

近30 a 全国人体舒适度指数变化特征

朱卫浩^{1,2}, 张书余², 罗 斌¹

(1. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044; 2. 中国气象局兰州干旱气象研究所,
甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730020)

摘 要:利用全国736个站点1981~2010年的逐日气象资料,对人体舒适度指数(I_{CHB})时空演变、各影响因子的权重以及夏季6、7、8月的偏热天数进行了统计分析。研究表明:(1)近30 a来,我国年均 I_{CHB} 呈上升趋势,且达到极显著水平,各区的 I_{CHB} 年际变化与全国的演变趋势总体保持一致;(2)通过对4季 I_{CHB} 比较,春、秋、冬3个季节的 I_{CHB} 上升趋势均比夏季明显,冬季最为明显,春季次之;(3)温度(湿度和风速)与 I_{CHB} 存在着极显著的正(负)相关关系,其中温度对 I_{CHB} 的正影响最大,而湿度和风速对 I_{CHB} 的负影响主要是通过温度的间接作用来体现;(4)近30 a来,我国夏季6月份偏热天数较少,7、8月份平均偏热天数相当,华南地区偏热天数最多,西北地区最为舒适。

关键词:人体舒适度指数;通径系数;时空演变特征;偏热天数

中图分类号:P49

文献标识码:A

引 言

人们通常用气温高低来表示环境冷热,而人体对外界冷热的舒适感,并不能仅仅根据气温或其他任何单一的气象要素来评价^[1]。能量交换在人类与大气环境之间无时无刻地进行着,人体通过自身体温调节中枢使体温维持恒定。人体舒适度正是以人类机体与近地大气之间的热交换原理为基础,从气象学角度评价人类在不同天气条件下舒适感的一项生物气象指标,其在城市环境气象服务中具有重要地位^[2]。从1990年代开始,国内学者对人体舒适度展开了广泛的研究^[2-6],其主要通过统计方法分析了不同时空特征以及不同下垫面的人体舒适度变化规律,同时结合各地的旅游特点分析适宜度假的舒适月份。尽管其他学者对人体舒适度的研究较多,但大都是针对区域小范围的,对全国性范围人体舒适度还鲜有研究。

人体舒适度指数(Comfort Index of Human Body, 以下简称为 I_{CHB})是日常生活中较为常用的表征人体舒适度的方法,它主要取决于气温、湿度与风速3个指标:气温是判断气候舒适度的主要指标,湿度和风速是辅助指标^[7]。本文以全国近30 a的气

象资料为基础,通过计算出各地区各时段的 I_{CHB} ,研究在全球变暖的大背景下^[8-9],全国以及全国各地人体舒适度的时空分布特征。通过对 I_{CHB} 的研究,进一步了解我国各地区的人体舒适度感觉,提示人们根据各地气象要素的变化采取相应有效的防范措施,并为城市气象预报提供一些参考。

1 资料与方法

1.1 资料来源

所用资料为全国756个观测台站1981~2010年的逐日气象资料,包括日平均温度(以下简称温度)、日平均相对湿度(以下简称湿度)和日平均风速(以下简称风速)3项要素。地区划分标准为华北:晋、冀、京、津、蒙;东北:黑、吉、辽;华中:豫、鄂、湘;华东:苏、浙、皖、赣、鲁、闽、沪;华南:粤、桂、琼;西北:陕、甘、青、宁、新;西南:川、渝、贵、滇、藏。4季划分标准为:春季为每年的3~5月、夏季6~8月、秋季9~11月、冬季指当年12月至次年2月。

1.2 人体舒适度指数的计算方法

根据温度、湿度和风速对人体的影响原理,国内

收稿日期:2011-12-26;改回日期:2012-03-09

基金项目:中国气象局公益性行业专项(GYHY201106034)“天气敏感性疾病发病和流行诱发机制及预报技术”资助

作者简介:朱卫浩(1988-),男,江苏启东人,硕士研究生,研究方向为医疗气象学. E-mail:whzhu@hotmail.com

外专家提出了一系列人体舒适度指数的计算方法^[10-14],本文选用的是我国气象站常用的 I_{CHB} 经

验公式^[15],并按照规定统一标准将其划分为9个等级(表1),具体计算公式如下:

$$I_{\text{CHB}} = (t \times 1.8 + 32) - 0.55 \times (1 - hu/100) \times (t \times 1.8 - 26) - 3.2 \times \sqrt{v} \quad (1)$$

