

重庆市 1959~2018 年夏季高温热浪及湿度影响特征分析

杨溟鋆^{1, 2} 杜钦³ 王咏薇^{1, 2} 高阳华³ 胡凝^{1, 2} 何泽能³¹

(1. 南京信息工程大学 大气物理学院, 江苏 南京 210044;

2. 南京信息工程大学 大气环境中心, 江苏 南京 210044;

3. 重庆市气象科学研究所, 重庆 401147)

【摘要】 基于重庆市沙坪坝(城区)和北碚(郊区)站点 1959~2018 年夏季(6~8 月)的气象观测数据, 探究重庆市城区 60 年高温事件的时间变化特征, 分析城郊差异和暖夜日数的变化特征, 并通过计算温度-湿度指数(THI)以探究湿度因子对人体舒适度的影响。结果表明: (1)重庆市城区高温热浪 20 世纪 60~80 年代呈减少趋势, 90 年代开始呈增加趋势, 21 世纪之后大幅增加。于 2006 年夏季到达顶峰, 热浪天数达 23d。从城郊两站的差值分析, 1997 年以后, 城市化过程导致城郊日平均气温和日最低气温增大, 表明城市在夜间的增温效应明显。相对湿度的差值增大, 城市区域湿度明显降低。(2)暖夜的发生率明显大于日间高温热浪, 稳定存在, 最高暖夜日数发生在 2013 年, 达 33d。在 2000~2009 年日间、夜间高温同时存在的天数所占比例达到了 35.73%, 在 2010~2018 年增加到 55.89%。城市化过程对重庆市城区的夜间高温产生一定影响。(3)近年来重庆地区高温高湿的日数逐渐增多。湿度对人体舒适程度存在不可忽视的影响。THI>24 的所有数据中, 相对湿度大于 70% 的天数所占的比例达到 22.51%; 夜间的不舒适受湿度因子的影响很大, 相对湿度大于 70% 以上的日数日数占比为 64.12%, 延续了日间高温的危害。

【关键词】 重庆 高温热浪 城郊差异 暖夜日数 湿度因子

【中图分类号】 :X16 **【文献标识码】** :A **【文章编号】** :1004-8227(2021)10-2492-10

在全球变暖的气候背景下, 高温灾害是一个突出的世界性问题^[1]。中国多个地区高温灾害频频发生, 使其成为关注度最高的气象灾害之一^[2,3]。在高温环境下, 城市供电、供水压力增大, 建筑、交通、医疗等领域负担变重, 农作物减产, 甚至遭受经济损失^[4,5,6,7]。此外高温条件下, 湿度对人体舒适度、人体健康的影响, 也受到了极大的关注^[5,8]。

1997 年重庆成为直辖市以来, 其城市化迅速发展, 截止到 2018 年末, 重庆市常住人口达 3101.79 万人, 城镇人口达 2031.59 万人, 城镇化率已达 65.5%^[9]。由于特殊的地理位置、地形地貌, 使得重庆盛夏极易出现高温伏旱, 整个城市的热环境状况更加严峻, 对热环境的治理则面临更大的挑战。2006 年夏季川渝地区出现了严重高温灾害, 造成重庆直接经济损失高达 91.18 亿元。

¹**作者简介:** 杨溟鋆(1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气边界层与大气环境以及城市气象. E-mail:mingjunyang_00@outlook.com; 王咏薇, E-mail:wyw@nuist.edu.cn

基金项目: 国家自然科学面上项目(41675016)

此次灾害持续时间之长、发生范围之广、强度之大、灾害损失之重都为历史罕见。因而重庆区域的气候变化及高温灾害研究受到空前重视^[10, 11, 12]。

对于重庆高温灾害的分析，许多学者做了不同方面的研究工作^[10, 11, 12, 13, 14, 15, 16]。相关研究表明，重庆市高温热浪经历了低—高相间的年代际变化过程，近年来的变化趋势逐步与全球变暖趋势步调相一致^[11, 12]。杨若霖^[14]和白莹莹等^[15]研究表明，城市进程破坏自然下垫面，对平均气温和最低气温有增温的影响。张天宇等^[16]研究重庆市高温热浪发展趋势结果表明，在二氧化碳低、中、高3种排放情形下高温热浪指数(HWLI)与暖夜指数(TN90)都呈现显著增加的趋势。然而大部分学者仅研究到2010年之前，在此之后，重庆城市发展速度更快，其高温特征的影响值得研究。

