

引用格式:刘文娇,沈春明,郭军红,等.夏季气象电力负荷相关性分析模型修正方法——以北京为例[J].电力科学与技术学报,2024,39(2):112-123.

Citation: LIU Wenjiao, SHEN Chunming, GUO Junhong, et al. Correction method of correlation analysis model between meteorology and electric power load in summer: a case study of Beijing[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 112-123.

# 夏季气象电力负荷相关性分析模型修正方法 ——以北京为例

刘文娇<sup>1</sup>, 沈春明<sup>2</sup>, 郭军红<sup>1</sup>, 李 薇<sup>1</sup>, 陈 卓<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学资源环境系统优化教育部重点实验室, 北京 102206; 2. 北京市科学技术研究院城市系统工程研究所, 北京 100035)

**摘 要:**气象电力负荷相关性分析对电力负荷预测影响关键,需根据实际数据对相关经验模型修正。基于综合气象指数、积温效应以及电力负荷与气象因素相关性分析经验公式,提出一种夏季气象负荷相关性模型修正方法;采用负荷趋势分析和 Python 爬取提取气象负荷与气象数据,提高分析数据的精准性;通过对比分析负荷与单气象因子、综合气象指数以及两种积温效应修正的相关系数,结合负荷与气象指标随时间变化趋势吻合度,确定适用于相关性分析的最优指标参数,进而构建气象负荷与最优指标参数之间的拟合关系式,并以 2019 年北京夏季主城区为例应用验证。结果表明,与单气象因素相比,电力负荷、气象负荷和综合气象指数的相关性更强;各综合气象指数中,基于日平均气温的酷热指数与气象负荷的相关系数最高;2 种积温修正方法中,考虑累积效应系数的方法对气温的修正效果更好,修正后气温与气象负荷的相关系数提高 7.39%;基于修正气温的酷热指数与气象负荷的相关性较未修正时均有所提高,与负荷的变化趋势更接近;以酷热指数和修正后温度为自变量构建的气象负荷拟合关系式与实际值的吻合度高于参考的经验公式。

**关 键 词:**电力负荷;气象相关性;综合因素;模型修正

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.02.013 中图分类号: TM715 文章编号: 1673-9140(2024)02-0112-12

## Correction method of correlation analysis model between meteorology and electric power load in summer: a case study of Beijing

LIU Wenjiao<sup>1</sup>, SHEN Chunming<sup>2</sup>, GUO Junhong<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, CHEN Zhuo<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Resource and Environment System Optimization, Ministry of Education, North China Electric Power University College, Beijing 102206, China; 2. Institute of Urban System Engineering, Beijing Academy of Science and Technology, Beijing 100035, China)

**Abstract:** The correlation analysis between meteorological factors and power load is critical to power load forecasting, and it is necessary to correct the empirical model of correlation according to actual data. Based on the comprehensive meteorological index, accumulated temperature effect, and the empirical formula of correlation analysis between power load and meteorological factors, a method for correcting the correlation model of meteorological load in summer is proposed. Load trend analysis and Python crawling are used to extract meteorological load and meteorological data to improve the accuracy of analytical data. By comparing and analyzing the correlation coefficients between load and single meteorological factors, comprehensive meteorological indices, and two kinds of accumulated temperature effect corrections, combined with the coincidence degree of load and meteorological indicators over time, the optimal index parameters suitable for correlation analysis are determined. And then the fitting relationship between meteorological load and optimal index parameters is constructed. The proposed method is applied and verified by taking the main urban area of Beijing in summer 2019 as an example. The results show that compared with single meteorological factors, there is a stronger correlation between power load, meteorological load, and comprehensive meteorological index. Among the comprehensive

收稿日期: 2022-10-18; 修回日期: 2023-04-19

基金项目: 北京市科技新星计划项目(Z191100001119069); 国家重点研发计划(2018YFE0208400)

通信作者: 沈春明(1985—), 男, 博士, 研究员, 主要从事电力系统韧性提升方面的研究; E-mail: Chunming\_Shen@126.com

meteorological indices, the heat index based on daily average temperature has the highest correlation coefficient with meteorological load. Among the two accumulated temperature correction methods, the method considering the cumulative effect coefficient has a better correction effect on temperature, and the correlation coefficient between the corrected temperature and meteorological load increases by 7.39%. The correlation between the heat index based on the corrected temperature and meteorological load is higher than that before correction, which is closer to the changing trend of load. The coincidence degree between the fitting relationship of meteorological load constructed with heat index and corrected temperature as independent variables and the actual value is higher than that of the referenced empirical formula.

