

天津电力人体舒适度预报模型

兰辉 左晓辰 郭玲 周慧

(天津市气象服务中心, 天津 300074)

摘要 为做好天津电力气象服务工作, 提供符合电力负荷预测需求的人体舒适度预报产品, 本文根据国内外多种人体舒适度预报模型, 利用 2002—2005 年夏季天津逐日电力负荷数据和气象数据, 计算天津市逐日平均人体舒适度, 详细分析各模型计算结果与平均气温和气象负荷的对应关系。结果发现, UTCI 模型、吕伟林室外预报模型和李源模型计算的人体舒适度更符合天津市人体舒适度感觉, 且与电力气象负荷的线性相关性较好。鉴于吕伟林模型在我国应用较广, 本文采用最小二乘法对吕伟林室外预报模型进行拟合订正, 建立出符合天津市电力气象服务需求的人体舒适度预报模型。

关键词 电力负荷; 人体舒适度; 日平均气温; 预报模型

中图分类号: P49 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20170298 **文献标识码:** A

引言

随着居民生活水平的提高, 居民用电负荷快速增加, 特别是夏季防暑降温负荷, 占夏季用电负荷比重越来越大, 这主要是因为, 在夏季, 为保持适宜的舒适度, 各种制冷降温设备被大量使用, 产生明显的用电负荷增长。因此, 夏季电力负荷与人体舒适度密切相关, 在电力系统负荷预测过程中, 将考虑气温、相对湿度及风速等气象因素的人体舒适度引入到预测因子中, 将有助于提高电力负荷预测的精度^[1]。

目前国内利用人体舒适度预报开展电力负荷预测的研究较多, 例如: 张祥等^[2]早在 2003 年, 对电网负荷与体感温度之间的关系进行了分析; 韩新阳等^[3]将体感温度、舒适度指数、风寒指数等综合气象因子, 以及“持续”气象因子等引入到气象因子同气象敏感负荷的关联性分析中, 开展负荷预测。谢家安等^[4]通过对大量负荷数据与体感温度之间关系分析, 给出了体感温度与负荷的分段函数曲线。

国内外人体舒适度预报模型基本都是生物气温指标的各种变形。在预报实践中, 要分析各模型的适用性, 根据需求选取不同的预报模型, 而且由于气候、人种、性别、年龄的不同, 在气候适应上产生差

别, 使用效果也会有相当大的差异, 因此, 任何一种方法都不能简单照搬就在当地使用^[5-6]。我国尚无不同人体舒适度预报模型与电力负荷的分析评估研究, 因此本文参考国内外多种人体舒适度预报模型, 结合天津市电力负荷、气温、相对湿度等数据, 分析各预报模型的适用性, 对适用性较好的预报模型进行订正, 以期获得天津夏季对电力负荷预测最有效的人体舒适度预报模型。

1 人体舒适度预报模型

1.1 净有效温度预报模型 (NET)

1923 年, Houghton 和 Yaglou 等^[7]提出了有效温度指数 E_T (Effective Temperature Index), 对热舒适研究影响深远, 被世界许多国家采用或订正使用。Li 等^[8]根据香港实际情况对经典 E_T 计算公式进行修正, 提出了净有效温度 N_{ET} (Net Effective Temperature)。其计算公式如下:

$$N_{ET} = 37 - (37 - T) / [0.68 - 0.0014R_H + 1 / (1.76 + 1.4V^{0.75})] - 0.29T(1 - 0.01R_H) \quad (1)$$

式中, T 为气温 ($^{\circ}\text{C}$), R_H 为相对湿度 (%), V 为风速 (m/s)。

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

天津市气象局科技支撑项目(201313)资助

作者简介: 兰辉, 男, 1985 年生, 硕士, 工程师, 主要从事专业气象服务研究, Email: rainedworld@163.com

收稿日期: 2017 年 5 月 17 日; 定稿日期: 2017 年 8 月 4 日

1.2 酷热指数(H_1)

