

气候舒适度的体感分级: 季节锚点法与中国案例

蔚丹丹^{1,2}, 李 山^{1,2,3}

(1. 华东师范大学地理科学学院, 上海 200241; 2. 地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241;
3. 崇明生态研究院, 上海 200062)

摘要: 气候舒适度对人居环境和人类活动具有深远影响, 相关的评价模型/指数在建筑设计、城市规划、人体健康和旅游发展等领域有着广泛应用。体感分级标准作为气候舒适度评价模型不可或缺的关键环节, 对模型效度有着重要的裁量权, 也是实践应用中最终的度量衡工具。目前体感分级标准研究和应用中异地套用和局地实测的传统做法, 在制定国家尺度普适性标准时遇到较大瓶颈。本文试图提出包含“定级一定名一定点一定宽”等基本环节的“季节锚点法”这一新的体感分级思路, 并基于中国 1981-2010 年间 814 个基本(基准)气象站点的日值气象数据, 以温湿指数和风效指数为例开展了实证研究。研究给出了“暑—热—暖—温—凉—冷—寒”这一针对中国区域的 7 级体感划分标准, 并具体给出了温湿指数和风效指数在各体感等级上的阈值区间, 进而在此基础上计算评价了中国气候舒适期和不舒适期的时间长短、空间格局及其历时变化, 得到一些有益发现。未来的研究可以进一步就细分人群、测试模型和区域差异等方面的体感分级标准开展更多深入探索。

关键词: 人体热舒适; 热舒适指数; 气候舒适度; 气候舒适期; 温湿指数; 风效指数; 国家标准

气候舒适度(人体热舒适)是指在气温、湿度、风速和日照等气象因子的综合影响下, 人体冷热感觉的舒适状态与适宜程度^[1]。因其对人居环境和人类活动有着重要影响^[2-3]而受到学术界长期持续关注^[4], 相关的评价模型/指数在建筑设计^[5-7]、城市规划^[8-10]、人体健康^[11-12]和旅游发展^[13-16]等领域有着广泛应用。一个完备的气候舒适度评价模型通常涉及“机理基础—量化指标—体感分级”等三方面逻辑关联的内容, 其中处于“尾端”的体感分级标准对模型效度有着重要的“裁量权”, 是实践应用中最终的“度量衡”工具。也就是说, 对量化指标的计算结果需要制定合理的体感分级标准, 从而与人体的冷热经验产生直接关联而便于理解, 同时也有利于消除不同评价指数间因量纲差异而难以比较的障碍。

目前, 一些经典指数的国家标准被相继提出, 部分标准甚至被世界各地广泛采用。例如美国 ASHARE Standard 55 标准基于预测平均投票(Predicted Mean Vote, PMV)热舒适模型^[17]制定了能够让大多数人可接受的舒适范围, 给出了衡量热敏感度的 7 级刻度标准; 德国工程师协会(Verein Deutscher Ingenieure, VDI)基于慕尼黑人体热量平衡模型提出了目前室外热环境评价常用的指数——生理等效温度(Physiologically Equivalent

收稿日期: 2019-01-07; 修订日期: 2019-06-03

基金项目: 国家重大科学研究计划课题(2012CB955803)

作者简介: 蔚丹丹(1991-), 女, 山东济宁人, 博士研究生, 研究方向为旅游地理学与旅游气候学。

E-mail: 52173901011@stu.ecnu.edu.cn

通讯作者: 李山(1974-), 男, 四川西昌人, 博士, 副教授, 研究方向为旅游地理学与旅游气候学。

E-mail: sli@geo.ecnu.edu.cn

Temperature, PET)^[18], 划分为9个等级来表征不同程度的人体热舒适状态。虽然个体因体重^[19]、年龄^[20]和性别^[21-22]等差异而对气候条件的适应性不尽相同, 但体感分级国家标准的制定, 仍具有重要的意义: (1) 从时间上看, 面对全球变暖的不争事实^[23-24], 标准的统一便于开展历时性的纵向比较, 探索气候变化对某一国气候舒适度的整体影响^[25-26], 为国家层面应对气候变化提供科学依据; (2) 从空间上看, 针对国家内部可能存在的地区差异, 选择适中的分级粒度, 在统一标准下开展气候舒适度评估, 有利于不同地区之间进行横向比较^[26-27]; (3) 此外, 一个统一的国家标准, 可以作为地方标准制定的重要参考和依据, 从而有利于各地因地制宜开展局地气候舒适度的评价分析。中国针对温湿指数 (Temperature Humidity Index, THI)^[28]和风效指数 (Wind Effect Index, WEI)^[29], 虽然也推荐了“五级”划分的国家标准《人居环境气候舒适度评价》(GB/T 27963-2011), 但国家标准的制定需要学术研究提供科学支持, 而以往针对中国气候舒适度评价的研究中, 体感分级标准的制定往往是“异地套用”和“局地实测”, 面临着一些客观存在的问题和局限。

在长期的人地关系演化中, 人体对气候环境形成了鲜明的地域性适应。例如, 以有效温度 (Effective Temperature, ET) 界定的“宜人气候”这一体感等级, 其阈值区间在英国为 15~19 °C、欧洲与印尼为 20~26 °C、印度为 21~26 °C、马来西亚为 21~29 °C^[30], 地域差异显著; 再如, 以生理等效温度 (Physiological Equivalent Temperature, PET) 界定的“热中性”这一体感等级, 其阈值区间同样存在明显的地域差异^[31], 其中西欧为 18~23 °C^[32]、地中海气候区为 20~25 °C^[33]、中国台湾为 26~30 °C^[34]。总体上看, 长期居住在热带地区的人群要比中纬度地区的人群具有更强的耐热性^[35], 这在温湿指数 (THI) 的实证研究中也得到相应验证^[36-38]。因此, 在气候舒适度评价中, 体感分级标准的制定需要“因地制宜”, 不能简单地移植套用^[39], 特别是诸如预测平均投票数—预测不满意百分率 (Predicted Mean Vote-Predicted Percentage of Dissatisfied, PMV-PPD) 等一些经典评价指数的体感分级标准往往是基于欧美年轻人的调查结果, 并不适用于所有国家和地区^[40-43]。同时, 一些经典模型 (例如 THI) 在引入性评价实践中, 出现了多个不同的体感分级标准, 缺乏辨析的照搬套用可能导致针对某一区域的评价“方法相同而结果打架”的疑惑^[26,39]。

“局地实测”即在实验环境或自然状态下, 通过对样本人群的问卷调查 (心理量表), 根据其主观感受来对其所处环境的热舒适性进行体感分级, 偶尔也会辅助开展较为客观的行为观察^[44]。例如闫海燕等^[45]以拉萨为研究对象, 通过现场环境测试和热舒适的问卷调查, 分析在高原气候下拉萨住宅建筑冬夏两季室内热环境及不同性别热反应的差异特点; 魏冬雪等^[46]对上海创智天地广场夏秋冬三季小气候物理实验和大众心理感知研究, 验证了广场空间形态、热环境与人的心理感知三者之间密切相关。实际上, 正是基于样本人群的心理“实测”, 风效指数 (WEI)^[29]、预测平均投票数 (PMV)^[17]、通用热气候指数 (UTCI)^[47-49]等若干经典评价指数才得以构建, 并制定出广为接受的体感分级标准。“局地实测”方法虽然打破了“异地套用”方法的局限, 使得体感分级标准具有了鲜明的地域针对性。然而, “局地实测”方法往往针对特定城市, 不具备全国普适性。例如, 中国不同地区的 PET 舒适范围并不一定相同, 夏热冬暖地区 (广州、香港、台湾) 舒适阈值的上、下限均高于寒冷地区 (天津)^[50]。若要制定一个全国普适标准, 则需要在全国范围进行城市抽样和人群抽样, 开展大样本的情景实验或自然调查, 人力物力和时间成本巨

大。因此,本文试图提出“季节锚点法”这一新的体感分级思路,利用地域人群在长期人地关系中形成的较为稳定的冷热体感经验,以经典评价指数和中国为例,制定一个相对普适的体感分级标准。

1 研究方法与数据来源

1.1 数据来源

本文采用国家气象信息中心(中国气象数据网, <http://data.cma.cn/>)提供的“中国地面气候资料日值数据集”,涉及中国824个(不包括港澳台地区)基准气象站(national reference climatological station, NRCS)和基本气象站(national basic meteorological observing station, NBMOS)1951年1月以来的气温、相对湿度、风速以及日照时数等气象要素的日值数据。世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)规定气候要素标准值的参考时段一般为30年。国家气象局发布的气象行业标准《气候季节划分》(QX/T152-2012)中提到,气候平均值为气象要素30年或其以上的平均值,并推荐2011-2020年间取1981-2010年这30年的平均值。因此,基于数据的可得性和稳定性,选取在1981-2010年这30年完整气候周期长度的时间范围内均存在的814个站点进行计算分析(图1)。其中,陕西省西安市区站号57131站点于2005年建站,但为保证省会数据完整性,也将此站点纳入统计范畴。全国814个气象站点在空间上并非均匀分布,东部站点比较密集,而西部站点相对稀少。故在后续计算全国舒适期时,没有使用各站点舒适日数的简单平均,而是根据其所在泰森多边形面积大小进行加权处理(图2)。

