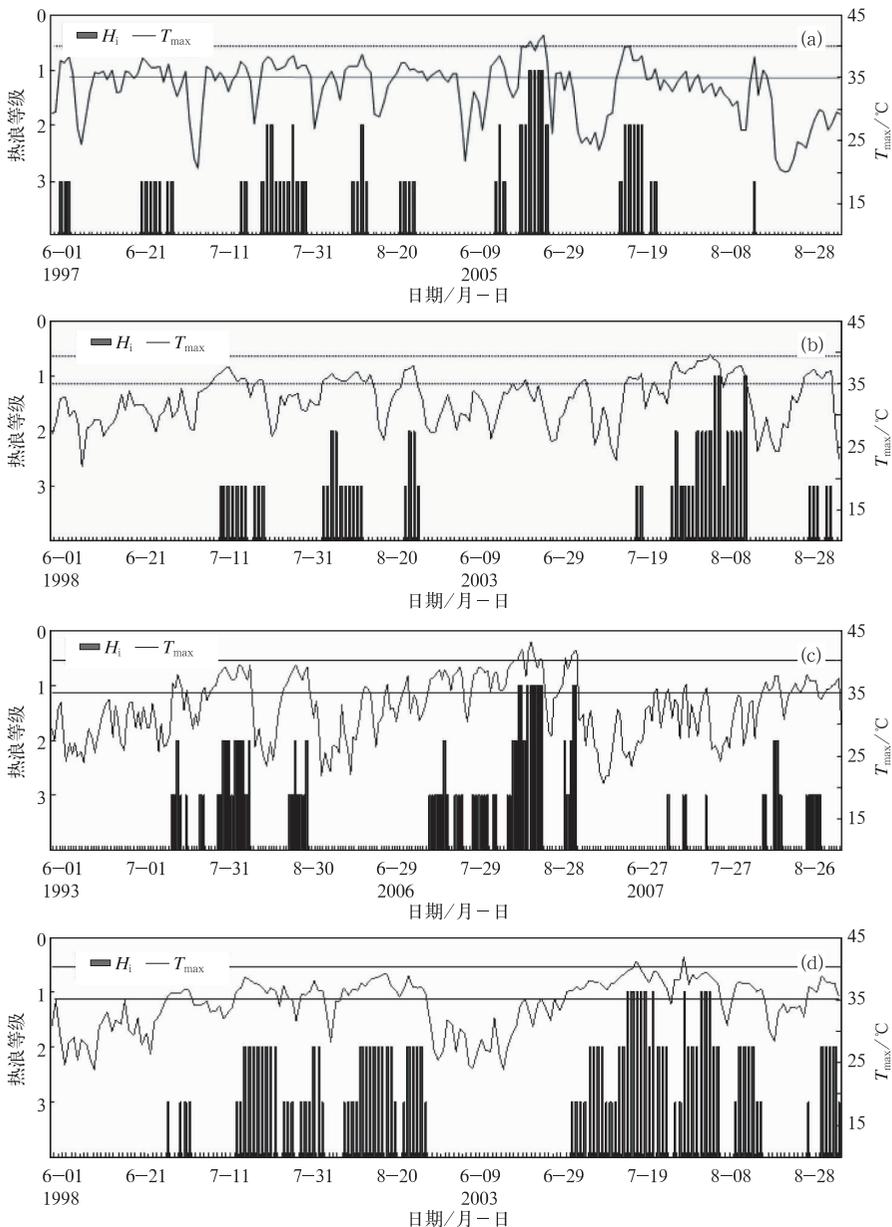


图 2 西安(a)、武汉(b)、重庆(c)、福州(d)热浪等级与最高温度对比图

Fig. 2 Comparisons between grades of heat wave and maximum temperatures in Xi'an (a), Wuhan (b), Chongqing (c) and Fuzhou (d)

热浪天数一般均较少且年分布较均匀,说明热浪分级标准具有一定的合理性。从不同等级热浪出现天数看,3个等级的热浪天数逐级递减。10个城市中除福州的中度热浪天数达到了72天外,其余城市基本均在45天以下,平均每年4天左右。所有城市重度热浪的天数均在15天以下,大多数城市重度热浪在12年中没有出现或仅出现3~6天。因此,按此热浪分级标准,可有效地控制高等级热浪特别是重度热浪的出现频数。