高温不仅可以发生在室外，也可以发生在室内。白天室内温度令人不适，相比于白天，夜间室外降温幅度小，那么室内外温度梯度减小，导致白天的热浪并没有缓解，反而夜间高温的延续将加重其的危害。引起研究学者的普遍关注^[16, 17]。重庆高温的暖夜特征同样值得我们关注。重庆位于长江上游，长江横贯境内，周围森林茂密，城市湿度较大。已有的研究表明，潮湿气候加剧了高温影响^[18]。在任何大气条件下，空气中的湿度直接或间接的都会对人体产生不同程度的影响^[19]。长时间在高温高湿环境中工作生活可能会导致一系列热疾病发生，严重影响人的身体健康和生命安全^[5]。但是重庆已有的高温研究中，考虑湿度因子的研究尚不多见。因此，有必要研究湿度因子对于重庆高温的影响。

基于以上研究背景，本文利用重庆市1959~2018年气象观测资料分析了夏季高温热浪的时间分布特征以及城市化进程对高温天气的影响，探讨暖夜日数的变化、湿度因子的影响。对预测未来气候趋势、确立切实可行的治理方法、弱化高温热浪具有重要的理论支撑。

1 方法与数据

1.1 研究区域与数据

重庆市位于我国西南地区、长江上游，介于我国第二、第三阶梯交界处，四川盆地向长江中下游平原的过渡地带，地貌环境复杂、地形起伏大，以低山丘陵地形为主^[20]。如图1，白色圈内为重庆市城市化发达区，本文主要研究区域，设有2个城区气象站点：沙坪坝站、重庆站。其中重庆站1986年撤销，1987年1月业务由沙坪坝站代替。白色圈外设有3个近郊站点：北碚站、渝北站、巴南站。其中巴南站2011年有迁站记录，渝北站海拔高度为464.7m。为排除迁站影响、海拔高度影响、真实客观的反映城市化进程的影响，选择沙坪坝站(位于重庆市主城区西部，周围建筑物密集高耸)作为城市区域代表站，北碚站(处于城市边缘，周围建筑稀疏)作为近郊区域代表站。两站的海拔高度分别为259.1、240.8m，两站均无迁站记录，数据质量好，缺测少^[12, 15]。研究区域及气象观测站点如图1所示。



图 1 研究区域以及气象观测站分布

注：绿色点表示沙坪坝站，黄色点表示北碚站，白色圈内代表主要研究范围。

本文采用 1959~2018 年夏季(6~8 月)沙坪坝、北碚气象观测站的观测资料，每日 02、08、14、20 时(北京时间)的气温和相对湿度观测数据。在本文计算中，取一天中温度最高的 14h 的气温数据作为日最高气温(T_{max})，并使用对应的相对湿度数据；取 02 时的气温数据作为日最低气温(T_{min})。为保证所使用数据的可靠性，将去除所有观测数据中的缺测值。若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。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是站点的总观测天数的百分比^[17]。取 1959~2018 年 6~8 月共 60 个夏季的温度、相对湿度观测数据。基于物理极值方法以及连续性方法进行数据的质量控制，全部数据容量为 44160 个，缺测率为 0.018%。

1.2 研究方法

1.2.1 高温热浪表征指标

本研究选取 HWN(Heat wave number), HWF(Heat wave days), HWD(Heat wave duration) 和 HWL(Heat wave longest duration)^[21,22], E_r 炎热指数和 Hi 热浪指数^[23]为指标，分别从热浪的频次、天数、持续时间、强度等不同方面描述高温热浪，分析重庆市城区高温热浪的时间分布特征。

(1) HWN 为年度热浪事件发生次数。

HWF 为年度所有热浪事件所涉及的总天数。HWD 为年度所有热浪事件的平均长度。HWL 为年度最长热浪事件的长度。

本文计算过程中，假如一年有 3 个热浪，分别持续 3、5、4d，那么该年 HWN 为 3 次，HWF 为 12d, HWD 为 4d, HWL 为 5d。

(2) 炎热指数。

E_r 作为评估体感舒适度受气象环境影响程度的综合气象指标。该指标主要考虑人体舒适状况受气温以及相对湿度的综合影响。计算公式如下：

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

$$E_r = 1.8T_a - 0.55(1.8T_a - 26) \times (1 - RH) + 32 \quad \text{当 } RH > 60\% \text{ 时} \quad (2)$$

式中： T_a 为环境温度(℃)，一般取当日极端最高温度，在本文中即为 T_{max} ； RH 为空气相对湿度(%)。

当日的炎热指数大于临界炎热指数时，即为炎热日。年日炎热指数大于阈值的日数即为炎热日数。年日最高温度大于或等于 35℃的日数即为高温日数。本文中应用于重庆市的炎热临界值及其不同相对湿度对应的温度参考黄卓等^[22]的研究，具体取值如表 1 所示。

表 1 重庆市炎热临界值及其不同相对湿度对应的温度

城市	炎热临界值(℃)	炎热临界值所对应的温度(℃)			
		RH≤60%	RH=70%	RH=80%	RH=90%
重庆	89.5	36.9	35.4	34.1	33.0