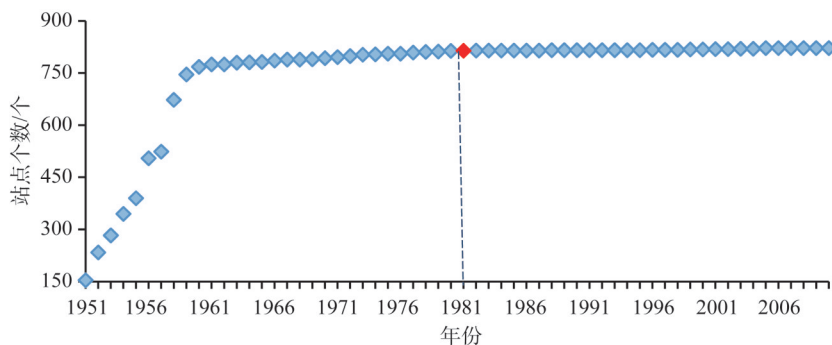
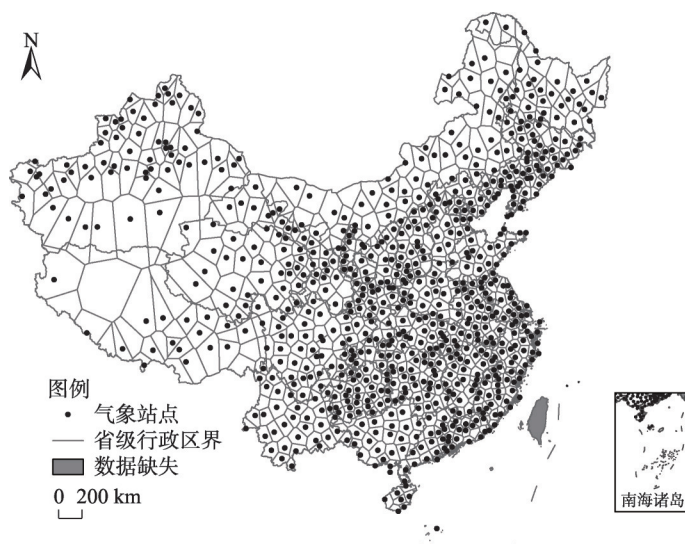


图1 1951-2010年中国基准和基本气象站点历年数量累计

Fig. 1 Cumulative number of the NRCS and NBMOS in China from 1951 to 2010

1.2 测试模型

气候舒适度评价在其100多年的发展历程中,超过160种评价模型(指数)被相继提出^[51],并在总体上可划分为经验模型和机理模型这两个大类^[52-54]。以预测平均投票数—预测不满意百分数(PMV-PPD)^[17]、生理等效温度(PET)^[55]、通用热气候指数(UTCI)^[56-57]等为代表的机理模型虽然在20世纪60年代以来主导了“理论研究”,但发端于20世纪20年代的经验模型在“实践应用”中仍然被广泛关注^[39]。在中国,经验模型中代表性的温湿指数(THI)和风效指数(WEI),既被写进经典旅游地理学教材^[58],又被作为《人居环境气候舒适度评价》的国家标准(GB/T 27963-2011),同时也被大量学术研究所运



注：本图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)1593号的标准地图制作，底图无修改，下同。

图2 中国814个基准和基本气象站点泰森多边形划分

Fig. 2 Tyson polygon division of the NRCS and NBMOS in China

用^[59-61]，具有很高的解析度和影响力。故而，本文选择 *THI* 和 *WEI* 作为测试模型，据此进行体感分级标准的划分探索。实际上，*THI* 和 *WEI* 最初的源头分别是用来评价偏热环境和偏冷环境的舒适状况^[39]，选择这两个模型进行测试在冷热跨度上具有某种完备性；此外，在目前的体感分级中，不同的学者对 *THI* 给出了不尽相同的分级标准^[62-64]，而对 *WEI* 分级标准认识却有着较强的一致性^[29]，因此将两者进行测试比较，在问题发现上或将更具针对性。

常用的温湿指数 (*THI*) 和风效指数 (*WEI*) 的计算公式分别为^[28-29,39]：

$$THI = t - 0.55(1 - 0.01RH) \times (t - 14.5) \quad (1)$$

$$WEI = -\left(10\sqrt{v} + 10.45 - v\right) \times (33 - t) + \frac{200 \times S}{D} \quad (2)$$

式中： t 为气温 ($^{\circ}\text{C}$)； v 为风速 (m/s)； RH 为相对湿度 (%)； S 为日照时数 (h)； D 为昼长 (h)。

2 分级方法：季节锚点法

本文所提季节锚点法的思路是将各种气候舒适度评价指标看作不同的“标尺”，将它们与温度这把衡量人体冷热感最常用的标尺进行“分段映射”。映射的关键在于选择某种“体感耐宽”区间范围内的典型锚点（刻度），在这个锚点上不同标尺刻度值对应的人体冷热感是相同的。考虑到本文使用人体在典型季节的冷热感知来确定不同标尺的共同锚点，故而将该方法命名为“季节锚点法”。具体而言，该方法包括定级（划分适度级数）、定名（确定等级措词）、定点（选择季节锚点）和定宽（映射体感耐宽）等四个环节。

2.1 定级：适度级数

体感分级首先需要确定划分为“多少级”，即适度级数。级数过多，相邻等级之间的

真实体感差异难以辨别；级数过少，同一等级之内的真实体感差异未能反映。学术研究和实践中常见的一些典型评价模型在体感等级划分上从5~12级不等（表1），这也成为本文划分适度级数的参考区间。

表1 一些典型热指数的体感分级
Table 1 Scales of warmth sensation on some typical thermal indexes

评价指数	体感级数	等级措词	来源
经验模型	<i>THI</i>	10 Hyperglacial, Glacial, Extremely cold, Very cold, Cold, Cool, Comfortable, Hot, Very hot, Torrid	Kyle ^[63]
		5 寒冷、冷、舒适、热、闷热	国家标准 (GB/T 27963-2011)
	<i>WCI</i>	9 Exposed flesh freezes, Bitterly cold, Very cold, Cold, Very cool, Cool, Pleasant, Warm, Hot	Siple等 ^[65]
	<i>WEI</i>	12 Exposed flesh freezes, Bitterly cold wind chill, Very cold wind chill, Cold wind chill, Very cool wind chill, Cool wind chill, Pleasant wind effects, Warm wind effects, Neutral wind effects, Warming sensation to skin, Discomforting heat addition, Very discomforting heat addition	Terjung ^[30]
机理模型	<i>ICL</i>	9 根据着衣状况（厚薄）给定等级措词（略）	De Freitas等 ^[51]
	<i>PET</i>	9 Very cold, Cold, Cool, Slightly cool, Comfortable, Slightly warm, Warm, Hot, Very hot	Franger ^[17]
	<i>PMV-PPD</i>	7 Hot, Warm, Slightly warm, Neutral, Slightly cool, Cool, Cold	ASHRAE ^[1]
	<i>UTCI</i>	10 Extreme heat stress, Very strong heat stress, Strong heat stress, Moderate heat stress, No thermal stress, Slight cold stress, Moderate cold stress, Strong cold stress, Very strong cold stress, Extreme cold stress	Blazejczyk等 ^[47-49]

若立足实践应用，适度级数划分上可参考以下两个原则：（1）与国家与国际主流标准相一致；（2）与普通大众的冷热体感识别能力相匹配。中国国家标准《人居环境气候舒适度评价》（GB/T 27963-2011）推荐的*THI*和*WEI*采用5级划分，美国采暖、制冷与空调工程师学会（ASHRAE Standard 55-2010）和欧盟（BS EN ISO 7730-2005）推荐的*PMV-PPD*采用7级划分，德国工程师协会（VDI）推荐的*PET*采用9级划分。因此从主流标准看，5级、7级或9级较为适宜，也就是说可将其适度级数区间界定为5~9级。心理学研究表明人体一般不混淆的区分感觉的量表通常不超过7级^[66-67]。进一步，如果考虑到人体其他感觉器官长期形成的文化认知经验，例如肉眼对可见光“红橙黄绿蓝靛紫”七种颜色的日常识别和听觉对乐音“哆瑞咪发嗦啦西”七声音阶的文化接纳，7级划分或许更符合人体感知和文化经验的辨析粒度。因此，本文在适度级数区间5~9级之中选择7级来划定适度级数，并在此基础上进行等级措词的探索。

2.2 定名：等级措词

对称性和修饰性是现有冷热体感等级命名的两个显著特点。对称性表现为围绕“舒适”或“中性”分别向冷和热两个方向，按程度对称展开，例如ASHRAE^[1]关于*PMV-PPD*的7级体感划分中，“微凉（slight cool）—微暖（slight warm）”“凉（cool）—暖（warm）”“冷（cold）—热（hot）”围绕“中性（neutral）”对称展开（表1）；修饰性则表现为程度副词+冷热形容词的命名方式，例如*PMV-PPD*中“微凉（slight cool）”和“微暖（slight warm）”等。对称性保证了冷热体感的全覆盖，也符合日常的经验认识，

但是一些修饰性的等级措词在相邻等级的刻画上则会显得较为模糊而不利于识别。例如，*PET*和*PMV-PPD*的等级划分中（表1），凉（cool）与微凉（slightly cool），暖（warm）与微暖（slightly warm），这种程度上的轻微差异是相对模糊而难以识别的。究其原因，很可能是介绍引用国外相关研究成果时，按照“程度副词+冷热形容词”的英文字面翻译而来，而对中国历史传统上冷热感的经验认知和表达刻画考虑不足。按照“形式对称、表达简洁、中国元素”的要求，综合现有典型体感等级措词，结合中国传统文学作品描述，本文将冷热体感的7个等级分别命名为“暑、热、暖、温、凉、冷、寒”（表2）。

上述体感分级中，“温”是中间等级，其意为“非冷非热”的中性，两侧等级则以之为中心对称展开，一侧为“暖—热—暑”、一侧为“凉—冷—寒”，其程度差异在《尚书·洪范》关于“燠”和“寒”的注疏中早已被提及：燠（即暖）是热之始，暑是热之极；凉是冷之始，寒是冷之极。“暖（warm）—凉（cool）”和“热（hot）—冷（cold）”，这两组体感上的对称关系在典型评价指数中较为常见；“暑（torrid）”与“寒（frozen）”在体感上的对称关系，则体现在“寒来暑往、寒耕暑耘”等成语中，体现在“小暑大暑与小寒大寒”的传统节气中，以及体现在“寒假暑假”的日常生活中。表2提出的体感等级措词，（1）以“温”为中心向冷热两个方向呈现为严谨的对称性，是一种良好传承；（2）通过“暑—寒”的引入，避免了“微、很”等程度副词的使用，各等级边界更为清晰；（3）使用单字措词，形式简洁统一而便于识别记忆，也富有一定的传统文化特色。

就不同等级的体感舒适性而言，偏暖和中性环境更受人体的偏爱^[17,67-68]，可以将“暖”与“温”合并后归入“舒适”类型等级，将“暑”与“寒”归入“不舒适”类型等级，而将“热”“凉”与“冷”归入“亚舒适”类型等级（表2）。

2.3 定点:季节锚点

锚点意味着某种确定的冷热体感，即不同评价指数（标尺）在共同锚点上的刻度是等效的。在中国，聚集了绝大部分人口的胡焕庸线以东地区，多属于亚热带或温带季风气候，四季分明。其中，秋季典型时段的典型体感是“凉”，正所谓“却道天凉好个秋”

