

文章编号: 2096-1618(2023)04-0472-06

成渝地区气候舒适度特征及未来变化研究

徐 诚¹, 淡 嘉¹, 刘绿柳², 陈 蕾¹, 郭 洁¹, 宋怡轩¹

(1. 四川省气象服务中心, 四川 成都 610072; 2. 国家气候中心, 北京 100081)

摘要:为科学论证成渝地区气候舒适度特征,利用1981–2010年地面观测日统计资料和CMIP6(第六次国际耦合模式比较计划)中北京气候中心模式(BCC-CSM2-MR)日订正数据,采用插值和线性趋势等方法分析成渝地区人体舒适度时空演变特征,并对其未来变化趋势进行预估。结果表明:(1)成渝地区常年舒适时长为7~9个月,年平均舒适日数最多,冷不舒适日数次之,热不舒适日数最少。(2)年平均人体舒适度指数及各季节舒适度指数均呈上升趋势。(3)四川盆地常年年平均冷不舒适日数、舒适日数和最舒适日数多于重庆,年平均热不舒适日数少于重庆。(4)成渝地区常年和预估2023–2100年人体舒适度均没有酷热等级出现。2023–2100年,舒适日数较常年相比有所增加,冷不舒适日数和热不舒适日数有所减少。

关键词:气候变化;成渝地区;人体舒适度;时空变化特征;变化预估

中图分类号:P463.3

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcu.2023.04.015

0 引言

成渝地区位于长江上游,地处四川盆地,东邻湘鄂、西通青藏、南连云贵、北接陕甘,是中国西部地区发展水平最高、发展潜力较大的城镇化区域,是实施长江经济带和一带一路战略的重要组成部分,区域核心城市有成都、重庆,中心城市有宜宾、达州、绵阳、德阳、乐山、泸州、南充。2021年10月,《成渝地区双城经济圈规划纲要》明确提出四大战略定位,其中之一就是要将成渝地区打造成为高品质生活宜居地,这是践行以人民为中心发展思想的应有之义,也是成渝地区在高质量发展中扎实推进共同富裕的重要路径。

高品质生活宜居地与气候舒适度密不可分,气候舒适度是指在气温、风速、湿度等气象因子综合影响下,人体冷热感觉的舒适程度。有关气候舒适度的研究至今已有近百年的历史^[1-2],国内外学者提出的关于舒适度模型有温湿指数、着衣指数、风效指数、人体舒适度数等,近年在中国得到广泛的应用。如高家骥等^[3]通过GIS技术对东北三省人居环境气候舒适度分异及影响因素进行了研究,于昕冉等^[4]研究了近60 a甘肃省旅游气候舒适度变化,曹永强等^[5-6]研究了辽宁省气候舒适度的区域特征变化且对未来趋势进行了预测,谭静等^[7]对湖北省生态旅游气候资源进行了分析及区划,金琪等^[8]计算武汉市城市圈人体舒适度指数,并进一步分析了人体舒适度的时空变化特征,姜继兰等^[9]对四川地区城市气候舒适度进行了评价,贾晓

红^[10]分析了呼和浩特市人体舒适度变化特征,这些研究^[11-15]多以各地人体舒适度的时空分布特征及其主要影响因子为主,鲜有文献研究成渝双城经济圈的人体舒适度的特征,其未来变化的预估更是空白。

本文利用人体舒适度指数对成渝地区常年(1981–2010年)气候舒适度进行客观评价,再利用气候模式资料对其未来变化进行预估。这一工作对成渝双城经济圈未来生态文明建设及经济社会高质量发展等方面有着重要的现实意义。

1 研究区域概况及资料说明

1.1 研究区域概况

本文研究区域为四川盆地及重庆地区,如图1所示。该区域西依青藏高原和横断山脉,北近秦巴山脉,东南部斜贯有巫山、大娄山等山脉,总体上西高东低,以山地丘陵为主,是西部陆海新通道的起点,具有连接西南西北,沟通东亚与东南亚、南亚的独特优势。

