

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).

## 影响杭州人体舒适度的城市因素分析<sup>\*</sup>

高 超<sup>1,2,3</sup> 申双和<sup>1,2,4</sup> 蒋烨林<sup>1</sup> 彭 擎<sup>1</sup>

1 南京信息工程大学应用气象学院,南京 210044

2 气象灾害预报预警与评估协同创新中心,南京 210044

3 广德县气象局,安徽宣城 242200

4 江苏省农业气象重点实验室,南京 210044

**提 要:** 城市的热环境与城市因子之间有某种必然的联系,为了研究两者之间的关系,本文以人体舒适度为研究视角,分析影响人体舒适度变化的主要城市因子。该研究首先采用了热气候指数法计算 1980—2017 年杭州夏季高温不舒适日数,并统计其变化趋势。运用熵权优化的灰色关联度模型,确立各影响因子的权重,分析城市化因子与高温不舒适日数之间的关联关系。结果表明:(1)38 年来,杭州高温不舒适日数的平均为 30.6 d,气候倾向率为  $6.87 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,呈现显著上升趋势。年代际变化特征表明,高温不舒适日数主要集中在 7、8 月,并在 1992—1993 年高温不舒适日数发生由少到多的突变。(2)灰关联熵结果显示,在十二个指标因子中,第二产业占地区生产总值比重所占权重最大,公路客运量所占权重占第二位,所占权重最小的是人口密度。(3)公路客运量和第二产业占地区生产总值比重与高温不舒适日数的关联度均成强度相关联,而园林绿地面积、建成区绿化覆盖面积、人口密度等剩下的十个因子均成中度相关联。综上所述,灰色理论在多因子关联系统预测中具有优越性,能够有效分析影响高温不舒适日数的主要城市因子,在实际应用中具有一定价值。

**关键词:** 热气候指数,人体舒适度,熵值法,灰色关联度

**中图分类号:** X16

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.06.011

## Analysis of Urban Factors Impacting Human Comfort Degree in Hangzhou

GAO Chao<sup>1,2,3</sup> SHEN Shuanghe<sup>1,2,4</sup> JIANG Yelin<sup>1</sup> PENG Qing<sup>1</sup>

1 School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing 210044

3 Guangde Meteorology Station of Anhui Province, Xuancheng 242200

4 Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing 210044

**Abstract:** There is a certain necessary connection between urban thermal environment and urban factors. In order to study the connection, this paper analyzes the main urban factors impacting human comfort degree from the perspective of human comfort degree. We adopt the way of thermal climatic index to calculate the uncomfortable days with high temperatures in Hangzhou from 1980 to 2017, and sum the change trend. By means of gray relational analysis of entropy-based optimization, we determine the weights of different factors and analyze the connection between urban factors and uncomfortable days with high temperature. The results are as follows. First, over the past 38 years, the average uncomfortable days with high temperature in Hangzhou are 30.6 d, and the climate tendency rate is  $6.87 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ , showing a significant upward

<sup>\*</sup> 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506018)资助

2018 年 10 月 3 日收稿; 2019 年 4 月 25 日收修定稿

第一作者:高超,主要从事气候变化与城市气象方面的研究. Email: fgy4949@126.com

通信作者:申双和,主要从事农业气象与生态环境等方面的研究. Email: yqzhr@nuist.edu.cn

trend. The interdecadal variation changes dramatically. The uncomfortably days with high temperature mostly appear in July and August and notably the uncomfortable days with high temperature appear more frequently from 1992 to 1993. Second, according to the results of gray relational analysis of entropy-based optimization, among 12 index factors, the weight of the occupying areas of secondary industry is the biggest, with highway passenger volume standing the next. Population density accounts for the smallest proportion. Third, highway passenger volume and the weight of occupying areas of secondary areas strongly correlate with days with high temperature, while the other ten factors such as garden area, green coverage area of built-up area, and population density correlate with days with high temperature moderately. In conclusion, gray relational analysis has advantages in the prediction of multiple factor connection. It can effectively analyze the main urban factors impacting days with high temperatures and has some values in application.

**Key words:** thermal environment index, human comfort degree, the entropy method, gray relational degree

## 引言

在全球气候变暖的背景下,随着城市化的快速发展,城市的热环境必然加剧,特别是季节性高温天气的产生,张芳华等(2019)指出高温是夏季最主要的气象灾害之一,而丑洁明等(2016)指出社会经济系统受气象因子年际变化的影响。这表明高温热浪天气不仅影响人体健康同时还关系着社会经济的发展。国内外学者围绕此课题进行了大量研究,提出了人体舒适度的概念。吴志丰和陈利顶(2016)研究指出人体舒适度是表征人体对外界环境的感知程度,关于它的研究模型大体可分为两大类:早期的经验模型和后来的机理模型。经验模型的考虑是基于外界的气象因子对人体的影响,比如空气的温度、湿度、风速、辐射等综合作用对人体的影响。如陆续提出的用来表征热环境的经验指数有:Houghton and Yaglou(1923)的有效温度、Siple and Passel(1945)的风寒指数、Yaglou and Minard(1957)研究提出的湿球黑球温度,以及 Thorsson et al(2007b)的平均辐射温度。孙美淑和李山(2015)指出机理模型是以人体热交换机制为基础,综合考虑环境因素、人体代谢、呼吸散热及服装热阻等各种因素的影响。如 Mayer and Höppe(1987)提出的生理等效温度,丹麦学者 Fanger(1972)提出的预计热舒适指数。1990年由国际生物气象学会提出通用热舒适度评价指数(universul thermal climate index,UTCI),该指数是基于人体热调节模型和服装模型开发完成(Fiala et al,2012;Havenith et al,2012)。理论的发展使得人体舒适度的应用被赋予更为丰富的内涵。