式中: t 为温度($^{\circ}\text{C}$), hu 为湿度(%), v 为风速(m/s)。

表1 我国人体舒适度指数的等级划分标准

Tab.1 Rank standard of comfort index of human body in China

舒适度等级	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I_{CHB}	≤ 25	25~38	38~50	50~55	55~70	70~75	75~80	80~85	> 85
感觉程度	冷	偏凉	舒适	舒适	舒适	偏热	热	炎热	酷热

1.3 通径分析法

通径分析法(path analysis)最早由 Sewall Wright^[16]于1921年提出,是简单相关分析的延续,在多元回归的基础上将相关系数加以分解,通过直接通径、间接通径系数及总通径系数分别表示某一变量对因变量的直接作用效果、通过其他变量对因变量的间接作用效果和综合作用效果^[17]。具体而言,通径分析是把每一个自变量 X_i 与因变量 Y 的相关系数 r_i ,分解成 X_i 对 Y 的直接通径系数 P_i 和 X_i 通过其他变量 X_j 对 Y 的间接通径系数 $r_{ij}P_j$ 。

通径分析常利用 SAS、SPSS 等软件进行分析,而何风华等^[18]发现在 Excel 内进行通径分析更加简单快捷,故本文采用 Excel 方法分析,在求得相关系数的基础上建立通径系数方程组,求解下列正则方程组,即可得到各自变量的直接通径系数 P_i ^[19]:

$$\begin{cases} r_{11}P_1 + r_{12}P_2 + L + r_{1n}P_n = r_{1Y} \\ r_{21}P_1 + r_{22}P_2 + L + r_{2n}P_n = r_{2Y} \\ \vdots \\ r_{n1}P_1 + r_{n2}P_2 + L + r_{nn}P_n = r_{nY} \end{cases} \quad (2)$$

式中 n 为自变量个数, $r_{ii} = 1$, $r_{ij} = r_{ji}$ ($i, j \leq n$), r_{ij} 是各自变量间的相关系数, r_{iY} 是各自变量与因变量之间的相关系数。最后计算 X_i 通过 X_j 形成的间接通径系数 $r_{ij}P_j$ 。

2 结果分析

2.1 全国各区人体舒适度指数的时空演变特征

从1981~2010年全国地区的 I_{CHB} 变化(图1a)可以看出,在近30 a中,我国年平均 I_{CHB} 存在较为明显的年际变化,尤其是从1990年代中期开始,年际振荡的周期基本为5~6 a。从 I_{CHB} 的总体演变特征上看,我国的年均 I_{CHB} 呈现极显著的上升趋势,线性趋势达到了0.08/a,通过了95%的信度检验。

由图1b可知,全国各区的年均 I_{CHB} 在数值上存在一定差异,华南地区最大、东北最小,平均相差26左右,线性趋势分别为0.03/a和0.08/a;华中和华东地区数值相差不大,线性趋势为0.08/a和0.10/a;其他地区如西南、华北和西北地区, I_{CHB} 指数介于东北和华东之间,线性趋势分别为0.08/a、0.05/a和0.08/a。尽管 I_{CHB} 区域差异较为明显,但7个地区的年际变化整体上较为一致,存在着显著的上升趋势,且通过了95%的信度检验。

比较1981~2010年全国4季 I_{CHB} 的变化趋势(图2),可以看出,春、夏、秋、冬4个季节的 I_{CHB} 变化范围分别是:50~54、66~69、50~55、31~38。显而易见,夏季 I_{CHB} 最高,而冬季 I_{CHB} 最低。通过对4个季节 I_{CHB} 总体演变趋势的比较,可以看出4个季节的 I_{CHB} 均有显著的上升趋势,其中冬季上升趋势最为明显,线性趋势达到了0.09/a,春季次之,而夏季最低,为0.05/a,均通过了95%的信度检验。4个季节的 I_{CHB} 的时间序列都存在显著的年际变化,其中夏季波动幅度最小,而冬季,尤其是1996年以后,波动幅度明显大于其他3个季节,同时在1984年出现明显的低谷。