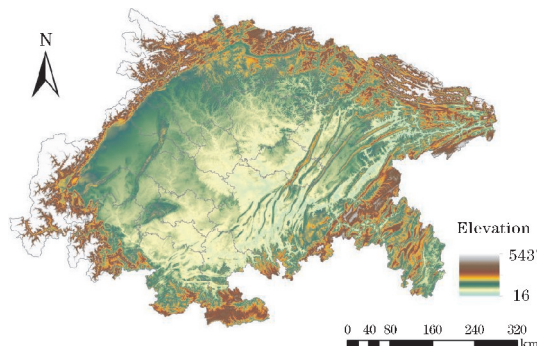


图1 成渝地区地形图

收稿日期:2022-12-02

基金项目:高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室科技发展基金资助项目(SCQXKJQN202220)

通信作者:郭洁. E-mail:guojie126@163.com

1.2 资料来源

实况气象资料来源于国家气象信心中心的站点日统计数据。为保证数据的指标完整性、空间代表性及时间连续性,剔除数据不完整的站点,选用 1981–2010 年四川盆地及重庆地区的国家气象观测站和区域自动站(共 115 个站)日平均相对湿度、日平均气温、日平均风速等观测资料,对于缺测日数据采用线性回归模型进行插补。

数字高程模型数据(DEM)来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/home>),空间分辨率为90 m。行政边界来源于全国地理信息资源目录服务系统。

预估数据来源于 CMIP6(第六次国际耦合模式比较计划)中的北京气候中心模式(BCC-CSM2-MR)日订正数据,空间范围为中国区域,水平分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$,时间步长为天。本文选取模式中日平均气温、日平均相对湿度和日平均风速 3 个气象要素并将其插值到成渝地区各个气象站点上。

1.3 研究方法

目前,国内外学者提出了许多气候舒适度评价模型,本文综合考虑影响气候舒适度的多种气象指标,选取应用比较广泛的 KSSD 经验模型^[16–21]对成渝双城气候舒适度进行分析。其计算公式如下:

$$I_{BC} = (t \times 1.8 + 32) - 0.55 \times (1 - H_R / 100) \times (t \times 1.8 - 26) - 3.2 \sqrt{V}$$

式中, I_{BC} 为人体舒适度指数(无量纲),四舍五入取整数; t 为日平均气温($^{\circ}\text{C}$), H_R 为日平均相对湿度($\%$); V 为日平均风速(m/s)。

根据国家气候中心规定的统一标准,将人体舒适度划分为 10 个等级(表 1),其中 1、2、3 等级统称为冷不舒适级别,4、5、6 等级统称为舒适级别,7、8、9、10 等级统称为热不舒适级别。

表 1 国家气候中心人体舒适度指数分级表

I_{BC}	等级	感觉程度	划分
≥ 90	10	酷热,很不舒适	热不舒适
86 ~ 89	9	暑热,不舒适	
80 ~ 85	8	炎热,大部分人不舒适	
76 ~ 79	7	闷热,少部分人不舒适	
71 ~ 75	6	偏热,大部分人舒适	舒适
59 ~ 70	5	最为舒适	
51 ~ 58	4	偏凉,大部分人舒适	
39 ~ 50	3	清凉,少部分人不舒适	
26 ~ 38	2	较冷,大部分人不舒适	冷不舒适
≤ 25	1	寒冷,不舒适	

2 成渝地区气候舒适度特征分析

2.1 成渝地区 1981–2010 年平均舒适时长空间分布

图 2 为 1981–2010 年成渝地区年平均舒适时长分布,可以看到成渝地区常年舒适时长在 7~9 个月。其中,四川盆地大部分地区年平均舒适时长达 8 个月以上,重庆东北部和西南部大部分地区年平均舒适时长为 8~8.5 个月,其余地方年平均舒适时长为 7.5~8 个月。四川盆地东北部局部地方及重庆中部局部地方年平均舒适时长仅为 7~7.5 个月。