**Key words:** electric power load; meteorological correlation; comprehensive factors; model correction

城市电力负荷与气象条件密切相关,气温被认为是最显著的影响因素之一<sup>[1-7]</sup>。受全球气候变暖影响<sup>[8]</sup>,近年来北京夏季空调降温负荷不断攀升。例如,2020年夏季,北京最大电力负荷曾2次突破2 000万千瓦,降温负荷占比约为44%。而到了2022年8月,最大电力负荷更是创造新的纪录,突破了2 600万千瓦。为了更好地构建安全韧性、能力充足的首都新型电力体系<sup>[9]</sup>,有必要进一步探究电力负荷与气象因素的相关性。

国内外学者在气象因素对短期电力负荷影响与预测方面做了大量工作,考虑了单一气象因素、综合气象因素、积温效应等对电力负荷的影响。其中,在单一气象因素方面,文献[10]基于南京地区历年逐日电力负荷资料,采用谐波分析、功率谱等方法分析了该地区电力负荷与气温、湿度等单一气象因素的关系;文献[11]利用2016~2018年武汉夏季电力负荷和逐日气象数据,分析了最大电力负荷的变化特征及其与温度、日照时数等单一气象因素的关系;在综合气象因素的研究方面,文献[12]以黄石市2007~2013年逐日电力负荷为研究对象,研究了体感温度对夏季气象负荷率变化的影响。文献[13]提出了一种基于综合气象指数的进化算法—脉冲神经网络组合负荷预测模型,提高了地区电网电力负荷的预测精度;在考虑积温效应对电力负荷影响方面,文献[14]以电网迎峰度夏为背景,采用基于累积温度指标的预测方法和基于综合气象指标的预测方法对气象敏感负荷进行了预测。文献[15]利用华中四省负荷与气象数据,探讨了炎热天气过程对电力负荷的影响特征,并建立了基于积温效应的电力负荷预测模型。

近年来,随着大数据技术的发展,结合Python语言的爬虫技术在环境、气象数据分析中被广泛应用。文献[16]在构建基于位置数据的空气质量分类混合预测模型中编写了爬虫脚本,获取了杭州市及其附近的空气质量与气象数据,完成了空气质量等级预测;文献[17]提出使用Google MEAN Stack

全栈技术,开发了基于CheerioIO的高效定向爬虫,并利用其高性能I/O特性,提高了气象信息的搜集效率;文献[18]运用爬虫技术从天气预报网站获取气象数据,构建了基于BP神经网络算法对能源站电、热、冷等负荷的预测方法。相关性分析方法在近几年被广泛应用于负荷与气象因素关系的研究中。文献[19]利用北京市历年逐日电力负荷资料以及气象要素资料,采用相关性分析法分析了北京市电力负荷与气象因子的关系。文献[20]基于邢台市逐日电力负荷数据和气象数据,采用负荷趋势分离、相关分析、逐步回归法,研究了夏季制冷期电力负荷的变化特征及其预报模型。文献[21]基于气象信息预测区域天气数据,采用相关性分析方法,提出了一种基于天气信息的短期冷热电负荷联合预测方法。

以上研究综述表明,对气象因素与电力负荷进行相关性分析的研究方法与模型较多,但已有模型具有一定局限性,不同时空情景下的气象负荷相关性模型还有待进一步修正完善;同时,地区经济发展、地理位置等条件不同,电力负荷水平受气象因素的影响程度不同,如何采用先进数据采集与分析方法,考虑地域空间差异性、数据敏感性等改进相关性模型是研究的关键。

本文提出一种考虑气象因素综合影响的气象—负荷相关性模型修正方法。首先运用爬虫技术收集北京市六个主城区六个气象站的气象数据,再结合各区电力负荷资料,分析气象电力负荷与气象因素的相关性,在此基础上构建气象负荷与气象因素的拟合关系式,计算结果较前人经验公式更接近实际值。

