

于庚康,徐敏,于堃,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.

# 近 30 年江苏人体舒适度指数变化特征分析<sup>\* 1</sup>

于庚康<sup>1</sup> 徐 敏<sup>1</sup> 于 堃<sup>2</sup> 高 苹<sup>1</sup>

1 江苏省气象局,南京 210008

2 南京信息工程大学,南京 210044

**提 要:** 利用江苏地区 37 个观测站 1980—2009 年逐日气象资料,通过线性趋势以及通径分析法,对人体舒适度指数(CIHB)的时空演变特征进行了分析。结果表明:(1)近 30 年来,江苏年均 CIHB 呈现显著的上升趋势,线性趋势为 0.11/年,淮北、江淮之间、苏南的 CIHB 年际变化特征与全省平均的演变特征基本保持一致;(2)除夏季外,其余三个季节的 CIHB 均有较明显的上升趋势,其中春季的上升趋势最为明显,秋季次之,冬季的年际变化幅度最大,CIHB 春、夏(秋、冬)两季的南北差异较小(较大);(3)CIHB 与温度(相对湿度和风速)存在显著的正(负)相关,其中温度对 CIHB 的正影响最大,相对湿度和风速对 CIHB 的最终影响是通过温度起负作用;(4)虽然近 30 年江苏整个夏季的 CIHB 不存在明显的变化趋势,但自 20 世纪 90 年代初期以来,7、9 月份还是存在着弱上升趋势。研究表明,在全球气候变暖的大背景下,对江苏地区的 CIHB 气候变化特征的研究可为人们应对气象要素变化采取有效防范措施以及旅游、能源业的气象服务提供一定的科学依据。

**关键词:** 人体舒适度指数, 时空特征, 通径分析, 偏热天数

## Analysis of Variation Characteristics of Comfort Index of Human Body in Jiangsu Province During the Past Three Decades

YU Gengkang<sup>1</sup> XU Min<sup>1</sup> YU Kun<sup>2</sup> GAO Ping<sup>1</sup>

1 Jiangsu Meteorological Service, Nanjing 210008

2 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

**Abstract:** Based on the daily meteorological data observed by 37 stations in Jiangsu Province from 1980 to 2009, the spatio-temporal characteristics of comfort index of human body (CIHB) were studied by use of the linear trend and path analysis. The results indicated that the average annual CIHB index in all Jiangsu and the three partitions (the north of the Huaihe River, the area between Yangtze and Huaihe Rivers and the south of Yangtze River) presents a remarkable increasing trend during the past 30 years, and the linear increasing trend of CIHB in Jiangsu is 0.11/a. Except in summer, the average annual CIHB index of Jiangsu in the other three seasons has an obvious ascendant trend. Increasing is the most prominent in spring and the interannual variation is the most remarkable in winter. In addition, the north-south difference of CIHB index in autumn and winter is more than that in spring and summer. There is a significant positive (negative) correlation between CIHB and temperature (relative humidity and wind speed), furthermore, the temperature has the biggest impact on CIHB. Although the whole summer CIHB index over the past three decades has no obvious change trend, there is still weak rising trend in July and September since the 1990s. Under the background of the global warming, the research of the characteristics of CIHB climate change may provide scientific basis for people taking effective prevention measures for the variation of meteorological elements and meteorological services about tourism and energy industry.