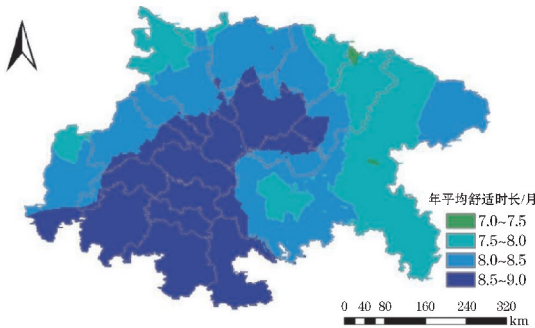


图 2 成渝地区 1981–2010 年平均舒适时长分布

2.2 成渝地区 1981–2010 年平均舒适日数空间分布

图 3 为成渝地区 1981–2100 年平均舒适日数分布图,可以看到成渝地区常年平均舒适日数均超过 200 d,空间分布大体上自西向东呈现先递减后递增趋势,出现这种分布特征可能与本文研究区域四周为丘陵或者山区、海拔较高、夏季气温比平原低以及人体舒适度指数受温度影响较大有关系。盆地西北部 and 西南部年平均舒适日数最多,达到 240 d 以上,其中绵阳西北部、雅安南部、乐山西南部部分地方年平均舒适日数超过 260 d,雅安南部局部地方达 280~290 d。

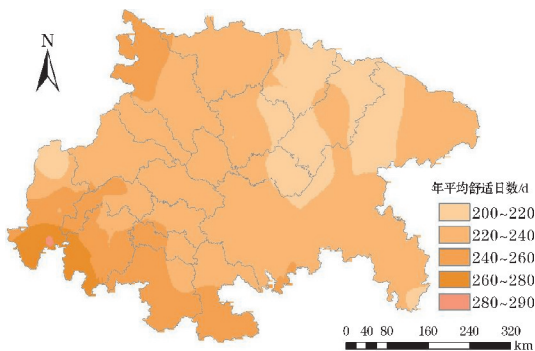


图 3 成渝地区 1981–2010 年平均舒适日数分布

图 4 为成渝地区 1981–2010 年平均最舒适日数分布图,可以看到成渝地区常年平均最舒适日数在 99~158 d。常年平均最舒适日数整体空间分布上从西北往东南,

从西南往东北方向呈现出递减趋势,出现这种分布特征可能与本文研究区域四周为丘陵或者山区,海拔较高,夏季气温比平原低以及人体舒适度指数受温度影响较大有关。其中,绵阳西北部和雅安南部部分地方年平均最舒适天数最多,超过140 d。

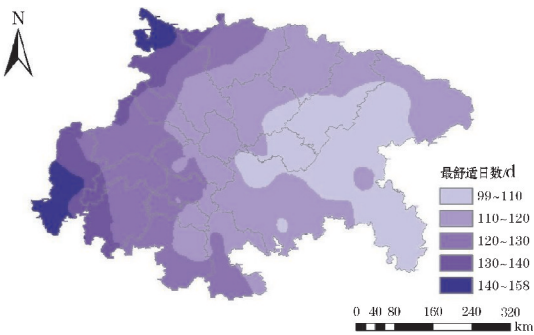


图4 成渝地区1981-2010年平均最舒适日数分布

2.3 成渝地区1981-2010年各等级舒适度月平均日数分布

将四川盆地和重庆地区115个站人体舒适度各等级日数分别求取算数平均值后得到成渝地区区域平均的人体舒适度各等级日数。

图5为成渝地区1981-2010年区域平均舒适度等级各月平均值分布图,可以看到成渝地区1981-2010年人体舒适度总共有9个等级,没有酷热等级出现,寒冷天气出现在1月和12月,月平均天数小于0.004 d;暑热天气出现在7-9月,月平均天数小于0.003 d。除1月外,其余月份均有最舒适日数,较多的是4-6月和9-10月,每个月均超过15 d,最多的是5月和9月,每个月均超过20 d。较冷日数出现在1-3月和10-12月,其中1-2月和12月超过2 d,其余月份均小于1 d。清凉日数在1-5月和10-12月均有出现;偏凉日数除7月没有出现外,其余各月均有出现;偏热天气3-10月均有出现,主要出现在6-8月,平均日数超过12 d;闷热天气出现在4-10月,主要出现在7-8月;炎热天气在5-9月均有出现,但日数很少,平均日数在2 d以下。

