

# 江苏地区夏季高温舒适度模型建立及效果检验

喻丽<sup>1</sup> 李萌<sup>2</sup> 褚荣浩<sup>3</sup> 熊美美<sup>4</sup>

(1 南通市通州区气象局, 南通 226300; 2 郑州航空工业管理学院民航学院, 郑州 450015;  
3 河南省气象科学研究所, 郑州 450003; 4 吕泗国家基准气象站, 南通 226200)

**摘要:** 分析2000—2021年江苏24个站点实测资料, 提取气象要素对舒适度影响的主成分, 在人体舒适度指数(CIHB)的基础上, 利用非线性回归法建立了以太阳日总辐射、气温日较差、连续高温日数为主导因子的夏季高温舒适度指数模型, 将舒适度指数分级、分类并分析其时空演变特征。结果表明: 气象要素对舒适度的影响主要有四大主成分, 分别与温度、日照和辐射、湿度及风速有关; 各站舒适度模型决定系数 $R^2$ 均在0.800以上, 拟合效果较好; 2000—2021年舒适度指数时间上呈现波动上升趋势, 空间上, 沿江苏南地区夏季舒适度指数最高, 江淮之间地区其次, 而江苏夏季相对舒适区域为淮北地区。

**关键词:** 主成分分析, 舒适度模型, 模型检验, 时空特征

中图分类号: P4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.05.009

## Establishment and Effectiveness Testing of Summer Comfortability Model in Jiangsu

Yu Li<sup>1</sup>, Li Meng<sup>2</sup>, Chu Ronghao<sup>3</sup>, Xiong Meimei<sup>4</sup>

(1 Tongzhou Meteorological Bureau, Nantong 226300; 2 School of Civil Aviation, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450015; 3 Henan Institute of Meteorological Sciences, Zhengzhou 450003; 4 China Lüsi National Meteorological Station, Nantong 226200)

**Abstract:** Based on the analysis of the measured data at 24 stations in Jiangsu Province from 2000 to 2021, the principal components of the impact of meteorological factors on comfortability are extracted. On the basis of CIHB (Comfort Index of Human Body), a summer high temperature comfortability index model with the daily solar radiation, the daily temperature range and the continuous days of high temperature as the leading factors is established by using nonlinear regression method. The comfortability index is graded and categorized, and its spatio-temporal evolution characteristics are analyzed. The results show that meteorological factors have four main principal components on comfortability, which are related to temperature, sunlight and radiation, humidity, and wind speed; The coefficient of determination  $R^2$  of the comfortability model for each station is above 0.800, indicating a good fitting effect; The comfortability index has shown a fluctuating upward trend from 2000 to 2021. The summer comfortability index in the areas along the Yangtze River and in Sunan is the highest. The comfortability index in the areas between the Yangtze River and Huai River ranks the second. The relatively comfortable zone for the summer lies in the areas to the north of Huai River.

**Keywords:** principal component analysis, comfortability model, model verification, spatio-temporal feature

### 0 引言

天气气候条件与国家安全、社会稳定、经济发展及人们的生活质量都有着密切联系, 也是影响一个地区农业、旅游业及康养产业发展的重要因素<sup>[1]</sup>。1950年至今, 全球高温热浪发生频次明显增加。近几十年, 中国高温热浪愈加频繁, 尤其是西南、华南等地区。其次, 新疆、长江中下游以南地区也受到热浪的严重影响, 为热浪频次高值区<sup>[2]</sup>。2013年夏季, 我

国南方地区遭遇罕见持续的高温热浪天气, 此次高温过程覆盖范围广、强度强、持续时间长、降水日数和降水量少、蒸发量大, 导致旱情快速发展, 给经济发展、生产生活的方方面面都带来了负面影响, 尤其是农林业损失严重<sup>[3]</sup>。2015年欧洲遭遇500年来最强的一次热浪, 阿尔卑斯雪山因高温而融化<sup>[4]</sup>。2018年7月, 北半球天气气候异常, 极端气候事件频发。北非、欧洲、东亚以及北美洲的大部分地区均出现严重的高温热浪天气<sup>[5]</sup>。2022年夏季, 中国大范围地区遭受高温热浪侵袭, 高温综合强度为1961年有完整观测记录以来最强, 干旱发生范围为1961年以来同期最广, 长江干流出现“汛期干枯”的罕见现象, 江河水位达近百

