

谭凯炎, 闵庆文, 王培娟, 2022. 一种基于中国气候特征和人体舒适感受的气候舒适指数模型[J]. 气象, 48(7): 913-924. Tan K Y, Min Q W, Wang P J, 2022. A human climate comfort index model based on the climatic characteristics and human thermal sensations in China[J]. Meteor Mon, 48(7): 913-924 (in Chinese).

一种基于中国气候特征和人体舒适感受的气候舒适指数模型^{*}

谭凯炎¹ 闵庆文² 王培娟¹

¹ 中国气象科学研究院, 北京 100081

² 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

提 要: 气候舒适指数是开展天气舒适度预报和旅游与康养气候适宜性评价的基础。为了发展适于我国应用的天气舒适度预报和旅游气候适宜性评价模型, 基于前人关于气象要素与人体热舒适性关系研究成果, 结合对我国天气气候特征和问卷调查数据研究, 提出了一种新的人体气候舒适度评价模型——室外天气舒适指数(OWCI), 其由白天平均气温、最高气温、湿度、风速及日照共 5 个气象要素对人体舒适性影响评价子项组合而成, 并在湿度、风速和日照子项中体现了温度对各要素作用的影响, 因此 OWCI 可以更好地刻画各种天气条件下白天人体舒适度。根据问卷调查数据验证和实例对比表明, OWCI 模型较客观、准确地反映了各种天气气候条件下人群对室外天气舒适度的主观评价, 比现有常用经验指数更广泛地适用于我国不同气候区和季节。模型可应用于具有基本气象要素观测或预测值的任何地点, 其指数值可进行时空统计与比较, 方便用于气候舒适性时空评价和气候变化影响评估。OWCI 模型为开展全国性天气舒适度预报和旅游与康养气候适宜性评价提供了一种先进实用的算法工具。

关键词: 室外天气舒适指数(OWCI), 气候舒适指数, 人体舒适度, 旅游气候, 人居环境

中图分类号: P49

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.032202

A Human Climate Comfort Index Model Based on the Climatic Characteristics and Human Thermal Sensations in China

TAN Kaiyan¹ MIN Qingwen² WANG Peijuan¹

¹ Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

² Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

Abstract: The climate comfort index is the basis of the forecast of weather comfort degree and climate suitability assessment for tourism. Various bioclimatic indices have been developed with their own purposes. However, they could not be able to accurately describe human comfort perception to different weather conditions in various climate zones in China. To fill this gap, a new universal and semi-empirical climate comfort indicator (outdoor weather comfort index, OWCI) is proposed based on the previous results on the relationships between meteorological elements and human thermal comfort and the analysis of meteorological element characteristics in different regions of China and questionnaires. The OWCI model consists of five components that describe the impacts of daily average and maximum temperatures, humidity, wind speed and radiation on human comfort perception, respectively. The impact of the temperature on the effects of

^{*} 国家自然科学基金项目(31971774)、农业农村部国际合作司项目(125A0607)共同资助

2021 年 3 月 8 日收稿; 2022 年 5 月 16 日收修定稿

第一作者: 谭凯炎, 主要从事生态与农业气象研究. E-mail: tanky@cma.gov.cn

humidity, wind and sunshine is taken into account. The OWCI allows for more weather elements and interactions between them than the empirical models in use so far, so it could depict its capability of capturing human comfort perception in the daytime. Verification questionnaires and case studies in different climatic regions in China show that the OWCI could reflect the subjective comfort perception of respondents much more accurately under various weather conditions. Therefore, it could be more widely applied in different seasons and climate zones across China wherever the basic meteorological data are available. Furthermore, the data of OWCI are suitable for statistical analysis, which is conducive to spatiotemporal evaluation and assessment of climate change impacts on comfort perception.

Key words: outdoor weather comfort index (OWCI), climate comfort index, human comfort degree, tourism climate, human settlement

引 言

天气气候条件是人居环境的重要组成部分,它与生活质量、工作效率乃至健康密切相关(Shindell et al, 2012),也是影响一个地方旅游和康养产业发展的重要因素。气象要素通过多种机制作用于人与环境的热交换,从而影响人体舒适感受。自 20 世纪初国外就开始了人体热舒适性研究,迄今提出了一百多种经验或机理气候舒适指数模型。目前应用广泛的有温湿指数(THI)、风效指数(WEI)、有效温度(ET)、旅游气候指数(TCI)、生理等效温度(PET)和通用热气候指数(UTCI)等模型(Potchter et al, 2018)。现有经验指数模型考虑的影响要素较少,对要素作用的处理往往仅适应于特定环境,导致其应用具有气候或季节的局限性(Potchter et al, 2018; Blazejczyk et al, 2012)。如 THI 适用于炎热季节, WEI 适用于寒冷季节。Mieczkowski(1985)提出的 TCI,虽然该指数考虑的气象要素比较全面,但其对各要素影响的区间赋值与分等级方法主观性很强,它对日照作用的处理更适合于热爱日光浴的西方人群。机理模型基于人体与环境热交换原理,综合考虑了环境与人体自身各种因素的影响(闫业超等, 2013),其中 UTCI 被认为是普适性最好的指数(Potchter et al, 2018; Blazejczyk et al, 2012; Jendritzky et al, 2012)。UTCI 耦合了模拟人体热生理反应的多点调节模型和衣服热阻模型,较好地反映了各个生物气象要素对热舒适性的影响(McGregor, 2012; Bröde et al, 2012)。实际应用中 UTCI 模型被简化成气温、水汽压、风速和平均辐射温度的多元回归模型。由于平均辐射温度需由黑球温度或辐射观测数据计算得到,而一般气象站缺少这些观测

数据,因此 UTCI 指数应用范围非常有限。

我国自 20 世纪 80 年代以来在人体气候热舒适性方面开展了大量工作,主要集中于对国外指数模型进行适应性分析与修订(郑有飞等, 2010; Lai et al, 2014; 黄静, 2001; 徐大海和朱蓉, 2000)、气象要素与热舒适性关系研究(郑有飞等, 2007; Li et al, 2018; Xu et al, 2018; Xie et al, 2019)和舒适指数在人居环境舒适性和旅游气候资源评价中的应用(马丽君等, 2009; 吴佳等, 2017; 于庚康等, 2011; 孔钦钦等, 2015; 张莹等, 2013; 高超等, 2019)等。在发展原创舒适指数模型方面,冯定原和邱新法(1990)、刘梅等(2001)分别提出了由温度、水汽压、风速及净辐射 4 个要素模拟体感温度的多元回归模型,陆鼎煌等(1984)、钱妙芬和叶梅(1966)、吕伟林(1997)和 Feng et al(2004)构建了多个舒适度指数经验模型。此外,围绕建筑设计和暖通制冷需求,相关学者开展了室内外热舒适理论研究(Huang et al, 2017; Liu et al, 2017; Xie et al, 2018)。我国一些地方气象部门曾采用人体舒适度、体感温度、综合舒适度等多种指数模型开展日常天气舒适性预报(唐进时, 2015),近几年来中国气象服务协会将 THI 和 WEI 及其复合指数用于天然氧吧评价。