酷热指数 H_1 (Heat Index)^[9] 是美国国家气象局用来评价夏季炎热程度的一个人体舒适度指数。其计算公式如下:

$$H_1 = -8784695 + 1.61139411T + 2.338549R_H - 0.14611605TR_H - 1.2308094 \times 10^{-2}T^2 \dots - 1.6424828 \times 10^{-2}R_H^2 + 2.211732 \times 10^{-3}T^2R_H \dots + 7.2546 \times 10^{-4}TR_H^2 - 3.582 \times 10^{-6}T^2R_H^2 \quad (2)$$

式中, T 为气温($^{\circ}\text{C}$), R_H 为相对湿度($\%$)。

1.3 通用热气候指数模型(UTCI)

随着生物气象学和计算机技术的发展,基于人体热平衡的机理模型研究引起了各国学者的广泛关注。人体热平衡模型^[10]可以概括为:

$$M - W \pm R \pm C - E = \pm S \quad (3)$$

式中, M 为人体能量代谢率, W 为人体所做的机械功, R 为人体与环境辐射换热率, C 为人体与环境对流换热率, E 为汗液蒸发和呼出水汽所带走的热量, S 为人体蓄热率。

目前,全球较为先进的人体舒适度机理模型为通用热气候指数模型(Universal Thermal Climate Index, UTCI)^[11],较早期的人体热量平衡模型更复杂,拟真度更高。

1.4 我国主要人体舒适度预报模型

我国人体舒适度研究自上世纪 80 年代开始起步,而今仍不断有新的研究成果或应用成果发表^[12-14]。20 世纪 90 年代末,北京市气象局的吕伟林^[15]根据有效温度指数 E_T ,经过计算、订正,得出室外体感温度的经验预报模型(以下简称吕伟林 A 模型),其计算方式如下:

$$T_g = T + T_u + T_f + T_r \quad (4)$$

式中, T_g 为体感温度, T 为气温, T_u 为相对湿度修正项, T_f 为风速修正项, T_r 为太阳辐射修正项。相对湿度、风速和太阳辐射修正公式如下:

$$T_u = \begin{cases} (1 + (T - 20)^{2/3})(u - 20/T) & (T \geq 25^{\circ}\text{C}) \\ (1 + (T - 20)^{2/3})(20/T - u) & (T < 25^{\circ}\text{C}) \end{cases} \quad (5)$$

$$T_f = -(1 - T_u/32)\sqrt{V} \quad (6)$$

$$T_r = 4.2(\sinh_1 + \sinh_2)(1 - 0.9M_c) \quad (7)$$

式中, u 为相对湿度, V 为风速, h_1 为当日最大太阳

高度角, h_2 为预报时刻太阳高度角, M_c 为天空总云量。

夏季居民生活用电,主要跟室内活动有关,本文将上述体感温度计算略去了辐射修正项的作用,做为室内体感温度预报模型(以下简称吕伟林 B 模型)。

武汉市气象局的李源等人^[16],通过问卷调查和气象数据结合的方法,得到在高温、高湿气象条件下体感温度计算公式:

$$T_f = \begin{cases} T + \frac{9}{(T_M - T_m)} + \frac{U - 50}{15} - \frac{v - 2.5}{3} & (T > 33.6^{\circ}\text{C}) \\ T + (U - 50)/15 - (v - 2.5)/3 & (12.1^{\circ}\text{C} \leq T \leq 33.6^{\circ}\text{C}) \\ T - (U - 50)/15 - (v - 2.5)/3 & (T < 12.1^{\circ}\text{C}) \end{cases} \quad (8)$$

式中, T_f 为体感温度($^{\circ}\text{C}$), T 为实时气温($^{\circ}\text{C}$), T_M 为日最高气温($^{\circ}\text{C}$), T_m 为日最低气温($^{\circ}\text{C}$), U 为相对湿度($\%$), v 为平均风速(m/s)。