国内学者如肖安和周长艳(2017)运用 EHF 热浪指标分析中国热浪事件的气候特征;于庚康等(2012)对江苏冬夏季人体舒适度指数异常背景场进行相关研究;葛伟强等(2010)基于 MODIS 数据的长三角城市群热岛的形成及演变分析。自邓聚龙(1982)创立灰色理论以来,灰色理论便被普遍应用到经济、交通、农业、工业等各个领域,它具有计算量小、对样本量要求不高、应用广泛等特点(张绍良和张国良,1996)。张岐山等(1996)研究提出灰色关联分析是贫信息分析的有效手段,是灰色系统方法体系中的一类重要方法。实证研究包括,韩玮等(2013)运用湿温指数和灰色关联度模型分析了长三角洲城市发展与人体舒适度的关系。陈志等(2004)将灰色系统理论引入到城市热岛效应的评价与预测中,运用灰色关联度分析影响西安热岛效应的因子群,得到了较好的实证效果。王志春等(2017)运用灰色模型分析珠三角城市群化发展指标与城市热岛效应之间的关系。

杭州地处长三角的中心城市带,由于经济发展带来的人口增长,城市化进程加快,使得城市热岛效应正在增强(谢志清等,2017)。与以往研究人体舒适度大多采用经验模型不同的是,本研究采用机理模型-热气候指数法进行人体舒适度的计算,综合考虑人体舒适度的发生机制受个体差异和外界环境作用的影响。并利用灰色关联度分析方法,对影响高温不舒适日数的城市因子贡献测度进行分析和确定,为控制杭州高温不舒适日数的继续增长找到了主控因子,为城市规划和产业结构合理布局提供参考。

# 1 资料与方法

## 1.1 研究方法

### 1.1.1 UTCI 模型

Fanger(1972)研究指出人体的冷热舒适程度除受气温影响外,还与湿度、风速、辐射以及人体代谢、服装热阻等因素有关。Jendritzky et al(2011)、闫业超等(2013)提出 UTCI 模型包括热调节功能的主动系统和人体内部产热过程的被动系统,主动系统用以模拟人体代谢、皮肤血液流动的减弱和加强、发汗、发抖等;被动系统考虑人体不同部位如骨骼、内脏、肌肉等组分的差别,模拟人体内部传热过程,在热交换过程中包含了表面对流、长短波辐射、皮肤表面水分蒸发、呼吸等因素。Blazejczyk et al(2012)研究指出 UTCI 适用于不同季节、不同气候、不同纬度地区,具有拟真度高、结构复杂的特点,被广泛应用于气象服务、城市规划、旅游等诸多领域。

UTCI 被定义为在标准参照环境下,使人产生与实际环境相同的生理响应温度(Bröde et al, 2012)标准参照环境为:(1)人体活动水平:步行速度为  $4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  的成年男子(人体代谢率为  $135 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ );(2)气候条件:平均辐射温度等于气温,  $10 \text{ m}$  风速为  $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,相对湿度为  $50\%$  ( $T_{2\text{m}} < 29^\circ\text{C}$ ) 或水汽压为  $20 \text{ hPa}$  ( $T_{2\text{m}} > 29^\circ\text{C}$ )。它的计算源程序由德国学者开发,国内学者如唐进时等(2015)采用此方法评价中国南方城市夏季舒适度得到了较好的实证效果。计算涉及的要害为气温、风速、水汽压、相对湿度和平均辐射温度。其中气温、风速、相对湿度可以直接从气象数据中获取。

水汽压  $p_a$  由露点温度  $T_d(^{\circ}\text{C})$  计算得到:

$$p_a = 6.11 \exp 5417.753 \left[ \frac{1}{273.16} - \frac{1}{273.16 + T_d} \right] \quad (1)$$

平均辐射温度不能从气象观测数据中直接获取,其可以通过计算裸体吸收太阳辐射得到(Thorsson et al, 2007a)。

$$T_{\text{mrt}} = \left[ \frac{R}{5.39 \times 10^{-8}} + (273 + T)^4 \right]^{0.25} - 273 \quad (2)$$

式中,  $T_{\text{mrt}}$  为平均辐射温度(单位:  $^{\circ}\text{C}$ ),  $T$  为日平均温度(单位:  $^{\circ}\text{C}$ ),  $R$  为日总辐射(单位:  $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )。