**Key words:** comfort index of human body (CIHB), spatial-temporal features, path analysis, hotter days

\* 江苏省科学技术厅科技创新与成果转化项目(BM2008163)资助

2010 年 10 月 14 日收稿; 2010 年 12 月 30 日收修定稿

第一作者: 于庚康,主要从事公共气象服务研究工作. Email: yugk\_qx@js.gov.cn

## 引言

温度、湿度、风等气象要素是人类赖以生存的大气环境,人体与大气环境之间通过能量交换和自身的体温调节,在产热、吸热和失热中达到热平衡,以维持恒定的体温<sup>[1]</sup>。人体舒适度正是以人类机体与大气环境之间的热交换原理为基础,从气象学角度来评价人类在不同角度气候条件下舒适感的一项生物气象指标<sup>[2]</sup>。它不仅直接影响到人民的日常生活,还对生产、销售、交通运输等诸多领域产生影响。由于它在城市环境气象服务中具有十分重要的地位,因此从 20 世纪 90 年代开始,国内不少学者对此陆续展开了广泛的研究,如石春娥等<sup>[3-6]</sup>以逐日气象条件为基础深入研究了人体舒适度指数的预报;徐大海等<sup>[7]</sup>详细分析了体表温度、不舒适指数和着装指数;严明良等<sup>[8]</sup>提出了环境气象指数和人体舒适度指数的 7 种设计方法。尽管表征人体舒适度的方法有多种,在这里仅对日常生活中较为常用的人体舒适度指数进行研究。可是人体舒适度指数是一种比较复杂的指数,它受到多种气象要素的影响,但一般而言,气温、相对湿度和风速等气象要素对人体感觉的影响最大,所以在文中计算人体舒适度的时候只包含这 3 个要素。

科学研究表明,当前全球气候正经历一次以变暖为主要特征的变化,在全球变暖的大背景下,江苏地区的气候也存在着变暖的趋势,尤其是近十几年气温上升趋势更加明显<sup>[9]</sup>。气温是用来表征人体舒适程度中的一项重要影响因子,在变暖的大背景下,该指数是否也存在类似的变化趋势目前还不清楚,因此需要我们进一步的研究探讨,并且对近几十年人体舒适度指数做研究,对进一步认识和采取相关措施来改善我们赖以生存的城乡基础条件是非常有意义的<sup>[10-11]</sup>,同时也可以为日常气象环境指数的预报提供一些依据。另外,对江苏旅游气候资源优势的综合开发以及气象部门开展旅游气象服务均可以提供科学依据。

## 1 数据和计算方法

### 1.1 数据和人体舒适度指数的计算方法

使用的具体资料是江苏 37 个气象观测站

1980—2009 年日平均温度(简称温度)、日平均相对湿度(简称湿度)和日平均风速(简称风速)。由于人体舒适度指数(Comfort Index of Human Body,简称 CIHB)是一项综合感觉指数,包括较多气象要素,很难在一个公式中把各个要素对指数的贡献直接表达出来,所以到目前为止,国内外至少有二十多种 CIHB 的计算方法,针对江苏特有的气候特征,在文中采用了如下的计算公式<sup>[12]</sup>:

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

该公式是由温度、湿度和风速构建的非线性方程,它已经经过多次试验和比较,并且已经作为预报模式应用于日常的业务当中,式中  $t$  为温度( $^{\circ}\text{C}$ ),  $hu$  为湿度(%),  $v$  为风速( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )。

在分析区域差异时,按照通常业务预报中的气候区域划分方法,以长江和淮河为界将江苏划分为苏南、江淮之间和淮北三个地区。

### 1.2 通径分析法

通径分析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,通过直接通径和间接通径系数分别表示某一变量对因变量的直接效应,以及通过其他变量对因变量的间接效应来反映自变量与因变量之间的关系。具体而言,通径分析是把每一个自变量  $x_j$  与因变量  $y$  的相关系数  $r_j$ ,分解成  $x_j$  对  $y$  的直接通径系数  $b_j$  和  $x_j$  通过其他变量  $x_k$  对  $y$  的间接通径系数  $r_{kj}b_k$ 。

在 Excel 中对自变量与因变量进行相关分析<sup>[13]</sup>,在求得相关系数的基础上建立通径系数的方程组,求解方程组,得到各自变量的直接通径系数  $b_j$ 。

$$\begin{aligned} b_1 + r_{12}b_2 + r_{13}b_3 &= r_1 \\ r_{21}b_1 + b_2 + r_{23}b_3 &= r_2 \\ r_{31}b_1 + r_{32}b_2 + b_3 &= r_3 \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $r_{kj}$  是各自变量间的相关系数,  $r_j$  是自变量与因变量之间的相关系数。最后计算  $x_j$  通过  $x_k$  形成的间接通径系数  $r_{kj}b_k$  ( $j \neq k$ )。

## 2 江苏地区人体舒适度指数特征分析

### 2.1 江苏地区人体舒适度指数的时空演变特征

从 1980—2009 年 CIHB 的历年变化(图 1)中

可以看出,在近 30 年中,江苏全省平均的年均 CIHB 存在着较为明显的年际变化,尤其是从 20 世纪 90 年代开始,年际振荡的周期基本上是 3~4 年。但从总体的演变特征上看,江苏地区的年均 CIHB 呈现出了显著的上升趋势,线性趋势达到了 0.11/年,通过了 0.05 的显著性水平检验。