## 1 夏季综合气象因素与电力负荷相关性模型

### 1.1 综合气象指数

相对于单个气象因子,夏季电力负荷与综合气象因子相关性更显著<sup>[13]</sup>。现有研究文献中的综合

气象指数经验公式主要包括酷热指数( $H_1$ )、综合舒适指数( $S$ )和人体舒适指数( $D_1$ )等。

1) 酷热指数。美国国家气象局将感热模型转化为多元统计回归模型<sup>[22]</sup>,并将其重新命名为酷热指数,用于高温预警信息发布,即

$$H_1 = c_1 + c_2 T + c_3 R_H + c_4 T R_H + c_5 T^2 + c_6 R_H^2 + c_7 T^2 R_H + c_8 T R_H^2 + c_9 T^2 R_H^2 \quad (1)$$

式中, $H_1$ 为酷热指数; $T$ 为环境温度, $^{\circ}\text{C}$ ; $R_H$ 为相对湿度, $\%$ ;  $c_i$  ( $i=1, 2, \dots, 9$ )为系数。

2) 综合舒适指数。文献[23]利用环境卫生学方法,全面考虑温度、湿度、风速3个要素对人体舒适度的影响,提出综合舒适度指标,即

$$S = 0.06(|T - 24|) + 0.07(|R_H - 70|) + 0.5(|V - 2|) \quad (2)$$

式中, $S$ 为综合舒适指数; $T$ 为空气温度, $^{\circ}\text{C}$ ; $R_H$ 为空气相对湿度, $\%$ ; $V$ 为风速, $\text{m/s}$ 。

3) 人体舒适度指数。北京市气象局自1997年开始发布人体舒适度指数预报<sup>[24]</sup>,使用的计算模型为

$$D_1 = 0.18T + 0.55(1 - R_H) - 3.2\sqrt{V} + 32 \quad (3)$$

式中, $D_1$ 为人体舒适度指数; $T$ 为空气温度, $^{\circ}\text{C}$ ; $R_H$ 为空气相对湿度, $\%$ ; $V$ 为风速, $\text{m/s}$ 。

## 1.2 积温效应分析

电力负荷中的积温效应是指在持续低温或高温天气条件下,负荷会出现一定程度的反常增长<sup>[25]</sup>。由于温度变化会影响人体的体温调节,连续高温天气会导致人体代谢增加、能量消耗增加、舒适度降低。本文选择2种积温效应计算方法,通过实例验证这2种方法在各区的相关性分析效果。为了描述积温修正效果,首先需要确定出现积温效应的温度临界点。对北京市夏季6、7、8月的日平均负荷、日峰负荷、日谷负荷与日平均温度、日最高温度、日最低温度进行最小二乘拟合,比较各参数的拟合效果,选择拟合效果最好的一组数据绘制敏感度曲线和平均敏感度曲线,二者交点的横坐标即为临界温度。

方法1 考虑累积天数的积温效应计算。考虑当日平均气温值和累积天数的积温效应<sup>[26]</sup>,计算公式如下:

$$T' = \begin{cases} r[-(n-4)^2 + 9] + (1+r) \sum_{i=1}^n (T_i - T_0), & T_i \geq T_0 \\ 0, & T_i < T_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中,前半部分为高温持续天数对气温的影响,后

半部分为当日气温的影响效果; $r$ 为比例系数,通过调节 $r$ 来调节两者的比重; $n$ 为累积天数, $n \leq 7$ ; $T'$ 为积温调整后气温; $T_i$ 为积温调整日平均气温; $T_0$ 为出现积温效应的气温界限点。

方法2 考虑累积效应系数的积温效应计算。全面考虑界限气温、最大累积天数以及累积效应系数等因素,对第 $i$ 天的日平均气温进行调整<sup>[27]</sup>,计算公式如下:

$$T'_i = T_i + \sum_{j=1}^p k_{ij} (T_{i-j} - T_{\min}) \quad (5)$$

式中, $T'_i$ 为待修正日 $i$ 积温调整后气温; $T_i$ 为待修正日 $i$ 的日平均气温, $T_i \geq T_{\min}$ ; $T_{i-j}$ 为待修正日前第 $j$ 天的日平均气温; $T_{\min}$ 为高温日的界限气温; $k_{ij} \in [0, 1]$ 为累积效应系数; $p = \min(n, d_{\max})$ , $d_{\max}$ 为最大累积天数; $n$ 为连续高于界限气温的累积日数。