收稿日期: 2023年6月6日; 修回日期: 2024年1月4日

第一作者: 喻丽(1989—), Email: yuli627509344@163.com

资助信息: 南通市气象局气象科研项目(NQZ202101)

年来同期最低<sup>[6-9]</sup>。随着全球气候变暖和城市热岛效应的加剧,高温热浪事件频发,为了在高温天气下更好地把握人体舒适度,科学家们在热舒适度指数上开展了一系列研究。

20世纪初,国外就开启了人体热舒适度模型的研究,迄今已提出了一百多种经验或机理舒适指数模型。20世纪70—80年代,丹麦科技大学的Fanger<sup>[10-11]</sup>开始研究热舒适度指数模型,开创了热浪平衡模型在人类生物气象学应用的先河,Fanger热舒适方程的先决条件是认为人体热舒适最基本的条件是维持人体热平衡。国外对高温影响的舒适度研究主要集中在20世纪70年代后,Jones等<sup>[12]</sup>、Ellis等<sup>[13-14]</sup>、Applegate等<sup>[15]</sup>和Wainwright等<sup>[16]</sup>对美国 and 英国城市群的高温热浪时间进行了系统研究,并指出高温与发病率、死亡率存在密切关系。1979年,美国生物气象学家Steadman<sup>[17-18]</sup>基于人体热量平衡,利用多种资料讨论了气象要素对人体舒适度的影响;1994年,Steadman利用体感温度模型在澳大利亚的应用情况,对模型进行了进一步改进。

我国自20世纪80年代以来在气候舒适度研究方面开展了大量工作,但前期主要集中在定性描述上。90年代起,随着计算机技术的推广,一些定量描述方程逐渐被应用起来。王远飞等<sup>[19]</sup>利用温湿指数分析了上海市的舒适度。于波等<sup>[20]</sup>通过研制热平衡方程研究不同年龄人群的新陈代谢特点,得出凉爽条件体感温度的计算公式和统计模型。马丽君等<sup>[21]</sup>在风寒指数、着衣指数和温湿指数的基础上,建立了一个可加和、可比较的综合气候舒适度模型。谈建国<sup>[22]</sup>通过人体热量平衡模型来研究人体舒适度。郑有飞等<sup>[23]</sup>引进热气候指数UTCI(Universal Thermal Climate Index),结合天气预报数值模式预报的湿度、风速、温度、气压和Solalt模型预报的太阳辐射,修正改进人体舒适度预报模型。余永江<sup>[24]</sup>利用人体热量平衡模型评价了主要省会城市的舒适度。

国内外目前应用较广泛的舒适度算法有很多,例如温湿指数、风寒指数、热气候指数等。大多数模型都是基于温度、湿度、风速等指标的经验公式和当地数据的统计学特征,而夏季太阳辐射对人体的影响很大,但鲜少有指标将太阳辐射考虑在内;其次,高温和不舒适感具有过程累积效应,故要对每一次高温的持续时间加以分析。本文将太阳日总辐射和高温持续时间两个因子纳入,建立舒适度指标模型,这样更接近于人体的实际感觉,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重要的现实意义。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料

本文将江苏淮安、吕泗、南京、通州等24个站点作为研究对象。资料包括2000—2021年6—8月逐日最高及最低气温、平均气温、平均水汽压、平均相对湿度、平均风速、日照时数等数据。由于江苏只有南京、淮安、吕泗3个国家基准站有2000—2021年的太阳日总辐射数据,辐射数据匮乏,因此利用喻丽等<sup>[25]</sup>研究的太阳日总辐射模型DSRM-Y模拟计算江苏其余站点的太阳日总辐射。所有数据均选取当日最高气温 $\geq 33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、太阳日总辐射 $\geq 45\text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 且连续高温日数 $\geq 3\text{ d}$ 的天数作为研究样本,用于主成分分析、模型建立和舒适度指数的分级、分类及时空变化特征研究。研究涉及的资料来源于江苏省气象信息中心。