江苏南北跨度近 5 个纬度,南北地区存在着一定的气候差异,从图 1 中可以明显地看到,淮北、江淮之间和苏南这 3 个地区的年均 CIHB 在数值上存在差异,淮北最小、江淮之间居中、苏南最大,但 3 个地区的年际变化特征基本上还是一致的,也存在着显著的上升趋势,线性趋势分别达到了 0.10/年, 0.11/年和 0.12/年,均通过了 0.05 的显著性水平检验。

从 1980—2009 年江苏全省平均的 4 个季节 CIHB 的历年变化(图 2)中,可以看出春、夏、秋、冬 4 个季节的 CIHB 变化范围分别是:49~56,70~

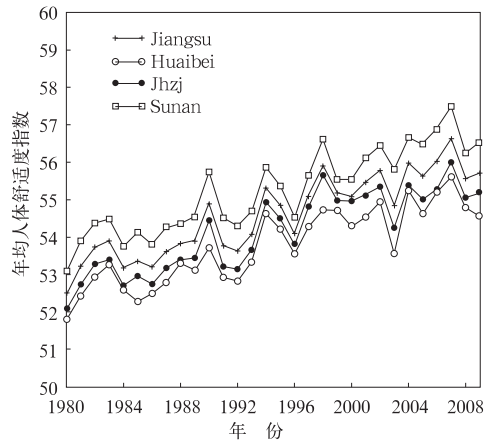


图 1 1980—2009 年,江苏、淮北、江淮之间、苏南等地人体舒适度指数的历年变化  
图中 Jiangsu: 江苏;Huaibei: 淮北;  
Jhzej: 江淮之间;Sunan: 苏南,以下类同  
Fig.1 Annual variations of CIHB index in the four regions of Jiangsu, Huaibei, Jhzej and Sunan during 1980—2009

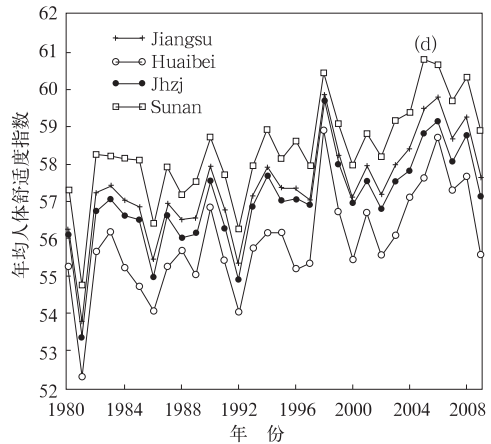
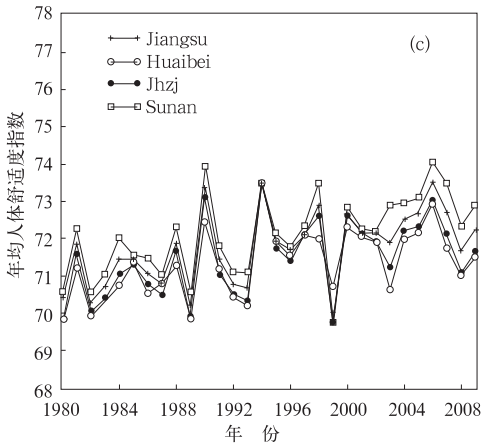
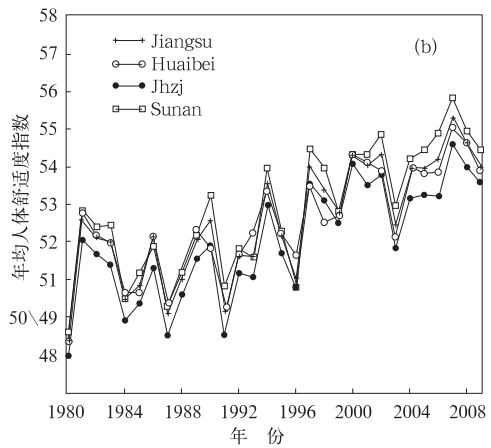
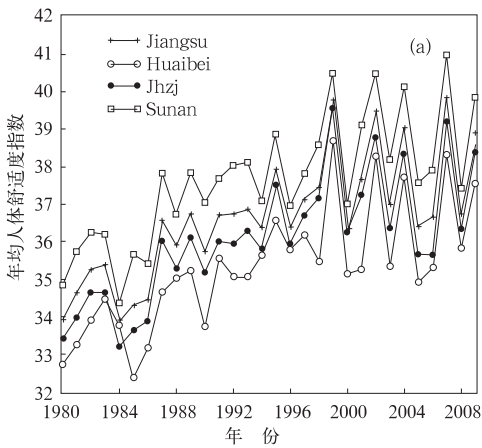