若使用不采纳相对湿度因子的 35℃的绝对阈值判别热浪，则无法考虑到气温相对低，但相对湿度异常高的闷热天气的严重性。因此，基于炎热指数，高温干热、高温闷热对人体健康的影响得以等效评估。

(3) 热浪指数。

作为一个综合指标，基于炎热指数考虑到热浪持续带来的累积效应，计算公式如下：

$$Hi = 1.2(E_r - E'_{r'}) + 0.35 \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{nd_i} \times (E_{ri} - E'_{ri}) + 0.15 \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{nd_i} + 1 \quad (3)$$

式中： E_r 为当日的炎热指数； $E'_{r'}$ 为炎热临界值，大于 $E'_{r'}$ 值则感觉炎热；其值如表 1； E_{ri} 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 为热浪事件的持续时间。本文应用的热浪分级标准参考黄卓等^[22]的研究，具体取值如表 2 所示。

表 2 热浪分级标准

等级	一般热浪	轻度热浪	中度热浪	重度热浪
热浪指数	$Hi < 2.8$	$2.8 \leq Hi < 6.5$	$6.5 \leq Hi < 10.5$	$Hi \geq 10.5$

1.2.2 城市化阶段划分

根据反映城市化进程速度的人口密度、地区生产总值、工业能源终端消费及耕地面积^[8]的变化来划分城市化进程的不同阶段。重庆地区的人口密度、地区生产总值以及能源消费总量的突变从 1997 年开始，1997 年重庆开始大规模的城市建设，取 1959~1997 年为城市化缓慢发展阶段，1997~2018 年为城市化快速发展阶段^[15]。

1.2.3 暖夜及暖夜日数

采用百分位阈值法定义夏季暖夜事件，将某站 1959~2018 年中每年夏季逐日最低气温资料按升序排列，是否发生暖夜事件以序列第 90 个百分位上的阈值作为判断。年日最低气温大于阈值的日数则为暖夜日数^[17]。得出 1959~2018 年夏季在沙坪坝气象站发生暖夜事件的阈值为 29.6℃。

1.2.4 温度-湿度指数 (THI)

$$THI = 0.8t + \frac{RH \times t}{500} \quad (4)$$

式中: t 是空气温度($^{\circ}\text{C}$), 在本文中即为平均气温; RH 为空气相对湿度(%), 在本文中即为平均相对湿度。通过对人类受试者的 THI 值进行实证测试, 舒适度极限定义为:

当 $21 \leq THI \leq 24$ 时, 100%的受试者感到舒适, 当 $24 < THI \leq 26$ 时, 有 50%的受试者感到舒适, 当 $THI > 26$ 时, 有 100%的受试者感到不舒适^[24,25]。

2 结果分析

2.1 1959~2018 年夏季高温热浪特征及城郊差异

2.1.1 日间高温热浪的时间特征及城郊差异

对 1959~2018 年重庆市城区热浪指标和 GDP 增长历年变化进行统计(图 2)。图 2a 中 HWN、HWF、HWD、HWL 等指标总体呈先减后增趋势, 如拟合线所示。20 世纪 60 年代~80 年代, 热浪指标呈减小趋势。80 年代热浪最少, 即使有少量热浪发生均为一般热浪, 不足以造成高温灾害(图 2b), 气温偏低是热浪较少发生的主要原因(图 3)。周鑫^[26], 以及张晓惠^[27]关于气温年际-年代际变化的研究中, 也分析到了 70 年代至 80 年代末气温偏低的现象。90 年代热浪事件逐渐增多, 1997 年以后, 市区 HWN、HWF、HWD、HWL 均有显著的增加。HWN、HWF 的高值出现在 2006 年(5 次, 23d)、2013 年(5 次, 19d)、2017(3 次, 20d)年, HWD 的高值出现在 1997 年(9d)、2018 年(8d), HWL 的高值出现在 2011 年(11d)、2016 年(10d)。一般热浪与轻度热浪发生次数总体变化呈现与图 2a 相似的趋势, 1997 年以来显著增加, 随着 GDP 的飞速增长; 中度热浪与重度热浪在 1997 年前发生次数少甚至为零, 1997 年后有所增加(图 2b)。

2006 和 2013 年是显著的高温年, 前人相关研究很多, 主要原因与天气系统的异常有关^[10,28,29]。从图 2 中可以看到 2017 同样是高温年, 虽然 HWN 值小, 但其热浪总天数 HWF 长达 20d, 最长热浪持续时间 HWL 达 8d。图 3 中气温等要素表现也体现出 2017 年为高温年。注意到, GDP 快速增长阶段, 存在没有热浪事件发生的年份, 如 1998、2005 年等(图 2)。研究表明, 全球变暖和城市化均会加剧极端降水事件^[30,31]。而张晓惠^[27]关于降水年际变化的研究, 分析到重庆市城区 20 世纪 90 年代中期至 21 世纪初期夏季为多雨期, 降水最多年份 1998 年, 可达 915.9mm。降水量的增加减少了地面的感热, 从而导致近地面气温降低(图 3), 这可能是没有热浪发生的原因。