### 1.2 研究方法

1) 主成分分析。分析2000—2021年影响夏季舒适度指数的主成分指标。

2) 模型建立。利用2000—2021年相关气象资料,在CIHB<sup>[26]</sup>指数的基础上,通过非线性回归法建立以气温日较差( $D$ )、太阳日总辐射( $Q$ )、连续高温日数( $E_i$ )为主导因子的夏季高温舒适度指数模型( $H_i$ )。

3) 热舒适度指数分级、分类。将舒适度指数划分为4个等级,利用系统聚类法对24个城市进行分类和区划分析。

4) 舒适度时空变化特征。将江苏24个站点划分为沿江苏南地区、江淮之间地区及淮北地区,研究近22年江苏夏季舒适度指数的变化特征。

## 2 气象要素对舒适度影响的主成分分析

总方差解释是指选取的共同因素能够解释所有变量的比例。将逐日平均气温、最低气温、最高气温、平均相对湿度、平均水汽压、平均风速、日照时数、太阳日总辐射,以及连续高温日数共9个气象要素作为主成分分析的研究对象。如表1所示,方差贡献率和累计贡献率前4个特征值大于1,所以只选择了前4个主成分。第一至第四个主成分的方差贡献率分别为29.726%、22.001%、16.957%、11.761%,前4个主成分的方差占有主成分方差的80.445%。由此可见,选择前4个主成分已足够替代原来的变量。

表2为成分矩阵,表明各成分在各个变量上的载荷。可知平均气温、最低气温、最高气温、连续高温日数在第一主成分上有较高载荷,说明第一主成分基本反映了温度指标;日照时数和太阳日总辐射在第二主成分上有较高载荷,第二主成分基本反映了日照和辐射指标;平均相对湿度和平均水汽压指标在第三主

表1 总方差解释  
Table 1 Total variance explanation

成分	初始特征值			提取载荷平方和		
	总计	方差/%	累计/%	总计	方差/%	累计/%
1	2.675	29.726	29.726	2.675	29.726	29.726
2	1.980	22.001	51.727	1.980	22.001	51.727
3	1.526	16.957	68.684	1.526	16.957	68.684
4	1.058	11.761	80.445	1.058	11.761	80.445
5	0.792	8.795	89.240			
6	0.546	6.061	95.301			
7	0.233	2.592	97.893			
8	0.130	1.449	99.342			
9	0.059	0.658	100.000			

表2 成分矩阵  
Table 2 Composition matrix

气象要素	成分			
	1	2	3	4
平均气温	0.931	-0.149	0.132	0.101
最低气温	0.746	-0.319	0.028	0.504
最高气温	0.773	-0.092	0.202	-0.332
平均相对湿度	-0.286	-0.102	0.775	0.434
平均水汽压	0.322	-0.272	-0.813	0.035
平均风速	-0.026	0.432	-0.346	0.693
日照时数	0.385	0.848	0.099	-0.070
太阳日总辐射	0.354	0.884	0.050	-0.068
连续高温日数	0.842	-0.275	0.269	-0.069

成分上有较高载荷，这两个指标可以解释第三主成分，可定义为湿度指标；平均风速在第四主成分有较高载荷，将其定义为风速指标。提取这4个主成分可以基本反映全部指标信息，可概括总结为温度指标、日照辐射指标、湿度指标及风速指标。进一步观察发现，连续高温日数在第一主成分载荷为0.842，太阳日总辐射在第二主成分载荷为0.884，均具有较高载荷，可见本文将连续高温日数和太阳日总辐射引入夏季高温舒适度模型是切实可行的。

### 3 江苏夏季高温舒适度指数模型

#### 3.1 相关要素计算

针对江苏的气候特征，于庚康等<sup>[26]</sup>采用如下公式计算江苏的人体舒适度指数(CIHB)：

$$CIHB = (1.8t + 32) - 0.55(1 - h/100) \times (1.8t - 26) - 3.2\sqrt{v}, \quad (1)$$

式中， $t$ 为日平均气温(单位:℃)； $h$ 为日平均相对湿度(%)； $v$ 为日平均风速(单位:m/s)。

计算气温日较差：

$$D = T_{\max} - T_{\min}, \quad (2)$$

式中， $D$ 为气温日较差(单位:℃)； $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 分别为当日最高与最低气温(单位:℃)。