2 资料处理方法

2.1 气象负荷提取方法

图 1 给出了 2002 年 1 月 1 日至 2005 年 12 月 31 日天津电网日最大电力负荷距平的逐日变化曲线,从图中可以看出,天津市日最大电力负荷呈明显增长趋势,本文采用熊明明等^[17]处理方法,以线性关系($y = 1.2608x + 3039.5$, $x = 1$ 时代表 2002 年 1 月 1 日的线性项,以此类推)来表示负荷随时间的趋势项,以时间日最大负荷减去线性趋势得到日气象负荷。由于双休日的电力负荷数据与工作日不同,剔除夏季(6—8 月)的双休日数据,得到天津市夏季逐日最大气象负荷数据。

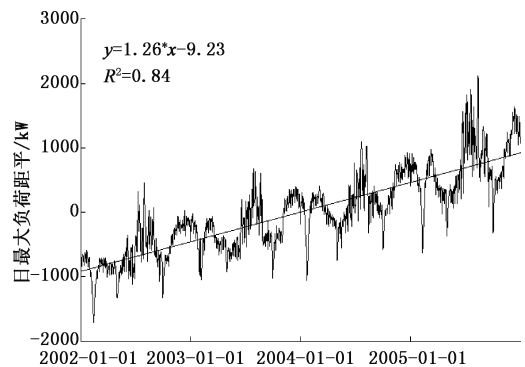


图 1 2002 年 1 月 1 日至 2005 年 12 月 31 日
天津用电日最大负荷距平变化

2.2 气象数据来源及处理

选取天津市气象局天津城市气候监测站(站号:54517)2002—2005 年夏季(6—8 月)气象数据,统计的气象要素包括日平均气压、平均相对湿度、平均气温、平均总云量、平均风速、最高气压、最高气温、最大风速、最小相对湿度、降水量和日照时数。按照电力负荷数据的处理方法,删除双休日数据。

3 天津夏季人体舒适度模型分析评估

3.1 夏季日最大气象负荷与气象因子相关性

将 2002—2005 年夏季日最大气象负荷与气象因子进行皮尔逊相关系数分析(表 1),可见日平均气温、最高气温与气象负荷呈较高的正相关,平均气温较最高气温与气象负荷相关性更好,所以本文通过计算各模型的日平均人体舒适度,来分析评估其与平均气温和气象负荷的对应关系。

表 1 天津 2002—2005 年夏季日最大气象负荷与气象因子相关系数

	平均气温	最高气温	最高气压	平均风速	最大风速	平均气压	平均相对湿度	最小相对湿度	降水量	平均总云量	日照时数
2002	0.908	0.807	-0.310	-0.319	-0.165	-0.277	0.120	0.023	-0.117	-0.170	0.102
2003	0.771	0.564	-0.156	-0.403	-0.435	-0.112	0.415	0.272	0.019	-0.017	-0.06
2004	0.763	0.592	-0.177	0.088	0.157	-0.189	0.164	0.175	-0.083	-0.029	-0.023
2005	0.835	0.648	-0.241	-0.186	-0.339	-0.195	0.043	0.115	-0.183	0.153	-0.021
平均值	0.819	0.653	-0.221	-0.205	-0.196	-0.193	0.186	0.146	-0.091	-0.016	-0.001

3.2 各模型人体舒适度与平均气温相关性

计算 2002—2005 年夏季逐日(去除双休日)的人体舒适度,通过分析各模型计算的人体舒适度与平均气温的一致性(图 2),可以看出 HI、吕伟林 A

和李源模型计算的人体舒适度绝大多数高于平均气温,UTCI 和吕伟林 B 模型计算的人体舒适度与平均气温总体持平,而 NET 模型计算得出的人体舒适度均低于平均气温。表 2 给出了各模型计算的人