当前,我国对人居环境气候舒适性和旅游康养气候资源评价的需求越来越多,但作为人体气候舒适性评价工具,现有应用的气候舒适指数仍然存在一些明显的不足或不便之处,源自国外的指数及其指标也不尽符合我国人群对天气舒适性感受的规律及长期气候适应下形成的习惯。因此,建立一个基于我国天气气候特征及人体热舒适感受且应用方便的气候舒适指数模型,对于促进开展天气气候舒适性业务预报和评价服务,提高气候舒适性评价科学水平具有非常重要的现实意义。

本研究旨在基于总结借鉴前人相关研究成果,依据我国天气气候特点及其对人群舒适感影响规律,提出一个更适合在我国应用且方便实用的描述人群室外活动气候舒适性程度的室外天气舒适指数(outdoor weather comfort index,OWCI)模型,为开展室外天气舒适度预报、旅游气候适宜性评价、气候变化对人居气候环境影响评估与预测提供统一通用的计算方法和指标。

1 资料来源和处理

1.1 气象资料

本研究所用气象资料包括三类:(1)分析气候要素时空特征及其相互关系利用了7个代表气象站1987—2016年逐日平均气温、最高气温、空气湿度、风速和日照时数,分析气象要素白天平均值与日平均值关系利用了7个代表气象站2007—2016年每日4次测值和2011年自动气象站逐小时观测数据;(2)问卷调查验证利用了现场问卷调查点所在地气象站(2019年4月至2020年4月)逐日气象数据;(3)指数对比利用了10个站点2015—2016年日气象数据。7个代表气象站为长春、北京、郑州、南京、长沙、广州、吐鲁番,指数对比站点除上述代表气象站外(不含郑州)还包括兰州、成都、贵阳和普洱(思茅)。上述资料均来自于中国气象数据共享网。分析辐射与日照时数关系利用了中国气象科学研究院固城试验基地2006—2008年自动站数据。

1.2 现场问卷调查数据

2019年4月至2020年4月,在北京、定兴和饶阳、天津、武汉、无锡、长沙和湘潭、杭州和丽水、成都、西安、漳州、广州、三亚、昆明和红河、哈密等地通过现场问卷调查收集了1276份调查表,其中,北京、湖南、福建调查时间跨度一年,所有问卷调查均在白天时段进行。问卷登记了被调查者性别、年龄段、居住地、衣着、活动状态等基本信息,记录了被调查者对气温、湿度、风、日照以及总体气象条件感受的主观评价。人对气温的感觉分为寒冷、冷、凉、中性、暖、热和酷热7个等级,湿度感觉分为干燥、湿润(舒适)、潮湿和无感四种,人对风的感受分为冷风、舒适风、热风和无感四种,光照感觉分为温暖、灼热、灼热难耐和无感四种。去掉问卷中部分记录不全和有明

显疑问的问卷,共得到1205份有效问卷。

1.3 资料分析

统计问卷调查日照感受时,选取所有天气现象记录为晴天或多云的样本,灼热和灼热难耐归为一档,按最高气温分区间统计各档日照感受样本数量及其百分率。在计算低温侧各温度区间舒适等级投票百分率时,因为完全符合参考条件(湿度为40%,风速为 $0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,日照时数为0h)的样本较少,所以将条件稍加放宽到湿度为30%~50%、风速 $<0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、日照时数 $<3\text{ h}$ 的样本,统计4个舒适度等级的投票百分率。

2 室外天气舒适指数

2.1 OWCI的定义

人体气候舒适度是指在气象因子综合影响下,人体感觉的热舒适程度(ANSI/ASHRAE, 2010)。OWCI依据人对环境热舒适性感受,不分冷热,反映主观感受的舒适性程度,它表示在适时调节衣着前提下,一个低强度活动(或步行速度在 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以内)的健康成年人感受的室外气温、湿度、风速和日照综合影响下的总体舒适程度。鉴于人类室外活动(如旅游、作业)主要在白天进行,因此,OWCI表示白天时段天气舒适程度的平均状况。

2.2 OWCI模型

在不考虑衣着、生理和心理因素前提下,人体在室外感受的天气舒适程度主要受气象条件(温度、湿度、风速、辐射、气压、降水)影响,人在室外的舒适感由各气象要素影响叠加形成。气温是决定舒适感的主要因素,湿度、风和辐射在一定程度上显著影响或改变着人对气温的冷热感受。由于平均气温不足以反映夏季白天的炎热程度,OWCI中考虑了最高气温的作用。此外,人们对气压日常波动敏感度较低,对降水的感受迥异,因此OWCI中不考虑气压和降水的影响。这样,OWCI由平均气温、最高气温、相对湿度、风速和辐射项构成。指数模型用式(1)表示:

$$OWCI = C - (C_{ta} + C_{tm} + C_h + C_v + C_r) \quad (1)$$

式中: C 为常数, C_{ta} 为平均气温项, C_{tm} 为最高气温项, C_h 为湿度项, C_v 为风速项, C_r 为辐射项。常数

C 为参考湿度、风速和日照条件下由极不舒适阈值温度计算的平均气温项与最高气温项之和,采用常数项减去各分项之和旨在达到 OWCI 值越大表示天气舒适程度越高,同时极不舒适等级指数阈值为 0 的目的。

2.2.1 平均气温项

鉴于 OWCI 旨在描述白天天气舒适程度,采用白天平均气温可以更准确地反映白天的平均温度状况。由代表气象站历史资料统计得出,日平均气温(T_a)与日最高气温(T_{\max})的平均值非常接近 08—20 时(北京时,下同)平均气温(图 1)。因此采用日平均气温与最高气温的均值表示白天平均温度状况。

人体在中性温度范围感觉最舒适,随着环境温度升高或降低,舒适感下降并随后转变为不舒适。人体中性温度随气候区和季节而变化。Potchter et al(2018)总结各种气候下的热舒适研究结果表明,在参考条件下具有共性的无热胁迫温度区间为 18~23℃,中值为 20.5℃。张志薇(2014)采用人体最佳舒适温度计算方法计算了我国 31 个省会城市的最佳舒适温度,分布区间为 20.0~22.7℃,均值为 21.4℃。Liu et al(2016)通过大量现场问卷调查得出华中城市长沙全年平均中性温度为 20.3℃。综合考虑前人研究结果,取 21℃ 为我国平均最舒适温度,也就是当白天平均气温为 21℃ 时,人在室外感觉最舒适,对应的最舒适日平均温度约为 18℃。借鉴陆鼎煌等(1984)提出的综合舒适度平均气温项的计算方法及其系数取值,用式(2)表示 OWCI 平均气温项:

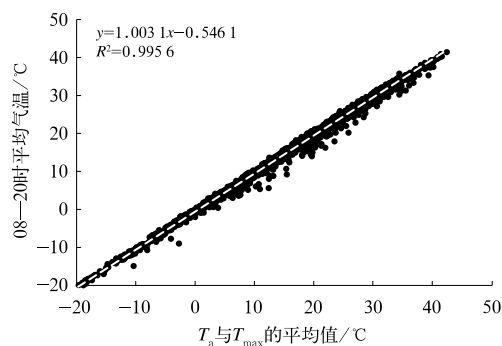


图 1 用日平均气温和最高气温模拟白天平均气温

Fig. 1 Simulating average daily daytime temperature by use of daily mean and maximum temperatures

$$C_{td} = A \left| \frac{T_a + T_{\max}}{2} - 21 \right| \quad (2)$$

式中: T_a 为日平均气温(单位:℃); T_{\max} 为日最高气温(单位:℃); A 为平均气温项系数,取值 0.6。平均气温项取值随气温分布是以白天平均气温 21℃ 为顶点的 V 字形(图略)。