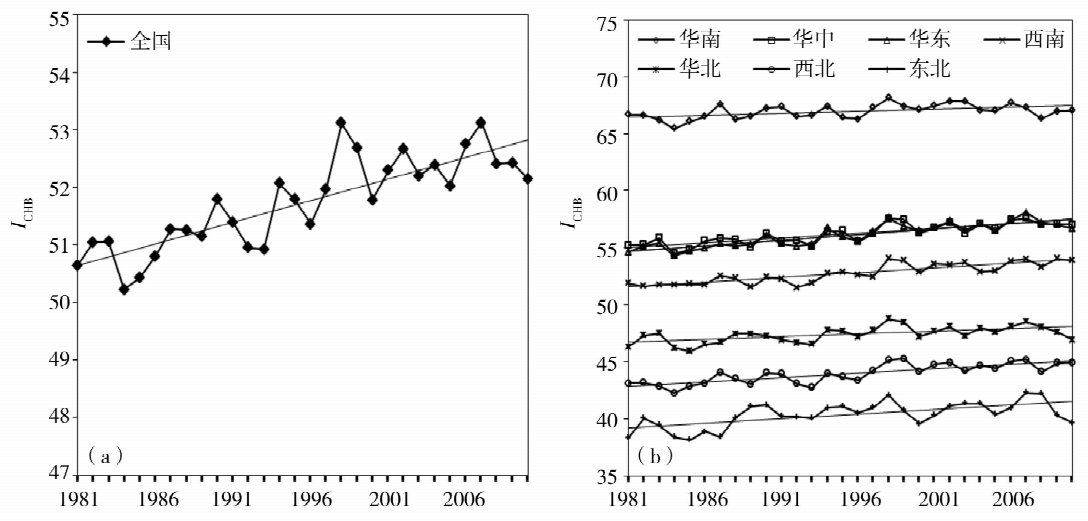


图 1 1981 ~ 2010 年全国(a)及各区(b)人体舒适度指数的历年变化

Fig. 1 Annual variation of comfort index of human body in China(a) and each region of China(b) from 1981 to 2010

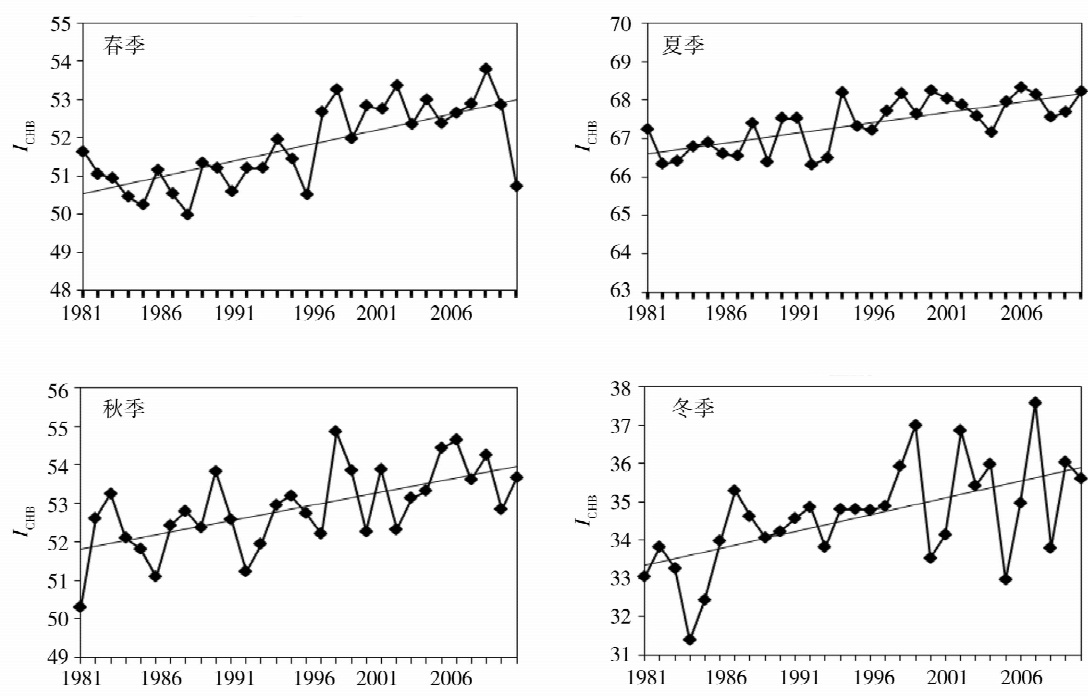


图 2 1981 ~ 2010 年全国 4 季人体舒适度指数的历年变化

Fig. 2 Annual variation of seasonal comfort index of human body in China from 1981 to 2010