表2 七级冷热体感措词的典出列举与舒适性分类
Table 2 Nomenclature and classification in the 7 levels of thermal sensation

体感措词		古代诗文典出列举	舒适性分类
中文	英文		
暑	torrid	寒往则暑来，暑往则寒来。——《周易·系辞下》 冬日则寒冻，夏日则暑伤。——《韩非子·人间训》	热不舒适
热	hot	力尽不知热，但惜夏日长。——[唐]白居易《观刈麦》 夜热依然午热同，开门小立月明中。——[宋]杨万里《夏夜追凉》	亚舒适
暖	warm	竹外桃花三两枝，春江水暖鸭先知。——[宋]苏轼《惠崇春江晚景》 暖风熏得游人醉，直把杭州作汴州。——[宋]林升《题临安邸》	舒适
温	neutral	迎燕温风旋旆，润花小雨斑斑。——[宋]黄庭坚《子瞻继和复答二首》 暖日温风破浅寒，短青无数簇幽栏。——[宋]吕本中《浣溪沙》	
凉	cool	殷勤昨夜三更雨，又得浮生一日凉。——[宋]苏轼《鹧鸪天·林断山明竹隐墙》 欲说还休，却道天凉好个秋。——[宋]辛弃疾《丑奴儿·书博山道中壁》	亚舒适
冷	cold	中庭地白树栖鸦，冷露无声湿桂花。——[唐]王建《十五夜望月寄杜郎中》 地冷叶先尽，谷寒云不行。——[唐]李白《冬日归旧山》	
寒	frozen	墙角数枝梅，凌寒独自开。——[宋]王安石《梅花》 又恐琼楼玉宇，高处不胜寒。——[宋]苏轼《水调歌头·明月几时有》	冷不舒适

([宋]辛弃疾《丑奴儿·书博山道中壁》),这已长期积淀成为中国人的一种集体经验。春季体感从冷变暖(冷—凉—温—暖),在意境上虽然偏向“暖”,但因冷暖气流交替作用而并不稳定,春寒料峭时有发生,加之与秋季形成的对称性,因此其典型时段的典型体感仍然以“凉”最为显著。故而,选择中国省会城市为代表,根据1981-2010年共30年间逐日的气象资料计算其常年春秋两个气候季节(各地起始日期存在差异)中每日的气候舒适度指数(本文以 THI 和 WEI 的日均值为例),并将其中位数(中值)与气温中位数分别作为“凉”的体感锚点(表3)。表3中各城市常年气候季节起始日期的计算依据为国家气象行业标准《气候季节划分》(QX/T 152-2012),中位数根据30年逐日数据汇总排序后选取。

表3之所以选择省会城市作为代表样本,一是因为中国地域辽阔且分异显著,而省会城市在宏观上具有较好的“区域代表性”;二是省会城市通常是区域人口的聚集中心,2010年第六次全国人口普查数据显示,中国31个省会城市人口数合计为2.61亿,约占全国的五分之一,具有广泛的受众基础。表3显示,在“凉”这一典型体感等级上,省会城市春秋季气温、 THI 和 WEI 的平均锚点值分别为16.6℃、16.2℃和-273 kcal/m²·h,故将以此作进一步计算的基础。

2.4 定宽:体感耐宽

人体冷热感觉对环境条件的变化具有一定的耐受性,即某一阈值区间内的不同环境条件均能给人体带来类似水平的冷热体感,将这种耐受阈值范围的大小称为“体感耐宽”(可简称耐宽)。体感耐宽可以反映人体冷热感觉对环境条件的敏感性,耐宽大则敏感性弱,耐宽小则敏感性强。实际上,不同体感水平(等级)对应的体感耐宽是存在差异的,而不同评价指数因量纲差异其耐宽数值也不尽相同。根据计算得到的温度、 THI 和 WEI 等“标尺”在“凉”这一典型体感上各自的锚点值,如果能进一步确定不同体感等级上各评价指数(标尺)的耐宽值,那就可以根据锚点值扩展计算出各评价指标的分级阈值(即不同体感等级间的分界值)。

2.4.1 温度标尺下的体感耐宽

温度作为最常用的冷热体感指标,其各等级耐宽值的确定可以从一些国家和行业标准中得到启示。国家标准《室内空气质量标准》(GB/T 18883-2002)推荐夏季空调状态下的室内适宜温度为22~28℃,而冬季采暖状态下则为16~24℃,可以认为它们代表了一种“舒适”的体感阈值区间,其相应的耐宽大小分别为6℃和8℃,两者的平均值为7℃,这也成为市场上一些常见家用圆盘温湿度计上“舒适温度”的耐宽标准。此外,作用温度(operative temperature)(房间空气温度和平均辐射温度的综合效果)的研究发现,在10~33.5℃的不同室外温度条件下,80%的受访者认为7℃的范围是可接受的舒适耐宽(ASHRAE Standard 55-2010)。综上,可以将“舒适”体感(包含“暖”和“温”两个等级)的温度耐宽值确定为7(℃)。由于缺乏进一步的参考标准,将“舒适”耐宽值平均分配给“暖”与“温”,从而将两者的温度耐宽值均暂定为3.5(℃),以待进一步的验证。

如果将根据《室内空气质量标准》(GB/T 18883-2002)推荐的夏季空调状态下22~28℃的适宜温度标准,将28℃作为“热”的下限温度,那么“热”的上限温度成为确定其体感耐宽值的关键。世界气象组织将日最高气温高于32℃且持续3天以上的天气过程界定为热浪;中国气象部门将日最高气温高于32℃且平均相对湿度达到80%的天气定义

表3 1981-2010年中国省会城市春秋季气温、THI与WEI的日均值中位数

Table 3 Median of daily air temperature, daily THI and daily WEI in spring and autumn of provincial capital cities in China during 1981-2010

省会城市	气温中位数/℃			THI中位数/℃			WEI中位数/(kcal/m ² ·h)			常年气候季节起始日/(月/日)			
	春季	秋季	春秋季	春季	秋季	春秋季	春季	秋季	春秋季	春	夏	秋	冬
北京	17.0	16.4	16.7	16.3	16.0	16.2	-260	-242	-249	4/3	6/1	9/3	10/23
成都	16.8	16.2	16.4	16.4	16.0	16.2	-287	-295	-292	3/10	5/29	9/10	11/27
福州	13.6	17.1	15.0	13.7	16.6	14.9	-419	-346	-388	1/1	5/11	10/21	*
广州	16.7	17.7	17.2	16.4	17.1	16.7	-290	-223	-265	1/1	4/16	10/30	*
贵阳	17.6	16.1	16.9	17.2	15.9	16.6	-297	-312	-305	3/11	6/19	9/4	11/24
哈尔滨	17.2	17.1	17.2	16.6	16.7	16.7	-286	-253	-268	4/27	7/3	8/11	10/2
海口	19.1	19.8	19.3	18.8	19.2	18.9	-260	-238	-251	1/1	3/14	11/28	*
杭州	15.9	16.6	16.2	15.7	16.3	16.0	-303	-268	-286	3/10	5/20	9/27	11/28
合肥	16.6	17.0	16.7	16.2	16.6	16.4	-309	-269	-289	3/18	5/18	9/26	11/17
呼和浩特	17.5	16.3	17.0	16.5	16.0	16.2	-223	-209	-215	4/16	6/24	8/12	10/11
济南	16.9	17.2	17.0	16.2	16.5	16.4	-283	-256	-268	3/27	5/19	9/12	11/8
昆明	17.4	18.4	18.0	16.7	18.0	17.4	-258	-250	-254	2/9	*	6/29	12/1
拉萨	12.4	13.2	13.0	12.9	13.4	13.3	-318	-300	-303	5/15	*	6/15	10/1
兰州	16.8	16.6	16.6	16.1	16.1	16.2	-244	-241	-242	4/16	*	7/24	10/3
南昌	15.8	16.6	16.1	15.6	16.1	15.8	-320	-272	-295	3/5	5/8	10/4	12/3
南京	16.8	17.3	17.0	16.4	16.9	16.7	-281	-242	-258	3/26	5/20	9/22	11/16
南宁	15.3	17.3	16.3	15.2	16.7	15.9	-315	-225	-277	1/1	4/09	10/27	*
上海	16.5	17.2	16.9	16.2	16.8	16.5	-333	-297	-315	3/19	5/31	9/30	11/29
沈阳	17.1	16.2	16.7	16.4	15.9	16.2	-292	-269	-279	4/14	6/13	9/1	10/17
石家庄	16.7	16.1	16.4	16.2	15.8	15.9	-247	-234	-241	3/26	5/19	9/13	11/07
太原	17.5	17.0	17.2	16.6	16.6	16.6	-238	-220	-229	4/4	6/13	8/15	10/18
天津	17.0	17.0	17.0	16.4	16.5	16.4	-286	-244	-263	4/1	5/28	9/9	10/30
乌鲁木齐	16.6	17.3	16.9	15.7	16.3	16.0	-272	-238	-257	4/26	*	7/16	9/30
武汉	16.7	16.2	16.4	16.4	16.0	16.2	-276	-250	-265	3/10	5/17	9/28	11/26
西安	17.1	16.5	16.7	16.5	16.2	16.4	-277	-314	-297	3/15	5/24	9/4	11/11
西宁	14.9	14.9	14.9	14.8	14.8	14.8	-252	-236	-246	4.27	—	7/24	9/30
银川	16.8	17.3	17.1	16.1	16.7	16.4	-254	-221	-238	4/5	6/12	8/12	10/15
长春	17.5	16.5	17.0	16.7	16.2	16.4	-277	-256	-265	4/25	6/24	8/17	10/12
长沙	15.6	16.6	16.1	15.4	16.4	15.9	-338	-282	-311	3/5	5/9	9/27	11/28
郑州	17.2	17.0	17.1	16.6	16.5	16.5	-275	-251	-261	3/26	5/19	9/9	11/9
重庆	16.9	16.0	16.4	16.6	15.8	16.2	-283	297	-290	3/2	5/23	9/25	12/3
平均值	16.6	16.7	16.6	16.1	16.3	16.2	-285	-260	-273	—	—	—	—
标准差	1.23	1.06	1.02	1.01	0.92	0.87	37.0	32.5	32.8	—	—	—	—

