

城市极端高温灾害研究综述

扈海波¹ 熊亚军²

(1 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089; 2 北京市气象台, 北京 100089)

摘要: 极端高温是一种危害性较大的灾害性天气, 对人体健康的影响较大。它的发生发展既与天气尺度的环流系统有关, 又与城市热岛效应、下沉增温和地形等因素相关。从高温的气候特征、高温与环流的关系及高温灾害的风险评估及预警三个方面, 对城市高温气象灾害的相关研究成果进行了简要回顾, 期望从已有的文献中梳理城市高温灾害研究的重点及主要发展方向。

关键词: 高温热浪, 风险评估, 预警

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.01.002

A Research Summary of Extreme Heat Wave

Hu Haibo¹, Xiong Yajun²

(1 The Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089

2 Beijing Meteorological Observatory, Beijing 100089)

Abstract: The high temperature is a kind of disastrous weather with serious harmfulness. Its occurrence and development are not only be related to the warm atmospheric circulation, but also have a connection with other factors such as heat island effect, subsidence and temperature increasing as well as terrain. In the paper, a brief retrospect has been made that many scientists have achieved research results in the basic characteristics, the formative causes of high temperature meteorological disaster, risk assessment of disaster and so on. At the same time, this paper systematically reveals some advances in studying high temperature meteorological disasters.

Keywords: heat wave, risk assessment, warning

0 引言

近100年(1906—2005年)地球表面的平均温度上升了0.74℃, 近50a的线性增温速率为0.13℃/10a, 1850年以来最暖的12个年份中有11个出现在1995—2006年^[1]。在全球气候变暖背景下, 近年我国也频繁遭遇高温热浪灾害, 例如, 2006年的川渝地区的高温及伴随的旱灾对农业、电力供应等造成巨大影响, 也出现了大量人员因热死亡事故。鉴于高温灾害的影响越来越严重, 国内外针对高温气象灾害的研究也不少。20世纪90年代以前的研究侧重于高温灾害的天气预报方法及应用研究。90年代以后, 有关大气环流与高温天气影响方面的研究较多; 高温作为一种极端天气及气候事件, 高温日数的增加是全球气候变暖的证据之一, 其时空变率的研究也在90年代开始兴起。2000年以后, 随着城市化的发展, “热岛效应”和全球变暖对极端高温事件的开始引起人们的关注, 而有关城市高温气象灾害的风险评估及预警方面的研

究近年来逐渐受到重视。

本文试图对有关城市高温气象灾害的研究进行回顾, 重点从高温气象灾害的气候特征、高温热浪与大气环流的关系以及高温热浪风险评估及预警三个方面进行阐述。希望本综述能对高温灾害研究的深入开展、拓宽高温热浪减灾对策研究的思路起到抛砖引玉的作用。

1 高温灾害的气候特征

1.1 高温日数的变化趋势和周期性

IPCC第二次研究报告指出, 高温及干旱作为一种极端天气及气候事件, 高温日数正逐渐增加。Zhai等^[2]分析了1951—1999年中国200个气象站的高温日数变化特征, 认为中国的高温日数整体呈现略微减少的趋势。高荣等^[3]利用中国541个站的最高气温资料, 分析了高温日数的时空变化特征, 发现吐鲁番盆地和江南是高温日数的高值中心, 认为从1951—2006年中国各区域的高温日数均呈现“增加—减少—增加”的变化趋势。由于时间段不一致, 以上两个研究结果并不矛盾。因为在20世纪90年代左右, 可能存在一个高温日数变化的拐点, 拐点过后中国处于高温日数增多的

收稿日期: 2013年5月31日; 修回日期: 2013年9月12日

第一作者: 扈海波(1970—), Email: hbhu@ium.cn

资助信息: 国家自然科学基金项目(41175099)

阶段。IPCC第四次评估报告也指出, 1850年以来最暖的12个年份中有11个出现在1995—2006年。而中国范围内, “高温日数的周期变化”存在明显的区域性差异。中国东部以3~6a的周期变化为主; 西部的新疆有准3a的周期变化; 重庆则以14~15a的周期振动最强; 河南夏季的高温日数则存在2~4a、8~12a的周期变化。