图 3 是全国各区 4 季的 I_{CHB} 比较, 可以发现, 全国 7 大区域的 4 季 I_{CHB} 年际变化特征与全国总体趋势相似。各区之间的差异比较明显, 各季节之间的差异也十分显著。通过比较可以看到, 各区之间 I_{CHB} 的数值存在差异, 夏季最小, 为 15 左

右, 冬季最大, 达到了近 50。春、秋 2 季各区的 I_{CHB} 变化特征与各区的年 I_{CHB} 变化特征相一致。同时, 通过比较夏季各区的 I_{CHB} 值, 可以发现, 西北地区的 I_{CHB} 最低, 而华南地区的 I_{CHB} 4 季均处于高值。

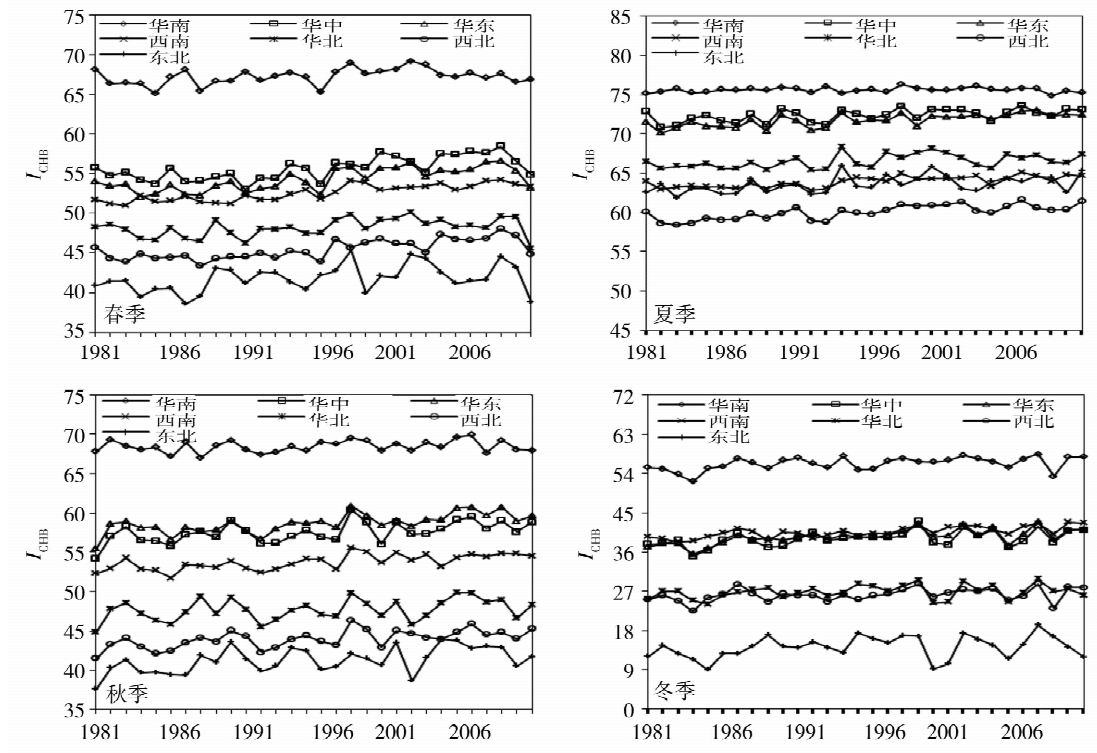


图3 1981~2010年全国各区4季人体舒适度指数的历年变化

Fig.3 Annual variation of seasonal comfort index of human body in each region of China from 1981 to 2010

2.2 人体舒适度指数影响因子权重分析

从表2可知,温度、湿度和风速与 I_{CHB} 之间存在着极显著的相关关系,且各因素之间又相互促进或相互制约,因此,须采用通径分析法对温度、湿度、风速与 I_{CHB} 之间的关系进行比较,以估算每一个影响因子对 I_{CHB} 的直接影响以及一个影响因子通过另一个影响因子对 I_{CHB} 产生的间接影响^[17-21]。