注：(1) 某一省会城市涉及多个气象站点时，取其平均值；(2) *代表无冬或无夏。

为“桑拿天”。进一步考虑到人体平均皮肤温度大约为33℃这一约束条件，可以将32℃作为“热”体感的温度上限，即认为28~32℃为“热”的温度阈值区间，从而确定其温度耐宽值为4（℃）。

国家标准《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》（GB 50736-2012）将办公室、休息室和食堂等常典型室内场所的冬季供暖气温下限规定为18℃，并在“条文说明”中

指出“18℃无冷感,15℃是产生明显冷感的温度界限”。实际上, *THI* 的经典计算公式中,相对湿度对冷热体感的正向或反向调节作用,就是以14.5℃的生理参数值作为界限的^[30],高于这个温度时,相对湿度越大则 *THI* 值就越大,低于这个温度时,相对湿度越大则 *THI* 值就越小,这也侧面证明了15℃左右是人体冷热感的典型温度分界所在。综上,可以认为15~18℃是“凉”的温度阈值区间,从而确定其温度耐宽值为3(℃)。

国家标准《低温作业分级》(GB/T 14440-1993)将“工作地点平均气温等于或低于5℃”界定为“低温作业”;行业标准《建筑工程冬季施工规程》(JGJ 104-2011)中规定“当室外日平均气温连续5天稳定低于5℃即进入冬期施工,当室外日平均气温连续5天稳定高于5℃时解除冬期施工”;国家标准《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》(GB 50736-2012)中建议“累年日平均温度稳定低于或等于5℃的日数大于或等于90天的地区,宜设置集中供暖”;此外,国家标准《民用建筑热工设计规范》(GB 50176-2016)也将日平均气温小于或等于5℃的天数作为一个地方在“建筑热工设计一级区划”中归属类型的辅助指标。综上,可以将5℃作为“寒”与“冷”的分界温度,并参考“15℃是产生明显冷感的温度界限”这一标准而将“冷”的温度阈值区间界定为5~15℃,从而确定“冷”的温度耐宽值为10(℃)。

表4简要汇总了不同冷热体感等级的温度耐宽值及其设定依据。“寒”与“暑”位于冷热体感等级的两端,作为不舒适等级,其单边阈值分别为“冷”的下限和“热”的上限,不再单独列出。同时,根据“凉”16.6℃的气温锚点值(表3)和3(℃)的耐宽值,将16.6℃作为“凉”的中值,而将3(℃)耐宽值平分后作为其上、下限的延伸区间,在0.5℃的精度水平上,可以计算得到其阈值区间为15.0~18.0℃,并在此基础上根据其他体感等级的耐宽值延展推算出各自的气温阈值区间(表4)。其中,“暖”与“温”共同构成“舒适”等级,其气温阈值区间为18.0~25.0℃,符合人体的日常经验体感。

表4 不同冷热体感等级的温度耐宽值与气温阈值区间

Table 4 Tolerance value and threshold value of temperature on different levels of thermal sensation

体感等级	温度耐宽值/℃	温度耐宽值设定的参考标准(依据)	气温阈值区间/℃	
			调整前(精度0.1)	调整后(精度0.5)
热	4.0	(1) GB/T 18883-2002; (2) 世界气象组织; (3) 中国气象部门; (4) 人体皮肤平均温度	25.1~29.1	25.0~29.0
暖	3.5	“舒适(暖与温)”温度耐宽值设定依据: (1) GB/T 18883-2002; (2) ASHRAE Standard 55-2010	21.6~25.1	21.5~25.0
温	3.5		18.1~21.6	18.0~21.5
凉	3.0	(1) GB 50736-2012 (2) <i>THI</i> 计算公式参数	15.1~18.1	15.0~18.0
冷	10.0	(1) GB 50736-2012; (2) GB/T 14440-1993; (3) JGJ 104-2011; (4) GB 50736-2012; (5) GB 50176-2016	5.1~15.1	5.0~15.0

2.4.2 不同标尺间的耐宽转换

如同“汇率”换算一样,而不同气候舒适度评价标尺在体感耐宽上存在由量纲关系决定的转换关系。*THI*和*WEI*作为冷热体感评价的另外两把标尺,与气温这一常见标尺之间在量纲上的转换关系可由式(1)和式(2)对气温求偏导数进行估算:

$$\frac{\partial THI}{\partial t} = 1 - 0.55(1 - 0.01RH) \quad (3)$$

$$\frac{\partial WEI}{\partial t}=10\sqrt{v}+10.45-v$$

(4)

由式（3）、式（4）可知，单位气温与 THI 之间的量纲转换主要受到相对湿度（ RH ）的影响，单位气温与 WEI 之间的量纲转换主要受到风速（ v ）的影响。因此可以根据实测的相对湿度和风速数据，对 THI 和 WEI 与气温之间在不同体感等级上的耐宽关系进行估算（表5）。

表5 不同冷热体感等级的 THI 耐宽值与 WEI 耐宽值

Table 5 Tolerance value of THI and WEI on different levels of thermal sensation

体感等级	日均气温阈值 区间/℃	省会（全国） 日均相对湿度/%	省会（全国）日 均风速/(m/s)	与单位温度的量纲换算 （据省会数据计算）		体感耐宽值	
				$THI/℃$	$WEI/(kcal/m^2\cdot h)$	$THI/℃$	$WEI/(kcal/m^2\cdot h)$
热	25.0~29.0	75.9 (77.7)	2.14 (2.15)	0.87	22.9	3.5	92
暖	21.5~25.0	73.1 (73.5)	2.14 (2.15)	0.85	22.9	3.0	80
温	18.0~21.5	71.0 (71.2)	2.15 (2.15)	0.84	23.0	2.9	81
凉	15.0~18.0	68.6 (69.5)	2.15 (2.21)	0.83	23.0	2.5	69
冷	5.0~15.0	67.2 (66.8)	2.20 (2.29)	0.82	23.1	8.2	231

注：日均相对湿度和日均风速数据的统计起止时间为1981-2010年，其中省会数据涉及气象站点69个，全国数据涉及气象站点814个。

表5显示，无论相对湿度还是风速，省会城市和全国站点之间在不同体感等级（日均气温阈值范围）上的多年日均值差异甚微，故而以省会城市作为代表进行体感耐宽值的换算。考虑到不同日均气温阈值区间范围内，日均相对湿度和日均风速存在一定差异，因此分别计算了各体感等级上的单位温度与 THI 和 WEI 之间的量纲换算。然后根据量纲换算数值和日均气温耐宽值，计算得到各体感等级的 WHI 耐宽值和 WEI 耐宽值。例如，在“凉”这一体感等级上，1℃的温度值相当于0.83℃的 THI 值和23.0 kcal/m²·h的 WEI 值，此时的温度耐宽为3（℃），从而可计算得到 THI 耐宽值为2.5（℃）而 WEI 耐宽值为69（kcal/m²·h）。

根据“凉”这一典型体感上 THI 和 WEI 的锚点值分别为16.2℃和-273 kcal/m²·h（表3），将其作为“凉”的中值，结合耐宽值计算得到“凉”在 THI 和 WEI 标尺下的阈值区间分别为15.0~17.5℃和-308~-238 kcal/m²·h，进而根据其他体感等级上的耐宽值延展得到各自的阈值区间（表6）。同时，考虑到体感等级标准的简洁性，调整了精度水平，从而得到“暑—热—暖—温—凉—冷—寒”共7级体感水平上 THI 和 WEI 的阈值区间标准（表6）。

3 分级效度:交集验证

冷热体感在不同标尺下的分级阈值是否合理，需要一定的判别标准，一个较有效的方法是与最常见的标尺进行比较，即与温度标尺的经验分级阈值进行测试样本交集验证^[40]。测试样本交集验证的基本思路是：对于待验标尺分级样本集 A_i 与温度标尺分级样本集 B_j （ i, j 为体感等级），计算其子集 $C_{ij}=A_i\cap B_j$ 在 A_i 中的样本比例 $f_{i,j}$ ；对于一个较好的待验标尺分级阈值而言，当 $i=j$ 时， $f_{i,j}$ 应足够大，而当 $i\neq j$ 时， $f_{i,j}$ 应足够小。例如，根据 THI 划分为“凉”的所有样本中，日均气温为15~18℃（“凉”的经验温度阈值区

表6 不同冷热体感等级的 *THI* 阈值区间与 *WEI* 阈值区间
Table 6 Threshold value of *THI* and *WEI* on different levels of thermal sensation

体感等级	<i>THI</i> 阈值区间/℃		<i>WEI</i> 阈值区间/(kcal/m ² ·h)	
	调整前 (精度0.1)	调整后 (精度0.5)	调整前 (精度1)	调整后 (精度10)
暑	≥ 26.9	≥ 27.0	≥ 15	≥ 20
热	[23.4, 26.9)	[23.5, 27.0)	[-77, 15)	[-80, 20)
暖	[20.4, 23.4)	[20.5, 23.5)	[-157, -77)	[-160, -80)
温	[17. 5, 20.4)	[17.5, 20.5)	[-238, -157)	[-240, -160)
凉	[15.0, 17.5)	[15.0, 17.5)	[-308, -238)	[-310, -240)
冷	[6.8, 15.0)	[7.0, 15.0)	[-539, -308)	[-540, -310)
寒	< 6.8	< 7	< -539	< -540

间)的样本占比 ($f_{凉·凉}$) 要足够大, 这样才符合人们对“凉”的日常气温感知, 也是不同标尺刻画冷热体感一致性 (可称之为“是且是”, 既是气温的“凉” 且是 *THI* 的“凉”) 的客观要求使然; 另一方面, *THI* 其他体感等级的样本中, 日均气温为 15~18 ℃ 的样本占比 ($f_{i·凉}$) 应足够小, 这样才能有效减少把气温为“凉”的样本划归到 *THI* “非凉”等级 (可称之为“是而非”) 的错判概率; 同时, 还需要避免将日均气温不在 15~18 ℃ 范围内的样本过多划归到 *THI* 为“凉”的等级 ($f_{凉·j}$ 要小), 减少将“非凉”气温样本划归到 *THI* “凉”等级 (可称为“非而是”) 的错判概率。