1.2 最高气温与最低气温非对称变化

有学者提出, 最高气温与最低气温存在不对称变化, 即全球变暖主要发生在夜间^[4-6]。谢庄等^[7]分析了北京最低和最高气温发现: 1月份最低气温的倾向率约为 $0.4^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 7月份最高气温的倾向率为 $-0.2^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。吴胜安等^[8]研究发现海南极端最高气温的线性增温趋势不能通过显著性检验。孙凤华等^[9]发现东北地区的最高气温的气温趋势系数春夏季约为 0.28°C 、秋季为 0.08°C 、冬季为 0.34°C , 年平均最高气温的趋势系数为 0.42°C , 而最低气温为 0.73°C , 两者相差近一倍。江志红等^[10]对比分析了上海近百年来最高和最低气温, 发现二者都显著增加, 但最低气温的上升趋势明显大于最高气温。在中国的北部、西北部也存在最高气温与最低气温的非对称变化特征^[11-14]。

上述文献表明, 中国范围内气温整体呈现增温的趋势。在平均气温、最高气温和最低气温三者当中, 最低气温的增温率最大, 平均气温次之, 最高气温的增幅最小。最高与最低气温之间存在非对称变化。最高气温是整体增幅最小的温度要素, 有些城市的增温趋势不显著, 部分地区甚至呈阶段性降温趋势。

2 城市高温气象灾害的成因分析

2.1 我国引起高温气象灾害的主要环流形势和影响系统

华北酷暑天气的出现与大环流形势密切相关, 大陆副热带高压维持于华北上空是其主要因素, 空气下沉增温是酷暑的主要机制, 而大城市的热岛效应则可使城区百叶箱气温再增高 2°C 左右^[15]。孙建华等^[16]利用MM5中尺度模式对1999年6、7月份华北的两段高温过程进行了模拟研究, 发现大陆副热带高压中的下沉增温和辐射增温是造成高温酷暑天气的主要原因。北京出现持续高温天气的物理机制可能包括: 与河套高压下沉运动相联系的晴空区辐射增温, 与暖气团东移相联系的平流增温, 以及与下沉运动相联系的绝热增温等^[17]。赵庆云等^[18]利用甘肃省62个气象观测站的研究表明, 100hPa南亚高压、300hPa暖中心、500hPa副热带高压闭合单体控制西北地区上空, 对流层上下层暖高压中心相对应, 且中心位置基本一致时, 将

出现大范围、持续性的异常高温天气。常军等^[19]对1991—2005年15年河南典型的大面积持续高温下的环流形势进行普查和分类后发现, 与河南省高温有关的环流型主要有两种: 贝加尔湖高压型和副热带高压型。贺懿华等^[20]认为西太平洋副热带高压持续稳定控制长江中下游, 是造成武汉市高温及强高温过程的主要环流系统。

副热带高压和热带气旋是导致华南地区高温的主要天气系统^[21]。王远超^[22]分析广西的高温天气后认为广西高温的环流形势分别有副高控制型、热带气旋西侧高压型和地面西南暖低压控制型。

2.2 城市高温气象灾害与热岛效应

Manley^[23]把城市地区气温较高的现象称为城市热岛(UHI)后, 这一术语沿用至今。Yoshino^[24]、Oke^[25]及Bornstein等^[26]认为在大气清晰度较高、微风天气条件下城市地区气温通常比周边的农村地区高出 $0\sim 10^{\circ}\text{C}$ 。Souch等^[27]将城市热岛特征归结为: (1) 夜晚热岛强度相对较大; (2) 全年发生; (3) 受风速等气象条件影响较大; (4) 在城市核心及主要商业区气温较高。城市热岛首先被认为是城市下垫面地表特征改变的结果, 比如水泥及柏油路面、房顶等具有较低反照率(Albedo)从而吸收更多太阳辐射的原因。其次, 城市地区树林及灌丛稀少, 蒸腾降温效果差; 城市建筑物和地表的加热增温强化城市热岛效应; 燃料消耗、空调使用及其他人类活动增加了城市地区的人为热排放^[28]等。Rosenzweig等^[29]指出城市热岛加剧了城市地区夏日热浪的致灾能力, 给城市居民的人体健康和生活造成严重影响。