$R$  并非一个直接观测值,其计算公式为:

$$R = S_0 (AS_1 + B \ln D + C) \quad (3)$$

式中,  $S_0$  为天文辐射(单位:  $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ),  $S_1$  为日照百分率,  $D$  为日较差(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )。  $A$ 、 $B$ 、 $C$  为各参数系数,根据杭州的地理位置和辐射特征分别取值为  $0.443$ 、 $0.128$ 、 $0.030$ (喻丽, 2015)。

### 1.1.2 UTCI 的临界值

地区的差异、气候的差异决定人们承受的高温阈值有所不同,对临界值的确定应该考虑地域的差异。具体做法:中国气象局规定的高温预警标准为最高温度高于  $35^\circ\text{C}$ ,世界气象组织的高温标准为  $32^\circ\text{C}$ ,综合以上两个指标,选取 1980—2017 年杭州 6—9 月所有气温高于  $33^\circ\text{C}$  的 UTCI 值进行升序排列,选取第  $50\%$  分位数作为临界值(黄卓等, 2011; 唐进时等, 2015)指出采用  $50\%$  分位数可以避免出现异常值和偏态产生的误差,按此方法得到的临界值更具有纬度辐射特征。这样既考虑了辐射特征的差异,又反映了城市的高温特征,经计算杭州市夏季 UTCI 值的临界值为  $36.66^\circ\text{C}$ 。UTCI 指数中的临界值,主要用于判断是否为舒适性天气,当 UTCI 值大于该临界值时,定义当日为高温不舒适天气。

### 1.1.3 熵值法确定指标权重

在信息论中,熵是信息无序化程度的量度,用以反映信息量的大小。信息熵越小,信息的无序度越低,其效用值越大,指标的权重也越大。相反,信息熵越大,信息的无序化程度越高,其信息的效用值越小,指标的权重也越小。熵值法是一种客观的赋权方法,可以克服主观赋权的随机性(贺祥等, 2016)。计算步骤为:

(1) 构建  $m$  个样本、 $n$  个评价指标的原始数据矩阵:

$$\mathbf{X} = \{X_{ij}\}_{m \times n} \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$$

式中  $X_{ij}$  表示第  $i$  个样本的第  $j$  项评价指标。

(2) 数据通过无量纲化处理,转化为可比较的数据序列,本文采取的标准化方法是  $Z_{\text{score}}$  法,原始数据在 SPSS 中进行标准化。

(3) 由于标准化后的数据存在负值,为了消除负值在熵值运算中对取对数的影响,可平移标准化后的数值。平移公式为:

$$Z_{ij} = x'_{ij} + A$$

式中,  $Z_{ij}$  是平移后数值,  $Z_{ij} > 0$ ;  $A$  为平移幅度,  $A > \min(x'_{ij})$ ,  $A$  值越接近  $\min(x'_{ij})$ , 其评价结果越显著,本研究取  $A=2$ 。

(4) 根据熵的定义,计算指标的熵,确定指标的

权重。

$$p_{ij} = z_{ij} / \sum_{i=1}^m z_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}, k = 1/\ln m, e_j > 0 \quad (5)$$

$$\omega_j = 1 - e_j / \sum_{j=1}^n (1 - e_j) \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

式中,  $p_{ij}$  为第  $j$  项指标下, 样本  $i$  所占该指标的比重,  $e_j$  为第  $j$  项指标熵值,  $\omega_j$  为第  $j$  项指标的权重。

### 1.1.4 灰色关联熵分析模型

传统的邓氏关联度采取的是对各点序列关联系数值求平均的办法, 用于计算灰色关联度, 样本数据

$$\delta_{0i}(t) = \frac{\min \min |x_0(t) - x_i(t)| + \rho \max \max |x_0(t) - x_i(t)|}{|x_0(t) - x_i(t)| + \rho \max \max |x_0(t) - x_i(t)|} \quad (7)$$

式中  $\min \min |x_0(t) - x_i(t)|$ ,  $\max \max |x_0(t) - x_i(t)|$  分别为参考数列与比较数列的极差最小值与最大值。  $\rho$  为分辨系数, 其作用是提高关联系数之间的差异显著性,  $\rho \in (0, 1)$ , 通常取 0.5。

计算加权关联度:

$$r_{ij} = \sum_{i=1}^m \delta_{0j}(i) \omega_j \quad (8)$$

式中,  $r_{ij}$  和  $\omega_j$  分别为第  $j$  项指标的灰关联熵和熵权。

## 1.2 指标体系建立与数据来源

### 1.2.1 影响人体舒适度的城市化指标体系的建立

根据人体舒适度的定义: 城市发展与气候变化的关系紧密依存、互相影响。城市发展可以影响气候, 反过来, 气候变化也可以影响城市发展, 城市发展又是人类活动的直接体现, 人作为一个群体自然离不开客观环境的影响。我们依照这一联系建立本文的指标体系, 以研究高温不舒适日数与城市发展指标之间的关系。选取 12 个因子建立指标体系(表 1)。