利用太阳日总辐射模型DSRM-Y<sup>[25]</sup>模拟计算江苏

其余站点的太阳日总辐射：

$$Q = Q_0[aS_1 + b\ln(D) + c] \exp\left(\frac{d \times P}{1000}\right), \quad (3)$$

式中， $Q$ 为太阳日总辐射模拟值(单位: MJ/(m<sup>2</sup>·d))； $Q_0$ 为天文辐射日总量(单位: MJ/cm<sup>2</sup>)； $S_1$ 为天文日照百分率(%)； $D$ 为气温日较差(单位:℃)； $P$ 为当地空气质量指数(AQI)。

通过计算通用热气候指数(UTCI)求得因变量( $H_i$ )。UTCI由来自23个国家、多学科的科学家一起构建，全球范围适用。所谓“通用”是指可应用于常规预报、极端天气预警、城市规划、环境流行病学等诸多领域，在现有指数中处于领先地位<sup>[27]</sup>。UTCI通过计算气温、相对湿度、风速及平均辐射温度值，能够计算人体所承受的热量指数。由于UTCI模型的计算过程较长，在此不作赘述，其相关公式程序已在UTCI网站上(www.utci.org)提供。

#### 3.2 模型的建立及效果检验

根据前人研究成果，人体对环境的响应主要体现在温度、湿度和风速，但是几乎很少有指标将太阳辐射考虑在内，而夏季太阳辐射对人体冷热感受的影响很大，所以本模型引入太阳日总辐射因子，这样更接近于人体的实际感觉，一般情况下，辐射越大，人体不舒适感越强烈。其次，研究者们也发现一些定性规律，即当气温日较差越小时，感觉越闷热，所以日较差也需要考虑其中，使用 $1/D$ 作为日较差对 $H_i$ 的贡献可表征人体对气温日较差相对小的天气状况下闷热感更强烈。近些年夏季连续高温日数逐年增加并且不断刷新历史极值，考虑到高温和不舒适感具有过程累积效应，在高温持续过程中，由于热浪效应的存在，当日的热胁迫会随着时间往后推移，但影响力越来越小。所以公式中制定了炎热累积项，其 $1/E_i$ 与距当日时间长短有关。此外，结合江苏气候特征，引入前人已应用于江苏日常预报业务中的CIHB舒适度因子，综合太阳日总辐射( $Q$ )、气温日较差( $D$ )、连续高温日数( $E_i$ )这3个主要因素，构建了一个能表征人体舒适感的江苏夏季舒适度模型，计算公式如下：

$$H_i = aCIHB + bQ + \frac{100c}{D} + d \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i}, \quad (4)$$

式中， $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 分别为CIHB、 $Q$ 、 $D$ 、 $E_i$ 的回归系数。

为初步检验模型的模拟能力，运用决定系数 $R^2$ 来判断模型模拟效果。利用SPSS二次非线性回归得到江苏各站的回归系数及决定系数 $R^2$ ，如表3所示。24个站点对应的回归参数值有所差异，参数 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 各站分别在0.109~0.359、0.017~0.077、

2.024~2.948、-3.217~6.754。参数 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 变化略有差异，参数 $d$ 在所有参数中变化最明显，表明连续高温日数对各站点模型的订正作用差异显著。观察各站 $R^2$ ，54%站点在0.800~0.900，46%站点在0.900以上，模拟效果理想。

表3 江苏各站 $H_i$ 模型回归系数及决定系数 $R^2$

Table 3 Regression coefficient in  $H_i$  and  $R^2$  for each station in Jiangsu