2.2.2 最高气温项

统计结果表明,在我国不同气候和天气条件下,日最高气温约平均高于日平均气温 5℃(图略),其差值随天气不同变化很大(图 2)。在舒适温度和低温环境下人对最高气温感受不明显,但在高温季节,同一平均气温下,最高气温不同对人体热舒适性影响差异显著,最高气温越高,人的热感不舒适性急剧增加。虽然平均气温项已包含部分最高气温信息,但仍不足以反映最高气温对热舒适性的影响,为此 OWCI 设置最高气温项,以表示高温季节日最高气温对热舒适的特别影响。同时它可以起到体现调节衣着对舒适感影响的作用,一定温度范围内随着气温下降人们可以通过增加衣着保持体感舒适。

OWCI 最高气温项的表达如式(3):

$$C_{tm} = \frac{Me^{m1+m2 \times T_{\max}}}{1 + e^{m1+m2 \times T_{\max}}} \quad (3)$$

式中: $M, m1, m2$ 为最高气温项系数,由问卷调查数据调试确定,下同。 T_{\max} 取值分布如图 3 所示。

2.2.3 湿度项

高湿在高温区间主要是抑制体表汗液蒸发使人感觉闷热潮湿,而在低温时则通过影响衣服和空气热传输阻力使人感觉更冷(郑有飞等,2007;于波等,2002;Stathopoulos et al, 2004),在 21℃ 气温条件下,体感温度随水汽压增加变化极小(于波等,2002),中性温度时湿度的变化对人体热舒适性影响

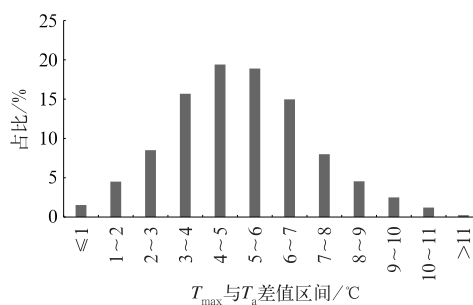


图 2 日最高气温与日平均气温差值的概率分布

Fig. 2 Probability distribution of the differences between daily maximum and mean temperatures

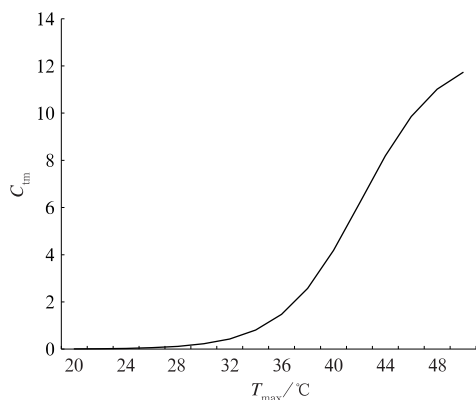


图3 OWCI最高气温项取值分布

Fig. 3 The value distribution of maximum temperature effect on OWCI

很小(胡敏等,2007),问卷调查表明相对湿度40%对人体而言是中性的(Stathopoulos et al, 2004)。无论高温或低温条件下,湿度过低均引起皮肤和鼻粘膜干燥不适,舒适感下降。根据 UTCI 对舒适温度以上湿度热效应模拟结果(Bröde et al,2012),湿度增温效应与温度和湿度的关系如图4,可见湿度热效应与气温和湿度自身均存在某种幂函数关系。同时根据 Mieczkowski(1985)研究,在舒适温度以下,高湿使人感觉更冷的效应主要在0~8℃时显现,当气温低于0℃后,湿度的效应逐渐消失。这也是显而易见的,因为当气温远低于0℃后,空气中的水汽压趋向于0(Bröde et al,2012)。

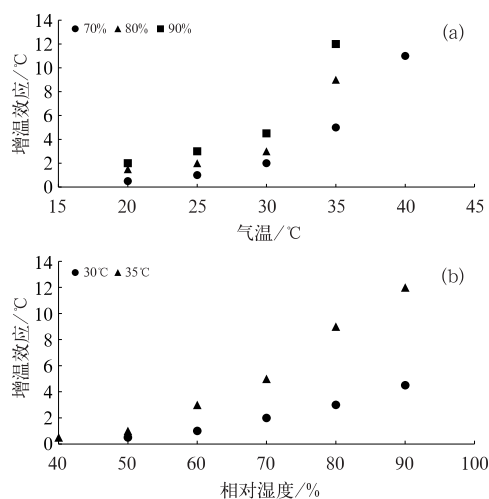


图4 湿度的增温效应随(a)气温和(b)相对湿度的变化

Fig. 4 Humidity effect changes with (a) air temperature and (b) relative humidity

综合上述分析,将40%作为中性湿度,以我国平均最佳人体舒适温度(白天平均气温为21℃,对应日平均气温为18℃)作为湿度效应的过渡点温度,构建OWCI湿度项如式(4):

$$C_h = H(T_a - 18)^2 \times e^{1-h(T_a-35)^2} \times |R - 0.4|^{\frac{3}{2}} \quad (4)$$

式中: H, h 为湿度项系数, R 为相对湿度的日平均值(0~1)。

OWCI湿度项取值随气温和空气湿度的变化见图5。

2.2.4 风速项

风主要通过促进人与空气热对流传导而影响人对环境的冷热感受。根据 Takahashi(1961)推导的人与空气传热交换关系式可以得出,风对体感温度的影响与体表空气温差及风速的关系可用式(5)近似模拟:

$$T_v = K(T - T_s)V^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中: T_v 为风对体感温度的修订, T 为气温(单位:℃), T_s 为裸露皮肤温度(单位:℃), V 为风速(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), K 为系数。

依据国内外试验结果,人体平均体表温度为33~35℃(彭见曙等,1994)。根据统计结果,日最高气温比白天平均气温高2~3℃,日平均风速与白天平均风速相近(图略)。当白天平均气温等于体表温度(取平均值34℃)时,这时日最高气温接近36℃,因此,白天风对体感温度的平均影响可改写成式(6):

$$T_v = K(T_{\max} - 36)V^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

风对舒适感的影响比对体感温度影响更复杂,风在不同温度区间对人体舒适性影响是不同的

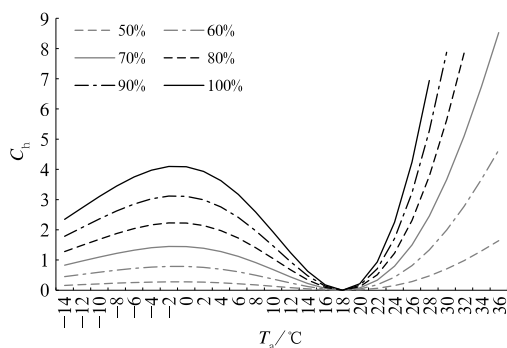


图5 不同日平均气温的OWCI湿度项取值分布

Fig. 5 The value distribution of humidity effect on OWCI under different daily mean temperatures