谢德寿^[30]通过分析长江中下游地区的沿江城市常在西太平洋副高控制下出现高温酷热天气的现象, 提出热岛效应是大城市高温灾害的主要成因。谢庄等^[7]以西郊作为城区代表站, 以密云作为郊区代表站, 在分析城郊温差的基础上发现, 北京的高温不能单一归结于气候变率, 热岛效应可能是一个不可忽视的因素。郑柞芳等^[31]应用中尺度模式, 对2002年7月14日的一次高温天气过程进行了模拟分析, 初步探讨了北京周边特殊地形及城市环境对高温强度的影响, 发现地形对北京城区气温的影响主要是通过焚风效应来实现的, 它加剧了背风坡一侧平原地区高温的强度。当西部、北部山区地形高度减小后, 焚风效应也会减弱, 相应的背风坡气温增幅减小。高温天气与暖性环流系统有较好的对应关系。鉴于目前气象系统业务模式对于大的环流形势有较好的预报能力, 因此对气象部门而言, 在中短期范围内, 对高温天气的趋势预报

要相对容易。但高精度的高温天气预报，不能忽视下沉增温和“热岛效应”等其他因素的影响。对于高温灾害风险评估及区划，则也应该注重城市热岛效应对评估及区划结果的影响，从空间精度上体现城市热岛效应的空间差异，这样才能更好地为城市高温热浪灾害风险管理提供决策依据。

2.3 温湿条件对高温热浪致灾因子特征的影响

目前气象台主要通过预报最高气温这一气象要素，来反映第二天的冷热程度。但实际上，在不同的湿度等要素下，人体对同一气温的感觉并不一致。1955年Burton等^[32]描述了湿度对人体舒适感的影响，总结出当气温适中时，大气湿度变化对人体舒适度影响较小，当气温较高或较低时，湿度变化才对人体的温热感产生影响。20世纪40年代Yagtu^[33]根据人体在不同气温、湿度和风速条件下所产生的热感觉指标提出了实感气温。温湿指数（Temperature Humidity Index, THI）综合反映了温度和相对湿度两个因子对人体热感的影响，是衡量舒适度的一项重要指标^[34]。谢雯等^[35]利用MODIS遥感的地表温度和地面水汽压数据来反演中国温湿指数的时空分布。陈正洪等^[36]计算了湖北的温湿指数（ID）并进行试验，结果表明：ID ≥ 80 ，绝大多数人均感不适；ID ≥ 75 ，半数人身感不适；ID ≥ 70 ，少数人（10%）感到不适；ID为60~65，大部分人感到舒适。国外在针对高温天气对人体健康影响分析及发展趋势研究过程中，注重高温气象条件对人体感官的影响^[37]。因此，基于人体热量平衡模式，涉及温度及湿度条件的体感温度（Apparent Temperature, AT）指标被更多地应用于高温热浪对人体健康（导致热死亡）的影响分析中。美国天气局则进一步采用具有操作性的体感温度指标——“热指数”作为城市热环境监测及预警的指标。Andrew等^[38]选用体感温度分析了美国1949—2010年各测站的极端高温天气变化情况，发现高温日的最低AT的增长趋势比较明显，44%的测站呈现增长趋势；20%测站的极端最高AT呈现增长趋势，并主要分布在西部地区。Andrew认为尽管从AT上看高温灾害性天气日数呈现比较明显的增长趋势，但高温热浪对人类的危害程度，尤其是对人体健康的影响还与人口老龄化、空调设备的大量使用等高温灾害脆弱性、风险暴露等因素有关。Sheridan等和Kalkstein等^[39-41]同样基于气温及湿度条件来分析高温热浪或极端冷湿天气对人体健康的影响。