可以看出 I_{CHB} 与温度存在极显著的正相关关系,而与湿度和风速呈极显著的负相关关系。温度

的直接通径系数最大,达到了0.9853,说明温度对 I_{CHB} 的正影响最大;湿度和风速的直接通径系数较小,且为负值,但通过温度对 I_{CHB} 的间接通径系数的绝对值却很大,分别为0.4051和0.7016,均达到了显著水平,说明湿度和风速对 I_{CHB} 的负影响是通过温度间接产生的,而对 I_{CHB} 的直接影响较小,且风速的负影响作用略大于湿度。由此可见,3个影响因子中,温度直接影响 I_{CHB} ,而湿度和风速则通过温度间接负影响 I_{CHB} 。

表2 人体舒适度指数与各影响因子的通径系数
Tab.2 Path coefficient of I_{CHB} and each influence factor

I_{CHB}	与 I_{CHB} 的 相关系数	直接通径系数	间接通径系数			
			温度	湿度	风速	合计
温度	0.9853 **	0.8831 **	—	0.0041	0.0981	0.1022
湿度	-0.4701 **	-0.0089	-0.4051 *	—	-0.0561	-0.4612 **
风速	-0.8292 **	-0.1235	-0.7016 **	-0.0041	—	-0.7057 **

注: ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$; $r_{0.01} = 0.4487$, $r_{0.05} = 0.3494$ 。

2.3 夏季人体感觉偏热天数的特征

人们在不同的季节,对环境气候的感受自然是

不同的。夏季是人们出行的高峰期,同时也是人体对舒适度最为敏感的季节。

图4a给出了我国夏季人体感觉偏热(舒适度等级为6级)的天数的时间序列,可以看出,近30a来,除2002年、2005年以及2009年以外,全国6月平均偏热天数均在10d以下,7、8月平均偏热天数相当,均为16d,其中偏热天数 ≥ 15 d的年份分别占到了53.33%和73.33%,可见7月的波动幅度比8月大;从上升趋势上看,8月年际变化趋势不十分明显,未达到显著性水平,而6、7月的年际变化特征则呈现了一定的上升趋势,其中7月全国的偏热天数历年变化达到显著水平,而6月偏热天数的历年变化则达到了极显著水平。

比较全国各区夏季3个月的人体感觉偏热(舒适度等级为6)天数的年变化(图4b),可以看到,各区之间的差异相当明显。6月刚入夏,各区的偏热天数年际波动较为规律。华南地区分别在1982年、1987年、2000年以及2010年出现低谷,但其值仍然

高于其他各区。华东、华中地区呈极显著的上升趋势,但年际波动较大。西南地区6月上升趋势达到极显著水平,但上升幅度较小,年际波动较为平缓。华北地区上升趋势未达到显著水平。东北和西北地区偏热天数历年来一直处于零值附近。进入7月以后,各区历年偏热天数曲线特征出现变化。华南地区偏热天数始终处于高位,一个月几乎全都处于偏热等级。华东、华中地区偏热天数均超过了20d,年际波动比较明显。华北、东北地区,波动幅度较大,1993~1994年之间出现了明显的跳跃现象。西南、西北地区波动变化较为平缓,其中西北地区的年均偏热天数最少,平均仅有1d左右,这与全国各区夏季的年际变化特征相一致。8月的变化特征与7月类同,各区差异依旧明显,华南地区依旧处于高值,但整体偏热天数呈下降趋势,西北地区偏热天数进一步减少。