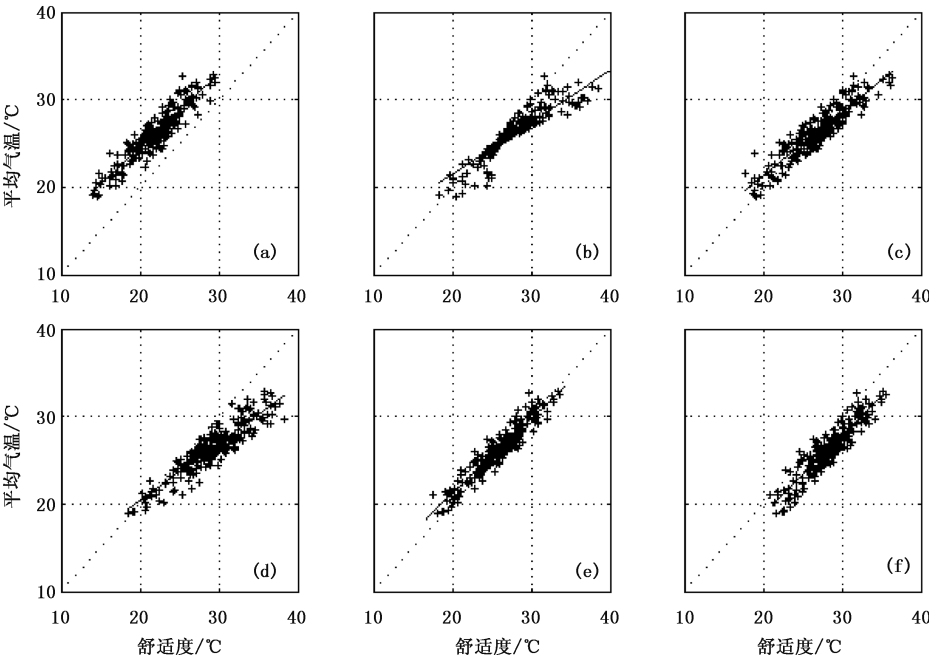


图 2 天津 2002—2005 年夏季不同模型逐日人体舒适度与平均气温散点图:(a)NET 模型、(b)HI 模型、(c)UTCI 模型、(d)吕伟林 A 模型、(e)吕伟林 B 模型、(f)李源模型

体舒适度与平均气温的统计结果,2002—2005 年夏季天津(去除双休日)日平均气温范围为 19.0~32.8℃,NET 模型计算的人体舒适度范围为 14.0~29.5℃,HI 模型计算的人体舒适度范围为 18.4~44.4℃,两者均与平均气温相差很大,其他 4 种模型计算的人体舒适度范围与平均气温较为接近。通过以上的分析可以看出,NET 和 HI 模型计算的人体舒适度范围与天津市人体舒适度感觉温度差异较大,不适合直接对外发布。

表 2 天津 2002—2005 年夏季不同模型人体舒适度与平均气温的统计值

	逐日平均气温	NET	HI	UTCI	吕伟林 A	吕伟林 B	李源
最小值/℃	19.0	14.0	18.4	17.8	18.6	17.5	21.0
最大值/℃	32.8	29.5	44.4	36.4	38.3	33.6	35.6
平均值/℃	26.3	22.2	28.3	27.0	29.1	26.1	28.4
方差/℃	7.5	9.2	17.7	12.2	14.5	9.1	8.0
与平均气温的回归系数		0.840	0.594	0.726	0.657	0.859	0.894
与平均气温的相关系数		0.927	0.910	0.921	0.911	0.945	0.920

注:NET 为有效温度指数,HI 为酷热指数,UTCI 为通用热气候指数,下同。

3.3 各模型人体舒适度与气象负荷相关性

图 3 给出了各模型计算的人体舒适度与气象负荷的对应关系,表 3 为不同气温区间,各模型计算的人体舒适度与气象负荷的线性相关系数,可以看出,

通过图 2、表 2 还可以看出,各模型计算得到的人体舒适度与平均气温均呈显著相关,相关系数 R 均大于 0.9,但与平均气温的回归系数差异较大,李源模型计算的人体舒适度与平均气温的回归系数最大,为 0.894。各模型计算的人体舒适度方差均大于平均气温的方差,表明经模型计算后的人体舒适度较平均气温离散程度变大,其中,李源模型计算的人体舒适度离散程度最小,吕伟林 B 模型次之。