对 $k$ 进行离散化处理,修正气温时,根据待预测日的原始气温所处的气温区间选择对应的累积效应系数序列。采用试探的方法,计算考虑不同累积天数时平均负荷与日平均气温的相关程度,求得使相关程度最高的最大累积天数 $d_{\max}$ 。以7月份或8月份为样本,将相邻 $d_{\max}+1$ 天的负荷和气温数据作为一组,共有 $(31-d_{\max})$ 组数据,分别计算每组负荷和气温的相关系数,并求 $(31-d_{\max})$ 个相关系数的平均值,平均值最大的 $d_{\max}$ 确定为最大累积天数,计算公式为

$$\max_{d_{\max}} \text{ave}_R = \frac{1}{31 - d_{\max}} \cdot \sum_{i=1}^{31-d_{\max}} \frac{\sum_{i=0}^{d_{\max}} (T_i - \bar{T})(L_i - \bar{L})}{\sqrt{\sum_{i=0}^{d_{\max}} (T_i - \bar{T})^2} \sqrt{\sum_{i=0}^{d_{\max}} (L_i - \bar{L})^2}} \quad (6)$$

式中, $\max_{d_{\max}} \text{ave}_R$ 为累积天数为 $d_{\max}$ 时,负荷与气温相关系数的平均值; $d_{\max}$ 为最大累积天数; $T_i$ 为第 $i$ 天的日平均气温; $L_i$ 为第 $i$ 天的平均电力负荷; $\bar{T} = \frac{1}{d_{\max}} \sum_{i=1}^{d_{\max}} T_i$ , $\bar{L} = \frac{1}{d_{\max}} \sum_{i=1}^{d_{\max}} L_i$ 。

## 1.3 电力负荷与气象因素相关性模型

为了更直观地表征电力负荷与气象因素的相关性,引入相关系数 $R$ 的绝对值进行测度,取值区间为 $[0, 1]$ ;  $|R|$ 值越大,说明2个变量之间的相关性程度越大。根据 $R$ 绝对值大小,可将电力负荷与气象因素的相关程度划分4种情况: $|R| \geq 0.8$ 高度相关; $0.5 \leq |R| < 0.8$ 显著相关; $0.3 \leq |R| < 0.5$ 低度相

关;  $|R| < 0.3$  不相关。根据文献[28], 电力负荷与气象因素相关性可通过相关系数  $R$  可表示为

$$|R| = \left| \frac{n \sum_{i=1}^n L_i D_i - \sum_{i=1}^n L_i \sum_{i=1}^n D_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n L_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n L_i\right)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n D_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n D_i\right)^2}} \right| \quad (7)$$

式中,  $L_i$  为待测日  $i$  的实际电力负荷;  $D_i$  为待测日  $i$  的气象因素, 包括单个气象因子、综合气象指数以及积温效应调整后的气温等。

## 2 气象负荷相关性模型修正方法

### 2.1 相关性模型修正流程

本文在前人研究的基础上, 提出一种基于气象负荷提取、气象数据爬取的电力负荷与气象因素相关性模型修正方法, 核心环节步骤主要包括基础数据获取与处理、气象负荷相关性分析对比、拟合修正与检验输出, 相关性模型修正流程如图 1 所示。