图 2 1980—2009 年江苏、淮北、江淮之间、苏南四个季节人体舒适度指数的历年变化  
(a) 冬季; (b) 春季; (c) 夏季; (d) 秋季

Fig.2 Annual variations of seasonal CIHB index in Jiangsu, Huaibei, Jhzej and Sunan during 1980—2009  
(a) winter, (b) spring, (c) summer, (d) autumn

74, 52~61, 32~41。比较可知,夏季 CIHB 最高,意味着天气炎热,人体感觉偏热的天数较多;冬季 CIHB 最低,表明人体感觉偏冷的天数较多;春、秋两季的 CIHB 比较适中,说明人体感觉舒适的天数较多。四季 CIHB 的时间序列都存在着一定的年际变化,其中冬季的年际变化最为显著,尤其 1998 年以后,CIHB 的波动幅度要明显大于其他 3 个季节。比较 4 个季节的 CIHB 总体变化特征可以发现,除了夏季外,其余 3 个季节均有较明显的上升趋势,其中春季的上升趋势最为明显,秋季次之,春季的线性趋势是达到了 0.14/年,通过了 0.05 的显著性水平检验,并且 1996—1997 年存在较为明显的“跳跃”现象。

比较淮北、江淮之间、苏南地区的 4 个季节 CIHB(图 2),可以发现这 3 个地区各个季节的 CIHB 年变化特征基本上是一致的,当然与江苏全省平均的变化特征也是十分相似,但是在数值上存在差异,春、夏两季,CIHB 的南北差异较小,为 1.0 左右;秋、冬两季的南北差异较大,在 2~3 之间。这可能与在不同季节江苏受不同气候系统影响有关,在春、夏两季,江苏主要是受副热带高压的影响,南北的气温差异较小,而在计算 CIHB 的公式中,气温这一影响因子所占的比重最大(以下有影响因子权重具体分析),所以 CIHB 的大小主要还是取决于气温的变化,因此春、夏两季的 CIHB 南北的数值差异

比较小。而在秋、冬两季,冷空气较为活跃,而江苏地区南北跨度较大,冷空气在自北向南的影响过程中衰减作用较为明显,所以可能造成南北的降温幅度差异较大,从而导致了秋、冬两季南北的 CIHB 数值差异较大。

## 2.2 人体舒适度指数影响因子权重分析

由于温度、湿度和风速与 CIHB 之间存在显著的相关关系(表 1),而且各影响因子之间还存在着相互作用、相互制约和相互促进的关系,因此,对温度、湿度、风速与 CIHB 之间的关系必须采用 Wright 于 1921 年提出的途径分析法(path analysis)<sup>[14]</sup>,以估算每一个影响因子对 CIHB 的直接影响,以及一个影响因子通过另一个影响因子对 CIHB 产生的间接影响<sup>[15-18]</sup>。

由表 1 可知,CIHB 与温度存在显著的正相关关系、与湿度和风速是存在显著的负相关关系。温度的直接途径系数达到了 0.88,为最大,说明温度对 CIHB 的正影响最大,湿度和风速的直接途径系数较小,且为负,而通过温度对 CIHB 的间接途径系数却较大(绝对值),说明这两个因子是通过温度对 CIHB 产生负影响的。由此可见,湿度和风速对 CIHB 的最终影响是通过温度起负作用,而其自身对 CIHB 的直接负影响却比较小。

表 1 人体舒适度指数与各影响因子的途径系数(通过年均值计算的)