根据中国 31 个省会城市 69 个基本 (基准) 气象站点 1981-2010 年间的逐日气象数据, 计算得到测试样本的 *THI* 和 *WEI* 体感分级归属, 并将其与气温分级归属进行交集验证 (表 7、表 8)。

表 7 结果显示, *THI* 与气温在同一体感等级中的样本交集相对较多, 所有 $f_{i,j}$ 值 ($i=j$) 均大于 0.80, 其中在“凉—冷—寒”这三个体感等级上超过 0.9, “是且是”样本占比符合“足够大”的要求; 而当 *THI* 与气温的体感等级不同时, 所有 $f_{i,j}$ 值 ($i \neq j$) 均小于 0.20, 符合“足够小”的要求, 能够有效避免“是而非”和“非而是”这两类错判概率。

表 8 结果显示, *WEI* 与气温在同一体感等级中的样本交集多寡不一, $f_{i,j}$ 值 ($i=j$) 介

表7 七级划分下 *THI* 与气温之间的交集验证
Table 7 Sample intersection between *THI* and air temperature on the 7 levels of thermal sensation

体感等级	<i>THI</i> 样本数/个	<i>THI</i> 分级样本中不同气温阈值区间的样本数 (及占比)						
		≥ 29 ℃	25.0~29.0 ℃	21.5~25.0 ℃	18.0~21.5 ℃	15.0~18.0 ℃	5.0~15.0 ℃	<5 ℃
暑	31961	26196 (0.82)	5765 (0.18)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
热	88764	5174 (0.06)	74414 (0.84)	9176 (0.10)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
暖	91714	82 (0)	9080 (0.10)	76593 (0.84)	5959 (0.06)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
温	89806	0 (0)	18 (0)	9453 (0.11)	78122 (0.87)	2213 (0.02)	0 (0)	0 (0)
凉	68486	0 (0)	0 (0)	0 (0)	5712 (0.08)	62774 (0.92)	0 (0)	0 (0)
冷	207582	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	3597 (0.02)	195452 (0.94)	8533 (0.04)
寒	168932	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	12793 (0.08)	156139 (0.92)

表8 七级划分下WEI与气温之间的交集验证

Table 8 Sample intersection between WEI and air temperature in the 7 levels of thermal sensation								
体感等级	WEI样本数/个	WEI分级样本中不同气温阈值区间的样本数（及占比）						
		≥ 29 ℃	25.0~29.0 ℃	21.5~25.0 ℃	18.0~21.5 ℃	15.0~18.0 ℃	5.0~15.0 ℃	<5 ℃
暑	46379	27135 (0.59)	18997 (0.41)	247 (0.01)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
热	75887	4063 (0.05)	43442 (0.57)	25344 (0.33)	3012 (0.04)	26 (0)	0 (0)	0 (0)
暖	81288	185 (0)	22304 (0.27)	31902 (0.39)	21714 (0.27)	4564 (0.06)	619 (0.01)	0 (0)
温	91232	0 (0)	4338 (0.05)	30808 (0.34)	30201 (0.33)	17059 (0.19)	8826 (0.10)	0 (0)
凉	76202	0 (0)	13 (0)	6546 (0.09)	25067 (0.33)	21303 (0.28)	23168 (0.30)	1607 (0)
冷	207614	0 (0)	0 (0)	218 (0)	9664 (0.05)	25506 (0.12)	141851 (0.68)	30375 (0.15)
寒	167292	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	22 (0)	33407 (0.20)	133863 (0.80)

于0.28~0.80之间，其中在“暖—温—凉”这三个体感等级上均小于0.5，“是且是”样本占比总体上不符合“足够大”的要求；此外，当WEI与气温的体感等级不同时，又存在很多 $f_{i,j}$ 值（ $i \neq j$ ）较大的情况，不符合“足够小”的要求。例如，在“凉”这一体感等级上， $f_{凉·凉}=0.28$ （“是且是”占比），既小于 $f_{凉·暖}=0.33$ 也小于 $f_{凉·冷}=0.30$ （“非而是”占比）的水平，分级效果不理想。这表明WEI在7级水平下的体感分级识别能力不足，一种可行的优化方法是减少分级数目，即对邻近的体感等级进行合并，以提高WEI的分级识别能力。参考表2的5级舒适性分级，将“暖—温”合并为“舒适”，“凉—冷”合并为“冷”，再次对测试样本进行交集验证（表9）。

表9结果显示，在优化分级后，WEI与气温在同一体感等级中的样本交集显著增多，所有 $f_{i,j}$ 值（ $i=j$ ）均大于0.5，“是且是”样本占比总体上具有了“足够大”的特点。不过此时， $f_{暑·热}=0.41$ 而 $f_{热·舒适}=0.37$ ，也就是说在“暑”和“热”这两个偏热等级上，“非而是”占比略微偏高，这可能反映了WEI脱胎于风寒指数（Wind Chill Index, WCI）^[30]，相

表9 五级划分下WEI与气温之间的交集验证

Table 9 Sample intersection between WEI and air temperature in the 5 levels of thermal sensation						
体感等级	WEI样本数/个	WEI分级样本中不同气温阈值区间的样本数（及占比）				
		≥ 29 ℃	25.0~29.0 ℃	18.0~25.0 ℃	5.0~18.0 ℃	<5 ℃
暑	46379	27135 (0.59)	18997 (0.41)	247 (0.01)	0 (0)	0 (0)
热	75887	4063 (0.05)	43442 (0.57)	28356 (0.37)	26 (0)	0 (0)
舒适(“暖—温”)	172520	185 (0)	26642 (0.15)	114625 (0.66)	31068 (0.18)	0 (0)
冷(“凉—冷”)	283816	0 (0)	13 (0)	41495 (0.15)	211828 (0.75)	30480 (0.11)
寒	167292	0 (0)	0 (0)	0 (0)	33429 (0.20)	133863 (0.80)

对而言更适宜偏冷环境的评价（GB/T 27963-2011）。

总之，上述交集验证表明，在气候舒适度评价的实践中，可基于 *THI* 开展“暑—热—暖—温—凉—冷—寒”等7级体感划分，而 *WEI* 可能更适用“暑—热—舒适—冷—寒”等5级划分标准。

4 应用案例：中国

如果按照舒适性，从暑到寒的冷热体感分级可以划分为“热不舒适—亚舒适—舒适—亚舒适—冷不舒适”等5个等级（表2），其中作为理想状态的“舒适”和作为极端状态的“不舒适”具有突出的人居环境指示意义。因此，合并“暖—温”等级，将 $[17.5, 23.5)^\circ\text{C}$ 和 $[-240, -80) \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ 的阈值区间分别定义为 *THI* 和 *WEI* 的“舒适”；将“暑”（ $THI \geq 27^\circ\text{C}$ ， $WEI \geq 20 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ ）定义为“热不舒适”，将“寒”（ $THI < 7^\circ\text{C}$ ， $WEI < -540 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ ）定义为“冷不舒适”。本文以中国为例，在此标准下判定某地某日的舒适性状态归属，并通过某个时间段内天气舒适日数（/不舒适日数）的累加来计算其舒适期（/不舒适期）^[26]。

4.1 全国格局

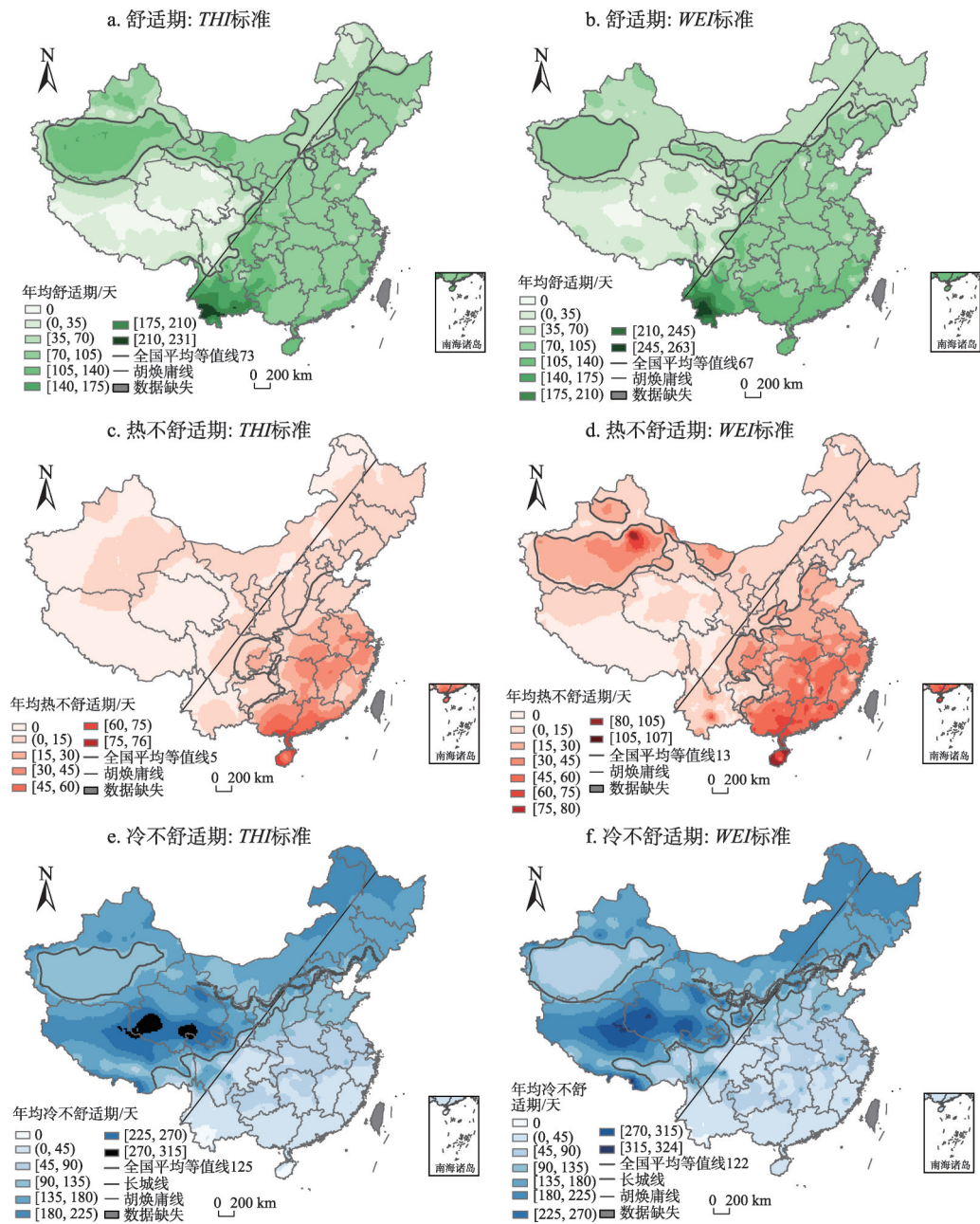
通过 ArcGIS 对全国814个基本（基准）气象站点进行泰森多边形划分，并以泰森多边形面积为权重对相应气象站点的舒适期（/不舒适期）进行加权求和，从而得到全国的舒适期（/不舒适期）状况（表10）。