在所有气温区间,除吕伟林 A 模型外,其他各模型计算的人体舒适度,与气象负荷的线性相关系数均大于 0.8,表现出强相关,并通过显著性差异检验,但相互间差别不大。吕伟林 A 是所有评估模型中唯

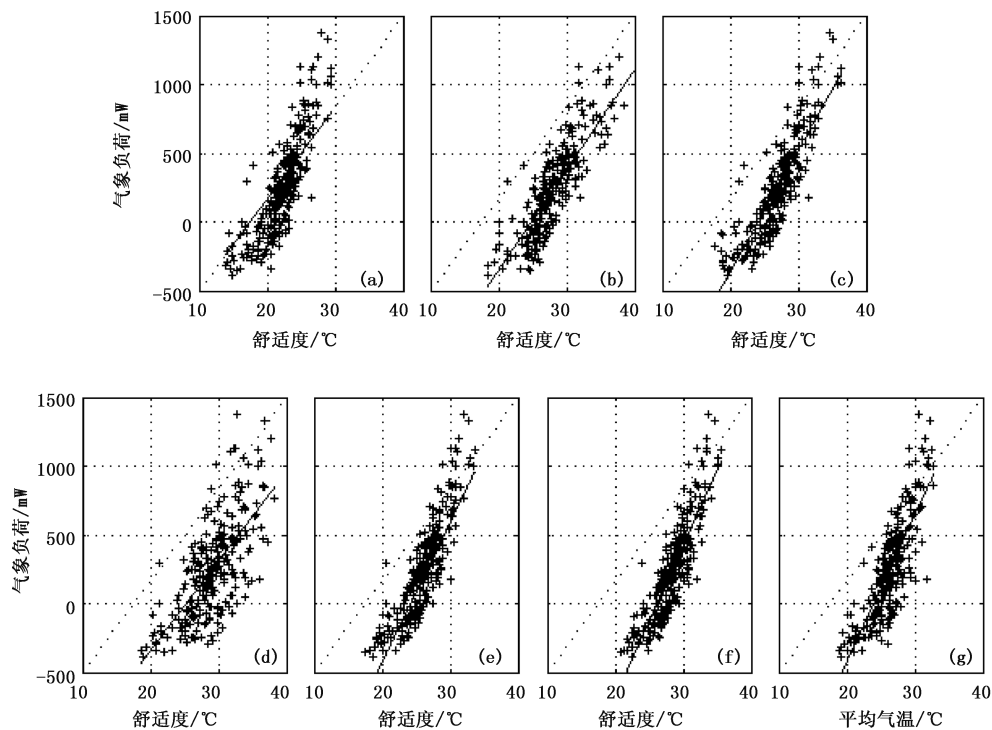


图 3 天津 2002—2005 年夏季不同模型人体舒适度及平均气温与气象负荷散点图:(a)NET 模型、(b)HI 模型、(c)UTCI 模型、(d)吕伟林 A 模型、(e)吕伟林 B 模型、(f)李源模型、(g)平均气温

一考虑太阳辐射项的人体舒适度预报模型,其计算的结果与气象负荷的线性相关系数最小,为 0.694,而去除太阳辐射修正项后,相关系数增加到 0.863,这表明去除太阳辐射修正项的吕伟林 B 模型计算的人体舒适度对电力气象负荷预测更有参考意义。

根据日平均气温将所有数据分为小于 25℃、25~30℃和大于等于 30℃3 个区间,分析各模型计算的人体舒适度与气象负荷的线性相关系数,可以看出,日平均气温处在 25~30℃时,各模型预报的人体舒适度与

气象负荷的线性相关系数最优,除吕伟林 A 模型外,其他模型的相关系数为 0.763~0.801,好于平均气温的相关系数 0.621;日平均气温小于 25℃时,HI 和吕伟林 A 模型的相关系数小于 0.5,呈中等相关,其他模型的相关系数为 0.526~0.640,与平均气温的相关系数差异不大;日平均气温大于等于 30℃时,除吕伟林 A 模型外,其他模型的相关系数为 0.579~0.659,均远好于日平均气温与气象负荷的相关系数。