Table 1 Direct path coefficients of CIHB index and each influence factor

CIHB	间接途径			直接途径	与 CIHB 的相关系数
	温度	湿度	风速		
温度		0.0057	0.0999	0.88	0.99
湿度	-0.4996		-0.1040	-0.01	-0.62
风速	-0.5861	-0.0069		-0.15	-0.75

## 2.3 7、8、9 月人体感觉偏热天数的特征

虽然从上述分析可知,近 30 年江苏整个夏季的 CIHB 并不存在明显的变化趋势,但由于夏季是旅游以及降温耗费能源的旺季,同时也是人体对舒适度的反应最为敏感的季节,所以有必要对夏季中各

个月份的 CIHB 气候变化特征进行对比分析。但是面对具体的 CIHB 数字,公众往往不知道如何去衡量这个值,所以就需结合当地实际情况对这些值进行分级,具体的江苏省 CIHB 的等级划分标准见表 2。

表 2 江苏省人体舒适度指数的等级划分标准(7—9 月)

Table 2 Classified standards of CIHB index in Jiangsu Province (from July to September)

舒适度指数	≤25	25~35	35~50	50~60	60~70	70~77	77~80	80~85	>85
舒适度等级	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
感觉程度	冷	偏凉	舒适	舒适	舒适	偏热	热	炎热	很热

图 3 给出了 7 月份人体感觉偏热(舒适度等级为 1 级)的天数的年变化序列,从图中可以看出,1980—2009 年 7 月份江苏全省平均的偏热天数的时间序列是呈现出了先降后升的特征,20 世纪 80 年代到 90 年代初期总体上呈现减少的趋势,90 年代初期以后至今是呈现增多的趋势,尤其是最近 5 年偏热的天数始终是处在高位,偏热天数都在 24 天以上(包含 24 天)。在近 30 年中,人体感觉偏热的平均天数是 20 天,7 月份偏热天数  $\geq 15$  天、 $\geq 20$  天、 $\geq 24$  天的年份分别占了 90%,53.3%和 33.3%。其中 2005 年偏热天数为 1980 年以来的极高值,高达 30 天;1988 年偏热天数为 1980 年以来的极低值,只有 8 天,但需要注意的是这并不是说明这一年 7 月份最凉爽,因为该月炎热(舒适度等级为 3 级)的天数为历年最高(图略),高达 5 天,同时热(舒适度等级为 2 级)的天数也不少,高达 13 天。

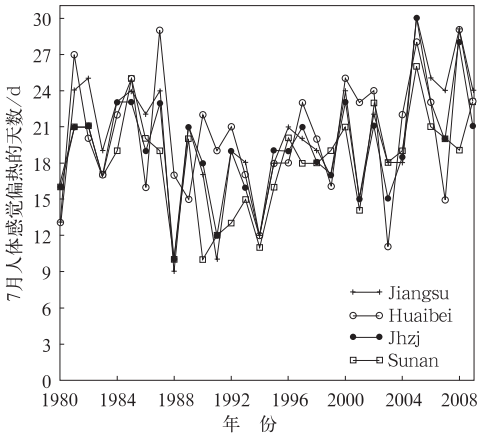


图 3 1980—2009 年 7 月份江苏、淮北、江淮之间、苏南人体感觉偏热的天数  
Fig. 3 The hotter days in July in Jiangsu, Huaibei, Jhzej and Sunan during 1980 to 2009

比较淮北、江淮之间、苏南地区的人体感觉偏热(舒适度等级为 1 级)天数的年变化,可以发现,年际变化的大致规律还是较为一致的,也是先降后升,苏南与江淮之间的数值较为接近,与淮北的差异较大。这 3 个地区 7 月份偏热天数  $\geq 15$  天的年份分别占了 90%,90%和 80%。

从图 4 可以看出,近 30 年 8 月份江苏人体感觉偏热的天数年变化序列没有明显的上升或下降趋势,平均偏热天数是 23 天,比 7 月份要平均多出 3 天,但是 8 月份感觉热、炎热的天数要略小于 7 月份(图略)。淮北、江淮之间、苏南地区的人体感觉偏热