表 10 1981-2010 年中国年均气候舒适期与不舒适期										
Table 10 Average annual comfortable and uncomfortable periods on climate in China during 1981-2010 (天)										
气候舒适性状态	全年		春（3-5月）		夏（6-8月）		秋（9-11月）		冬（12-2月）	
	<i>THI</i>	<i>WEI</i>	<i>THI</i>	<i>WEI</i>	<i>THI</i>	<i>WEI</i>	<i>THI</i>	<i>WEI</i>	<i>THI</i>	<i>WEI</i>
舒适期（暖与温）	73.2	67.8	16.0	16.3	41.2	31.3	14.8	17.9	1.2	2.4
热不舒适期（暑）	5.6	13.4	0.2	0.8	5.1	11.4	0.3	1.2	0	0
冷不舒适期（寒）	125.6	122.7	24.4	30.0	1.2	3.1	28.2	24.2	71.9	65.4

表10显示，在 *THI* 和 *WEI* 两种标尺下，全国评价结果具有较好的一致性，其中舒适期约65~75天、热不舒适期约5~15天、冷不舒适期约120~130天，总体上不舒适期远长于舒适期、冷不舒适期远长于热不舒适期，国土空间在人居环境气候舒适状态水平上并不具备总体优势。从季节分布上看，春、秋两季的舒适期约为冷不舒适期1/2到3/4的水平，而热不舒适期极短；冬季舒适期极短而热不舒适期为0，但冷不舒适期约65~75天，接近全年舒适期水平；夏季是舒适期超过不舒适期的唯一季节，冷不舒适期极短而热不舒适期也不长，成为全年最好季节。

进一步，对中国814个基本（基准）气象站点1981-2010年间平均的气候舒适/不舒适期进行 ArcGIS 普通克里金插值，得到其空间分布格局（图3）。为符合人们日常感知，绿色表示舒适，红色表示热不舒适，蓝色表示冷不舒适；色调越深代表舒适期和热/冷不舒适期的天数越多，色调越浅则代表舒适期和热/冷不舒适期的天数越少。由图可知：

（1）舒适期（图3a、图3b）。全国舒适期整体上呈现为“南方长、北方短、青藏缺”



次成为云南“四季如春”的注脚;毗邻的青藏高原却成为舒适期最短的区域,其内部存在不少0值地区,成为全国舒适期“洼地”,难以为人居活动和旅游发展带来积极影响。

(2) 热不舒适期(图3c、图3d)。全国热不舒适期呈现为“东南长、西北短”的总体格局,低纬度的海南、广东、广西成为热不舒适期的高值中心,其中海南三沙地区的热不舒适期最为突出(实测 THI 为129天、 WEI 为136天),比较适合开展海滨旅游、水上运动等一些需要较高热环境的活动;长江中下游流域似乎也具有较长的热不舒适期,成为夏季一些典型“火炉”城市的集中地。不过, THI 和 WEI 的测算结果在新疆地区出现较大差异,尤其是在吐鲁番地区, WEI 出现高值中心(实测 THI 为2.2天、 WEI 为67天),显示出两个指数在该地高温、低湿度、强日照等条件下,不易达成一致性的体感舒适度评价结果。

(3) 冷不舒适期(图3e、图3f)。全国冷不舒适期呈现为“西北长、东南短”的总体格局,就其等值线而言,胡焕庸线与长城线似乎成为两条重要的控制线。高海拔的青藏高原成为冷不舒适期的极值中心(其中,青海省实测 THI 为202天、 WEI 为192天,西藏自治区实测 THI 为170天、 WEI 为164天),高纬度的东北、内蒙古和新疆北部地区也有着较长的冷不舒适期,对人居活动和旅游发展形成了较大抑制;中国东南部冷不舒适期较短,纬度越低冷不舒适期越不明显,特别是海南岛和云南南部,冷不舒适期几乎为0,发展避寒产业的气候条件十分优越。

4.2 历时变化

本文对1981-2010年全国年平均舒适期和不舒适期历年变化进行计算,结果表明 THI 和 WEI 两种标尺下的波动起伏情况具有较好的一致性(图4)。总体上看,热不舒适期(图4a)保持稳定,冷不舒适期(图4b)波动下降,舒适期(图4c)则波动上升。中国作为全球气候变化的敏感区之一,舒适期和不舒适期均对气候变暖有着不同程度的响应,以 THI 为例,后15年(1996-2010年)相对前15年(1981-1995年)而言,年均舒适期增加了5.7天(说明:5.7天是前后15年的差值,相当于每年增加0.38天,下同),年均冷不舒适期减少了7.9天,年均热不舒适期增加0.4天。虽然舒适期增幅较大且冷不舒适期降幅明显,但总体上中国大陆仍是不舒适期远长于舒适期、冷不舒适期远长于热不舒适期。

本文还以 THI 为例,计算了所有气象站点1996-2010年(后15年)与1981-1995年(前15年)这两个阶段划分下气候舒适期和不舒适期均值之间的差值(简称两阶段差

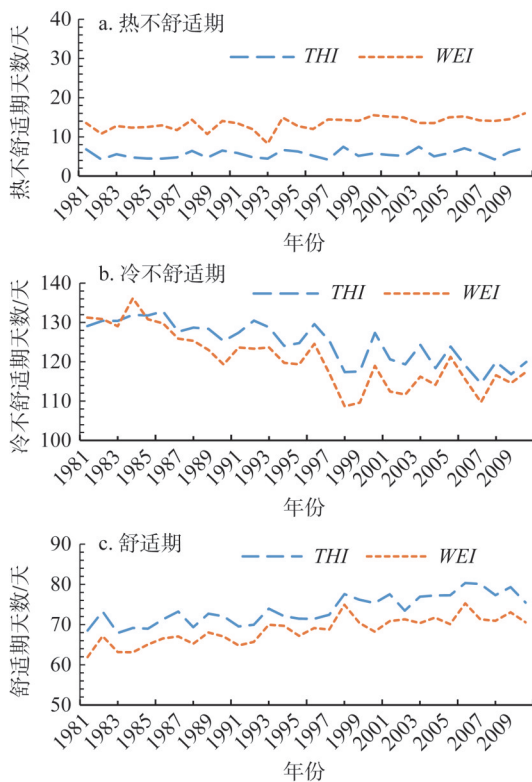


图4 1981-2010年中国年均舒适期和不舒适期的历年变化

Fig. 4 Annual average comfortable and uncomfortable periods in China during 1981-2010

值),并对该差值进行了空间插值(图5)。

结果表明:(1)热不舒适期(图5a)的增加与减少在空间上可谓“平分秋色”,增加的地区主要位于“胡焕庸线”以东,其中长江中下游和东南沿海地区增幅最明显。(2)冷不舒适期(图5b)除了海南岛及邻近地区外,在全国呈现“一片倒”的减少趋势,其中秦岭—淮河一带的降幅较为突出。(3)舒适期(图5c)除了在京冀及其周边地区有小幅减少外,全国大部分地区呈现为增加态势,这与李山等^[26]的研究结果“大同”而“小异”。无论北方还是南方,均出现了一些舒适期增幅较大的地带,或可对当地旅游业等相关产业发展具有积极的促进作用。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文针对气候舒适度评价中的体感分级标准问题,提出了包含“定级一定名一定点一定宽”等基本环节的“季节锚点法”这一新的体感分级思路,并基于中国大陆1981-2010年间814个基本(基准)气象站点的日值气象数据,以温湿指数和风效指数为例开展实证研究,结果表明:

(1)理论上,“暑—热—暖—温—凉—冷—寒”的7级体感划分符合普通大众冷热感受并能体现中国传统认知经验,具有一定的全国普适性;应用中,可将“暖—温”两个等级合并定义为“舒适”,将“暑”与“寒”分别定义为“热不舒适”与“冷不舒适”。

(2)模型上,对温湿指数而言,“暑—热—暖—温—凉—冷—寒”等7级体感划分下的6个分界值为“27.0℃, 23.5℃, 20.5℃, 17.5℃, 15.0℃, 7.0℃”;对于风效指数而言,“暑—热—舒适—冷—寒”等5级体感划分更为适宜,相应的4个分界值为“20 kcal/m²·h, -80 kcal/m²·h, -240 kcal/m²·h, -540 kcal/m²·h”。

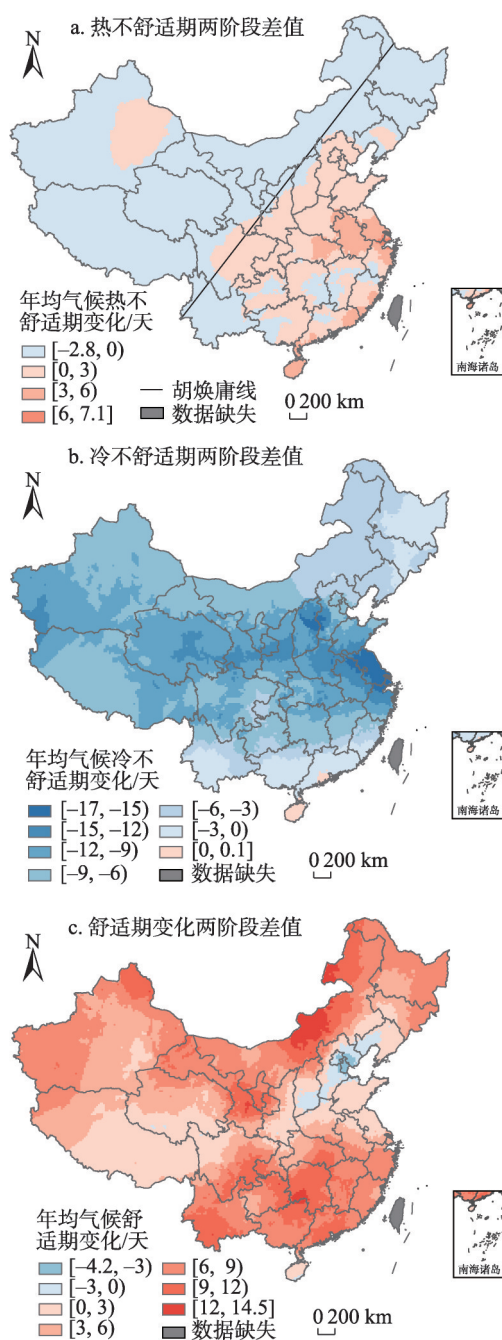


图5 1981-2010年中国大陆年均气候舒适期与不舒适期变化的空间格局

Fig. 5 Spatial evolution of the annual average comfortable and uncomfortable periods in China during 1981-2010