表 3 天津 2002—2005 年夏季不同平均气温区间不同模型人体舒适度及平均气温与气象负荷相关系数

平均气温区间	NET	HI	UTCI	吕伟林 A	吕伟林 B	李源	平均气温
$T < 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	0.526	0.331	0.548	0.402	0.628	0.640	0.584
$25\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T < 30\text{ }^{\circ}\text{C}$	0.766	0.763	0.801	0.441	0.765	0.779	0.621
$T \geq 30\text{ }^{\circ}\text{C}$	0.579	0.644	0.604	0.013 *	0.656	0.659	0.387 *
所有气温区间	0.840	0.859	0.865	0.694	0.863	0.872	0.819

注: T 表示平均气温, * 表示显著相关 P 值大于 5%。

4 天津电力人体舒适度预报模型建立

综合以上分析,UTCI、吕伟林 B 和李源模型计算的人体舒适度较其他 3 种模型更符合天津市人体舒适度感觉,且与电力气象负荷的线性相关性较好。3 种模型计算的人体舒适度在与平均气温和电力气象负荷对应分析差异较小,由于吕伟林人体舒适度模型应用范围较广,且较为成熟,本文选取吕伟林 B 人体舒适度模型进行订正,根据日平均气温将所有数据分为小于 25℃、大于等于 25℃小于 30℃和大于等于 30℃3 个区间进行拟合,拟合方法采用最小二乘法,得到基于电力气象负荷的天津电力人体舒适度预报模型如下:

$$T_g = \begin{cases} 1.0804T + 2.4125(1 + (T - 25)^{\frac{2}{3}})(u - \frac{25}{T}) + \\ (1 - Tu/35)\sqrt{V} & (T \geq 30\text{ }^{\circ}\text{C}) \\ 0.955T + 2.6556(1 + (T - 20)^{\frac{2}{3}})(u - \frac{20}{T}) + \\ 0.0917(1 - Tu/32)\sqrt{V} & (25\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T < 30\text{ }^{\circ}\text{C}) \\ 0.8522T - 3.9493(1 + (T - 20)^{\frac{2}{3}})(\frac{20}{T} - u) - \\ 0.8522(1 - Tu/32)\sqrt{V} & (T < 25\text{ }^{\circ}\text{C}) \end{cases} \quad (9)$$

式中, T_g 为日平均体感温度, T 为日平均气温, u 为平均相对湿度, V 为平均风速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)。

根据以上模型计算 2002—2005 年夏季天津逐日(去除双休日)人体舒适度,与吕伟林 B 模型计算的人体舒适度进行对比分析(表 4),可以看出,新模

型计算的人体舒适度与吕伟林 B 模型计算结果数值范围差异不大,与日气象负荷的相关系数稍好,但是在不同气温区间,新模型计算的人体舒适度与气象负荷的相关系数明显高于吕伟林 B 模型,这表明新模型更适合做为天津市电力气象服务人体舒适度预报模型。

5 结论与讨论

(1)天津夏季日最大气象负荷主要受气温影响,其中日平均气温较最高气温与日最大气象负荷相关性更好。

(2)综合分析国内外多种人体舒适度模型,各模型计算得到的人体舒适度与平均气温均呈显著相关,但 NET 和 HI 模型计算的人体舒适度预报与天津市人体舒适度感觉差异较大,不适合直接对外发布。

(3)统计分析多种模型计算的人体舒适度与气象负荷的相关系数,UTCI、吕伟林 B 和李源模型计算的人体舒适度与电力气象负荷的线性相关性较好,但 3 者间差异较小。

(4)本文采用最小二乘法,对吕伟林 B 模型人体舒适度模型进行订正,建立基于电力气象负荷的天津电力人体舒适度预报模型,可以看出,在不同气温区间,新模型计算的人体舒适度与气象负荷的相关系数明显提高,可做为天津市电力气象服务人体舒适度预报模型。