天数的年变化波动特征基本一致,在数值上存在差异,淮北偏热的天数基本上要小于其他两个地区。

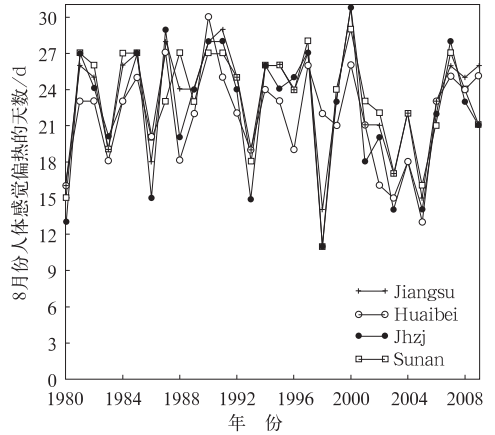


图 4 1980—2009 年 8 月份江苏、淮北、江淮之间、苏南人体感觉偏热的天数  
Fig. 4 The hotter days in August in Jiangsu, Huaibei, Jhzej and Sunan during 1980 to 2009

从图 5 可以看出,近 30 年 9 月份江苏人体感觉偏热天数的年变化序列存在着微弱的上升的趋势,平均偏热天数只有 6 天,远远小于 7、8 两月,9 月份平均舒适(舒适度等级为 0 级)的天数高达 20 多天(图略),所以 9 月份人体感觉会比 7、8 月份明显舒适不少。9 月份苏南地区人体感觉偏热的天数要基本上多于其他两个地区。由此可见,从时间上来说,江苏 9 月份的气候非常宜人,是夏季旅游的黄金时间;从空间上来说,最舒适的是淮北一带。

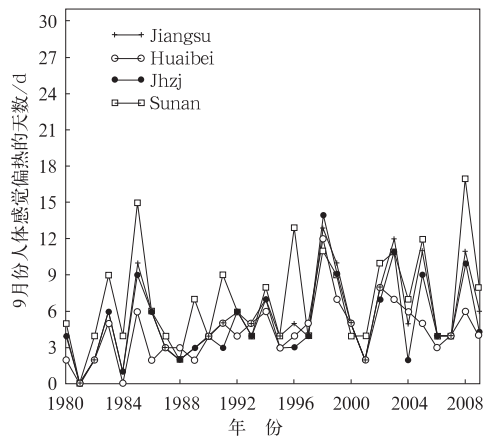


图 5 1980—2009 年 9 月份江苏、淮北、江淮之间、苏南人体感觉偏热的天数  
Fig. 5 The hotter days in September in Jiangsu, Huaibei, Jhzej and Sunan during 1980 to 2009

### 3 小结与讨论

利用江苏 37 个观测站近 30 年的逐日气象资料,着重分析了江苏地区 CIHB 的时空变化特征,采用通径分析对各影响因子所占权重进行了对比,最后针对 7、8 和 9 月三个月的偏热天数做了统计分析,研究结果表明:

(1) 1980—2009 年,江苏年均 CIHB 呈现出了显著的上升趋势,线性趋势达到了 0.11/年,通过了 0.05 的显著性水平检验。淮北、江淮之间、苏南的年均 CIHB 在数值上存在差异,但这三个地区的年际变化特征基本上还是一致的,也存在着显著的上升趋势,线性趋势分别达到了 0.10/年、0.11/年和 0.12/年,均通过了 0.05 的显著性水平检验。

(2) 除了夏季外,其余三个季节的 CIHB 均有较明显的上升趋势,其中春季的上升趋势最为明显(线性趋势达到了 0.14/年),秋季次之,冬季的年际变化最为显著,尤其 1998 年以后,CIHB 的波动幅度要明显大于其他三个季节。淮北、江淮之间、苏南的四个季节的 CIHB 年变化特征基本上保持一致,但是在数值上存在差异,春、夏两季,CIHB 的南北差异较小,为 1.0 左右;秋、冬两季的南北差异较大,在 2~3 之间。

(3) CIHB 与温度存在显著的正相关关系,与湿度和风速存在显著的负相关关系,其中温度对 CIHB 的正影响最大,湿度和风速对 CIHB 的最终影响是通过温度起负作用,而其自身对 CIHB 的直接负影响比较小。