### 1.2.2 数据来源

杭州市气象观测数据基于中国地面气候资料日数据集, 数据要素包括 1980—2017 年杭州日最高气温(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )、日平均气温(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )、平均风速(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、平均相对湿度(单位:  $\%$ )、日照时数(单位:  $\text{h}$ )及水汽压(单位:  $\text{hPa}$ ), 数据来源于中国气象数据共享服务平台。城市化指标要素包括人口数

的平均化处理可能会消除数据的个性特点, 造成个性信息的缺失。张贞等(2017)和张岐山等(1996)又提出了灰关联熵分析方法, 以弥补传统计算方法的不足。所以本文选取基于熵权改进的灰色关联度计算方法, 具体步骤如下:

高温不舒适日数与指标因子都是时间序列的数据, 本文要分析高温不舒适日数与各因子之间的关联关系, 因而以高温不舒适日数为参考序列, 各指标因子为比较数列。

系统中各因素数据列的量纲不同, 首先要进行数据标准化处理, 如上所采用  $Z\_score$  方法。

计算关联系数:

量、产业结构、能源类、城市建设、生态环境、交通六大类共 12 个指标, 数据来源于《杭州市 2007—2016 统计年鉴》(<http://www.hangzhou.gov.cn/col/col805867/index.html>), 详见表 1。

表 1 影响人体舒适度的城市化指标体系  
Table 1 Index system of urbanization affecting human comfort

指标因子	单位
人口密度( $X_1$ )	人 $\cdot \text{km}^{-2}$
第二产业占地区生产总值比重( $X_2$ )	$\%$
全市生产总值( $X_3$ )	亿元
城市供电总量( $X_4$ )	亿 $\text{kWh}$
建成区面积( $X_5$ )	$\text{km}^2$
住宅竣工面积( $X_6$ )	$10^4 \text{ m}^2$
园林绿地面积( $X_7$ )	$\text{hm}^2$
建成区绿化覆盖面积( $X_8$ )	$\text{hm}^2$
城市污水处理总量( $X_9$ )	万 $\text{m}^3$
公共交通实有车辆( $X_{10}$ )	辆
公路客运量( $X_{11}$ )	万人次
公路货运量( $X_{12}$ )	万 t

## 2 结果与分析

### 2.1 杭州夏季不舒适日数时间变化特征

#### 2.1.1 夏季杭州不舒适日数年际变化趋势

1980—2017 年杭州不舒适日数整体呈上升趋势(图 1), 线性倾向率为  $6.87 \cdot (10 \text{ a})^{-1}$  ( $p < 0.01$ )。1994 年达到最高(57 d), 1982 年最低(7 d)。38 年来总不舒适日数为 1161 d, 年平均不

舒适日数为 30.6 d,占比最高的两个年代分别为 20 世纪 90 年代(310 d)和 21 世纪前 10 年(370 d),20 世纪 80 年代不舒适日数为 176 d,整体对比来看为最舒适年代。杭州地处长三角城市带,夏季直接受副热带高压控制,常出现晴热伏旱天气。谢志清等(2017)研究指出盛夏的西太平洋副热带高压持续控制是形成东部地区极端高温事件的根本原因。杨续超等(2014)研究指出 20 世纪 90 年代开始为浙江省城市化快速发展期,尤其进入 21 世纪以后极端高温事件最频繁,2001—2011 年全省年均高温日数远高于 30 年前。从这里可知始于 20 世纪 90 年代的城市化是 90 年代和 21 世纪前 10 年杭州高温不舒适日数占比最高的原因,而城市化发展较慢的 80 年代则表现为相对舒适时期。

2.1.2 杭州不舒适日数年代际月变化特征

分年代统计共四个时期杭州 6—9 月的不舒适日数变化趋势,如图 2 结果表明,6 月平均不舒适日数呈现年代递增趋势,21 世纪 10 年代达到最高值,平均为 6.43 d。7 月不舒适日数呈先增后减趋势,

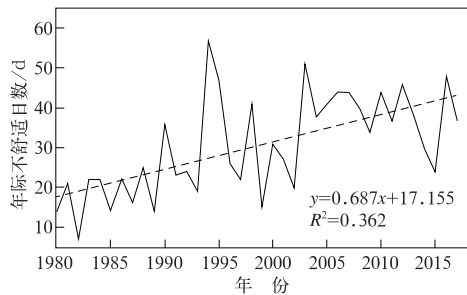


图 1 1980—2017 年杭州不舒适日数年际变化  
Fig. 1 Interannual variation of discomfort days in Hangzhou in 1980—2017

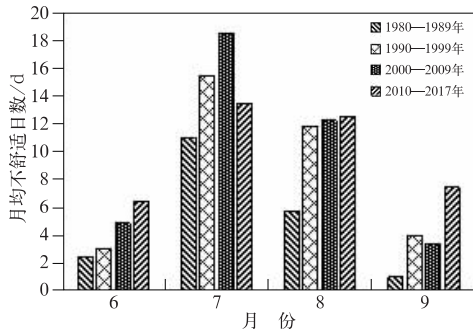


图 2 1980—2017 年杭州平均不舒适日数年代际变化

Fig. 2 Interdecadal variation of monthly average discomfort days in Hangzhou in 1980—2017