当前, 在全球变暖的气候背景下, 许多城市的气温出现高温天气增加的趋势^[1,2,3,30,31]。除了气候变暖的原因, 高温天气特征还受城市的局地化建设、下垫面变化的影响^[32]。本文选取处于同一气候背景下的沙坪坝站、北碚站作为城区站和近郊站的对比, 统计各气象要素在城郊两种下垫面不同阶段显示出的差异。

如图 3 所示, 日相对湿度、平均气温、日最高气温、日最低气温的变化特征与图 2 热浪事件变化特征相吻合。当处于城市缓慢发展阶段时, 城郊下垫面状况类似, 各气象要素之间的差异较小。相对湿度值差异最小, 差值绝对值的均值为 1.06%(图 3b), 郊区的相对湿度比城区略高一些; 平均气温和最高气温差异不大, 差值绝对值的均值分别为 1.16°C 、 1.78°C (图 3d, f), 城区平均气温、日最高气温略高于郊区; 日最低气温的差异相对较大, 差值绝对值的均值为 2.61°C (图 3h)。同样, 城市快速发展阶段, 城区下垫面变化剧烈, 各气象要素差异显著, 尤其 2000 年以后城区相对湿度远小于郊区, 差值绝对值的均值增大到 5.19%。城郊最高气温差距相对比较小。平均气温与日最低气温, 大部分时间段, 城区明显高于郊区, 差值绝对值的均值分别为 3.84°C 、 6.12°C 。2018 年城市建成区面积累计达到了 1635.02km^2 , 而城市建设初期 1997 年的建成区面积仅 283km^2 , 增长约 5 倍^[9,33]。城市

化推进带来的自然下垫面的改变、内部水循环的破坏是造成城郊气象要素差异、城市气温居高不下的可能原因^[14]。

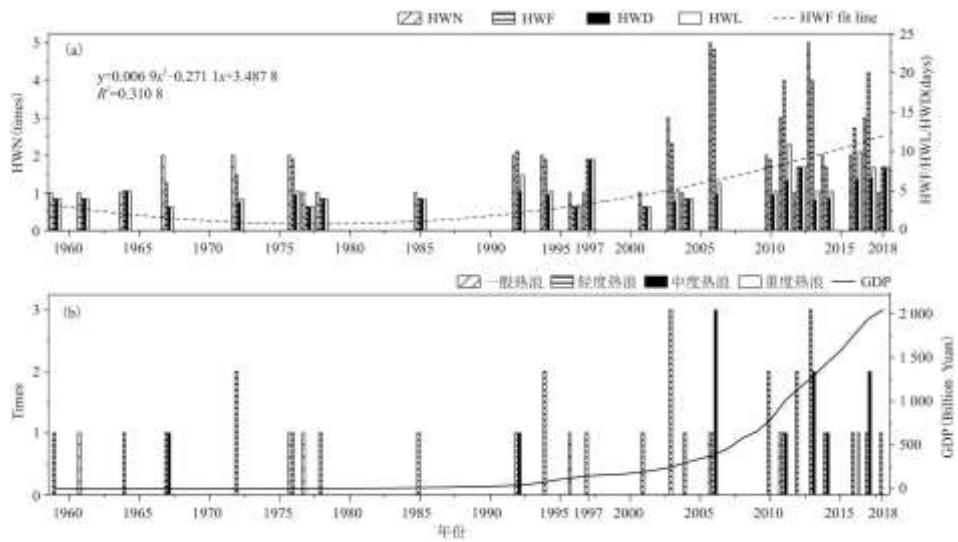


图 2 1959~2018 年重庆市城区热浪指标和 GDP 增长历年分布图

注: a、b 分别表示 HWN、HWF、HWD、HWL、HWF 的拟合曲线; 一般热浪、轻度热浪、中度热浪、重度热浪和 GDP.