(Nikolopoulou and Lykoudis, 2006)。众所周知,在舒适温度以下,风带给人寒冷感觉,使舒适度降低;而当气温高于舒适温度但低于皮肤温度时,风给人凉爽感觉,使舒适度升高;当气温高于皮肤温度后,风便成为热浪,加剧舒适度下降。因此,风对舒适度的影响应分为 3 个温度区间。最高气温 36℃ 是其转折点之一,另一转折点应位于人群平均中性温度(白天平均气温 21℃)附近,对应于日最高气温 24℃ 附近,考虑到此时风具有降温效果,转折点应高于 24℃,参考现场问卷调查数据,设定最高气温 26℃ 为从冷风到舒适风的转折点温度。采用式(7)模拟 OWCI 风速项,风速项分布见图 6。

$$C_v = W \frac{(T_{\max} - 26)(T_{\max} - 36)}{|T_{\max} - 31| + 6.0} \sqrt{V} \quad (7)$$

式中: W 为风速项系数。

2.2.5 日照项

辐射对人体感温度影响可以用环境平均辐射温度(T_r)与气温之差来准确评估(Bröde et al., 2012),或用净辐射来估算(冯定原和邱新法, 1990; 于波等, 2002)。但 T_r 需由黑球温度或辐射等参数推算,常规气象观测中不包含黑球温度,我国大部分气象站

也不进行辐射观测。OWCI 采用日照时数来估算日照对人体舒适感的影响。分析辐射观测站日照时数与总辐射关系发现,按月份统计日照时数与总辐射具有很好的线性相关关系(图 7),但相同日照时数在 7 月对应的辐射值比 1 月大幅增加,说明还必须考虑辐射强度随季节的变化,而辐射强度随季节变化与气温随季节变化是平行的。根据刘梅等(2001)提出的体感温度辐射增温计算方法,利用固城站辐射观测资料估算每日辐射增温值,发现在相同日照时数下,太阳辐射引起的体感温度增加值随日最高气温上升呈线性升高特征(图略)。因此可以用气温和日照时数两个因子的合成来反映辐射对舒适性的影响。

虽然日照总是引起体感温度升高,但在冬季和夏季日照对人体舒适感的影响却绝然相反,冬季阳光令人温暖舒适,夏季太阳灼热难受。显然,日照对室外人体舒适性的影响随温度变化存在一个转折点,这个转折点应位于中性温度附近。

分析现场调查问卷数据得出,在最高气温为 25~27℃ 的区间,人们认为日照感觉为温暖和灼热的比例最接近,低于 25℃ 时,认为日照温暖的比例明显高于感觉灼热的比例,当高于 27℃ 时,认为日照感觉灼热的比例高于感觉温暖的比例(表 1)。这表

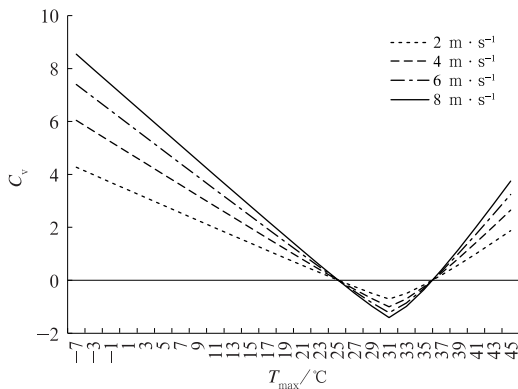


图 6 不同日最高气温的 OWCI 风速项取值分布

Fig. 6 The value distribution of wind speed effect on OWCI under different daily maximum temperatures

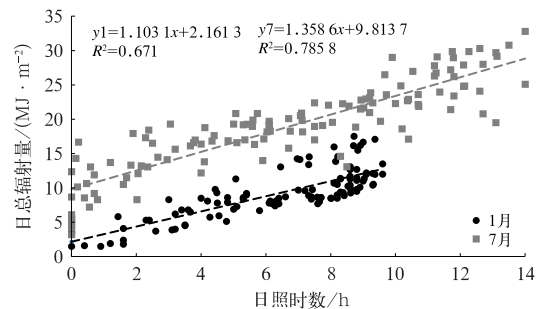


图 7 日照时数与日总辐射量关系

(y1: 1 月日总辐射量, y7: 7 月日总辐射量)

Fig. 7 Relations between sunshine hours and total radiation in January (y1) and July (y7)

表 1 问卷调查统计的不同气温区间三类日照感受占比(单位: %)

Table 1 Thermal sensation votes on three categories of sunshine effect under different temperature intervals based on questionnaires (unit: %)

最高气温 区间/℃	≤17	(17,19]	(19,21]	(21,23]	(23,25]	(25,27]	(27,29]	(29,31]	(31,33]	>33
舒适-温暖	88.2	89.5	81	77.8	56.8	41.7	39.6	38.7	9.4	3.5
不舒适-灼热	0	0	0	0	21.6	39.6	45.8	53.3	85.4	95.1
无感	11.8	10.5	19	22.2	21.6	18.8	14.6	8	5.2	1.5

明日照对舒适感影响转折点位于 25~27℃ 的最高气温区间。

综合上述分析,采用式(8)描述 OWCI 日照项,考虑到日照的升温作用,取 25~27℃ 的下限即最高气温 25℃ 作为转折点温度:

$$C_r = F(T_{\max} - 25) \times e^{1-f(T_{\max}-40)^2} S \quad (8)$$

式中: F, f 为辐射项系数, S 为日照时数(单位:h)。

OWCI 日照项取值随气温和日照时数的分布如图 8。

2.3 舒适指数分级及指标

根据简明实用原则,将室外天气舒适性分为4个等级,分别为极舒适、舒适、不舒适和极不舒适。极舒适表示气象条件总体让人感觉非常舒爽;舒适表示气象条件总体令人或暴露体表感觉不到明显热或冷胁迫,适宜于从事室外活动;不舒适表示气象条件总体令人或暴露体表明显感受到热或冷胁迫,不适宜长时间室外活动;极不舒适表示室外气象条件总体令人难以长时间忍受,长时间处于室外可能受到伤害(中暑、冻伤),需要做必要的防护。

舒适等级划分指标采用参考风速($0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、

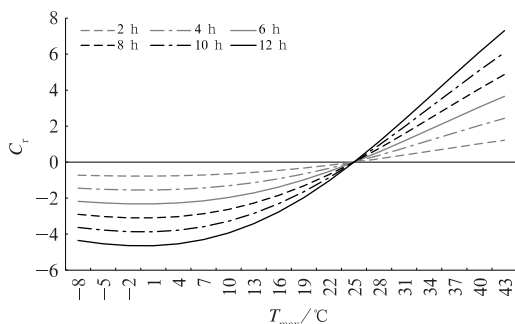


图 8 不同日最高气温的 OWCI 日照项取值分布

Fig. 8 The value distribution of sunshine effect on OWCI under different daily maximum temperatures