2000—2009 年最高,最高均值为 18.5 d。8 月不舒适日数在 20 世纪 80 年代最低,从 90 年代开始上升迅猛,后趋于平缓。9 月呈现递增趋势,21 世纪 10 年代达到最高,总的来看高温不舒适日数集中在 7—8 月,王传琛等(1991)也指出杭州盛夏季节始于 7 月 6 日,终于 8 月 31 日。

2.1.3 高温不舒适日数突变检验

用 Mann-Kendall 法对杭州地区 1980—2017 年高温不舒适日数进行突变检验,分析结果由图 3 可见,UF 曲线自 20 世纪 80 年代以来整体呈现波动上升趋势,1995 年后这种上升趋势大大超过 0.05 显著性水平检验临界线,甚至超过 0.001 显著性水平检验( $U_{0.001}=2.56$ ),表明杭州不舒适天数的上升趋势是非常显著的,在显著性水平检验区间内,根据 UF、UB 曲线的交点位置确定 90 年代初的年不舒适日数增长是一突变现象,这一结论也在相关文献中得到了验证,如李全胜等(1994)指出 1993 年杭州在夏季是一个明显的夏凉气候。

2.2 高温不舒适日数与城市化因子的灰关联熵分析

利用式(5)~式(7)计算得到影响高温不舒适日数的指标因子权重。如表 2 所示,对高温不舒适日数影响最大的是第二产业占地区生产总值比重(0.096),其次是公路客运量(0.094),全市生产总值(0.077)和人口密度(0.0760)权重最小。

由灰色关联度的定义可知,熵关联度越大,则比

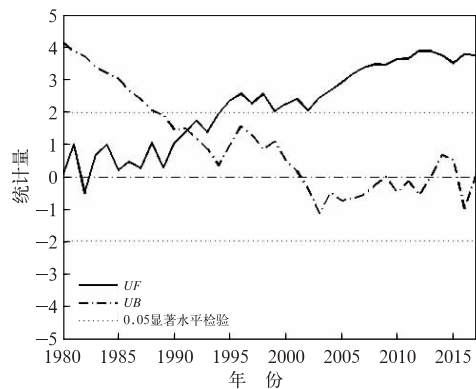


图 3 1980—2017 年杭州高温不舒适日数 Mann-Kendall 统计量曲线

Fig. 3 Mann-Kendall statistics curve of high temperature discomfort days in Hangzhou in 1980—2017

表2 高温不舒适日数与影响因子之间的权重及关联度分布

Table 2 Weight and correlation distribution matrix between high temperature discomfort days and impact factors

指标因子	灰色关联系数										权重	灰色关联度	关联度排序
	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年			
X <sub>1</sub>	0.999	0.354	0.439	0.770	0.940	0.727	0.507	0.834	0.582	0.484	0.076	0.505	11
X <sub>2</sub>	0.346	0.729	0.784	0.92	0.677	0.686	0.952	0.613	0.668	0.788	0.096	0.687	2
X <sub>3</sub>	0.813	0.352	0.465	0.776	0.671	0.968	0.556	0.823	0.564	0.441	0.077	0.497	12
X <sub>4</sub>	0.937	0.351	0.429	0.773	0.635	0.930	0.582	0.849	0.561	0.422	0.081	0.523	9
X <sub>5</sub>	0.829	0.358	0.453	0.801	0.672	0.957	0.584	0.908	0.547	0.422	0.081	0.527	7
X <sub>6</sub>	0.819	0.333	0.502	0.960	0.447	0.865	0.625	0.620	0.944	0.585	0.080	0.535	5
X <sub>7</sub>	0.858	0.355	0.454	0.798	0.671	0.946	0.593	0.942	0.535	0.419	0.082	0.540	3
X <sub>8</sub>	0.837	0.360	0.454	0.798	0.671	0.945	0.592	0.944	0.535	0.420	0.082	0.537	4
X <sub>9</sub>	0.838	0.362	0.522	0.900	0.539	0.735	0.494	0.588	0.797	0.403	0.085	0.524	8
X <sub>10</sub>	0.847	0.350	0.429	0.657	0.701	0.920	0.572	0.816	0.524	0.433	0.083	0.517	10
X <sub>11</sub>	0.350	0.688	0.956	0.618	0.989	0.611	0.982	0.652	0.978	0.707	0.094	0.707	1
X <sub>12</sub>	0.980	0.376	0.483	0.645	0.830	0.798	0.565	0.699	0.537	0.446	0.084	0.533	6