站点	$a$	$b$	$c$	$d$	$R^2$
南京	0.215	0.026	2.174	3.091	0.922
淮安	0.207	0.024	2.509	1.258	0.875
吕泗	0.173	0.038	2.948	1.947	0.971
徐州	0.203	0.035	2.312	-2.088	0.804
连云港	0.294	0.037	2.207	3.974	0.812
扬州	0.312	0.028	2.378	5.845	0.841
南通	0.212	0.064	2.024	3.296	0.957
常州	0.257	0.022	2.357	2.336	0.911
东海	0.307	0.020	2.125	3.469	0.882
金湖	0.238	0.029	2.566	4.051	0.901
金坛	0.257	0.035	2.718	6.071	0.817
江都	0.223	0.017	2.225	1.805	0.939
昆山	0.306	0.048	2.817	2.235	0.827
丹阳	0.283	0.045	2.889	5.674	0.895
无锡	0.287	0.041	2.558	4.828	0.913
通州	0.248	0.062	2.414	3.741	0.965
邳州	0.109	0.071	2.101	2.593	0.809
宿迁	0.337	0.067	2.274	6.754	0.947
盐都	0.227	0.049	2.571	5.088	0.956
泰州	0.283	0.051	2.236	-3.217	0.868
大丰	0.251	0.038	2.447	3.117	0.914
苏州	0.157	0.027	2.317	2.379	0.838
丹徒	0.282	0.077	2.652	4.708	0.925
泰兴	0.359	0.031	2.185	4.267	0.894

注：均通过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验。

## 4 热舒适度指数分级及分类区划

### 4.1 热舒适度指数分级

$H_i$ 指数能综合反映各气象要素对人体的热量胁迫强度，将各城市6—8月热舒适度指数取均值用于指数分级研究，所得数值在34~44。根据以上数值将 $H_i$ 指数分成4种舒适度等级（表4）。

### 4.2 热舒适度指数分类区划

为了更好地反映江苏各城市夏季高温舒适度在空间上的分布特征和相似特点，利用系统聚类法对24个城市进行分类和区划分析，评价夏季高温环境下相对舒适与相对不舒适城市，为城市的旅游、高温和医疗预警等提供参考。

聚类就是按照事物的某些特有的属性，把样本聚集成类，系统聚类法是将类由多变少的一种方法，是

表4  $H_i$ 指数等级  
Table 4 Ratings of  $H_i$

$H_i$ 指数范围	人体热胁迫描述
$H_i > 42$	极度热胁迫
$40 < H_i \leq 42$	高强热胁迫
$37 < H_i \leq 40$	强热胁迫
$34 < H_i \leq 37$	轻度热胁迫

聚类分析方法中用得最多的一种。其基本思想是：首先将 $n$ 个样本各自作为一类，并规定样本之间的距离和类与类之间的距离；然后将距离最近的两类合并成一个新类，计算新类与其他类的距离；重复进行两个最近类的合并，每次减少一类，直至所有的样本合并为一类<sup>[28-29]</sup>。

为了表征类别属性，本文从舒适到不舒适划分第1, 2, 3, ...,  $N$  ( $N$ 为各城市舒适度的分类总数)类城市群。

江苏夏季各城市高温舒适度树状图如图1所示，表5为各城市夏季舒适度指数分类具体数值。各城市舒适度可分为五大类，第一类为东海、盐城、金湖、宿迁、泰兴、大丰，平均舒适度指数为36.86；第二类为邳州，平均舒适度指数为37.11；第三类为连云港、通州、江都、金坛、泰州、扬州、徐州，平均舒适度指数为39.09；第四类为常州、淮安、昆山、南京，平均舒适度指数为40.83；第五类为南通、吕泗、丹阳、丹徒、苏州、无锡，平均舒适度指数为43.08。指数分布疏密度存在一定差异，第一类和第二类指数值相对接近；其余各类指数之间相差值均在2.0左右。以上城市中，热指数最高的3个站点为丹阳、丹徒、苏

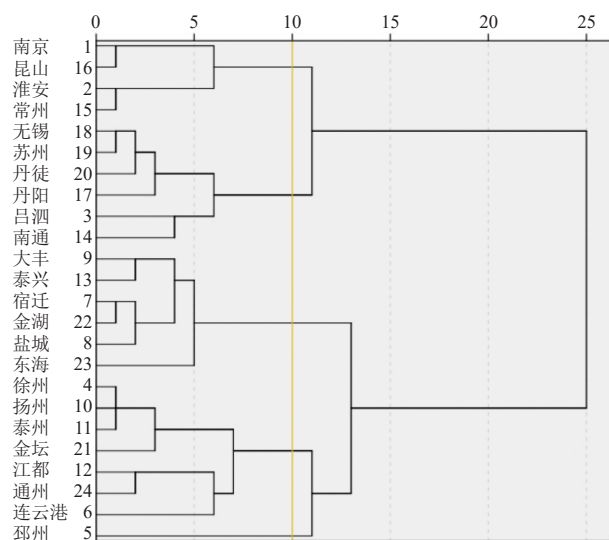


图1 江苏夏季城市高温舒适度指数聚类树状图  
Fig. 1 Clustering tree graph of high temperature comfortability index in summer in Jiangsu