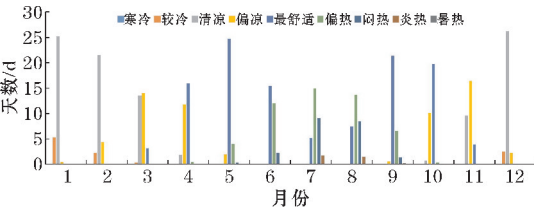


图5 成渝地区1981-2010年区域平均舒适度等级各月平均值分布

从表2中可以看到成渝地区冷不舒适日数常年平均值为109 d,占全年的30%;舒适日数常年平均值为231 d,占全年的63%,最舒适日数为117 d,占舒适日数的51%;热不舒适日数常年平均值为25 d,占全年的7%。

表2 1981-2010年成渝地区各舒适等级日数月平均分布表

单位:d				
月份	冷不舒适	舒适	热不舒适	最舒适
1	31	0	0	0
2	24	4	0	0
3	14	17	0	3
4	2	28	0	16
5	0	31	0	25
6	0	28	2	15
7	0	20	11	5
8	0	21	10	7
9	0	28	2	21
10	1	30	0	20
11	10	20	0	4
12	29	2	0	0

2.4 成渝地区1981-2010年舒适度年际变化

2.4.1 总体变化特征

图6为成渝地区1981-2010年人体舒适度指数逐年变化图,可以看到1981-2010年期间成渝地区的人体舒适度指数变化明显,存在显著上升趋势,气候变化率为0.56/10 a,通过99%的显著性检验。人体舒适度平均值分别为59,属于最为舒适级别。其中,1984年和1989年为两个低值点,1998年达到最高。成渝地区体舒适度指数在1987年以前人均在平均值以下,1987-1996年,平均值上下波动,1996年以后均在平均值以上。

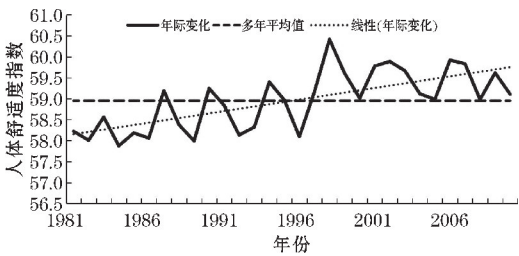


图6 成渝地区1981-2010年人体舒适度指数逐年变化

2.4.2 季节变化特征

本文根据气候统计法将3-5月划分为春季,6-8月划分为夏季,9-11月划分为秋季,12-2月划分为冬季。从图7可以看到,1981-2010年,成渝地区人体舒适度指数各季节有明显差异。夏季人体舒适度指数最高,在71~75,属于“偏热”级别;春季和秋季次之,在56~63,属于“偏凉”和“最为舒适”级别;冬季最低,在40~47,属于“清凉”级别。4个季节人体舒适度指数均呈现出上升趋势,其中春季上升趋势最明显,气候倾向率为0.709 d/10 a;冬季次之,为0.614 d/10 a;秋季和夏季气候倾向率分别为0.598 d/10 a和0.292 d/10 a,春季和秋季通过99%的显著性检验,夏季和冬季通过95%的显著性检验。