3 城市高温气象灾害风险评估与预警

2007年中国气象局最新颁布的《气象灾害预警

信号发布和传播办法》把高温气象灾害分为三个级别：较重高温（黄色预警），连续三天日最高气温将在35℃以上；严重高温（橙色预警），24小时内最高气温在37℃以上40℃以下；特别严重高温（红色预警），最高气温高于40℃。然而从精细化的角度考虑，完全依靠这类指标来进行高温灾害预警显然是不够的。高温热浪灾害的防治首先要做到的是基于风险管理模式的风险评估及区划，然后则是融入业务工作的高温热浪预警。

由于全球气候变暖、城市化过程的加快，以及人口老龄化所导致的高温灾害脆弱性特征的突显，使得高温对人类的影响越来越严重，尤其对人体健康的影响^[42]。高温与人类日常生活息息相关，在城市地区，高温会影响电力、供水等城市生命线系统的正常运行。因此高温灾害一直受到人们的密切关注。国内外关于高温天气预报的研究很多，但关于高温灾害的风险评估直到最近才逐渐引起国内研究者的重视。扈海波等^[43]从可预报性、可规避性及人工干预能力等方面分析了北京市奥运期间气象灾害的风险承受与控制能力，对北京奥运期间的雷电、冰雹、大风、高温、暴雨、大雾和霾这七种主要的气象灾害进行风险排序，确认高温风险最大（图1）。这种风险分析及排序对大型社会活动期间的灾害风险控制及防范具有重要参考价值。陈见等^[44]利用高温范围、高温持续时间作为高温危害的评估指标，综合评估了一次高温过程的灾害影响程度。扈海波等^[45]利用地理信息系统研究气象灾害事件的数学形态学特征时，以高温灾害为例，从下垫面的社会经济、环境构成情况等特征中提取数学形态学滤波中的目标函数，在观测要素值的空间离散化图谱上进行动态腐蚀或膨胀操作，最终完成高温灾害给北京中关村附近地区造成影响的空间图谱化特征（图2）。总之，高温灾害的风险评估有助于高温风险管理，有助于进行高温风险规避及风险控

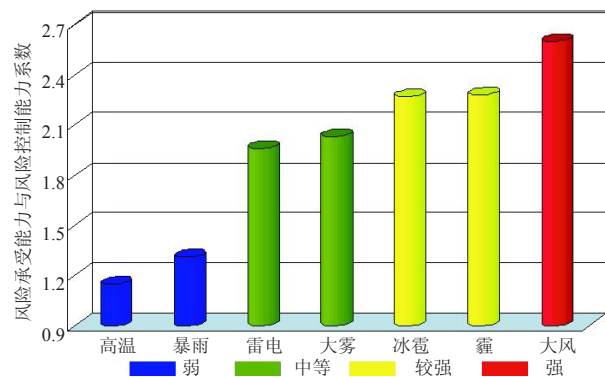


图1 奥运期间气象灾害风险评估（高温排在首位）

制。当然要将高温灾害的防治完全落实到实际，还应积极做好高温灾害的预警工作。

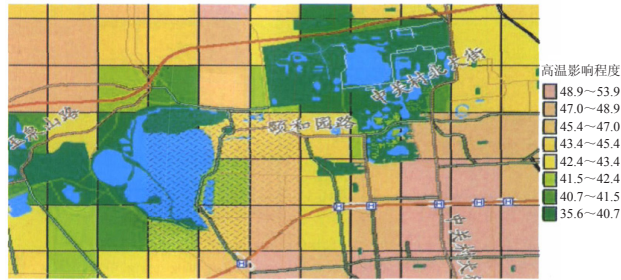


图2 根据下垫面类型数学形态动态膨胀腐蚀结果叠加绿地和水体后高温对城市的影响程度(试验区域为北京城区中关村附近)