表5 江苏夏季城市热舒适度指数分类

Table 5 Classification of comfortability index in summer in Jiangsu

		站点和指数值				均值
第一类	东海	盐城	金湖			36.86
	35.32	37.63	37.37			
	宿迁	泰兴	大丰			
	37.48	35.82	37.54			
第二类	邳州					37.11
	37.11					
第三类	连云港	通州	江都			39.09
	38.29	39.95	40.28			
	金坛	泰州	扬州	徐州		
	39.16	37.91	38.65	39.42		
第四类	常州	淮安	昆山	南京		40.83
	40.24	40.74	41.03	41.31		
第五类	南通	吕泗	丹阳			43.08
	42.08	42.89	43.83			
	丹徒	苏州	无锡			
	43.11	43.77	42.82			

州，以上3个城市均处于苏南地区，此地区站点普遍归类于第四及第五类，此区域城市夏季有比较强烈的高温热浪天气；热指数最低的3个站点分别为东海、泰兴、邳州，这3个城市处于江淮之间或淮北地区，此地区站点大部分归类于第一、第二及第三类，此区域城市夏季不舒适度相对较低。在各城市旅游或商务作业时，应注意各城市的不舒适类别，以便及时做出调整，避免不必要的高温成本损耗。

## 5 江苏地区夏季热舒适度指数变化特征

为研究江苏夏季热舒适度指数的变化特征，按地理环境条件及上文中已研究的舒适度指数等级将24个站点划分为3类，分别为沿江苏南地区、江淮之间地区及淮北地区。将夏季热舒适度指数的年均值按分类地区进行空间上平均，得到2000—2021年江苏3个区域夏季热舒适度指数的年变化（图2）。2000—2021年3个区域夏季热舒适度指数年际变化的大致规律较为一致，虽有波动，但总体趋势均是上升的，不同年份间变化有所差异。2000—2006年波动幅度较为明显，在2003年出现一个相对高值期，2004年迅速下降；2007—2012年，变化趋于平稳，沿着趋势线上下小幅波动；其后，在2013—2021年出现较为明显的上下起伏波动，但总体趋势还是上升的。

比较沿江苏南、江淮之间和淮北地区的夏季舒适度指数。沿江苏南地区夏季舒适度指数最高，最为炎热，江淮之间地区其次，而江苏夏季相对舒适区域为淮北地区。

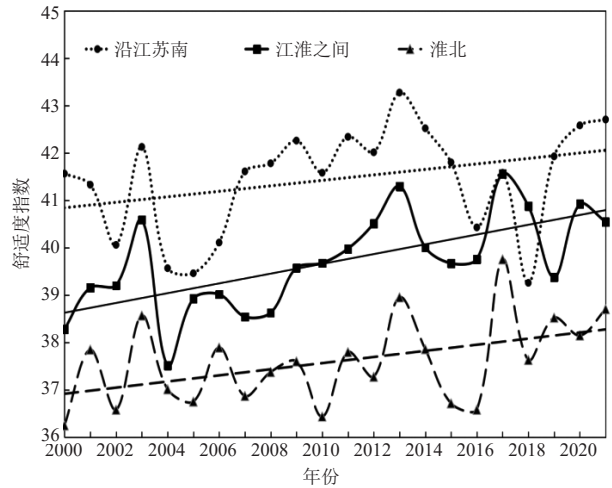


图2 2000—2021年沿江苏南地区、江淮之间地区、淮北地区夏季热舒适度指数变化

Fig. 2 Annual variations of summer comfortability index in areas along the Yangtze River and in Sunan, areas between the Yangtze River and Huai River, and areas to the north of Huai River from 2000 to 2021