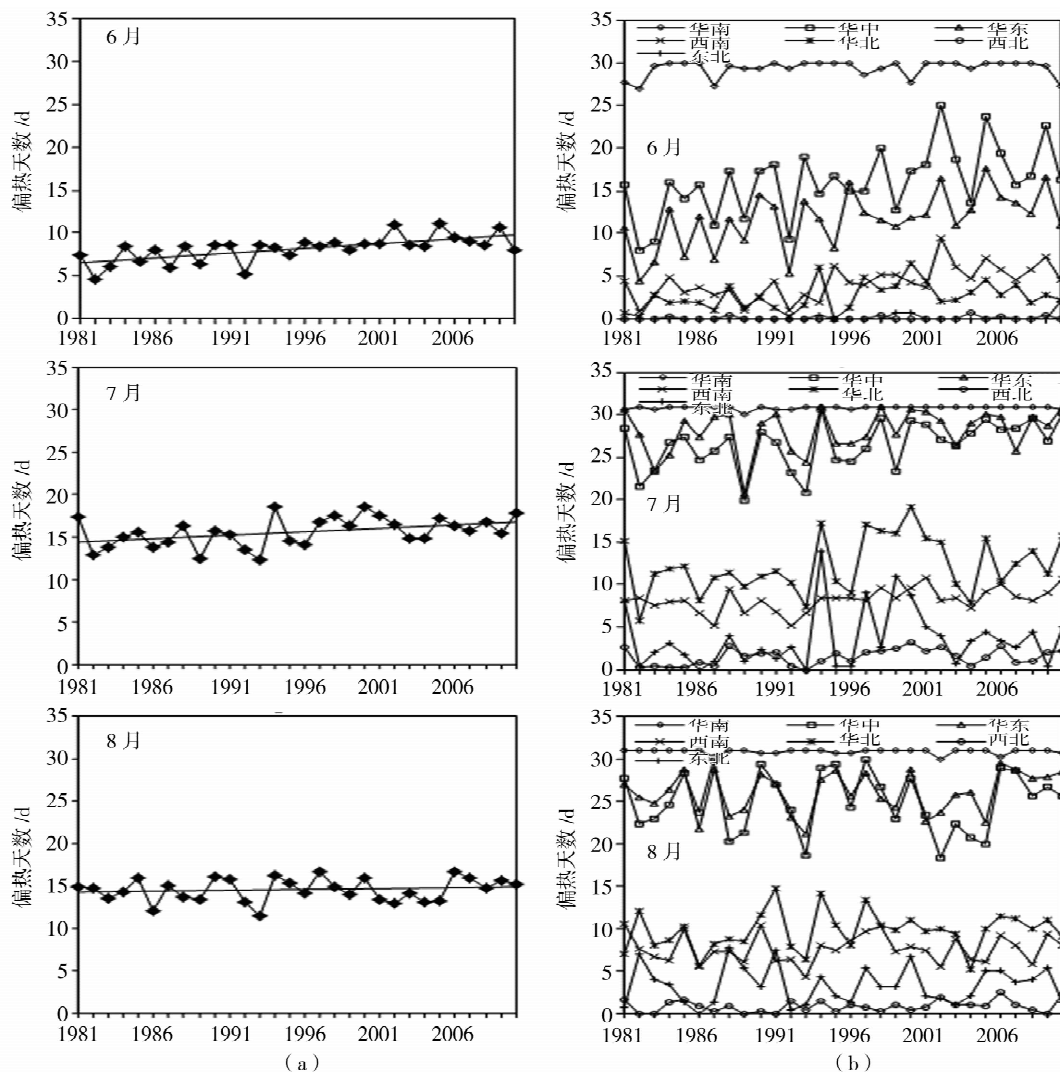


图4 1981~2010年夏季全国(a)及全国各区(b)人体感觉偏热的天数

Fig. 4 The heater days in June, July and August in China (a) and each region of China (b) from 1981 to 2010

3 讨论

(1)我国地势西高东低,东西跨度有60多个经度,南北跨度近50个纬度,沿海内陆以及南北地区都存在着一定的气候差异。通过对全国各区年均 I_{CHB} 数值的比较,得知华南地区人体感觉偏热的天数较多,而东北地区人体感觉偏冷的天数较多;人体在华中和华东地区舒适度感觉相当;其他地区人们感觉舒适的天数介于东北和华东地区之间。从整体上看, I_{CHB} 呈上升趋势,这可能与全球变暖造成的总体温度上升有关,段海霞^[22]等就2011年全国夏季的气温进行了分析,同期偏高 $1\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$,而气温这一影响因子对 I_{CHB} 的影响最大,进而使 I_{CHB} 数值增大。