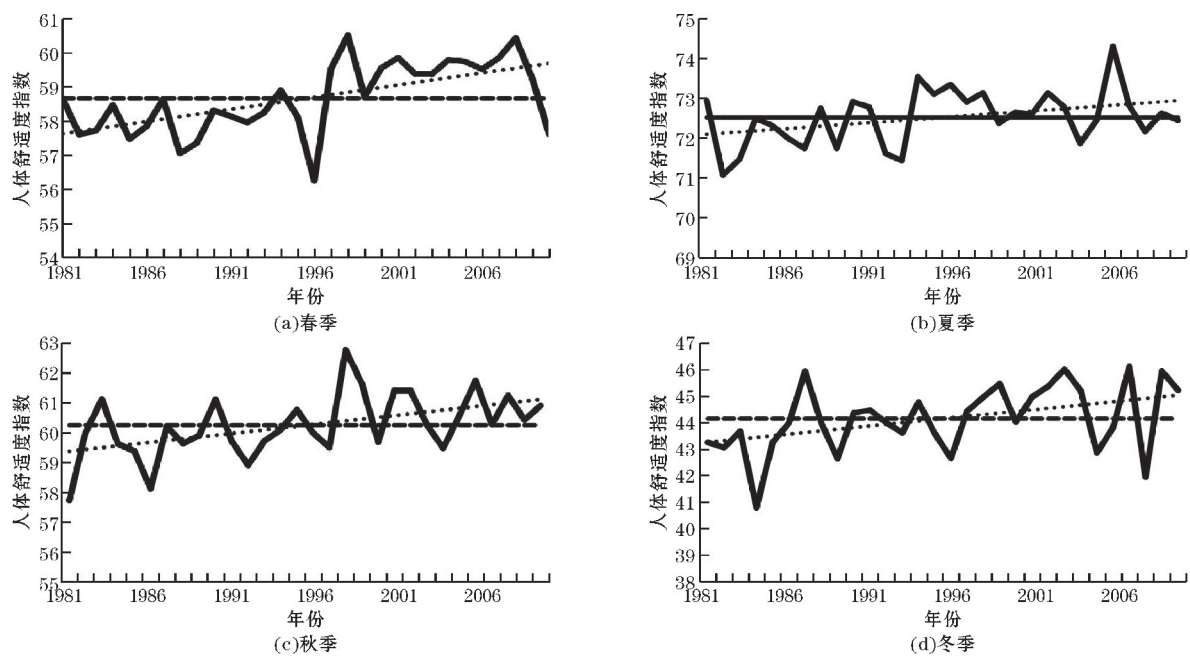


图7 成渝地区 1981–2010 年人体舒适度指数季节变化黑色折线代表年际变化,长虚线代表多年平均值,短须线代表线性趋势)

2.5 成渝地区 1981–2010 年各等级舒适度年代际变化

将 1981–2010 年划分为 3 个年代:20 世纪 80 年代、20 世纪 90 年代、21 世纪 00 年代。从表 3 中可以

看到,成渝地区 20 世纪 80 年代至 21 世纪 00 年代热不舒适日数呈逐渐减少趋势;舒适日数先减少后增多;冷不舒适日数逐渐增多。

表 3 成渝地区热不舒适、舒适、冷不舒适日数及距平百分率

时间	热不舒适日数/d	距平百分比/%	舒适日数/d	距平百分比/%	冷不舒适日数/d	距平百分比/%
20 世纪 80 年代	114.69	0.05	230.20	−0.01	21.61	−0.14
20 世纪 90 年代	110.86	0.01	228.56	−0.02	26.04	0.04
21 世纪 00 年代	103.60	−0.06	240.26	0.03	27.80	0.11

2.6 四川盆地和重庆 1981–2010 年舒适度变化对比

经统计可以得知,1980–2010 年四川盆地和重庆舒适度等级均有 9 个等级,没有酷热等级,寒冷天气和暑热天气很少,年平均天数均在 1 d 以下。年平均舒适度指数分别为 59 和 60,均属于最为舒适级别。从表 4 中可以看到,四川盆地年平均冷不舒适日数、舒适日数和最舒适日数均多于重庆,年平均热不舒适日数重庆多余四川盆地,这与重庆夏季高温天气多于四川盆地相吻合。四川盆地和重庆舒均为适日数占全年比例最多,超过 61%;其次是冷不舒适日数,占全年的 30% 左右;热不舒适日数最少,四川盆地占全年的 5.7%,重庆占全年的 9.3%。