较数列与参考数列的关联性越强。通常,定义  $0 < R \leq 0.30$  关联度为轻度;当  $0.30 < R \leq 0.60$  时为中度;当  $0.60 < R \leq 1$  时为强度(贺祥等,2016)。根据表2关联度排序可知:公路客运量与高温不舒适日数的关联度最大,其次是第二产业占地区生产总值比重,说明在众多指标中,这两者是影响高温不舒适日数的最大因子。公路客运量一方面要求增加城市建设用地面积,使得城市地表更加硬化,减少了下垫面的植被覆盖和水分含量,改变了城市地表特征,增加了地表的热容量和热传导性。另一方面交通本身会消耗大量的能源,这些能源又会以人为热的形式排放到大气中,使得城市热环境加剧。夏季又是杭州的旅游旺季,因而带来了大量的客流量,大规模的人群活动、汽车尾气的排放使得城市高温热浪的强度增强。就第二产业占地区生产总值比重来说,工业生产也会增加城市建设用地面积,特别是工业生产过程中污染物的排放和释放大量的工业热,这些都会成为城市重要的热源和污染源。冯建(2002)研究指出杭州城实施旧城改造、工业搬离城市中心的战略,促进了城市内部土地结构优化,从这里可知一定程度上缓解了城市中心的热岛效应,这也可能是第二产业占地区生产总值比重所占权重最大,而关联度未居于首位的原因。

其他指标与高温不舒适日数均呈现中度关联关系,特别是关联度排在第三、四位的分别是园林绿地面积、建成区绿化覆盖面积,因为城市绿地是城市生态的重要组成部分,园林绿地面积是减缓城市热岛效应的有效途径(周志翔等,2004)。第五和第七位的分别是住宅竣工面积和建成区面积。这两项也是

衡量城市化进程的重要指标,由于城市化的快速发展,使得城市高楼大厦林立,大量建筑物、建筑墙体的增加,改变了城市原本的空间格局,影响了城市的通风。另一方面自然下垫面被人工下垫面所取代,改变了下垫面的热力属性,增大了城区日间出现高温的可能。王伟武等(2009)研究指出大量的高层建筑改变了杭州城“三面云山一面城”的空间格局,阻隔了杭城通风散热的空间,加剧了城市的热岛效应。党冰等(2017)研究也指出合理构建城市通风廊道,可以缓解城市热岛效应,改善局地气候环境,提高人体舒适度。排在第六位的是公路货运量,第八位的是城市污水处理总量,城市污水处理量从来源上看是工业废水和城市居民生活产生的污水。第九位城市供电总量,第十、十一和十二位分别是公共交通实有车辆、人口密度和全市生产总值,这些因子反映了杭州人口聚集程度、能源消耗的多少,另外公路货运量、公共交通实有车量的增加也会增加近地面排放,正如陈兵等(2016)指出,随着人口增长及城市化进程加剧,人为热释放对气候的影响力正在逐步增强,具有明显的升温效应。另外谢志清等(2017)研究指出城市集群化发展已经改变了长江三角洲极端高温事件空间格局。

### 3 结论与讨论

运用热气候指数模型、灰熵优化的加权灰色关联度模型研究高温不舒适日数与城市化因子之间的关联关系。通过确定各影响因素权重大小并计算其灰色关联度,量化研究人体舒适度的影响因子,为控

制杭州高温不舒适日数的继续增长找到了主控因子。

结果表明,38年不舒适日数平均为30.6 d。并且以 $6.87 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的速率上升,高温不舒适日数主要集中在7、8月。不舒适日数的年际变化也呈现显著上升趋势,结合Mann-Kendall曲线发现在1992—1993年发生了由少到多的突变。而运用熵权优化的灰色关联度模型进行研究,结果显示:公路客运量、第二产业占地区生产总值比重与高温不舒适日数呈现强相关关系,两者在所有因子中所占权重最大,关联度也最强。而剩余因子的关联度均呈中度相关关系。说明工业化生产、城市不合理布局、人口疏密程度、人为热排放、城市绿化覆盖面积等因素是影响杭州热环境的主要原因。综上所述,城市的发展期与高温不舒适日数的增长有较好的一致性,城市的发展已经成为影响高温不舒适日数的重要因子。发展过程中带来的现代大城市阻碍城市生态自我调节能力,合理开发统筹兼顾的发展理念是今后城市发展的内在逻辑。

本研究还有待深入及改进的地方,比如指标体系可以多层次化细分,进行多因素对比评价,多角度思考问题,尽量减少人为对指标选取的主观性,提高评价结果的客观性和全面性,这样能够为城市的发展与防灾减灾提供更有价值的判断。