(2)夏季的 I_{CHB} 在4个季节中是最高的,虽然其值范围未达到偏热等级,但是由于我国幅员辽阔,南北温差大,全国平均水平可能达不到总体偏热的水平,但在一定程度上说明了夏季人体感觉偏热的天数较多;冬季 I_{CHB} 最低,则说明人体感觉偏冷的天数较多;春、秋季的 I_{CHB} 较为适中,意味着人体感觉舒适的天数较多。用 I_{CHB} 表征人体舒适度的研究结果与实际生活体验较为吻合。

(3)全国各区4季的 I_{CHB} 数值差异较大,在夏季,全国气温普遍较高,而气温对 I_{CHB} 的贡献最大,所以夏季全国各地区的差异较小;在冬季,由于西伯利亚和蒙古高原冷空气自北向南入侵,行径过程中有一定的衰减,所以造成我国北方地区与南方地区降温幅度差异较大,从而致使冬季南北地区的 I_{CHB} 数值差异较大。西北地区由于其特殊的地理位置和气候环境,其夏季人体舒适度比其他地区更适宜。贾海源^[7]等就曾利用 I_{CHB} 指数对甘肃省1961~2008年的气象要素分析,研究表明地处西北地区的甘肃全省表现为冷到舒适的平均舒适度水平。而华南地区,由于其地处热带或亚热带区域,常年温度高于国内其他地区,从而造成4季 I_{CHB} 较其他地区高。

(4)夏季是旅游出行的旺季,柏秦凤^[6]等基于我国20个主要旅游城市的逐日数据,分析了近50多a来各旅游城市的舒适月份以及旅游度假的适宜时间和地点,也有学者^[23]进一步提出了“宜人频率”的概念。本文结合 I_{CHB} 并对夏季3个月的偏热天数进行分析,我国夏季前2个月的偏热天数呈显著上升趋势,这可能也与全球变暖有关,造成夏季高温的提前到来。其中,西北、东北这2个地区的人们在6月几乎没有感觉偏热的时候,7、8月西北地区是全国人体感觉最舒适的地区。故夏季出行,西北

地区不失为较为理想的避暑佳地。

4 结论

(1)1981~2010年,我国年均 I_{CHB} 上升趋势达到极显著水平,线性趋势为 $0.08/\text{a}$,通过了95%的信度检验,且从1990年代中期开始,存在着较为明显的年际振荡周期。各区之间的年均 I_{CHB} 虽然在数值上存在一定差异,但整体变化特征仍较为一致,线性趋势较为明显,也存在显著上升趋势,且通过了95%的信度检验。

(2)全国4季 I_{CHB} 均有显著上升趋势,其中冬季上升趋势最为明显,线性趋势达到了 $0.09/\text{a}$,春季次之,夏季最低。夏季的波动幅度最小,而冬季,尤其在1996年以后,波动幅度明显大于其他3个季节。各区之间 I_{CHB} 数值差异比较明显,夏季最小,为15左右,冬季最大,达到了近50。

(3)温度、湿度和风速与 I_{CHB} 之间存在着极显著的相关关系,温度对 I_{CHB} 的正影响最大,而湿度和风速对 I_{CHB} 的负影响主要是通过温度的间接作用,直接作用影响比较小,且风速的负影响作用略大于湿度。

(4)近30a来,全国6月几乎所有年份平均偏热天数均在10d以下,7、8月平均偏热天数相当,均为16d。其中6、7月全国的偏热天数历年变化达到显著水平,而8月年际变化趋势并不是十分明显。从各区3个月的历年变化来看,华南地区偏热天数最多,西北地区最为舒适。

人体舒适度的评价影响因素众多,本文提供的 I_{CHB} 计算公式本身存在着一定的缺陷,所得出的结论也会存在一些不足。若在公式中引入地形地貌、天气状况、大气质量、人体个体差异等因素,同时进行人群跟踪调查试验对舒适度进行订正,可以更好地进行预报和指导工作。

参考文献:

- [1] 张书余. 医疗气象预报[M]. 北京:气象出版社,2010. 79-96.
- [2] 李树岩,马志红,许蓬蓬. 河南省人体舒适度气候指数分析[J]. 气象与环境科学,2007(4):49-53.
- [3] 王亚英,郝兴宇,蔺银鼎,等. 校园绿化小气候效应及其对人体舒适度的影响——以山西农业大学校园为例[J]. 山西农业大学学报(自然科学版),2011(2):117-120.
- [4] 毛家勋,吕忠东,陈永琼. 攀枝花市区5—7月人体舒适度变化趋势研究[J]. 气象与环境科学,2011(S1):65-69.
- [5] 靳宁,景元书,武永利. 南京市不同下垫面对人体舒适度的影响分析[J]. 气候与环境研究,2009(4):445-450.