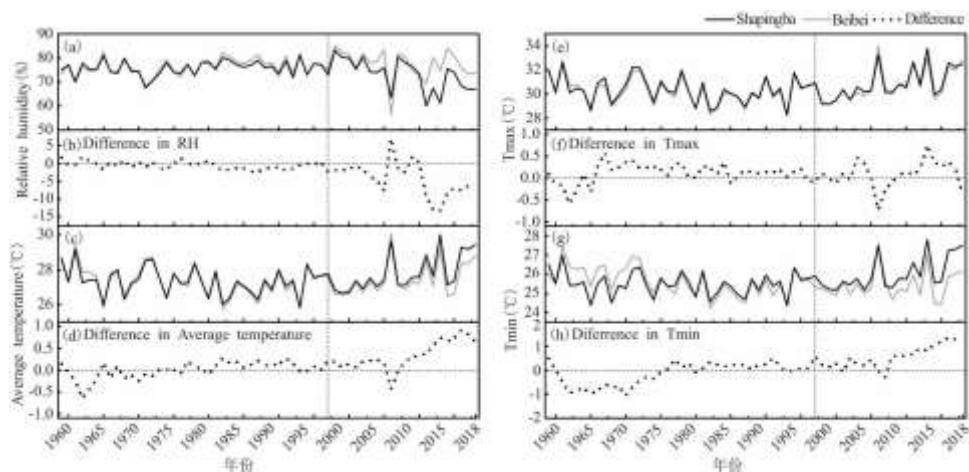


图 3 沙坪坝站和北碚站主要气象要素及其差值历年分布图

注: 黑色、灰色实线分别代表沙坪坝站、北碚站; a、b 为日相对湿度, c、d 为日平均气温, e、f 为日最高气温, g、h 为日最低气温; 黑色垂线处为 1997 年.

2. 1.2 暖夜日数的特征

上一小节中, HWN、HWF、HWD、HWL 等指标主要针对重庆日间高温的特征进行分析, 本小节选取暖夜日数指标进行分析, 主要解析夜间最低温度在不同日间背景下的特征。

从总体特征来看(图 4),暖夜的发生率明显大于白天的高温热浪,暖夜日数几乎在每一年稳定的存在(除 1982 年)。总暖夜日数在 20 世纪 80 年代最低,平均日数相比 70 年代减少 3d,但基本没有消失。表明在相同的温度变化背景下,重庆市城区的暖夜事件较白天的热浪事件发生更加稳定,即夜间高温更能稳定存在。暖夜日数的两个高值发生在 2006 年(32d)和 2013 年(33d)。2017 年和 2018 年是又一个次高峰,2017 年达到 28d,2018 年达到 31d。

当白天和夜间持续高温时,对人体健康的影响存在更大的危害。我们将暖夜分为两种,一种只有夜间存在高温,一种日间、夜间均存在高温。日间、夜间高温同时存在日数占比在年际之间存在着高低相间的变化。在 20 世纪 80 年代之前,有大约 32.26% 的时间同时存在日间、夜间高温。80 年代降低到了 19.5%。而后日间、夜间高温同时存在的天数所占比例明显增加,在 2000~2009 年增加到了 35.73%,甚至在 2010 年以后高达 55.89%。分析其原因,重庆城市的迅速扩张,改变了下垫面性质,不透水面积增大,总体热容变小,白天吸收很多的热量,增温迅速。到了夜间,城市高楼林立,阻止热量向外释放,使得夜间日最低气温升高,暖夜日数具有增大的趋势。说明城市化过程对重庆市城区的夜间高温产生一定程度的影响。

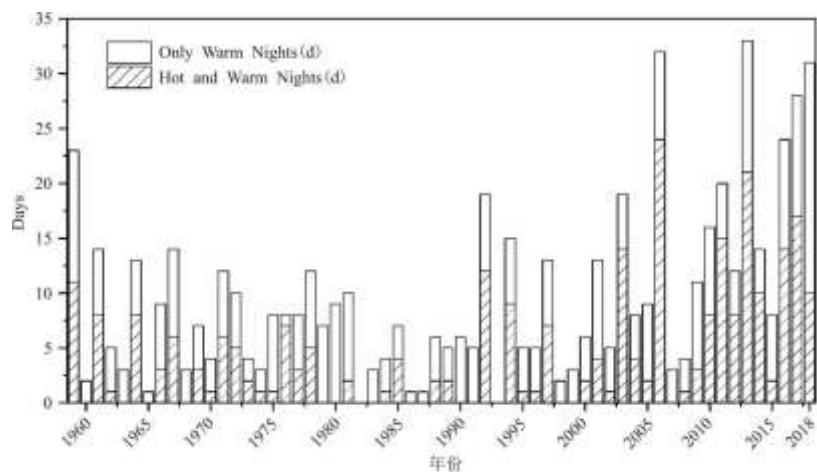


图 4 1959~2018 年夏季重庆市城区暖夜日数历年分布图

2.2 湿度因子对高温天气下人体舒适度的影响

与单纯的高温相比,高湿的天气同样对人体的健康、舒适度存在很大的影响^[5,8,19]。本小节分析了高温日数、炎热日数以及 THI 指标等,对包含湿度因子的温度-湿度指数所反映的人体舒适度进行分析。

高温日数和炎热日数的差异在于是否考虑了湿度的影响,其中高温日数,仅计算温度大于 35℃ 的天数,而判定炎热日的条件为,气温 $\geq 35.4^\circ\text{C}$,湿度需达到 70%,而当湿度 $\leq 60\%$,温度至少达到 36.7℃,即炎热日识别出高温高湿的日数。图 5 给出了这两个指标的时间变化分布特征。可以看出由于炎热日受高湿度的影响,其值小于高温日。但是总体看炎热日的分布,近年来逐渐增大,即高温高湿的日数逐渐增多。