## 参考文献

- 陈兵,陈良富,董理,等,2016.人为热释放:全球分布的估算及其气候效应的探索[J].大气科学,40(2):289-295. Chen B, Chen L F, Dong L, et al, 2016. Estimating the global distribution of anthropogenic heat release and exploring its possible climatic effect [J]. Chin J Atmos Sci, 40(2): 289-295 (in Chinese).
- 陈志,俞炳丰,胡汪洋,等,2004.城市热岛效应的灰色评价与预测[J].西安交通大学学报,38(9):985-988. Chen Z, Yu B F, Hu W Y, et al, 2004. Grey assessment and prediction of the urban heat island effect in city [J]. J Xi'an Jiaotong Univ, 38(9): 985-988 (in Chinese).
- 丑洁明,董文杰,延晓冬,2016.关于气候变化对社会经济系统影响的机理和途径的探讨[J].大气科学,40(1):191-200. Chou J M, Dong W J, Yan X D, 2016. The impact of climate change on the socioeconomic system: a mechanistic analysis [J]. Chin J Atmos Sci, 40(1): 191-200 (in Chinese).
- 党冰,房小怡,吕红亮,等,2017.基于气象研究的城市通风廊道构建初探—以南京江北新区为例[J].气象,43(9):1130-1137. Dang B, Fang X Y, Lü H L, et al, 2017. Preliminary study on building urban ventilation corridors based on meteorological research—Taking Nanjing Jiangbei New Region as the example [J]. Meteor Mon, 43(9): 1130-1137 (in Chinese).
- 邓聚龙,1982.灰色系统[J].华中工学院学报,(3):9-18. Deng J L, 1982. The grey control system [J]. J Huazhong Univ Sci Technol, (3): 9-18 (in Chinese).
- 冯健,2002.杭州城市郊区化发展机制分析[J].地理学与国土研究,18(2):88-92. Feng J, 2002. On mechanisms of the development of suburbanization in Hangzhou [J]. Geogr Geo-Inf Sci, 18(2): 88-92 (in Chinese).
- 葛伟强,周红妹,杨何群,2010.基于MODIS数据的近8年长三角城市群热岛特征及演变分析[J].气象,36(11):77-81. Ge W Q, Zhou H M, Yang H Q, 2010. Characteristics analysis on heat island effect in Yangtze Delta urban agglomerations in recent 8 years by MODIS data [J]. Meteor Mon, 36(11): 77-81 (in Chinese).
- 韩玮,苏敬,王琳,2013.长江三角洲城市发展与人体舒适度的关系[J].应用气象学报,24(3):380-384. Han W, Su J, Wang L, 2013. Effects of urbanization on human comfort in the Yangtze River Delta [J]. J Appl Meteor Sci, 24(3): 380-384 (in Chinese).
- 贺祥,林振山,刘会玉,等,2016.基于灰色关联模型对江苏省PM<sub>2.5</sub>浓度影响因素的分析[J].地理学报,71(7):1119-1129. He X, Lin Z S, Liu H Y, et al, 2016. Analysis of the driving factors of PM<sub>2.5</sub> in Jiangsu Province based on grey correlation model [J]. Acta Geographica Sin, 71(7): 1119-1129 (in Chinese).
- 黄卓,陈辉,田华,2011.高温热浪指标研究[J].气象,37(3):345-351. Huang Z, Chen H, Tian H, 2011. Research on the heat wave index [J]. Meteor Mon, 37(3): 345-351 (in Chinese).
- 李全胜,王兆寿,杨忠恩,1994.气候变化对长江三角洲农业生态系统的影响[J].生态学报,14(3):295-299. Li Q S, Wang Z Q, Yang Z E, 1994. Effects of climate change on agroecological systems in the Yangtze Delta [J]. Acta Ecol Sin, 14(3): 295-299 (in Chinese).
- 孙美淑,李山,2015.气候舒适度评价的经验模型:回顾与展望[J].旅游学刊,30(12):19-34. Sun M S, Li S, 2015. Empirical indices evaluating climate comfortableness: review and prospect [J]. Tourism Tribune, 30(12): 19-34 (in Chinese).
- 唐进时,申双和,华荣强,等,2015.热气候指数评价中国南方城市夏季舒适度[J].气象科学,35(6):769-774. Tang J S, Shen S H, Hua R Q, et al, 2015. Assessment on summer comfort level of southern cities in China by UTCI [J]. J Meteor Sci, 35(6): 769-774 (in Chinese).
- 王传琛,嵇瑞发,刘际松,1991.杭州城区的自然季节和天气类型[J].杭州大学学报(自然科学版),18(3):349-356. Wang C C, Ji R F, Liu J S, 1991. The natural seasons and weather types of the urban districts of Hangzhou [J]. J Zhejiang Univ (Sci Ed), 18(3): 349-356 (in Chinese).
- 王伟武,李国梁,薛瑾,2009.杭州城市热岛空间分布及缓减对策[J].自然灾害学报,18(6):14-20. Wang W W, Li G L, Xue J, 2009. Spatial distribution of urban heat island in Hangzhou and its mitigation countermeasures [J]. J Nat Dis, 18(6): 14-20 (in Chinese).
- 王志春,徐海秋,汪宇,2017.珠三角城市群化发展对热岛强度的影响[J].气象,43(12):1554-1561. Wang Z C, Xu H Q, Wang Y, 2017. Influence of Pearl River Delta urban cluster development on urban heat island intensity [J]. Meteor Mon, 43(12): 1554-