表 4 四川盆地和重庆各舒适度级别年平均日数 单位:d

地区	冷不舒适	舒适	最舒适	热不舒适
四川盆地	111.0	232.8	119.6	20.9
重庆	102.2	224.0	109.3	34.0

3 RCP4.5 排放情景下成渝地区气候舒适度预估

3.1 模式模拟性能检验

本文选取具有代表性的中低等排放情景 RCP4.5 (即到 2100 年,温室气体浓度对应的辐射强迫为 4.5 Wm^{-2}),此情景遵循用最低代价达到辐射强迫目标原则,是与全球经济框架相适应的温室气体排放情景。为检验模式对成渝地区预估数据的模拟能力,本文计算了成渝地区 115 个气象站点 1981–2010 年观测和模拟的平均气温、相对湿度、风速的相关系数,分别为 0.93,0.42 和 0.68,均通过 95% 的信度检验。由于温度对人体舒适度指数的影响最大,因此该套模式预估数据对成渝地区人体舒适度的主要影响因素有较好的模拟能力,可以用其对成渝地区未来人体舒适度进行预估。

3.2 成渝地区气候舒适度预估

3.2.1 成渝地区 2023–2100 年平均舒适时长空间分布

图 8 为 2023–2100 年成渝地区年平均舒适时长分布图,可以看到,2023–2100 年,成渝地区的舒适时长在 4~9 个月,空间上舒适时长呈现自西南向东北先递增后递减趋势,与常年变化趋势一致。其中,四川盆地西北部部分地方、西南部大部、东北部局部地方和重庆北部局部地方年平均舒适时长仅为 4~7 个月。四川盆地中部、南部、重庆南部及重庆东南部部分地方年平均舒适时长最长,为 8~9 个月,成渝地区其余地方年平均舒适时长在 7~8 个月。

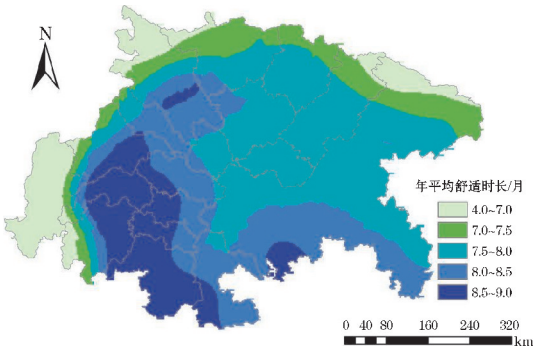


图 8 成渝地区 2023–2100 年平均舒适时长

3.2.2 成渝地区 2023–2100 年各等级舒适度月平均日数分布

图 9 为成渝地区 2023–2100 年区域平均舒适度等级各月平均值分布图,可以看到,成渝地区 2023–2100 年人体舒适度总共有 7 个等级,没有酷热、暑热和寒冷等级出现,成渝地区在全球增暖的大背景下,舒适度呈现转好趋势。除 1、2 月外,其余月份均有最舒适日数,较多的是 4–6 月和 9–10 月,每个月达到 15 d 及以上,最多的是 5 月、9 月和 10 月,均超过 24 d。较冷日数出现在 1–3 月和 11–12 月,月平均日数小于 2 d;清凉日数在 1–5 月和 9–12 月均有出现,主要出现在 1–2 月和 12 月,月平均日数超过 22 d;偏凉日数全年均有出现外,其中 3 月和 10 月超过 20 d;偏热天气 5–9 月均有出现,其中 6–8 月平均日数超过 14 d;闷热天气仅在 8–9 月出现,月平均日数在 10 天左右;炎热天气仅在 8–9 月出现,日数很少,月平均日数在 2 d 以下。