为进一步讨论热浪的分级标准问题,我们选取了西安、武汉、重庆、福州4个热浪天数较多的城市,分析了这些城市热浪多发年份各热浪等级与最高温度的关系。图2为西安、武汉、重庆和福州热浪多发年份热浪等级与最高温度的对比图。

从图中可以看出,当出现热浪时当日最高温度基本均大于35℃,这与中国气象局现行的高温发布标准具有一致性。随温度的上升及高温的持续,热浪等级也逐渐增加。西安、重庆、福州的重度热浪均

对应着大于40℃的高温天气。武汉的重度热浪对应着38℃以上的高温,这可能是由于当地空气湿度较大,高温闷热天气同样造成了对人体舒适程度的显著影响。同时,各等级热浪特别是中度或重度热浪均出现在一段持续时间较长的高温过程中,除个别的热浪是由于1~2天温度极高所造成的之外,大多数热浪均对应着持续3天以上的高温过程,这也与前述的各国将热浪定义为持续一段时间的过程相一致。

4 热浪指标的验证分析

为进一步验证热浪指标及分级标准的合理性,我们利用武汉市1994年和1995年7—8月的逐日中暑人数及上海市2003年7—8月的逐日死亡人数资料,分析了热浪等级与中暑或死亡人数的相关关系(图3和图4)。

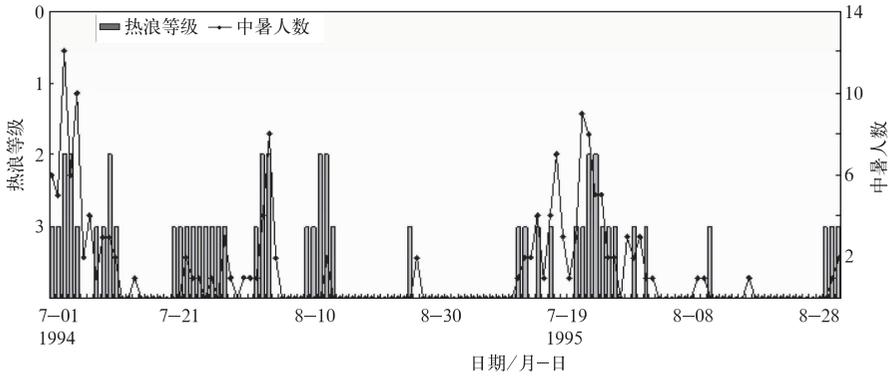


图3 武汉市1994年和1995年7—8月热浪等级与中暑人数对比图
Fig. 3 Comparison between grades of heat wave and the number of heatstroke in Wuhan during July–August of 1994–1995

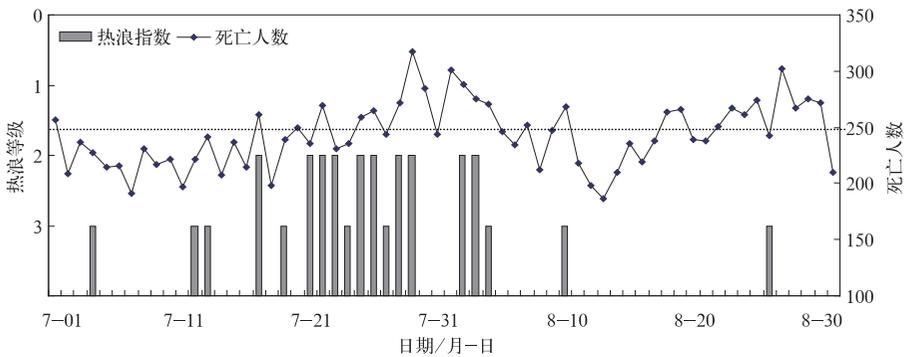


图4 上海2003年7—8月热浪等级与死亡人数对比图
Fig. 4 Comparison between grades of heat wave and the number of death in Shanghai during July–August of 2003

从图中看出,武汉市热浪等级与中暑人数具有较好的相关性,一般出现热浪天气时均有中暑事件发生,且随着热浪等级的上升,中暑人数也逐渐增加。图4为上海2003年7—8月热浪等级与死亡人数对比图,图中的虚线为平均死亡人数。由图所示,上海市出现热浪天气时其死亡人数一般均高于平均值,特别是发生中度热浪时,死亡人数一般均达到了该次过程的峰值。通过以上分析表明,中暑或死亡人数与热浪等级具有较好的相关性,在一定程度上验证了利用热浪指数方法对热浪判别和分级的合理性。