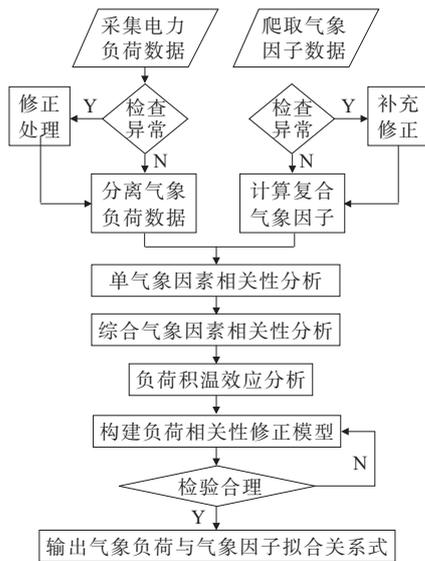


图 1 气象负荷相关性模型修正流程

Figure 1 Modification flowchart of meteorological load correlation model

### 2.2 基础数据获取与处理

1) 气象负荷的提取处理。原始电力负荷数据从电力监管部门获取, 检查采集的负荷数据是否存在异常值, 并对异常值进行处理。为了更准确地分析气象因素对电力负荷的影响, 需从电力负荷中提取出受气象影响的部分, 即气象负荷。由于城市电力负荷  $L$  构成<sup>[29]</sup>通常可表示为

$$L = L_t + L_m + X \quad (8)$$

式中,  $L$  为总的电力负荷;  $L_t$  为经济负荷, 表示经济

发展对电力负荷的贡献;  $L_m$  为气象负荷, 受气象因素的影响;  $X$  为随机负荷, 受不确定因素的影响, 对总电力负荷变化影响很小, 通常忽略随机负荷影响。故气象负荷  $L_m$  可表示为

$$L_m = L - L_t \quad (9)$$

经济负荷反映了电力系统长期变化趋势, 本文考虑了 3 种方法表征经济负荷:

① 基于当年 5 月份电力负荷的计算方法: 5 月北京市处于春末夏初, 可认为不产生气象负荷, 用各主城区 5 月负荷表示其夏季经济负荷;

② 基于酷热指数的计算方法: 夏季多高温热浪, 气象负荷主要用于降温, 故将各区酷热指数最低日的电力负荷作为经济负荷;

③ 基于趋势负荷的计算方法: 将各区经济负荷随时间变化关系以一次函数表示, 分析中可对样本数据拟合确定经济负荷  $L_t$ 。

$$L_t = A + Bt \quad (10)$$

式中,  $A$ 、 $B$  为系数;  $t$  为时间,  $d$ 。

对 3 种方法优选时, 选择分离出的气象负荷与单个气象因素相关程度最高的方法。经过验证, 基于趋势负荷的计算方法分离得到的气象负荷, 与单个气象因素的相关系数最高。因此, 本文气象负荷采用基于趋势负荷的计算方法进行提取。

2) 气象数据的爬取处理。使用 Python 爬虫技术获取气象数据, 检查爬取的数据是否存在异常值, 并对异常数据进行处理, 然后计算综合气象指数和积温效应影响。

本文气象数据从天气预报查询网站<sup>[30]</sup>获取, 数据爬虫流程如图 2 所示。

① 把目标网址的链接地址作为种子 URL 放入待抓取队列中, 爬虫依次读取, 通过 DNS 解析转换为对应的 IP 地址。根据网站的 User-Agent 将爬虫伪装成浏览器对目标网站进行请求以获取响应, 获取响应后便将该网页的 HTML 代码爬取下来。

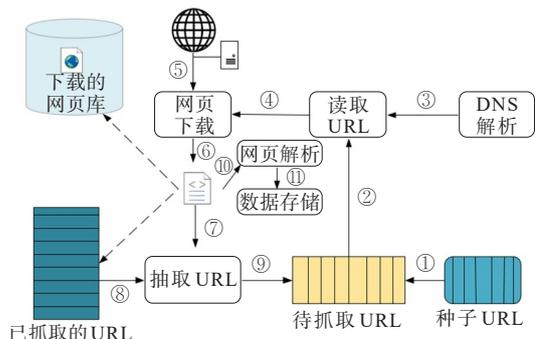


图 2 数据爬虫主要流程

Figure 2 Process of crawler

②已完成爬取的URL放入已爬取URL队列中,避免重复爬取。该网站上每日的数据是单独的一个页面,因此需要根据网页链接的特点加上循环来进行爬取。将整个页面的HTML爬取下来后,分析所需数据在其中的位置标签,最后把相应的数据进行保存并存储。

通过对网站页面的结构分析后,确定数据在网页“//divclass=‘mcon’//tbody//tr”中的td标签中。将网页的HTML代码爬取下来后,利用BeautifulSoup找到存储数据的tr标签,然后对tr标签中的td标签进行遍历循环抓取所包含的数据。