国外在高温热浪预警研究及应用上的做法非常值得借鉴。按照灾害学理论，人是高温灾害的主要承灾体，而人体健康是其主要的影响方面。国外的高温热浪灾害预警系统则主要针对高温对人体健康造成的影响，以及其可能导致人员因热死亡的情况来实施。美国的酷热天气健康预警系统(HHWS)在空间化天气分型(Spatial Synoptic Classification)的基础上根据未来高温天气的变化情况来评估这类天气可能会导致的因热死亡人数^[46]。非常有趣的是这类天气分型方法少了些学术气息，而对高温热浪的防治更加实用，更有针对意义。它主要从气温及湿度等要素出发将天气类型划分成“干热”(Dry Tropical)、“湿热”(Moist Tropical)、“极端湿热”(Moist Tropical)等类型。HHWS系统建立不同天气分型状况下的因热死亡人数与温度条件之间的定量评估关系，比如分步回归等，来识别高温灾害风险，并完成城市高温热浪的预警。Kalkstein等^[41]根据1975—2004年美国各大城市的因热死亡人口数据及高温热浪事件资料，评比HHWS系统在降低因热死亡人数方面起到的效果，认为这类系统确实使得许多大城市的因热死亡人数显著下降，具有不错的效果。

4 城市高温灾害研究的重点及主要发展方向

随着世界人口不断增加，全球变化和城市化进程逐渐深入，加之自然生态环境状况的恶化，高温天气的出现将更加频繁，强度将越来越大，“温室效应”和“热岛效应”等影响范围也将越来越广，而人类面对高温灾害的脆弱性也在不断加大。我们认为城市高温灾害研究应该着重于以下几个方面。

1) 高温灾害天气学成因的研究。着重对引发高温气象灾害的主要环流形势和影响系统的研究及天气学机理研究，以及高温灾害与城市热岛的研究。这对高温灾害成因分析，灾害预警及预测均有重要的作用。

2) 高温灾害气候学背景分析。充分预测高温灾害的变化发展趋势，对高温灾害的预警及有效防御和应对具有显著的作用。

3) 高温灾害风险评估预警的研究。重新梳理高温灾害风险预警指标，从精细化的气象服务需求出发，搭建适合不同地区、不同气候背景下的高温灾害风险预警指标。实施基于风险管理模式的风险评估及区划，并将之融入高温热浪预警业务工作。

4) 基于高温灾害风险评估及区划的高温灾害风险管理机制研究。加强高温灾害风险管理，有助于进行高温风险规避及风险控制，将高温灾害的防治完全落实到实际，积极应对高温灾害预警。

5) 高温天气对人体健康的影响研究。由于高温灾害性天气日数呈现比较明显的增长趋势，但高温热浪对人类危害程度，尤其是对人体健康的影响还与人口老龄化、空调设备的大量使用等高温灾害脆弱性、风险暴露等因素有关。这方面的研究对建立有效的高温灾害防御、预警及规避机制至关重要。

5 总结

1) 作为全球变暖的证据之一，高温日数目前处于整体增多阶段。但尚没有直接证据表明，高温日数的时空变化幅度与全球平均温度变化存在较为严格的对应关系。高温日数变化趋势和周期的区域性差异进一步表明，高温的发生发展既与天气尺度的暖性环流系统有关，又与城市热岛效应、下沉增温和地形等因素存在联系，研究局地高温天气时，要考虑多种因素的影响。

2) 中国区域最高气温和最低气温的非对称变化研究表明，最低气温和最高气温都在增加，但最低气温的上升趋势明显大于最高气温。最高气温、最低气温和平均气温三个气象要素中，最高气温的增幅最小，局地可能还存在阶段性负降温。

3) 高温天气与大的暖性环流系统有较好的对应关系，其中最主要的系统是副热带高压。地面的暖性低压系统也是产生高温天气的成员之一。另外，热岛效应、下沉增温等效应对高温天气的出现也有一定关系。鉴于目前气象系统业务模式对于大的环流形势有较好的预报能力，因此对气象部门而言，在中短期范围内，对高温天气的趋势预报要相对容易。但高时空分辨率的高温天气预报及高温灾害风险评估及区划必须考虑局地地理、地形特征及“热岛效应”等相关因素。利用业务模式的环流预报产品，进行二次开发，建立本地化的精细化高温预报、风险评估及预警系统，依然是各地气象部门的主要科研任务之一。