同时也可以看到,对于个别中暑事件来说,热浪等级预报存在滞后的情况,或者有的热浪等级并没有对应着中暑人数或超额死亡人数的明显上升过程,究其原因,一方面是由于热浪指数公式考虑了前期炎热天气的累积,在一定程度上造成了热浪指数相对于中暑事件的时间滞后;另一方面由于目前取得较为完善的长时间序列的病例资料存在一定难度,很难对具体的某一次热浪过程进行检验。因此,在热浪指数的检验和完善方面尚需开展进一步的研究工作。

5 小 结

本文在世界各国气象部门对热浪研究的基础上,根据热浪所具有的气温异常偏高(或为高温闷热)及通常要持续一段时间这两个特征,从高温闷热对人体健康影响的角度出发,研究设计了热浪的判别指标,并利用该指标提出了热浪的分级标准。通过该热浪判别指标对我国沈阳、北京、西安等10个城市1996—2007年6—8月热浪判别分析中的应用,从各等级热浪逐年出现频数的分布、热浪与温度的对应关系、热浪与武汉、上海中暑或死亡人数的相关关系等多方面对热浪指标和分级标准的合理性进行了初步验证。结果表明,应用热浪指数可较为有效地判别热浪天气并评价热浪的不同等级,该判别结果与中国气象局现行的高温预报标准保持了较好的一致性,在实际预报与评价业务中应具有一定的

应用价值。

但是,由于热浪指数的计算要考虑前期温度的累积效应,在一定程度上会造成热浪指数相对于温度的变化有滞后性,这种滞后性对于热浪天气结束的判断可能产生影响,如何消除这一影响,还应在今后的工作中进一步研究。

参考文献

- [1] 孙立勇,任军,徐锁兆. 热浪对炎热地区居民死亡率的影响[J]. 气象, 1994, 20(9): 54-57.
- [2] 李威,蔡锦辉,郭艳君. 2009年全球重大天气气候事件概述[J]. 气象, 2010, 36(4): 106-110.
- [3] 王亚伟,翟盘茂,田华. 近40年南方高温变化特征与2003年的高温事件[J]. 气象, 2006, 32(10): 27-33.
- [4] 张迎新,张守保. 2009年华北平原大范围持续性高温过程的成因分析[J]. 气象, 2010, 36(10): 8-13.
- [5] 张丽,申双和,孙向明. 热带气旋外围环流影响下深圳高温的定量估算[J]. 气象, 2010, 36(4): 37-42.
- [6] 朱周平,钱炳强. 中国东部地区夏季高温南北不均匀分布特征分析[J]. 气象, 2010, 36(11): 26-31.
- [7] 白莹莹,高阳华,张焱,等. 气候变化对重庆高温和旱涝灾害的影响[J]. 气象, 2010, 36(9): 47-54.
- [8] 陈丽华,周率,党建涛,等. 2006年盛夏川渝地区高温干旱气候形成的物理机制研究[J]. 气象, 2010, 36(5): 85-91.
- [9] Huynen M, Martens P, Schram D, et al. The impact of heat waves and cold spells on mortality rates in the dutch population[J]. Environmental Health Perspectives, 2001, 109(5): 463-470.
- [10] Kalkstein L S, Jamason P F, Libby J, et al. The Philadelphia hot weather-health watch-warning system: development and application, summer 1995 [J]. Bull Amer Meteorol, 1997, 41: 34-39.
- [11] 张尚印,宋艳玲,张德宽,等. 华北主要城市夏季高温气候特征及评估方法[J]. 地理学报, 2004, 59(3): 383-390.
- [12] Tom E C, Bosen J R. The discomfort index[J]. Weatherwise, 1959, 12: 59-60.
- [13] 谢静芳,秦元明. 气象环境与舒适度及健康[M]. 北京:气象出版社, 2004: 142-146.
- [14] 气象灾害预警信号发布与传播办法. 中国气象局第16号令, 2007: 24-26.
- [15] Hyndman R J and Fan Y. Sample quantiles in statistical packages[J]. Amer Statist, 50: 361-365.