湿度(40%)和日照时数(0h)下的温度阈值,由日平均气温与对应的最高气温(根据中国多地气候统计,日最高气温平均比日平均气温约高5℃)阈值组成。以大多数人感觉热中性的温度区间作为极舒适等级,对应于 $15^{\circ}\text{C} \leq T_a < 22^{\circ}\text{C}$, $20^{\circ}\text{C} \leq T_{\max} < 27^{\circ}\text{C}$;高温侧舒适等级温度区间为白天气温均在平均裸露皮肤温度(34°C) (彭见曙等,1994)以内,即 $22^{\circ}\text{C} \leq T_a < 29^{\circ}\text{C}$, $27^{\circ}\text{C} \leq T_{\max} < 34^{\circ}\text{C}$;不舒适等级区间为最高气温开始高于平均裸露皮肤温度至白天平均气温开始高于裸露皮肤温度,即 $29^{\circ}\text{C} \leq T_a < 35^{\circ}\text{C}$, $34^{\circ}\text{C} \leq T_{\max} < 40^{\circ}\text{C}$;极不舒适等级区间为白天气温均高于平均裸露皮肤温度,即 $T_a \geq 35^{\circ}\text{C}$, $T_{\max} \geq 40^{\circ}\text{C}$ 。低温侧等级指标参考了问卷调查统计结果,选择问卷中湿度、风速和日照基本符合参考条件的96个样本,统计得到低温侧主观感觉投票的分布(表2),可看出日平均气温 7°C 左右是舒适与不舒适等级的分界, -5°C 是极不舒适与不舒适等级分界。因此将 $7^{\circ}\text{C} \leq T_a < 15^{\circ}\text{C}$, $12^{\circ}\text{C} \leq T_{\max} < 20^{\circ}\text{C}$ 作为低温侧的舒适等级温度区间, $-5^{\circ}\text{C} \leq T_a < 7^{\circ}\text{C}$, $0 \leq T_{\max} < 12^{\circ}\text{C}$ 作为不舒适等级温度区间,极不舒适等级温度区间为 $T_a < -5^{\circ}\text{C}$, $T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$ 。各等级温度指标及指数值规定见表3。

3 问卷调查验证及与现有指数的比较

3.1 问卷调查数据验证与对比

为了验证 OWCI 模拟人体舒适感的准确性,计算了每个现场问卷调查日的 OWCI 值及其分级,对指数值分级和主观评价分级进行统计分析得到结果如下:1205 次问卷中 780 次指数值分级与主观评价分级一致,吻合率为 65%,相差 1 个级别的占 35%,

表 2 参考条件 ($30\% < R < 50\%$, $V < 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $S < 3 \text{ h}$)

下各舒适等级投票百分率随气温的分布(单位:%)

Table 2 Percentage of surveyed comfort sensation vote on different temperature intervals under the conditions of relative humidity between 30% and 50%, wind speed $< 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ and sunshine hour $< 3 \text{ h}$ (unit: %)

[illegible]

表 3 OWCI 分级温度指标及其指数值
(参考条件: $V=0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $R=40\%$, $S=0\text{ h}$)

Table 3 Classification of OWCI and their corresponding temperature thresholds under the conditions of relative humidity=40%, wind speed=0 m · s⁻¹ and overcast

分级	代码	指数值	$T_a/^{\circ}\text{C}$	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$
极舒适	1	≥ 12.0	[15,22)	[20,27)
舒适	2	[7.0,12.0)	[22,29) [7,15)	[27,34) [12,20)
不舒适	3	[0.0,7.0)	[29,35) [-5,7)	[34,40) [0,12)
极不舒适	4	< 0.0	≥ 35 < -5	≥ 40 < 0

无相差 2 个等级的情况。如果仅分为舒适和不舒适两类,则计算结果与主观评价完全一致的比例为 88.3%。根据中国气象服务协会在中国天然氧吧评价中采用的将 THI 和 WEI 相结合的舒适度评价方法(日最高气温 $\geq 29^{\circ}\text{C}$ 采用 THI,其余情况采用 WEI),由问卷调查日气象数据计算的舒适度分级结果与主观评价分级完全吻合的比例为 49%,相差一个等级的占 48.4%,相差 2 个等级的为 2.6%,如果仅分为舒适和不舒适两类,则计算结果与主观评价完全一致的比例为 71.4%。

3.2 不同区域站点实例指数分级对比

为了鉴定新指数相对于现有常用指数的优势,计算了我国不同气候区 10 个站点 2015—2016 年各指数的日值,并按各自分级标准划分舒适等级。首先应指出的是,大部分情况下各指数的分级结果是一致的,在不一致的情形里,相差 1 个等级的占大多数,相差 2 个以上等级的情形较少。因篇幅所限,只选取了部分不一致的案例进行对比,结果列于表 4。根据表 4 中各地案例的气象条件,可以看出 OWCI 的评价分级总体上更加合理,在大部分案例中,新指数的评价分级或者与其他指数分级相同,或者介于其他指数两种不同评价等级之间。现有指数或多或少对一些天气条件表现出明显判别失误。比如 THI 在每个站点都有评价不太符合人们感受的情况,以南京为例,2015 年 8 月 6 日高温高湿加日晒,而 8 月 9 日虽然湿度较高,但无日照,气温较低,高湿的不舒适效应较小,同时该温度下风可起降温作用,因此两天的舒适感受应该绝然不同;2016 年 6 月 23 日成都,THI 判别为不舒适,其余指数均判别为舒适。WEI 在风速较小时其分级失真,像 2015 年 2 月 3 日长春、2015 年 2 月 20 日北京和 2015 年

2 月 1 日成都这些天气显然不应被划为舒适等级。CIHB 虽然在 THI 基础上增加了风速要素,但对高温时风效的评价不符合人们感受,例如 2016 年 6 月 11 日吐鲁番和 2015 年 8 月 7 日广州的情形。按照 ET 标准,2015 年 10 月 21 日长春、2015 年 2 月 16 日北京和 2015 年 2 月 22 日兰州均为寒冷等级,而这种天气春、秋季常见,因白天均有太阳,温度较高,风速不大,不潮湿,通常感觉是比较舒适的。此外,现有经验指数对于热天气(吐鲁番、2016 年 7 月 3 日兰州、2016 年 5 月 11 日普洱)舒适性的评价明显偏离人们的普遍感受。

3.3 各指数的优势与局限

现有经验指数模型都具有比较简洁的结构,输入要素易得,其应用已有较长历史且全球影响广泛,因其包含了主要的影响要素并反映了要素的主要影响特征,所以基本上能准确地评价大多数天气的舒适程度。同时,由于它们忽略了某些气象要素,当这些要素作用明显时便会导致其评价失真。THI 的构建是以静止饱和大气作为参照标准,选择了气温和湿度两个要素,对于湿热气候条件具有较好的适用性,当气温较低时,辐射增温与风的降温作用极其明显,因此,没有考虑风速和辐射对人体舒适感的影响导致 THI 不适用于寒冷环境的舒适度评价。WEI 正是针对寒冷环境由风寒指数(WCI)发展而来,采用了温度-风速-日照组合,它比较适用于相对干燥的北方冬季环境,由于没有考虑湿度的作用,所以不适用于湿热和湿冷天气。为了扬长避短,现在较多地采用 THI 和 WEI 的组合模型,这样兼顾了 4 个主要气象要素的影响,但加权组合方式没有完全体现出各要素的实际作用。CIHB 是由 THI 模型中增加风速项改进而来的,它弥补了 THI 缺乏风