与炎热日指标相比较,THI 指标能够更加全面的分析出当温度处于不同范围时,湿度特征对舒适度的影响。当相对湿度值越高,所有受试者感受到不适所需温度越低,图 6 给出的 1958~2018 年夏季每日 THI 值分布图中不难看出这一特征。处于气温舒适的天气状况下,气温低于 28℃,仍有近半数的人群感到不舒适的区间($24 < \text{THI} \leq 26$),此时主要是湿度因子的贡献(图 6b),相对湿度大于 60%、70% 所占的比例分别达到了 91.56%、71.61%。在所有人群感觉不舒适的区间($26 < \text{THI} \leq 29$),相对湿度大于 60%、70% 所占的比例分别为 67.30%、32.62%,此时温度值略有升高(31.5°C 以下),湿度对于舒适度仍然是具有较大的贡献(图 6c)。在所有人群极端不舒适的区间($\text{THI} > 29$),相对湿度大于 60%、70% 所占的比例分别为 15.97%、2.08%,此时极端不舒适度由高温导致(图

6d)。对1958~2018年夏季THI值进行了统计,可知THI>24的所有数据中,相对湿度大于70%的天数所占的比例达到22.51%。综上所述,导致重庆不舒适的天气中,高湿度为影响舒适度的不可忽视的因子。

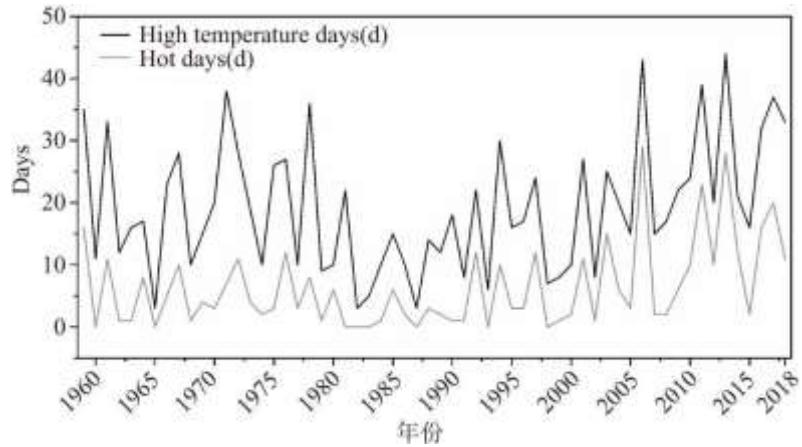


图5 1959~2018年夏季重庆市城区高温日数与炎热日数历年分布图

图7给出日间THI和夜间THI发生次数占比曲线。在THI≤24区间,夜间舒适日数占比略高于日间,相差2.17%。这是由于夜间气温较低日数多于日间,是合理的。在24<THI≤29区间,不论是50%受试者不适、还是100%受试者不适,夜间不舒适日数明显高于日间,分别相差5.20%、1.99%。在THI>24的区间,夜间相对湿度在70%以上的日数所占比例为64.12%,湿度对于夜间不舒适的贡献很大。在THI>29区间里,日间不舒适日数显著高于夜间,日间高温为主要原因。而夜间在湿度因子的作用下,加之日间高温影响着夜间高温,进而加剧夜间的不舒适度,延续了日间高温的危害^[15,34]。