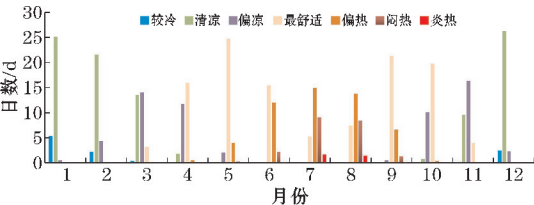


图 9 成渝地区 2023–2100 年区域平均舒适度等级各月平均值分布

从表 5 中可以看到,成渝地区 2023–2100 年冷不舒适日数多年平均值为 100 d,占全年的 28%,较常年相比有所减小,这与全球变暖结论相吻合;舒适日数多年平均值为 245 d,占全年的 67%,较常年相比有所增加;热不舒适日数多年平均值为 20 d,占全年的 5%,较常年相比降低了 2%,可能与研究区域四周海拔较高,人口密度较少,升温较慢有关。

表 5 2023–2100 年成渝地区各舒适等级日数月平均分布表
单位:d

月份	冷不舒适	舒适	热不舒适	最舒适
1	31	0	0	0
2	23	5	0	0
3	8	23	0	1
4	1	29	0	19
5	0	31	0	29
6	0	30	0	15
7	0	20	11	4
8	0	22	9	5
9	0	30	0	24
10	1	30	0	25
11	5	25	0	1
12	30	1	0	0

4 结论

- (1)成渝地区常年舒适时长在 7~9 个月,大部地方年平均舒适时长大于 7.5 个月,空间分布上呈现出自西南向东北递减特征。
- (2)成渝地区常年年平均舒适日数均超过 200 天,空间分布上自西向东先递减后递增。最舒适日数平均在 99~158 d,空间分布上自西北往东南,自西南往东北方向递减。
- (3)成渝地区人体舒适度总共有 9 个等级,没有酷热等级出现,常年冷不舒适日数占全年的 30%,舒适日数占全年的 63%,热不舒适日占全年的 7%。
- (4)成渝地区 1981–2010 年人体舒适度指数存在着显著的上升趋势,常年平均舒适度指数为 59,属于最为舒适级别。20 世纪 80 年代到 21 世纪 00 年代热不舒适日数呈现出逐渐减少的趋势;舒适日数先减少后增多;冷不舒适日数逐渐增多。
- (5)四川盆地年平均冷不舒适日数、舒适日数和最舒适日数均多于重庆,年平均热不舒适日数重庆多于四川盆地。
- (6)2023–2100 年成渝地区年平均舒适时长大部地方大于 7.5 个月,人体舒适度总共有 7 个等级,没有酷热、暑热和寒冷等级出现。冷不舒适日数占全年的 28%;舒适日数占全年的 67%;热不舒适日占全年的 5%。

参考文献:

- [1] Hilll, Griffith O W, Flack M. The measurement of the rate of heat loss at body temperature by convection, radiation and evaporation [J]. Philosophical transaction of royal society, 1961, 207: 183-220.
- [2] Brunt D. Climate and human comfort [J]. Nature, 1945, 155 (3941): 559-564.
- [3] 高家骥, 李鸿奎, 白芝珍, 等. GIS 支持下的东北三省人居环境气候舒适度分异及影响因素分析 [J]. 测绘通报, 2022, 543 (6): 148-153.
- [4] 于昕冉, 王乃昂. 近 60 a 甘肃省旅游气候舒适度变化分析 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 2021, 254 (2): 143-150.
- [5] 曹永强, 路洁. 辽宁省气候舒适度变化及未来趋势预测 [J]. 水利水电技术 (中英文), 2021, 569 (3): 32-42.
- [6] 曹永强, 高璐, 王学风. 近 30 年辽宁省夏季人体舒适度区域特征分析 [J]. 地理科学, 2016, 36 (8): 1205-1211.
- [7] 谭静, 陈正洪, 陈英英, 等. 湖北省生态旅游气候资源分析及区划 [J]. 湖北农业科学, 2022, 708 (15): 67-74.
- [8] 金琪, 孟英杰. 1960-2016 年武汉城市圈人体舒适度变化特征 [J]. 气象与环境学报, 2017, 33 (6): 82-88.
- [9] 姜继兰, 韩琳. 基于 ArcGIS 的四川地区城市气候舒适度评价 [J]. 成都信息工程大学学报, 2018, 152 (3): 318-325.
- [10] 贾晓红. 1991-2019 年呼和浩特市人体舒适度变化特征分析 [J]. 内蒙古气象, 2021, 252 (1): 29-32.
- [11] 龙敏, 张小容, 唐勇, 等. 中国死海旅游区气候舒适度与门票收入季节相关性研究 [J]. 成都信息工程大学学报, 2016, 143 (6): 651-655.
- [12] 林颖仪, 王式功, 马盼, 等. 基于气候季节划分的海南岛气候康养特征探析 [J]. 成都信息工程大学学报, 2021, 173 (6): 705-710.
- [13] 刘艳华, 阙粼婧, 白钰. 黑龙江省夏季避暑旅游气候适宜度的区域分布 [J]. 东北林业大学学报, 2020, 48 (8): 72-77.
- [14] 刘艳霞, 冯莉, 田慧慧, 等. 中国气候舒适度时空分布特征分析 [J]. 地球信息科学学报, 2020, 160 (12): 2338-2347.
- [15] 张可心. 1981-2018 年庆阳市气候舒适度特征分析及评价 [J]. 干旱区地理, 2020, 193 (5): 1270-1277.
- [16] 孙美淑, 李山. 气候舒适度评价的经验模型: 回顾与展望 [J]. 旅游学刊, 2015, 232 (12): 19-34.
- [17] 朱卫浩, 张书余, 罗斌. 近 30a 全国人体舒适度指数变化特征 [J]. 干旱气象, 2012, 30 (2): 220-226.
- [18] 曹伟宏, 何元庆, 李宗省, 等. 云南丽江旅游气候舒适度分析 [J]. 冰川冻土, 2012, 34 (1): 201-206.
- [19] 于庚康, 徐敏, 于堃, 等. 近 30 年江苏人体舒适度指数变化特征分析 [J]. 气象, 2011, 441 (9): 1145-1150.
- [20] 贾海源, 陆登荣. 甘肃省人体舒适度地域分布特征研究 [J]. 干旱气象, 2010, 28 (4): 449-454.
- [21] 杨成芳, 薛德强, 李长军. 山东省人体舒适度区域特征研究 [J]. 气象, 2004 (10): 7-11.

Study on the Characteristics and Future Changes of Climate Comfort in Chengdu-Chongqing Region

XU Cheng¹, DAN Jia¹, LIU Lvliu², CHEN Lei¹, GUO Jie, SONG Yixuan¹

(1. SiChuan Meteorological Service Center, Chengdu 610072, China; 2. National Climate Center, Beijing, 100081)

Abstract: In order to scientifically analyze the characteristics of climate comfort in Chengdu-Chongqing area, the meteorological observation data from 1981 to 2010 and China climate model results (BCC-CSM2-MR) from 2023 to 2100 of Chengdu-Chongqing area are used to calculate the human comfort index, then spatial and temporal evolution was investigated by interpolation and linear trend method, finally the projection for future trends was made. The results show: (1) The comfortable duration in Chengdu-Chongqing area is 7-9 months, the annual average number of comfortable days is the largest, and following is the number of cold uncomfortable days, and the number of hot uncomfortable days is the least. (2) The annual average human comfort index and the seasonal comfort index shows an increasing trend. (3) The annual average number of cold uncomfortable days, comfortable days and most comfortable days in Sichuan Basin is higher than that in Chongqing, while the annual average number of hot uncomfortable days is lower than that in Chongqing. (4) In Chengdu-Chongqing area, There is no extreme heat level in human comfort during the whole year and 2023-2100. From 2023 to 2100, the number of comfortable days will increase, while the number of cold uncomfortable days and hot uncomfortable days will decrease.

Keywords: climate change; Chengdu-Chongqing area; human comfort; spatial and temporal change; forecast of future changes