速要素而不适用于寒冷季节的不足,但其风速项不受气温制约,导致其对高温有风环境的舒适性评价失准。ET 模型中包含了温、湿和风 3 个要素,其中也反映了风与湿度的相互作用,它是一个从温暖环境到寒冷环境比较普适的评价模型,未考虑辐射影响是其主要不足,分析发现 ET 更适合用于评价实时天气舒适性。与上述指数相比,OWCI 考虑了温、湿、风和日照 4 个要素的作用,并融合了气温对湿

度、风速和日照效应的影响,因此其适用的天气条件更加广泛。OWCI 模型的另一特点是加入了最高气温,用来针对性地评价白天的天气舒适性,而仅用日平均气温则不论对白天或夜晚都存在代表性不足的问题。此外 OWCI 模型也存在对某些天气条件舒适性评价偏离人群感受的问题,比如不能准确反映适宜温度环境下干燥和强烈日照引起的不适,这导致对高原地区部分天气条件舒适性评价出现偏差。

表 4 OWCI 与现有指数对不同区域站点实例的天气舒适度评价

Table 4 Cases comparison between OWCI and existing indices at various sites in China

站点	日期 (年/月/日)	气象条件					舒适等级				
		S	T	T _m	V	R	OWCI	THI	WEI	CIHB	ET
吐鲁番	2015/6/5	12.6	30.3	40.8	2.2	19	极不舒适	较舒适	较舒适	极舒适	温暖
	2016/6/11	14.2	37.5	44.5	5.1	14	极不舒适	不舒适	极不适	舒适	炎热
长春	2015/2/3	6.3	-8.5	-0.3	0.2	72	极不舒适	极不舒适	舒适	极不舒适	寒冷
	2015/10/21	8.9	4.3	12.1	1.5	50	舒适	不舒适	舒适	较不舒适	寒冷
北京	2015/2/16	9	3.8	13	2	50	舒适	不舒适	舒适	较不舒适	寒冷
	2015/2/20	0	0.4	1.1	0.6	99	极不舒适	极不舒适	舒适	不舒适	寒冷
兰州	2015/2/22	8.1	4.7	13.4	1.6	30	舒适	较不舒适	舒适	较不舒适	寒冷
	2016/7/3	12.1	27.9	36.8	1.1	29	不舒适	较舒适	较舒适	极舒适	温暖
长沙	2016/2/17	9.6	6.7	14.9	0.5	59	舒适	较不舒适	舒适	较不舒适	冷
	2016/7/17	0	27.4	29.1	2.3	97	不舒适	极不舒适	舒适	较舒适	热
南京	2015/8/6	9.3	28.4	36.5	2.6	73	极不舒适	不舒适	较舒适	舒适	热
	2015/8/9	0	26.8	29.3	4.9	88	舒适	不舒适	舒适	舒适	温暖
广州	2015/4/3	0	25.2	27.2	4	82	舒适	不舒适	极舒适	极舒适	舒适
	2015/8/7	10.9	29.6	36.6	3.9	69	极不舒适	极不舒适	较舒适	舒适	热
成都	2015/2/1	0	4.5	6.9	1.1	89	不舒适	不舒适	舒适	不舒适	寒冷
	2016/6/23	0	25.6	28.3	2.1	89	舒适	不舒适	舒适	舒适	温暖
贵阳	2015/6/29	1.4	26.1	29.6	3.3	76	舒适	不舒适	舒适	舒适	温暖
	2016/12/9	9.1	12.2	19.8	2.6	77	舒适	不舒适	舒适	较不舒适	冷
普洱	2015/7/14	3	26.4	29.9	1.6	72	舒适	不舒适	舒适	舒适	温暖
	2016/5/11	11.5	25.9	34	1.8	48	不舒适	较舒适	舒适	极舒适	舒适

4 结论和讨论

通过借鉴前人研究成果,结合对我国天气气候特征和现场问卷调查数据分析,本文提出了室外天气舒适指数(OWCI)模型及其分级与指标。根据不同气候区多地问卷调查验证和实例对比表明,OWCI 能够比较客观、准确地反映人群对室外天气总体舒适性的主观感受,与现有常用指数相比,OWCI 可以更广泛地适用于我国不同气候区与季节。OWCI 表示舒适程度,不分冷热,等级指标统一,可以进行不同时空尺度统计,便于进行人居环境舒适性和旅游气候适宜性时空评价及其气候变化影响评估与预测,模型所用气象数据获取方便,便于广泛应用。

在我国人们普遍熟悉夏季高温高湿的闷热感,也体验过华中华东地区冬、春季阴雨天的寒冷,ET 和 THI 虽然也反映了高低温环境下湿度效应的差异,但 ET 中湿度效应的过渡温度在 10~15℃ 附近(Blazejczyk et al,2012),THI 的过渡温度在 15℃ 附近(Thom, 1959)。事实上,华中华东地区冬、春季在 10~15℃ 气温时阴雨潮湿仍会令人感觉冷,而高湿让人感觉闷热的温度是 25℃ 以上(Li et al,2018; 闫海燕,2013),OWCI 中取日平均气温 18℃ 作为湿度效应的过渡温度比较符合我国情况。由 OWCI 模型计算可知,日平均气温 30℃ (相应最高气温 35℃)、相对湿度 80% 时的指数值与相对湿度 40%、平均气温 33.5℃ (相应最高气温 38.5℃) 时的指数值完全相同,这与 UTCI 指数模拟结果几乎一致(Bröde et al,2012)。需要指出的是,由各地气象站

资料统计分析表明(图略),白天平均湿度通常低于日平均湿度,最大相差30%,平均相差7%。虽然OWCI模型中已考虑这一特征,但用日平均湿度代替白天平均湿度有时会产生一些误差。

根据风速项模拟结果(图6),在气温为 -6°C 时 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速产生的降温效果约为 6°C , $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速的降温效果约 8°C ,这与UTCI模拟结果非常接近(Bröde et al, 2012),这说明OWCI对低温区间风的作用模拟比较准确。在中高温区间($T_{\max} > 25^{\circ}\text{C}$),OWCI基本反映了风的舒适效应和热浪效果特征,转折温度也与UTCI相近,但这时风的作用与风速的关系更加复杂,并且也与空气湿度相互影响(Xie et al, 2018),另外,OWCI不能反映出舒适温度区间大风机械作用的不舒适性。

根据UTCI模型,当平均辐射温度与气温差为 30°C 时(相当于炎热夏季的正午),辐射增温达到近 10°C (Bröde et al, 2012)。由OWCI模型可以算出,在日最高气温为 38°C 时,全天日照对舒适感的影响与无日照天气里气温升高 $5^{\circ}\text{C}\sim 6^{\circ}\text{C}$ 的效果相近,OWCI中考虑到夏季太阳下人们通常有带帽或打伞等适应性措施,适当调低了高温区间日照的增温效应。在冬季,8 h日照对舒适指数的影响相当于气温提高 5°C 左右,这与冯定原和邱新法(1990)计算的冬季辐射增温一致。诚然,日照项只考虑了太阳辐射的作用,忽略了人体周围环境物体与人的辐射热交换,这部分热交换有时也会明显影响到人的热感受。此外,日照对人的影响还随海拔高度而不同,高原虽然夏季温度不高,但总辐射和紫外线特别强烈,这时OWCI可能低估了日照的不舒适作用。