(3) 案例上, 基于温湿指数和风效指数对中国大陆的体感分级评价结果具有较好的一致性, 其中全国年均舒适期约 65~75 天并在整体上呈现为“南方长、北方短、青藏缺”的空间格局, 年均热不舒适期约 5~15 天并在整体上呈现为“东南长、西北短”的空间格局, 年均冷不舒适期约 120~130 天并在整体上呈现为“西北长、东南短”的空间格局。从 1981-2010 年的历时变化看, 热不舒适期基本保持稳定、冷不舒适期波动下降而舒适期则波动上升, 这在空间上也有对应体现。

5.2 讨论

本文提出的“季节锚点法”对气候舒适度体感分级的探索虽然取得了一些积极发现, 但在细分人群、测试模型和区域差异等方面均值得进一步深入探索。

(1) “因人而异”的探索。“季节锚点法”主要回应了体感分级“因地制宜”这一客观要求, 缺乏对“因人而异”的考量, 未能体现年龄、性别和体重等个体差异在体感分级标准上的不同。例如, 老年群体相对而言更适宜偏暖的气候环境, 其体感“舒适”(暖—温)的阈值区间在指标数值上很可能应该高于目前的平均值才是合理的。根据国家统计局发布的《2018 年国民经济和社会发展统计公报》, 2018 年末, 全国 60 岁及以上老年人口 24949 万人, 占总人口的 17.9%, 其中 65 岁及以上人口 16658 万人, 占总人口的 11.9%, 整体上已经迈入老龄社会。因此, 针对不同细分人群尤其是老年群体开展体感分级标准研究, 将是一个富有意义而值得探索的方向。

(2) 其他模型的测试。本文以温湿指数 (*THI*) 和风效指数 (*WEI*) 为例开展了“季节锚点法”的测试, 为这两个评价指数分别制定了 7 级和 5 级体感分级标准。然而, *THI* 和 *WEI* 均属于“经验模型”的范畴, 缺乏针对“机理模型”的测试分析。在当今气候舒适度评价的理论研究和实践应用中, 以生理等效温度 (*PET*)、预测平均投票数—预测不满意百分数 (*PMV-PPD*) 和通用热气候指数 (*UTCI*) 等为代表的机理模型渐成主流。因此, 在未来的研究中需要积极拓展“季节锚点法”对其他气候舒适度评价指数的适宜性, 特别在经典机理模型体感分级标准制定中的适宜性, 以进一步夯实该方法的普适性。

(3) 地方标准的制定。“季节锚点法”主要针对中国区域的整体状况, 提出了一个相对普适性的体感分级标准。然而, 中国国土辽阔且地域差异显著, 在长期人地关系演化中形成了差异性的环境适应类型。例如, 东北地区人群对低温环境具有更强的适应性, 其“舒适”等级的体感阈值区间在指标数值上很可能低于中国西南地区。因此, 在未来的研究中, 可以将中国划分为若干人地关系类型区域, 深入考察各地人群对气候适应性的差异特点, 探索制定基于不同气候舒适度评价指数的地方性体感分级标准, 提升气候舒适度评价分级的地域针对性水平。

参考文献(References):

- [1] ANSI/ASHRAE Standard 55-2010. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2010: 2-4.
- [2] SHINDELL D, KUYLENTIERN A J C I, VIGNATI E, et al. Simultaneously mitigating near-term climate change and improving human health and food security. *Science*, 2012, 335(6065): 183-189.
- [3] SERRAO-NEUMANN S, SCHUCH G, HARMAN B, et al. One human settlement: A transdisciplinary approach to climate change adaptation research. *Futures*, 2014, 65: 97-109.
- [4] DE FREITAS C R, GRIGORIEVA E A. A comprehensive catalogue and classification of human thermal climate indices. *International Journal of Biometeorology*, 2015, 59(1): 109-120.

- [5] MIDDEL A, HÄB K, BRAZEL A J, et al. Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones. *Landscape & Urban Planning*, 2014, 122(2): 16-28.
- [6] CHEN L, WEN Y, ZHANG L, et al. Studies of thermal comfort and space use in an urban park square in cool and cold seasons in Shanghai. *Building & Environment*, 2015, 94: 644-653.
- [7] CHANDEL S S, SHARMA V, MARWAH B M. Review of energy efficient features in vernacular architecture for improving indoor thermal comfort conditions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 65: 459-477.
- [8] RUPP R F, VÁSQUEZ N G, LAMBERTS R. A review of human thermal comfort in the built environment. *Energy & Buildings*, 2015, 105: 178-205.
- [9] DJUKIC A, VUKMIROVIC M, STANKOVIC S. Principles of climate sensitive urban design analysis in identification of suitable urban design proposals. Case study: Central zone of Leskovac competition. *Energy & Buildings*, 2016, 115: 23-35.
- [10] 张德顺, 王振. 高密度地区广场冠层小气候效应及人体热舒适度研究: 以上海创智天地广场为例. *中国园林*, 2017, 33(4): 18-22. [ZHANG D S, WANG Z. Micro-climate effect and human thermal comfort of square canopy in dense habitat: A case study of Shanghai knowledge and innovation community square. *Chinese Landscape Architecture*, 2017, 33(4): 18-22.]
- [11] PARSONS K. *Human Thermal Environments: The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance*. New York: CRC Press, 2014.
- [12] SONG C, LIU Y, ZHOU X, et al. Temperature field of bed climate and thermal comfort assessment based on local thermal sensations. *Building and Environment*, 2016, 95: 381-390.
- [13] RIDDERSTAAT J, ODUBER M, CROES R, et al. Impacts of seasonal patterns of climate on recurrent fluctuations in tourism demand: Evidence from Aruba. *Tourism Management*, 2014, 41(2): 245-256.
- [14] 余志康, 孙根年, 罗正文, 等. 40°N以北城市夏季气候舒适度及消暑旅游潜力分析. *自然资源学报*, 2015, 30(2): 327-339. [YU Z K, SUN G N, LUO Z W, et al. An analysis of climate comfort degree and tourism potential power of cities in Northern China in summer to the north of 40°N. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(2): 327-339.]
- [15] NALAU J, BECKEN S, NOAKES S, et al. Mapping tourism stakeholders' weather and climate information seeking behavior in Fiji. *Weather Climate & Society*, 2017, 9(3): 377-391.
- [16] 曾瑜哲, 钟林生, 刘汉初, 等. 国外气候变化对旅游业影响的定量研究进展与启示. *自然资源学报*, 2019, 34(1): 205-220. [ZENG Y X, ZHONG L S, LIU H C, et al. Implications of overseas quantitative studies of climate change impact on tourism for domestic research. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(1): 205-220.]
- [17] FANGER P O. *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*. Copenhagen. Denmark: Danish Technical Press, 1970.
- [18] HÖPPE P. The physiological equivalent temperature: A universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 1999, 43(2): 71-75.
- [19] LEITES G T, SEHL P L, CUNHA G D S, et al. Responses of obese and lean girls exercising under heat and thermoneutral conditions. *Journal of Pediatrics*, 2013, 162(5): 1054-1060.
- [20] SCHELLEN L, VAN MARKEN LICHTENBELT W D, LOOMANS M G, et al. Differences between young adults and elderly in thermal comfort, productivity, and thermal physiology in response to a moderate temperature drift and a steady-state condition. *Indoor Air*, 2010, 20(4): 273-283.
- [21] LISJE S, MARCEL G, MARTIN H, et al. Effects of different cooling principles on thermal sensation and physiological responses. *Energy Build*, 2013, 62(4): 116-125.
- [22] KATAFYGIOTOU M C, SERGHIDES D K. Thermal comfort of a typical secondary school building in Cyprus. *Sustainable Cities & Society*, 2014, 13: 303-312.
- [23] IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge & New York: Cambridge University Press, 2013.
- [24] 秦大河, STOCKER T. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点总结. *气候变化研究进展*. 2014, 10(1): 1-6. [QIN D H, STOCKER T. Highlights of the IPCC working group I fifth assessment report. *Advances in Climate Change Research*, 2014, 10(1): 1-6.]