## 6 总结及展望

本文创新之处在于引入太阳辐射、连续高温日数两因子建立了江苏本地化舒适度模型，更接近人体实际感受，优化了评估当地夏季舒适度的方法。考虑气象要素对舒适度的影响，以CIHB指数为基础，通过非线性回归法建立了以气温日较差、太阳日总辐射、连续高温日数为主导因子的夏季高温舒适度指数模型，将舒适度指数分级、分类并分析其时空演变特征。

1) 气象要素对舒适度的影响可概括为4个主成分，分别为温度指标、日照和辐射指标、湿度指标、风速指标。连续高温日数和太阳日总辐射两个气象要素在第一和第二主成分上均具有较高载荷，因此引入这两个气象要素至高温舒适度模型具有可行性。

2) 模型系数 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 分别为0.109~0.359、0.017~0.077、2.024~2.948、-3.217~6.754。除系数 $d$ 外， $a$ 、 $b$ 、 $c$ 并未表现出明显的地域变化趋势。拟合效果方面，54%站点 $R^2$ 在0.800~0.900，46%站点在0.900以上，拟合效果理想。

3) 各城市热舒适度指数可分为4个等级，分别为极度热胁迫、高强度胁迫、强热胁迫、轻度热胁迫；舒适度可分为五大类，第一类至第五类平均舒适度指数分别为36.86、37.11、39.09、40.83、43.08。

4) 时间上，2000—2021年沿江苏南地区、江淮之间地区及淮北地区夏季热舒适度指数年际变化规律较为一致，呈现波动上升趋势。空间上，夏季舒适度指数沿江苏南地区>江淮之间地区>淮北地区，夏季相

(下转80页)

World Meteorological Organization (WMO), Kats A, Kurnosenko S, et al, 1991. WMO International Radiosonde Comparison, Phase III, Dzhambul, USSR, 1989: final report[R]. Geneva: World Meteorological Organization.

World Meteorological Organization (WMO), Mita A, Inoue N, 1996. WMO International Radiosonde Comparison, Phase IV, Tsukuba, Japan, 15 February—12 March 1993: final report[R]. Geneva: World Meteorological Organization.

World Meteorological Organization (WMO), Fisch G F, Machado L A

T, et al, 2006. The WMO Intercomparison of GPS Radiosondes (20 May—10 June 2001): final report[R]. Geneva: World Meteorological Organization.

Nash J, Oakley T, Vömel H, et al, 2011. WMO Intercomparison of High Quality Radiosonde Systems. Yangjiang, China, 12 July—3 August 2010[R]. Geneva: World Meteorological Organization.

Nash J, Smout R, Oakley T, et al, 2006. WMO Intercomparison of Radiosonde Systems. Vacoas, Mauritius, 2—25 February 2005[R]. Geneva: World Meteorological Organization.

(作者单位: 杨加春, 华云升达(北京)气象科技有限责任公司; 王柏林, 中国华云气象科技集团有限公司、南京信息工程大学江苏省  
大气环境与装备技术协同创新中心; 杨加春、徐洁、李京辉, 天津华云天仪特种气象探测技术有限公司)

(编辑: 卢冰)

(上接64页)

对舒适的是淮北一带。

本文还存在一定不足之处,在模型设计上,部分站点太阳辐射数据是通过各城市气象资料估算的,在一定程度上会降低人体舒适度指数计算的准确性。未来,可在全国范围内选择有太阳辐射实测值的站点进行舒适度模型研究,以进一步提高舒适度模型的精准性。