现有指数通常将热舒适感受划分为5~12级,以7级划分更符合人体感知和文化经验的辨析粒度(蔚丹丹和李山, 2019)。OWCI划分为7个温度区间和4个舒适等级,重点强调天气条件对室外活动的适宜程度,比较直观简明,易于接受和理解。将国外指数分级指标应用于国内时,可能出现与实际不符,于庚康等(2011)和闵俊杰等(2012)分别针对CIHB和THI建立了适合我国情况的分级指标。根据CIHB分级指标(于庚康等, 2011)可以算出,参考条件(相对湿度为40%,风速为 $0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)下,热舒适与热不舒适、热不舒适与热极不舒适分界阈值分别对应平均气温 30.2°C 和 36.8°C ,低温一侧相应阈值分别为 7.8°C 和 -4.6°C 。根据THI分级指标(闵俊杰等, 2012)可以算出,参考条件(相对湿度

40%)下,上述指标分别对应平均气温为 29.4 、 37.6 、 7.8 和 -12.9°C 。OWCI的舒适与不舒适阈值温度($T_a=7^{\circ}\text{C}$ 或 $T_a=29^{\circ}\text{C}$)与两者结果相当接近;低温一侧的极不舒适阈值($T_a=-5^{\circ}\text{C}$)与于庚康等(2011)结果基本一致,高温一侧的极不舒适阈值($T_a=35^{\circ}\text{C}$)比两者略低,表明OWCI分级指标基本符合共识,但冷极不舒适阈值对于东北和西北人群而言有所偏高。由于不同区域人群长期生活的生理适应缘故,哈尔滨居民与广州居民以及上海居民与西藏居民对同一冷热的感觉会有差异,尤其是极不舒适阈值指标的差异可能较大,用一套统一的阈值标准可能难以完全适用于全国各地,这需要在未来更深入的研究基础上细化和完善。

OWCI没有考虑天气现象对舒适性的影响,对于旅游出行和某些其他室外活动而言,强降水、大雾、沙尘暴等偶发天气现象都是极其不利的妨碍因素,因此结合对这类灾害性天气的补充评估才能更全面地评价天气气候条件对室外活动的适宜程度和旅游气候适宜性。我国幅员辽阔、气候类型多样,各地人群的热体验经历很不相同,OWCI研究过程中开展的现场问卷调查虽然包括了我国大多数气候区域,但仍然不够全面,调查样本数量还比较少,代表性尚有局限,因此,OWCI模型及其分级指标还需要经过广泛的检验和不断改进。此外,本文虽然将OWCI与现有常用经验指数做了对比分析,UTCI是学界公认的普适机理模型,将OWCI与UTCI进行广泛的实例对比分析将可以更全面地评价新指数的适用性与局限性。

参考文献

- 冯定原,邱新法,1990.我国各地四季感热温度的计算和分析[J].南京气象学院学报,13(1):71-80. Feng D Y, Qiu X F, 1990. Calculation and analysis of the apparent temperature in the four seasons over China[J]. J Nanjing Inst Meteor, 13(1):71-80(in Chinese).
- 高超,申双和,蒋烨林,等,2019.影响杭州人体舒适度的城市因素分析[J].气象,45(6):854-861. Gao C, Shen S H, Jiang Y L, et al, 2019. Analysis of urban factors impacting human comfort degree in Hangzhou[J]. Meteor Mon, 45(6):854-861(in Chinese).
- 胡敏,陈友明,郭兴国,等,2007.空气湿度对人体舒适度的影响[J].制冷与空调,21(3):111-115. Hu M, Chen Y M, Guo X G, et al, 2007. Analyzing air humidity on human comfort[J]. Refrig Air Condit, 21(3):111-115(in Chinese).
- 黄静,2001.天气舒适度的分析和应用[J].气象,27(11):47-51. Huang J, 2001. Analysis and application of comfort index[J].