- [6] 柏秦凤,霍治国,贺楠,等. 中国 20 座旅游城市人体舒适度指数分析[J]. 生态学杂志,2009(8):1607-1612.
- [7] 贾海源,陆登荣. 甘肃省人体舒适度地域分布特征研究[J]. 干旱气象,2010(4):449-454.
- [8] 牟尧,牟新之. 地壳隔热密封破坏——近百年气候与环境变化“发病机制”的数学验证[J]. 干旱气象,2011,29(3):383-391.
- [9] 刘吉峰,王金花,焦敏辉,等. 全球气候变化背景下中国黄河流域的响应[J]. 干旱区研究,2011(5):860-865.
- [10] 吴兑. 多种人体舒适度预报公式讨论[J]. 气象科技,2003(6):370-372.
- [11] 郑有飞. 人体舒适度及舒适指数计算[J]. 气象教育与科技,2000(2):7-10.
- [12] 刘梅,于波,姚克敏. 人体舒适度研究现状及其开发应用前景[J]. 气象科技,2002(1):11-14.
- [13] 石春娥,王兴荣,陈晓平,等. 人体舒适度预报方法研究[J]. 气象科学,2001(3):363-368.
- [14] Terjung W H. Physiologic Climates of the Conterminous United States: a Bioclimatic Classification Based on Man[J]. Annals of the Association of American Geographers,1966(1):141-179.
- [15] 雷桂莲,喻迎春,刘志萍,等. 南昌市人体舒适度指数预报[J]. 江西气象科技,1999(3):40-41.
- [16] Wolfe L M. Sewall wright on the method of path coefficients: An annotated bibliography[J]. Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal,1999,6(3):280-291.
- [17] 敬艳辉,邢留伟. 通径分析及其应用[J]. 统计教育,2006(2):24-26.
- [18] 何风华,李明辉. Excel 在通径分析中的应用[J]. 中国卫生统计,2005(5):331-332.
- [19] 张天伦,崔艳超,徐恒玉. 通径分析在 EXCEL 上的实现[J]. 农业网络信息,2004(8):36-37.
- [20] 林德光. 通径分析法在腰果播种中的应用——兼论通径分析的实施[J]. 热带作物学报,2001(3):34-39.
- [21] 张琪,丛鹏,彭励. 通径分析在 Excel 和 SPSS 中的实现[J]. 农业网络信息,2007(3):109-110.
- [22] 段海霞,王素萍,冯建英. 2011 年夏季全国干旱状况及其影响与成因[J]. 干旱气象,2011,29(3):392-400.
- [23] 陈胜军,樊高峰,郭力民. 浙江海岛休闲旅游适宜时段研究[J]. 气象科技,2006(6):719-723.

Variation Characteristics of Comfort Index of Human Body in China in Recent 30 Years

ZHU Weihao^{1,2}, ZHANG Shuyu², LUO Bin¹

(1. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Institute of Arid Meteorology, CMA, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou 730020, China)

Abstract: Based on the daily meteorological data from 736 stations in China during 1981-2010, the spatio-temporal evolution characteristics of comfort index of human body (I_{CHB}) were analyzed, at the same time, the weight of every influencing factor and the hotter days from June to August were analyzed statistically. The results are as follows: (1) The annual average I_{CHB} in China and each partition presented ascendant trend in the past 30 years, which reached an extremely significant level and the linear increasing trend of I_{CHB} in China is 0.08 each year; (2) The I_{CHB} in spring, autumn and winter presented obvious increasing trend, especially in winter, but the trend wasn't obvious in summer; (3) There were significant positive (negative) correlation between temperature (humidity and wind speed) and I_{CHB} , furthermore, temperature had the biggest impact on I_{CHB} while the influence of humidity and wind speed on I_{CHB} was mainly indirect effect through temperature; (4) Over the past 30 years, the hotter days was more in July and August but less in June, and hotter days were most in Southern China, but the northwest China was the most comfortable one.

Key words: comfort index of human body (I_{CHB}); path coefficient; spatio-temporal evolution; hotter days