4) 最高气温是温湿指数、闷热指数等舒适度指标中最主要的气象要素。当温度超过某一阈值时,湿度和风速等其他气象要素对舒适度指数的作用较大。确定合理的高温阈值及超过阈值后,引入湿度和风速,建立本地化的温湿指数方程不但是专业气象服务的重要内容,也是灾害风险评估及区划的侧重点,而且高温热浪的预警也需要建立在温湿指标基础上。

5) 高温灾害风险评估除了注重致灾因子(高温天气的环流形势)等方面的研究,也应该着重分析下垫面的脆弱性和脆弱性因子。人是高温灾害的主要承灾体,所以高温灾害的风险评估及预警可完全依赖于高温对人体健康的影响来进行分析、评估及预警。在高温热浪的预警应用上作者推荐美国HHWS系统的运作方法。

参考文献

- [1] 秦大河,陈振林,罗勇,等. 气候变化科学的最新认知. 气候变化研究进展,2007,3(2): 63-73.
- [2] Zhai P M, Pan X H. Trends in temperature extremes during 1951-1999 in China. *Geophys Res Lett*, 2003, 30(17): 1-4.
- [3] 高荣,王凌,高歌. 1956—2006年中国高温日数的变化趋势. 气候变化研究进展,2008,4(3): 177-180.
- [4] Karl T R, Jones P D, Knight R W, et al. A new perspective on recent global warming: Asymmetric trends of daily maximum and minimum temperature. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1993, 74(6): 1007-1023.
- [5] Bonan G B. Observational evidence for reduction of daily maximum temperature by croplands in the Midwest United States. *Journal of Climate*, 2001, 14(11): 2430-2442.
- [6] Brunetti M, Buffoni L, Maugeri M, et al. Trends of minimum and maximum daily temperatures in Italy from 1865 to 1996. *Theoretical and Applied Climatology*, 2000, 66: 49-60.
- [7] 谢庄,曹鸿兴. 北京最高、最低气温的非对称变化. *气象学报*, 1996, 54(4): 501-507.
- [8] 吴胜安,张永领,杨金虎. 海南岛最高和最低气温的非对称变化. *热带气象学报*, 2006, 22(6): 667-671.
- [9] 孙凤华,杨修群,路爽,等. 华北地区平均、最高、最低气温时空变化特征及对比分析. *气象科学*, 2006, 26(2): 157-163.
- [10] 江志红,丁裕国. 近百年上海气候变暖过程的再认识——平均温度与最低、最高温度的对比. *应用气象学报*, 1999(2): 151-159.
- [11] 王菱,谢贤群,苏文,等. 中国北方地区50年来最高和最低气温变化及其影响. *自然资源学报*, 2004, 19(3): 337-343.
- [12] 马晓波. 中国西北地区最高、最低气温的非对称变化. *气象学报*, 1999, 57(5): 613-621.
- [13] 林纾,吴红. 兰州最高最低气温的非对称变化. *气象科技*, 2004, 32(6): 444-449.
- [14] 杜军. 青藏高原最高、最低气温的非对称变化. *应用气象学报*, 2003, 14(4): 437-444.
- [15] 谢庄,崔继良,刘海涛,等. 华北和北京的酷暑天气 I. 历史概况及个例分析. *气候与环境研究*, 1999, 4(4): 323-333.
- [16] 孙建华,陈红,赵思雄,等. 华北和北京的酷暑天气 II. 模拟试验和机理分析. *气候与环境研究*, 1999, 4(4): 334-345.
- [17] 钱婷婷,王迎春,郑祉芳,等. 造成北京连续高温的河套高压结构分析. *应用气象学报*, 2005, 16(2): 167-173.
- [18] 赵庆云,赵红岩,王勇. 甘肃省夏季异常高温及其环流特征分析. *中国沙漠*, 2007, 27(4): 639-643.
- [19] 常军,李素萍,余卫东,等. 河南夏季高温气候特征及500hPa环流型. *气象科技*, 2007, 35(6): 776-780.
- [20] 贺懿华,湛伟,李才媛,等. 武汉市盛夏高温气候特征和成因及预报. *气象科技*, 2007, 35(6): 809-813.
- [21] 涂建文,许连丰. 影响珠海夏季高温的天气系统类型. *气象研究与应用*, 2007, 28(增刊 II): 43-44.
- [22] 王远超. 广西东南部高温灾害气候特征分析. *灾害学*, 2004, 19: 34-38.
- [23] Manley G. On the frequency of snowfall in metropolitan England. *Q J R Meteorol Soc*, 1958, 84: 70-72, doi:10.1002/qj.49708435910.
- [24] Yoshino M. *Climate in a Small Area*. Tokyo: University of Tokyo Press, 1975.