- Meteor Mon, 27(11):47-51(in Chinese).
- 孔钦钦,葛全胜,席建超,等,2015.中国重点旅游城市气候舒适度及其变化趋势[J].地理研究,34(12):2238-2246. Kong Q Q, Ge Q S, Xi J C, et al, 2015. Thermal comfort and its trend in key tourism cities of China[J]. Geogr Res, 34(12): 2238-2246 (in Chinese).
- 刘梅,于波,姚克敏,2001.以热量平衡为基础的体感温度模型及气候要素的效应分析[J].南京气象学院学报,24(4):527-535. Liu M, Yu B, Yao K M, 2001. The apparent temperature model based on thermal equilibrium and effect of climatic elements[J]. J Nanjing Inst Meteor, 24(4): 527-535(in Chinese).
- 陆鼎煌,崔森,李重和,1984.北京城市绿化夏季小气候条件对人体的适宜度[M]//林业气象论文集.北京:气象出版社:144-152. Lu D H, Cui S, Li C H, 1984. The influence of Beijing urban greening and summer microclimatic conditions on human fitness[M]//Forestry and Metrology Papers. Beijing: China Meteorological Press:144-152(in Chinese).
- 吕伟林,1997.体感温度及其计算方法[J].北京气象,(4):23-25. Lü W L, 1997. Apparent temperature and its calculation method [J]. J Beijing Meteor, (4):23-25(in Chinese).
- 马丽君,孙根年,王洁洁,2009.中国东部沿海沿边城市旅游气候舒适度评价[J].地理科学进展,28(5):713-722. Ma L J, Sun G N, Wang J J, 2009. Evaluation of tourism climate comfortableness of coastal cities in the eastern China[J]. Progr Geogr, 28(5): 713-722(in Chinese).
- 闵俊杰,张金池,张增信,等,2012.近60年来南京市人体舒适度指数变化及其对温度的响应[J].南京林业大学学报(自然科学版),36(1):53-58. Min J J, Zhang J C, Zhang Z X, et al, 2012. Human comfortable degree change and its response to temperature in recent sixty years in Nanjing City[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 36(1):53-58(in Chinese).
- 彭见曙,夏雅琴,林兆娣,1994.体表温度及其总体平均值的测量与统计分析[J].北京工业大学学报,20(1):49-53. Peng J S, Xia Y Q, Lin Z D, 1994. The measuring and statistic analysis of mean skin temperature[J]. J Beijing Polytech Univ, 20(1): 49-53(in Chinese).
- 钱妙芬,叶梅,1966.旅游气候宜人度评价方法研究[J].成都气象学院学报,11(3):128-134. Qian M F, Ye M, 1996. A method in evaluating the pleasantness of weather for tourist[J]. J Chengdu Inst Meteor, 11(3):128-134(in Chinese).
- 唐进时,2015.高温影响的舒适度模型研制及在我国南方城市的应用[D].南京:南京信息工程大学. Tang J S, 2015. Development of human comfort model influenced by high temperature and application on southern cities of China[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology(in Chinese).
- 吴佳,高学杰,韩振宇,等,2017.基于有效温度指数的云南舒适度变化分析[J].地球科学进展,32(2):174-186. Wu J, Gao X J, Han Z Y, et al, 2017. Analysis of the change of comfort index over Yunnan Province based on effective temperature[J]. Adv Earth Sci, 32(2):174-186(in Chinese).
- 徐大海,朱蓉,2000.人对温度、湿度、风速的感觉与着衣指数的分析研究[J].应用气象学报,11(4):430-439. Xu D H, Zhu R, 2000. The sensation of human to temperature and humidity & wind speed and the clothing[J]. Quart J Appl Meteor, 11(4): 430-439 (in Chinese).
- 闫海燕,2013.基于地域气候的适应性热舒适研究[D].西安:西安建筑科技大学. Yan H Y, 2013. Study on adaptive thermal comfort on the basis of regions and climates of China[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology(in Chinese).
- 闫业超,岳书平,刘学华,等,2013.国内外气候舒适度评价研究进展[J].地球科学进展,28(10):1119-1125. Yan Y C, Yue S P, Liu X H, et al, 2013. Advances in assessment of bioclimatic comfort conditions at home and abroad[J]. Adv Earth Sci, 28(10): 1119-1125(in Chinese).
- 于波,刘梅,严明良,等,2002.凉爽条件下体感温度模型的建立及风速、水汽压、辐射的影响[J].气象科学,22(3):304-312. Yu B, Liu M, Yan M L, et al, 2002. The apparent temperature model under cool condition and effects of wind, vapor-pressure and extra radiation[J]. Sci Meteor Sin, 22(3):304-312(in Chinese).
- 于庚康,徐敏,于堃,等,2011.近30年江苏人体舒适度指数变化特征分析[J].气象,37(9):1145-1150. Yu G K, Xu M, Yu K, et al, 2011. Analysis of variation characteristics of comfort index of human body in Jiangsu Province during the past three decades [J]. Meteor Mon, 37(9):1145-1150(in Chinese).
- 蔚丹丹,李山,2019.气候舒适度的体感分级:季节锚点法与中国案例[J].自然资源学报,34(8):1633-1653. Yu D D, Li S, 2019. Scale of human thermal sensation using seasonal anchor method: a Chinese case study[J]. J Nat Resour, 34(8):1633-1653(in Chinese).
- 张莹,马敏劲,王式功,等,2013.中国大陆九大名山风景区旅游气候舒适度评价[J].气象,39(9):1221-1226. Zhang Y, Ma M J, Wang S G, et al, 2013. Evaluation on tourism climate comfort in nine famous mountain scenic spots in Chinese Mainland[J]. Meteor Mon, 39(9):1221-1226(in Chinese).
- 张志薇,2014.基于舒适度研究的中国大陆健康气候评估[D].兰州:兰州大学. Zhang Z W, 2014. Assessment of healthy climate dependent on human comfortable degree in mainland China[D]. Lanzhou: Lanzhou University(in Chinese).
- 郑有飞,尹继福,吴荣军,等,2010.热气候指数在人体舒适度预报中的适用性[J].应用气象学报,21(6):709-715. Zheng Y F, Yin J F, Wu R J, et al, 2010. Applicability of universal thermal climate index to thermal comfort forecast[J]. J Appl Meteor Sci, 21(6): 709-715(in Chinese).
- 郑有飞,余永江,谈建国,等,2007.气象参数对人体舒适度的影响研究[J].气象科技,35(6):827-831. Zheng Y F, Yu Y J, Tan J G, et al, 2007. Influence of meteorological parameters on human comfort index[J]. Meteor Sci Technol, 35(6): 827-831(in Chinese).
- ANSI/ASHRAE, 2010. ANSI/ASHRAE Standard 55-2010 Thermal environmental conditions for human occupancy[S]. Tullie Circle NE, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers:2-4.

- Blazejczyk K, Epstein Y, Jendritzky G, et al, 2012. Comparison of UTCI to selected thermal indices[J]. *Int J Biometeorol*, 56(3): 515-535.
- Bröde P, Fiala D, Blazejczyk K, et al, 2012. Deriving the operational procedure for the universal thermal climate index (UTCI)[J]. *Int J Biometeorol*, 56(3): 481-494.
- Feng Y R, Wang A Y, Lin Z G, 2004. On the design of a new human comfort index[J]. *J Trop Meteor*, 10(1): 106-112.
- Huang T Y, Li J N, Xie Y X, et al, 2017. Simultaneous environmental parameter monitoring and human subject survey regarding outdoor thermal comfort and its modelling[J]. *Build Environ*, 125: 502-514.
- Jendritzky G, de Dear R, Havenith G, 2012. UTCI-why another thermal index? [J]. *Int J Biometeorol*, 56(3): 421-428.
- Lai D Y, Guo D H, Hou Y F, et al, 2014. Studies of outdoor thermal comfort in northern China[J]. *Build Environ*, 77: 110-118.
- Li B Z, Du C Q, Tan M L, et al, 2018. A modified method of evaluating the impact of air humidity on human acceptable air temperatures in hot-humid environments[J]. *Energy Build*, 158: 393-405.
- Liu H, Wu Y X, Li B Z, et al, 2017. Seasonal variation of thermal sensations in residential buildings in the hot summer and cold winter zone of China[J]. *Energy Build*, 140: 9-18.
- Liu W W, Zhang Y X, Deng Q H, 2016. The effects of urban micro-climate on outdoor thermal sensation and neutral temperature in hot-summer and cold-winter climate[J]. *Energy Build*, 128: 190-197.
- McGregor G R, 2012. Special issue: universal thermal comfort index (UTCI)[J]. *Int J Biometeorol*, 56(3): 419.
- Mieczkowski Z, 1985. The tourism climatic index: a method of evaluating world climates for tourism[J]. *Can Geogr*, 29(3): 220-233.
- Nikolopoulou M, Lykoudis S, 2006. Thermal comfort in outdoor urban spaces: analysis across different European countries[J]. *Build Environ*, 41(11): 1455-1470.
- Potchter O, Cohen P, Lin T P, et al, 2018. Outdoor human thermal perception in various climates: a comprehensive review of approaches, methods and quantification[J]. *Sci Total Environ*, 631-632: 390-406.
- Shindell D, Kuylenstierna J C I, Vignati E, et al, 2012. Simultaneously mitigating near-term climate change and improving human health and food security[J]. *Science*, 335(6065): 183-189.
- Stathopoulos T, Wu H Q, Zacharias J, 2004. Outdoor human comfort in an urban climate[J]. *Build Environ*, 39(3): 297-305.
- Takahashi K, 1961. *The Theory of Applied Meteorology*[M]. Tokyo: Iwanami Shoten.
- Thom E C, 1959. The discomfort index[J]. *Weatherwise*, 12(2): 57-61.
- Xie Y X, Huang T Y, Li J N, et al, 2018. Evaluation of a multi-nodal thermal regulation model for assessment of outdoor thermal comfort: sensitivity to wind speed and solar radiation[J]. *Build Environ*, 132: 45-56.
- Xie Y X, Liu J L, Huang T Y, et al, 2019. Outdoor thermal sensation and logistic regression analysis of comfort range of meteorological parameters in Hong Kong[J]. *Build Environ*, 155: 175-186.
- Xu M, Hong B, Mi J Y, et al, 2018. Outdoor thermal comfort in an urban park during winter in cold regions of China[J]. *Sustain Cities Soc*, 43: 208-220.

(本文责编:何晓欢)