表 4 2002—2005 年天津电力人体舒适度模型与吕伟林 B 模型计算的人体舒适度及其与日气象负荷的相关系数

	最大值	最小值	相关系数 R			
	℃	℃	$T < 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	$25\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T < 30\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T \geq 30\text{ }^{\circ}\text{C}$	所有气温区间
吕伟林 B 模型	33.6	17.5	0.628	0.765	0.656	0.863
电力人体舒适度模型	34.8	17.5	0.768	0.824	0.730	0.908

注: T 表示平均气温。

参考文献

- [1] 李晓梅,周晖,李冬梅. 夏季日峰荷与人体舒适度的灰色关联分析[J]. 电力科学与工程,2004(1):57-60.
- [2] 张祥,肖达强,吕东晓. 体感温度在电网负荷预计工作中的修正作用[J]. 华中电力,2003,16(3):37-39.
- [3] 韩新阳,周峰,邱向京,等. 气象因子同气象敏感负荷之间的关系研究[J]. 电力技术经济,2008,20(1):37-41.
- [4] 谢家安. 基于体感温度的电力系统负荷分类及负荷预测[J]. 电网与清洁能源,2012,28(8):24-28.
- [5] 吴兑,邓雪娇. 环境气象学与特种气象预报[M]. 北京:气象出版社,2001:394.
- [6] 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.
- [7] Houghton F C, Yaglou C P. Determining equal of comfort lines[J]. ASHVE Trans, 1923,29: 165-176.
- [8] Li P W, Chan S T. Application of a weather stress index for alerting the public to stressful weather in Hong Kong [J]. Meteorological Applications, 2000, 7(4): 369-375.
- [9] Rothfusz L P. The heat index equation [R]// NWS Southern Region Technical Attachment (SR90-23). Fort Worth, Texas: Scientific Services Division NWS Southern Region Headquarters, 1990.
- [10] 闫业超,岳书平,刘学华,等. 国内外气候舒适度评价研究进展[J]. 地球科学进展,2013,28(10):1119-1125.
- [11] Blazejczyk K, Epstein Y, Jendritzky G, et al. Comparison of UTCI to selected thermal indices [J]. International Journal of Biometeorology, 2012, 56(3): 515-535.
- [12] 夏廉博. 人体生物气象学[M]. 北京:气象出版社,1986.
- [13] 李玉姣,杨玉洁,张滨,等. 不同天气条件下温湿对室内外人体舒适度的影响[J]. 气象科技,2015,43(6):1197-1202.
- [14] 雷卫延,敖振浪,蔡耿华. 舒适度算法及其应用软件开发[J]. 气象科技,2017,45(3):561-565.
- [15] 吕伟林. 体感温度及其计算方法[J]. 北京气象,1998(1):23-25.
- [16] 李源,袁业畅,陈云生. 武汉市人体舒适度计算方法及其预报[J]. 湖北气象,2000,19(1):27-28.
- [17] 熊明明,李明财,任雨. 天津电力负荷特性及其与气象因子的关系[J]. 气象科技,2013,41(3):577-582.

Human Comfort Index Prediction Model Based on Electric Power Load in Tianjin

Lan Hui Zuo Xiaochen Guo Ling Zhou Hui

(Tianjin Meteorological Service Center, Tianjin 300074)

Abstract: In order to improve the power meteorological service and provide human comfort index prediction according to the demand of power load forecasting in Tianjin. We use the power load data and meteorological data in summer from 2002 to 2005 in Tianjin to calculate the human comfort index. The results of various models and the corresponding relationship between mean temperature and power load are analyzed in detail. The results show that some models are more accordant with the feeling of body comfort and has better linear dependence with meteorological power loads, such as UTCI (Universal Thermal Climate Index), Lyu Weilin outdoor model and Li Yuan model. In order to build a better human comfort index model for Tianjin, the least squares method is applied to correct the Lyu Weilin model, which is widely used in China.

Keywords: power load; human comfort index; correlation coefficient