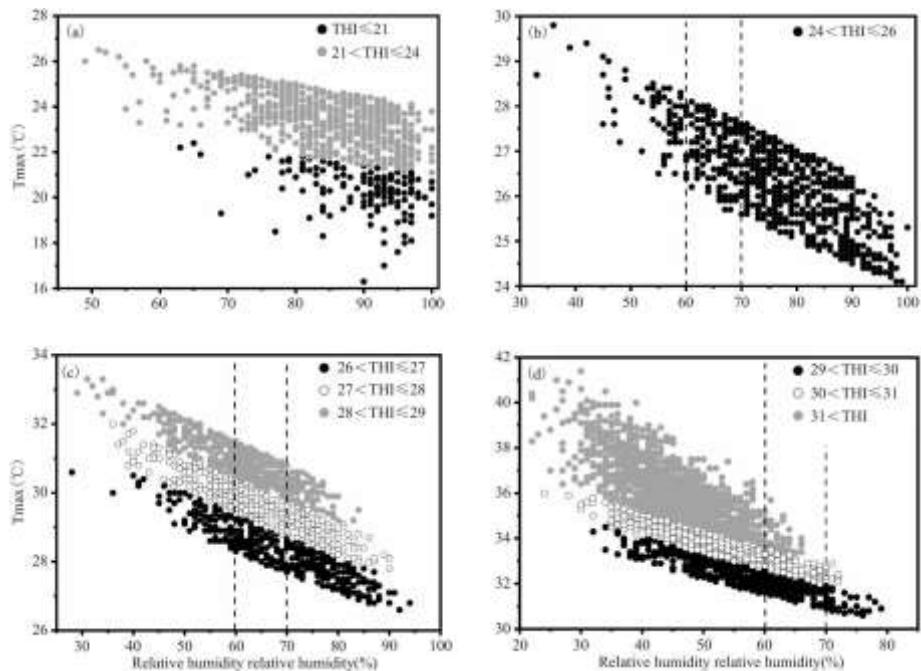


图6 1959~2018年夏季城区THI值分布

注: b中黑色垂线处分别为60%、70%相对湿度处, c、d同理。

3 结论及讨论

本文采用重庆市 1959~2018 年夏季(6~8 月)沙坪坝及北碚观测站资料研究分析夏季高温热浪的热浪数、热浪天数、热浪平均长度、热浪最长长度和热浪强度的时间分布特征, 探讨了暖夜日数的变化特征和湿度因子的影响。

1959~2018 夏季重庆市城区 HWN, HWF, HWD, HWL 的时间分布呈先减后增趋势。进入 1997 年, 城区 HWN, HWF, HWD, HWL 都有显著增加, 并在 2006 年达到峰值。高温热浪强度的变化趋势与上述变化相似。通过分析城郊各气象要素差异, 发现 1997 年以后, 城市化过程导致城郊日平均气温和日最低气温增大, 城市的增温效应明显, 相对湿度的差值增大, 城市区域湿度明显降低。

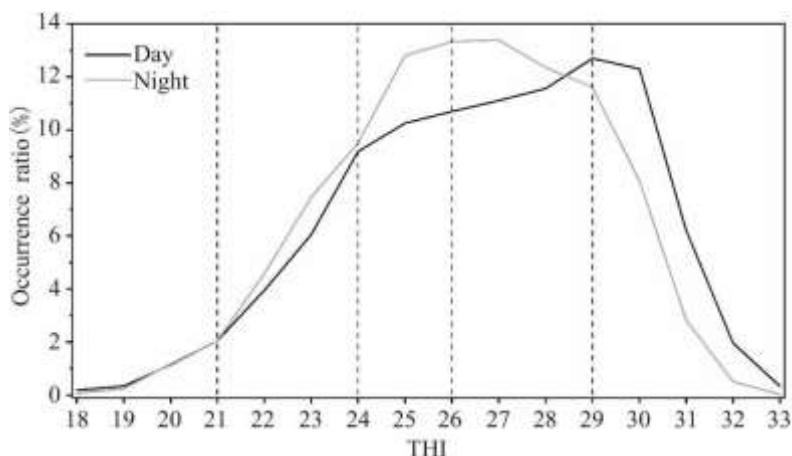


图 7 日间 THI(黑色实线)和夜间 THI(灰色实线)发生次数占比曲线

重庆市城区的暖夜日数出现频率大于日间高温, 体现出在相同的温度变化背景下, 即夜间高温更能稳定存在。日间、夜间高温同时存在的天数所占比例明显增加, 在 2000~2009 年增加到了 35.73%, 在 2010 以后达 55.89%。

炎热日数分布表明, 近年来重庆地区高温高湿的日数逐渐增多。而 THI 指标的分布可以看出导致重庆不舒适的天气中, 高湿度为影响舒适度的不可忽视的因子。THI>24 的所有数据中, 相对湿度大于 70% 的天数所占的比例达到 22.51%; 夜间的不舒适受湿度因子的影响很大, 相对湿度大于 70% 以上的日数占比为 64.12%, 延续了日间高温的危害。

本文的研究仍存在许多不足。首先, 研究分析高温热浪的时间分布特征的站点数据较少, 数据种类较少。由于数据限制, 本文无法度量城市化效应对高温强度的影响程度或者其在高温热浪中的贡献值, 下一步的研究工作中, 拟结合数值模拟机以及遥感等手段, 深入研究重庆高温的特征以及变化机理。

参考文献:

- [1] MORA, CAMILO, BÉNÉDICTE DOUSSET, IAIN R CALDWELL, et al. Global risk of deadly heat[J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7(7):501~506.
- [2] 祁新华, 程煜, 郑雪梅, 等. 国内高温热浪研究进展及其人文转向[J]. 亚热带资源与环境学报, 2017, 12(01):26~31.
- [3] YANG X, YUAN L, GUAN D B, et al. Assessment of the economic impacts of heat waves: A case study of Nanjing, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 171:811~819.