- 1561(in Chinese).
- 吴志丰,陈利顶,2016.热舒适度评价与城市热环境研究:现状、特点与展望[J].生态学报,35(5):1364-1371. Wu Z F, Chen L D, 2016. Thermal comfort assessment and urban thermal environment research: review and prospective[J]. Chin J Ecol, 35(5): 1364-1371(in Chinese).
- 肖安,周长艳,2017.基于超热因子的中国热浪事件气候特征分析[J].气象,43(8):943-952. Xiao A, Zhou C Y, 2017. Characteristic analysis of the heat wave events over China based on excess heat factor[J]. Meteor Mon, 43(8):943-952(in Chinese).
- 谢志清,杜银,曾燕,等,2017.长江三角洲城市群化发展对极端高温事件空间格局的影响[J].科学通报,62(2/3):233-244. Xie Z Q, Du Y, Zeng Y, et al, 2017. Impact of urban clusters on spatial pattern of extreme high temperature events over Yangtze River Delta[J]. Chin Sci Bull, 62(2/3):233-244(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).
- 杨续超,陈锋,祝炜平,等,2014.城市化对浙江省夏季极端高温事件的影响[J].热带气象学报,30(4):719-726. Yang X C, Chen F, Zhu W P, et al, 2014. Urbanization effects on observed change in summer extreme heat events over Zhejiang Province[J]. J Trop Meteor, 30(4):719-726(in Chinese).
- 于庚康,徐敏,高苹,等,2012.江苏冬夏季人体舒适度指数异常的背景场研究[J].气象,38(5):593-600. Yu G K, Xu M, Gao P, et al, 2012. Study on physical background of comfort index of human body anomaly in winter and summer in Jiangsu Province[J]. Meteor Mon, 38(5):593-600(in Chinese).
- 喻丽,2015.中国近30年太阳日总辐射状况及其气候学模型研究[D].南京:南京信息工程大学. Yu L, 2015. Study on daily total solar radiation over the past 30 years and its climatology model in China[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology(in Chinese).
- 张芳华,陶亦为,高辉,等,2019.2018年春末南方极端持续高温及MJO影响[J].大气科学学报,42(1):100-108. Zhang F H, Tao Y W, Gao H, et al, 2019. Persistent extreme high temperature event in southern China in late spring of 2018 and the effect of Madden-Julian Oscillation[J]. Trans Atmos Sci, 42(1):100-108(in Chinese).
- 张绍良,张国良,1996.灰色关联度计算方法比较及其存在问题分析[J].系统工程,14(3):45-49. Zhang S L, Zhang G L, 1996. Comparison between computation models of grey interconnect degree and analysis on their shortages[J]. Syst Eng, 14(3):45-49(in Chinese).
- 张岐山,郭喜江,邓聚龙,1996.灰关联熵分析方法[J].系统工程理论与实践,16(8):7-11. Zhang Q S, Guo X J, Deng J L, 1996. Grey relation entropy method of grey relation analysis[J]. Syst Eng-Theory Pract, 16(8):7-11(in Chinese).
- 张贞,马赛,汪权方,2017.基于Pearson灰色关联熵的粮食产量主影响因子识别——以河南省为例[J].干旱区资源与环境,31(9):43-48. Zhang Z, Ma S, Wang Q F, 2017. Identification of main driving factors influencing the grain production in Henan Province[J]. J Arid Land Resour Environ, 31(9):43-48(in Chinese).
- 周志翔,邵天一,唐万鹏,等,2004.城市绿地空间格局及其环境效应——以宜昌市中心城区为例[J].生态学报,24(2):186-192. Zhou Z X, Shao T Y, Tang W P, et al, 2004. The different urban green-land spatial patterns and their environmental effects: a case of the central district of Yichang City, Hubei Province[J]. Acta Ecol Sin, 24(2):186-192(in Chinese).
- Blazejczyk K, Epstein Y, Jendritzky G, et al, 2012. Comparison of UTCI to selected thermal indices[J]. Int J Biometeor, 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 Biometeor, 56(3):481-494.
- Fanger P O, 1972. Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering[M]. New York: McGraw-Hill.
- Fiala D, Havenith G, Bröde P, et al, 2012. UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation[J]. Int J Biometeor, 56(3):429-441.
- Havenith G, Fiala D, Blazejczyk K, et al, 2012. The UTCI-clothing model[J]. Int J Biometeorol, 56(3):461-470.
- Houghton F C, Yaglou C P, 1923. Determining equal comfort lines[J]. J Am Soc Heat Ventil Eng, 29:165-176.
- Jendritzky G, de Dear R, Havenith G, 2011. UTCI-Why another thermal index? [J]. Int J Biometeorol, 56(3):421-428.
- Mayer H, Höpfe P, 1987. Thermal comfort of man in different urban environments[J]. Theor Appl Climatol, 38(1):43-49.
- Siple M P A, Passel C F, 1945. Measurements of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures[J]. Proc Amer Philos Soc, 89(1):177-199.
- Thorsson S, Honjo T, Lindberg F, et al, 2007a. Thermal comfort and outdoor activity in Japanese urban public places[J]. Environ Behav, 39(5):660-684.
- Thorsson S, Lindberg F, Eliasson I, et al, 2007b. Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting[J]. Int J Climatol, 27(14):1983-1993.
- Yaglou C P, Minard D, 1957. Control of heat casualties at military training centers[J]. AMA Arch Ind Health, 16(4):302-316.