(4) 1980—2009 年,7 月份江苏偏热天数的时间序列是呈现出了先降后升的特征,8 月份的年变化序列没有明显的变化趋势;9 月份的年变化序列存在着微弱的上升趋势。近 30 年,7、8 和 9 月江苏人体感觉偏热的平均天数分别达到了 20、23 和 6 天,其中 9 月份平均舒适的天数高达 20 多天。由此可见,江苏夏季旅游气候随时间的推进而愈宜人,即 9 月份气候最舒适。

最后需要指出的是,舒适度的评价其实并不仅仅和气象要素有关,还与地形地貌、天气状况、大气质量、个体差异等有关<sup>[19-23]</sup>,所以上述计算 CIHB 的公式本身就存在一定的缺陷,因此所得出的结论也会存在一些不足。在 CIHB 计算公式中若加入更多因子,如地形地貌、太阳辐射、紫外线辐射等,并通过大量的对比和选取代表性人群进行验证,提高舒适

度的预报精度,那就可以更好地指导人们的生活和工作。

**致谢:**文章得到了江苏省气象局气候中心副主任周学东的悉心帮助,特表感谢。

### 参考文献

- [1] 杨成芳,薛德强,李长军. 山东省人体舒适度区域特征研究[J]. 气象,2004,30(10).
- [2] 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,2002,30(1):11-14.
- [3] 石春娥,王兴荣,陈晓平,等. 人体舒适度预报方法研究[J]. 气象科技,2001,29(3):364-369.
- [4] 谈建国,邵德民,马雷鸣,等. 人体热量平衡模型及其在人体舒适度预报中的应用[J]. 南京气象学院学报,2001,24(3):384-390.
- [5] 吴兑. 多种人体舒适度预报公式讨论[J]. 气象科技,2003,31(6):370-372.
- [6] 罗晓玲,兰晓波,李岩瑛,等. 人体舒适度指数预报体系研究[J]. 干旱区资源与环境,2004,18(8):59-62.
- [7] 徐大海,朱蓉. 人对温度、湿度、风速的感觉和着衣指数的分析研究[J]. 应用气象学报,2000,11(4):430-439.
- [8] 严明良,沈树琴. 环境气象指数的设计方法探讨[J]. 气象科技,2005,33(6):583-588.
- [9] 江苏省气象局. 江苏省气候图集[M]. 北京:气象出版社,2009:167.
- [10] 张书余. 城市环境气象预报技术[M]. 北京:气象出版社,2002:24-125.
- [11] 张秀丽,孙燕. 近 50 a 北京人居环境中气候因子的变化特征[J]. 南京气象学院学报,2007,30(4):519-523.
- [12] 严明良,沈树勤. 几个气象指数的开发以及中尺度树脂产品在其中的释用[G]//江苏省环境气象指数系列论文集,2001:2-6.
- [13] 任红松,朱家辉,杨彬,等. EXCEL 在通径分析中的应用[J]. 农业网络信息,2006,(3):90-92.
- [14] Wright S. The method of path coefficients[J]. Annals of Mathematical Statistics, 1934, 5:161-215.
- [15] 边宽江等. 小麦品种产量与产量因素通径分析[J]. 西北农业学报,1999,8(2):20-21.
- [16] Thakurb BS, Korla BN, Joshi A K. Path coefficients analysis in bean[J]. Annals of Agriculture Research, 1997, 18(4):437-440.
- [17] 宋志伟,杨首乐. 春性小麦品种主要农艺性状与产量的相关与通径分析[J]. 中国农学通报,2006,22(5):174-176.
- [18] 韩文革,于晓秋,朱伟. 通径分析在春小麦产量分析中的应用[J]. 农业与技术,2007,27(6):87-91.
- [19] 刘甜甜,郭海峰,禹伟,等. 洞庭湖区的气温特征及其对湖南气温分布的影响[J]. 气象,2008,34(10):108-114.
- [20] 王敏仲,魏文寿,何清,等. 南疆沙漠腹地夏季晴天与沙尘日小气候观测对比分析[J]. 气象,2008,34(11):7-14.
- [21] 李兴荣,胡非,舒文君. 北京夏季强热岛分析及数值模拟研究[J]. 气象,2007,33(6):25-31.
- [22] 李兴荣,张小丽,隋高林,等. 深圳夏季典型晴天不同小气候区温湿及舒适度特征[J]. 气象,2010,36(10):62-66.
- [23] 靳辛,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,2009,14(4):445-450.