#### 参考文献

- [1] Shindell D, Kuylenstierna J C I, Vignati E, et al. Simultaneously mitigating near-term climate change and improving human health and food security[J]. *Science*, 2012, 335(6065): 183-189.
- [2] 高焕妍, 沈新勇, 董伟, 等. 城市化和西太平洋副热带高压增强对中国复合热浪的协同作用[J]. *大气科学学报*, 2023, 46(1): 119-131.
- [3] 梁梅, 吴立广. 中国东部地区夏季极端高温的特征分析[J]. *气象科学*, 2015, 35(6): 701-709.
- [4] 邵颀, 廖要明, 柳艳菊, 等. 2015年全球重大天气气候事件及其成因[J]. *气象*, 2016, 42(4): 489-495.
- [5] 王倩, 翟盘茂, 余荣. 2018年7月北半球极端天气气候事件及环流特征分析[J]. *大气科学学报*, 2019, 42(1): 28-35.
- [6] 范进进, 秦鹏程, 史瑞琴, 等. 气候变化背景下湖北省高温干旱复合灾害变化特征[J]. *干旱气象*, 2022, 40(5): 780-790.
- [7] 冯宝飞, 邱辉, 纪国良. 2022年夏季长江流域气象干旱特征及成因初探[J]. *人民长江*, 2022, 53(12): 6-15.
- [8] 官学文, 曾明. 2022年长江流域枯水特征分析与启示[J]. *人民长江*, 2022, 53(12): 1-5, 36.
- [9] 邹旭恺, 高荣, 陈鲜艳, 等. 2022年长江流域夏伏旱监测评估[J]. *中国防汛抗旱*, 2022, 32(10): 12-16.
- [10] Fanger P O. *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*[M]. New York: McGraw-Hill, 1972.
- [11] Fanger P O. *Thermal Comfort*[M]. Malabar: Robert E Krieger Publishing Company, 1982.
- [12] Jones T S, Liang A P, Kilbourne E M, et al. Morbidity and mortality associated with the July 1980 heat wave in St Louis and Kansas City, Mo[J]. *The Journal of the American Medical Association*, 1982, 247(24): 3327-3331.
- [13] Ellis F P, Nelson F, Pincus L. Mortality during heat waves in New York City July, 1972 and August and September, 1973[J].

*Environmental Research*, 1975, 10(1): 1-13.

- [14] Ellis F P, Princé H P, Lovatt G, et al. Mortality and morbidity in Birmingham during the 1976 heatwave[J]. *Quarterly Journal of Medicine: An International Journal of Medicine*, 1980, 49(1): 1-8.
- [15] Applegate W B, Runyan J W, Brasfield L, et al. Analysis of the 1980 heat wave in Memphis[J]. *Journal of the American Geriatrics Society*, 1981, 29(8): 337-342.
- [16] Wainwright S H, Buchanan S D, Mainzer H M, et al. Cardiovascular mortality—the hidden peril of heat waves[J]. *Prehospital and Disaster Medicine*, 2000, 15(1): 87.
- [17] Steadman R G. The assessment of sultriness. Part I: a temperature-humidity index based on human physiology and clothing science[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1979a, 18(7): 861-873.
- [18] Steadman R G. The assessment of sultriness. Part II: effects of wind, extra radiation and barometric pressure on apparent temperature[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1979b, 18(7): 874-885.
- [19] 王远飞, 沈愈. 上海市夏季湿温效应与人体舒适度[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 1998(3): 60-66.
- [20] 于波, 刘梅, 严明良, 等. 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*, 2002, 22(3): 304-312.
- [21] 马丽君, 孙根年, 王洁洁. 中国东部沿海城市旅游气候舒适度评价[J]. *地理科学进展*, 2009, 28(5): 713-722.
- [22] 谈建国. 气候变暖、城市热岛与高温热浪及其健康影响研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2008.
- [23] 郑有飞, 尹继福, 吴荣军, 等. 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*, 2010, 21(6): 709-715.
- [24] 余永江. 基于人体与环境热量平衡模型的中暑等级预报[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2008.
- [25] 喻丽, 申双和, 陶苏林, 等. 基于空气污染指数的太阳日总辐射计算方法[J]. *应用气象学报*, 2015, 26(3): 291-299.
- [26] 于庚康, 徐敏, 于莹, 等. 近30年江苏人体舒适度指数变化特征分析[J]. *气象*, 2011, 37(9): 1145-1150.
- [27] Jendritzky G, de Dear R, Havenith G. UTCI—why another thermal index[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2012, 56(3): 421-428.
- [28] 李琼. 系统聚类分析中的遗传算法[J]. *武汉交通科技大学学报*, 2000, 24(3): 301-304.
- [29] 张惟皎, 刘春煌, 李芳玉. 聚类质量的评价方法[J]. *计算机工程*, 2005, 31(20): 10-12.

(编辑: 卢冰)