- [25] Oke T R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations. *J Climatol*, 1981, 1: 287-254, doi:10.1002/joc.3370010304.
- [26] Bornstein R D, Oke T. Influence of pollution on urban climatology. *Adv Environ Sci Eng*, 1980, 3:171-202.
- [27] Souch C, Grimmond S. Applied climatology: Urban climate. *Prog Phys Geogr*, 2006, 30: 270-279, doi:10.1191/0309133306pp484pr.
- [28] Oke T R. The energetic basis of the urban heat island. *Q J R Meteorol Soc*, 1982, 108: 1-24.
- [29] Rosenzweig C, Solecki W D, Parshall L, et al. Characterizing the urban heat island in current and future climates in New Jersey. *Global Environ Change B. Environ Hazards*, 2005, 6: 51-62, doi:10.1016/j.hazards.2004.12.001.
- [30] 谢德寿. 城市高温灾害及其预防. *灾害学*, 1994, 9(3): 29-33.
- [31] 郑梓芳,王迎春,刘伟东. 地形及城市下垫面对北京夏季高温影响的数值研究. *热带气象学报*, 2006, 22(6): 672-676.
- [32] Burton A C, Snyder R A, Leach W G, et al. Damp could versus dry could specific effects of humidity in heat exchange of unclothed men. *J App Physiol*, 1955, 8: 269-278.
- [33] Yagtu C P. A method for improving the effective temperature index. *ASHVE Trans*, 1947, 53: 307-309.
- [34] Tromp S W. *Medical Biometeorology*. Amsterdam: Elsevier, 1963: 211-219.
- [35] 谢雯,任黎秀,姜立鹏. 基于MODIS数据的旅游温湿指数时空分布研究. *地理与地理信息科学*, 2006, 22(5): 31-35.
- [36] 陈正洪,王祖承,张鸿雁. 炎(闷)热指数在武汉市的试用、修订及检验. *湖北气象*, 2000, 3: 23-25.
- [37] Robinson P J. On the definition of a heat wave. *J Appl Meteor*, 2001, 40: 762-775.
- [38] Andrew G, John D. Trends in extreme apparent temperatures over the United States, 1949-2010. *J Appl Meteor*, 2011, 50: 1650-1653.
- [39] Sheridan S C, Kalkstein A J. Seasonal variability in heat-related mortality across the United States. *Nat Hazards*, 2010, 55: 291-305, doi: 10.1007/s11069-010-9526-5.
- [40] Sheridan S C, Kalkstein A J, Kalkstein L S. Trends in heat-related mortality in the United States, 1975-2004. *Nat Hazards*, 2009, 50: 145-160.
- [41] Kalkstein L S, Greene S, Mills D M, et al. An evaluation of the progress in reducing heat-related human mortality in major U.S. cities. *Nat Hazards*, 2011, 56: 113-129.
- [42] Luber G, McGeehin M. Climate change and extreme heat events. *Amer J Prev Med*, 2008, 35: 429-435.
- [43] 扈海波,熊亚军,董鹏捷,等. 北京奥运期间(6—9月)气象灾害风险评估. 北京:气象出版社,2009.
- [44] 陈见,李艳兰,高安宁,等. 广西高温灾害评估. *灾害学*, 2007, 22(3): 24-27.
- [45] 扈海波,王迎春,刘伟东. 气象灾害事件的数学形态学特征及空间表现. *应用气象学报*, 2007, 18(6): 801-809.
- [46] Kalkstein L S, Jamason P J, Greene J S, et al. The Philadelphia hot weather health watch/warning system: Development and application, Summer, 1995. *Bull Am Meteorol Soc*, 1996, 77: 1519-1528.