- [25] 孔钦钦, 葛全胜, 郑景云. 中国极端通用热气候指数的时空变化. 地理研究, 2017, 36(4): 1171-1182. [KONG Q Q, GE Q S, ZHENG J Y. Spatio-temporal changes in extreme UTCI indices in China. Geographical Research, 2017, 36(4): 1171-1182.]
- [26] 李山, 孙美淑, 张伟佳, 等. 中国大陆 1961-2010 年间气候舒适期的空间格局及其演变. 地理研究, 2016, 35(11): 2053-2070. [LI S, SUN M S, ZHANG W J, et al. Spatial patterns and evolving characteristics of climate comfortable period in the mainland of China: 1961-2010. Geographical Research, 2016, 35(11): 2053-2070.]
- [27] 唐进时, 申双和, 华荣强, 等. 热气候指数评价中国南方城市夏季舒适度. 气象科学, 2015, 35(6): 769-774. [TANG J S, SHEN S G, HUA R Q, et al. Assessment on summer comfort level of southern cities in China by UTCI. Journal of the Meteorological Sciences, 2015, 35(6): 769-774.]
- [28] THOM E C. A new concept of cooling degree days. Air Condition: Heat & Ventilation, 1957, 54(6): 73-80.
- [29] TERJUNG W H. Physiologic climates of the conterminous United States: A bioclimatic classification based on man. Annals of the Association of American Geographers, 1966, 56(1): 141-179.
- [30] TERJUNG W H. The geographical application of some selected physio-climatic indices to Africa. International Journal of Biometeorology, 1967, 11(1): 5-19.
- [31] COCCOLO S, KÄMPF J, SCARTEZZINI J L, et al. Outdoor human comfort and thermal stress: A comprehensive review on models and standards. Urban Climate, 2016, 18: 33-57.
- [32] MATZARAKIS A, MAYER H. Another kind of environmental stress: Thermal stress. New Sletters, 1996, 18: 7-10.
- [33] COHEN P, POTCHTER O, MATZARAKIS A. Human thermal perception of Coastal Mediterranean outdoor urban environments. Applied Geography, 2013, 37(1913): 1-10.
- [34] LIN T P, MATZARAKIS A, HWANG R L. Shading effect on long-term outdoor thermal comfort. Building & Environment, 2010, 45(1): 213-221.
- [35] MCGREGOR G R, NIEUWOLT S. Tropical climatology: An introduction to the climates of the low latitudes. England: John Wiley and Sons Ltd, 1998: 56-57.
- [36] AULICIEMS A, DEDEAR R. Air conditioning in a tropical climate: Impacts upon European residents in Darwin, Australia. International Journal of Biometeorology, 1986, 30(3): 259-282.
- [37] DE DEAR R J, LEOW K G, AMEEN A. Thermal comfort in the humid tropics-part I: Climate chamber experiments on thermal acceptability in Singapore. Ashrae Transactions, 1991, 97(1): 874-879.
- [38] DE DEAR R J, LEOW K G, AMEEN A. Thermal comfort in the humid tropics-part II: Climate chamber experiments on thermal acceptability in Singapore. Ashrae Transactions, 1991, 97(1): 880-886.
- [39] 孙美淑, 李山. 气候舒适度评价的经验模型: 回顾与展望. 旅游学刊, 2015, 30(12): 19-34. [SUN M S, LI S. Empirical indices evaluating climate comfortableness: Review and prospect. Tourism Tribune, 2015, 30(12): 19-34.]
- [40] DE DEAR R J, AULICIEMS A. Validation of the predicted mean vote model of thermal comfort in six Australian field studies. Ashrae Transactions, 1985, 91(1): 452-468.
- [41] SCHILLER G E. A comparison of measured and predicted comfort in office buildings. Ashrae Trans, 1990, 96(1): 609-622.
- [42] CHAN D W T, BURNETT J, DEAR R J D, et al. Large-scale survey of thermal comfort in office premises in Hong Kong. Ashrae Transactions, 1998, 104(1): 1172-1180.
- [43] 夏一哉, 赵荣义, 江亿. 北京市住宅环境热舒适研究. 暖通空调, 1999, 29(2): 1-5. [XIA Y Z, ZHAO R Y, JIANG Y. Thermal comfort in naturally ventilated houses in Beijing. Heating Ventilating & Air Conditioning, 1999, 29(2): 1-5.]
- [44] PARSONS K. Human Thermal Environments: The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance. UK: CRC Press, 2003: 123-127.
- [45] 闫海燕, 李洪瑞, 陈静, 等. 高原气候对人体热适应的影响研究. 建筑科学, 2017, 8: 29-34. [YAN H Y, LI H R, CHEN J, et al. Research on influences of plateau climate on thermal adaptation of human body. Building Science, 2017, 8: 29-34.]
- [46] 魏冬雪, 刘滨谊. 上海创智天地广场热舒适分析与评价. 中国园林, 2018, 34(2): 5-12. [WEI D X, LIU B Y. The analysis and evaluation of thermal comfort at Shanghai knowledge & innovation community square. Chinese Landscape Architecture, 2018, 34(2): 5-12.]
- [47] BLAZEJCZYK K, EPSTEIN Y, JENDRITZKY G, et al. Comparison of UTCI to selected thermal indices. International

- Journal of Biometeorology, 2012, 56(3): 515-535.
- [48] JENDRITZKY G, DE DEAR R, HAVENITH G. UTCI: Why another thermal index. *International Journal of Biometeorology*, 2012, 56(3): 421-428.
- [49] BLĄŻEJCZYK K, JENDRITZKY B G, BRÖDE B P, et al. An introduction to the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *Geographia Polonica*, 2013, 86(1): 5-10.
- [50] 冯锡文, 何春霞, 方赵嵩, 等. 室外热舒适的研究现状. *中国园林*, 2017, 33(12): 152-158. [FENG X W, HE C X, FANG Z S, et al. Present research on outdoor thermal comfort. *Building Science*, 2017, 33(12): 152-158.]
- [51] DE FREITAS C R, GRIGORIEVA E A. A comprehensive catalogue and classification of human thermal climate indices. *International Journal of Biometeorology*, 2015, 59(1): 109-120.
- [52] BRAKE R, BATES G. A valid method for comparing rational and empirical heat stress indices. *Annals of Occupational Hygiene*, 2002, 46(2): 165-174.
- [53] BLĄŻEJCZYK K, EPSTEIN Y, JENDRITZKY G, et al. Comparison of UTCI to selected thermal indices. *International Journal of Biometeorology*, 2012, 56(3): 515-535.
- [54] 闫业超, 岳书平, 刘学华, 等. 国内外气候舒适度评价研究进展. *地球科学进展*, 2013, 28(10): 1119-1125. [YAN Y C, YUE S P, LIU X H, et al. Advances in assessment of bioclimatic comfort conditions at home and abroad. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(10): 1119-1125.]
- [55] MAYER H, HÖPPE P. Thermal comfort of man in different urban environments. *Theoretical & Applied Climatology*, 1987, 38(1): 43-49.
- [56] JENDRITZKY G, DE DEAR R, HAVENITH G. UTCI: Why another thermal index?. *International Journal of Biometeorology*, 2012, 56(3): 421-428.
- [57] BRODE P, FIALA D, BLĄŻEJCZYK K, et al. Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International Journal of Biometeorology*, 2012, 56(3): 481-494.
- [58] 保继刚, 楚义芳. 旅游地理学(第三版). 北京: 高等教育出版社, 2012: 125-129. [BAO J G, CHU Y F. *Tourism Geography (The 3rd Edition)*. Beijing: Higher Education Press, 2012: 125-129.]
- [59] 范业正, 郭来喜. 中国海滨旅游地气候适宜性评价. *自然资源学报*, 1998, 13(4): 304-311. [FAN Y Z, GUO L X. The climate suitability of tourism at the coastline destinations of China. *Journal of Natural Resources*, 1998, 13(4): 304-311.]
- [60] 刘青春, 王铮, 许世远. 中国城市旅游气候舒适性分析. *资源科学*, 2007, 29(1): 133-141. [LIU Q C, WANG Z, XU S Y. Climate suitability index for city tourism in China. *Resources Science*, 2007, 29(1): 133-141.]
- [61] 马丽君, 孙根年, 李馥丽, 等. 陕西省旅游气候舒适度评价. *资源科学*, 2007, 29(6): 40-44. [MA L J, SUN G N, LI F L, et al. Evaluation of tourism climate comfortableness in Shanxi province. *Resources Science*, 2007, 29(6): 40-44.]
- [62] 王德瀚. 我国南方体感温度(温湿指数)分布的气候学特征. *热带地理*, 1986, 6(1): 38-44. [WANG D H. Climatological features of physical sensation temperature (temperature-humidity index) distribution in South China. *Tropical Geography*, 1986, 6(1): 38-44.]
- [63] KYLE W J. The human bioclimate of Hong Kong. In: Brazdil R, Kolar M (eds.). *Proceedings of the Contemporary Climatology Conference*. Brno: Tisk Litera, 1994: 345-350.
- [64] 李秋, 仲桂清. 环渤海地区旅游气候资源评价. *干旱区资源与环境*, 2005, 19(2): 149-153. [LI Q, ZHONG G Q. Evaluation on climate resource for tourism in the region around Bohai. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2005, 19(2): 149-153.]
- [65] SIPLE P A, PASSEL C F. Measurements of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 1945, 89(1): 177-199.
- [66] DE FREITAS C. Human climates of Northern China. *Atmospheric Environment*, 1979, (13): 71-77.
- [67] 金招芬, 朱颖心. 建筑环境学. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001. [JIN Z F, ZHU Y X. *Built Environment*. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001.]
- [68] COCCOLO S, KÄMPF J, SCARTEZZINI J L, et al. Outdoor human comfort and thermal stress: A comprehensive review on models and standards. *Urban Climate*, 2016, 18: 33-57.

Scale of human thermal sensation using seasonal anchor method: A Chinese case study

YU Dan-dan^{1,2}, LI Shan^{1,2,3}

(1. School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China;

2. Key Laboratory of Geographic Information Science, Ministry of Education, Shanghai 200241, China;

3. Institute of Eco-Chongming, Shanghai 200062, China)

Abstract: Climatic comfort or human thermal comfort has a far-reaching impact on human settlements and human activities. A number of thermal indexes are widely applied in the fields of architectural design, urban planning, human health, and tourism development. As an indispensable and critical part of climatic comfort assessment, scale of thermal sensation not only greatly affects the validity of a thermal index, but also makes the comparison among different thermal indexes possible. At present, a few traditional scales of thermal sensation are generally used for the climatic comfort assessment in different regions without any localized adjustment. Alternatively, experimental investigation and questionnaire survey are adopted to formulate the scale of thermal sensation for a certain area. Therefore, a new approach named "seasonal anchor method" is proposed in this paper, which includes 4 steps -- "grading, naming, anchoring, and projecting". Furthermore, based on the long term daily meteorological data (from 1981 to 2010) from 814 national basic meteorological observing stations throughout China, a case study is carried out. In this study, a 7-level scale of thermal sensation, which includes "torrid, hot, warm, neutral, cool, cold, and frozen", is proposed. Meanwhile, the threshold values of each level of thermal sensation for THI (temperature and humidity indexes) and WEI (wind effect index), which can be adopted as a national standard, are generated. Finally, climate-comfortable period and climate-uncomfortable period in China are evaluated, which brings us some meaningful discoveries.

Keywords: human thermal comfort; thermal index; climatic comfort; climate-comfortable period; THI; WEI; national standard