-
- [4] 张可慧, 李正涛, 刘剑锋, 等. 河北地区高温热浪时空特征及其对工业、交通的影响研究[J]. 地理与地理信息科学, 27(6):90-95.
- [5] 王敬美. 高温高湿环境中人的工作效率及劳动安全研究[D]. 天津: 天津大学, 2015:1-71.
- [6] FORZIERI G, BIANCHI A, SILVA FBE, et al. Escalating impacts of climate extremes on critical infrastructures in Europe[J]. Global Environmental Change, 2018, 48:97-107.
- [7] ANDERKO L, CHALUPKA S, DU M, et al. Climate changes reproductive and children's health:A review of risks, exposures, and impacts[J]. Pediatric Research, 2020, 87(2):414-419.
- [8] JIN L, ZHANG Y F, ZHANG Z J. Human responses to high humidity in elevated temperatures for people in hot-humid climates[J]. Building and Environment 2016 (114) :257-266.
- [9] 杨弘毅, 李涛明. 重庆统计年鉴 2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019:181.
- [10] 邹旭恺, 高辉. 2006 年夏季川渝高温干旱分析[J]. 气候变化研究, 2007 (3):149-153.
- [11] 张娟娟. 2006 年重庆市特大干旱及其对农业的影响研究[D]. 重庆: 西南大学, 2008:1-45.
- [12] 何泽能, 左雄, 白莹莹, 等. 重庆市城市高温变化特征分析及对策初探[J]. 高原气象, 2013, 32(6):1803-1811.
- [13] ZHANG W, ZHENG C G, CHEN F. Mapping heat-related health risks of elderly citizens in mountainous area:A case study of Chongqing, China[J]. Science of the Total Environment 2019, 663:852-866.
- [14] 杨若霖. 重庆市热环境机理研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013:1-69.
- [15] 白莹莹, 程炳岩, 王勇, 等. 城市化进程对重庆夏季高温炎热天气的影响[J]. 气象, 2015, 41 (3):319-327.
- [16] 张天宇, 程炳岩. 重庆高温热浪指数和暖夜指数变化及其情景预估[J]. 气象科技, 2010, 38(6):695-703.
- [17] 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.
- [18] ZHAO L, LEE X H, SMITH RB, et al. Strong contributions of local background climate to urban heat islands[J]. Nature, 2014, 511 (7508):216-219.
- [19] 姚鹏. 全球气候变暖背景下成都地区气候宜居程度变化特征研究[D]. 甘肃: 兰州大学, 2019:1-71.
- [20] 赵志军. 重庆市自然灾害综合区划研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017:1-102.
- [21] LUO M, LAU N C. Heat waves in Southern China:Synoptic behavior, long-term change and urbanization effects[J]. Journal of Climate, 2016, 30(2):703-720.

-
- [22] LI Y, DING Y H, LI W J. Observed trends in various aspects of compound heat waves across China from 1961 to 2015[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2017, 31(3):455–467.
- [23] 黄卓, 陈辉, 田华. 高温热浪指标研究[J]. *气象*, 2011, 37(3):345–351.
- [24] NIEUWOLT S. Tropical climatology: An introduction to the climates of the low latitudes[J]. *Geographical Review*, 1978, 68(2):240–241.
- [25] DOAN Q-V, KUSAKA H, HO Q-B. Impact of future urbanization on temperature and thermal comfort index in a developing tropical city: Ho Chi Minh City[J]. *Urban Climate* 2016, 17:20–31.
- [26] 周鑫. 中国气温的年际-年代际变化特征及其模拟检验研究[D]. 江苏: 南京信息工程大学, 2013:1–72.
- [27] 张晓惠. 1951–2014 年重庆市主城区气温和降水的变化特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016:1–70.
- [28] 胡豪然, 李跃清. 近 50 年来川渝地区夏季高温及严重干燥事件分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(7):832–838.
- [29] LI J, DING T, JIA X L, et al. Analysis on the extreme heat wave over China around Yangtze River Region in the summer of 2013 and its main contributing factors[J]. *Advances in Meteorology*, 2015, 2015:1–16.
- [30] SHI J, CUI L, WEN K, et al. Trends in the consecutive days of temperature and precipitation extremes in China during 1961–2015[J]. *Environmental Research*, 2018, 161:381–391.
- [31] YU R, ZHAI P, CHEN Y. Facing climate change-related extreme events in megacities of China in the context of 1.5°C global warming[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2018, 30:75–81.
- [32] LIN L, GAO T, LUO M, et al. Contribution of urbanization to the changes in extreme climate events in urban agglomerations across China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020:140264.
- [33] 陈治平. 重庆统计年鉴 1998[M]. 北京: 中国统计出版, 1998:1–402.
- [34] 杨红龙, 许吟隆, 陶生才. 高温热浪脆弱性与适应性研究进展[J]. *科技导报*, 2010, 28(19):98–102.