### 2.3 气象负荷相关性对比分析

根据式(7),分别计算总的电力负荷 $L$ 、基于趋势负荷计算提取的气象负荷 $L_m$ 与气象因素 $X_i$ 的相关系数。其中,气象因素 $X_i$ 包括单项气象因子(日平均气温 $T$ 、平均风速 $V$ 、相对湿度 $R_H$ ),综合气象指数(基于日最高、日平均、日最低气温的酷热指数 $H_{lmax}$ 、 $H_{lavg}$ 、 $H_{lmin}$ ,基于日最高、日平均、日最低气温的综合舒适度指数 $S_{max}$ 、 $S_{avg}$ 、 $S_{min}$ ,基于日最高、日平均、日最低气温的人体舒适度指数 $D_{lmax}$ 、 $D_{lavg}$ 、 $D_{lmin}$ ),以及积温效应调整后气温(考虑累积天数的计算、考虑累积效应系数的计算)。对比分析与各类气象指标的相关系数,确定并选取相关性最优的单气象因子、综合气象指标以及积温效应的计算方法。

### 2.4 拟合修正与检验输出

根据气象负荷与各类气象指标的相关性系数对比结果,构建以气象负荷为目标函数,以相关性最优的综合气象指数和积温效应修正后的气温为自变量的拟合关系,进而提出气象负荷相关性修正模型如式(11)。

$$f(H_i, T') = b_0 + b_1 C + b_2 T' \quad (11)$$

式中, $b_i$ 为系数( $i=0,1,2$ ); $C$ 为相关性最优的综合气象指数; $T'$ 为积温修正后的气温, $^{\circ}\text{C}$ 。受地理条件、人类活动影响,各区的气象因素有所差异,相应的拟合式的系数不同。

根据文献[31],对负荷与各气象指标随时间变化的趋势吻合度、修正模型拟合关系式的自变量拟合度 $R^2$ 进行计算:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (12)$$

式中, $y$ 为待拟合数值,其均值为 $\bar{y}$ ,拟合值为 $\hat{y}_i$ 。

依据式(13)计算各区负荷拟合结果与实际值的相对误差绝对值平均值,并对模型修正结果合理性进行验证,验证预测误差是否符合电力部门内部业务考核目标小于5%<sup>[15]</sup>的要求。

$$|\bar{\delta}| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|(\hat{y}_i - \bar{y})|}{\hat{y}_i} \quad (13)$$

## 3 北京城区实例分析

### 3.1 数据来源与处理

本文分别收集了北京市朝阳区、城区(东城区和西城区)、丰台区、海淀区、石景山区2019年6月1日至8月31日15 min的电力负荷数据,共计8 832个样本;并爬取了2019年北京市各区6~8月包括温度、相对湿度、风速、降水量在内的步长为1 h的气象数据。在样本数据预处理时,针对部分数据缺失问题,采用前后两日同一时段数据取平均值填补。对于异常数据,则计算前一日负荷增加趋势,以当日数据为基础,加上负荷趋势增量修正。

各行政区电力负荷水平不同,为便于综合对比评价,根据式(14)、(15)采用Z-score法<sup>[31]</sup>对负荷数据进行标准化处理。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (14)$$

$$z_i = (x_i - \mu) / \sigma \quad (15)$$

式(14)、(15)中, $z_i$ 为负荷标么值; $\mu$ 为数据均值; $N$ 为待处理负荷数; $x_i$ 为负荷; $i=0,1,\dots,N$ ; $\sigma$ 为标准差。

以基于趋势的计算方法为例,各区气象负荷分离并标准化处理后如图3所示。

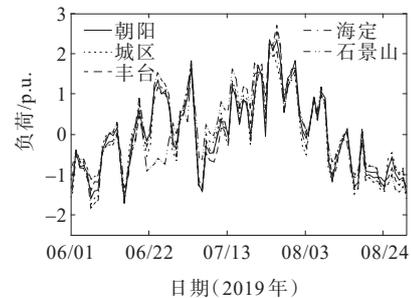


图3 气象负荷分离对比

Figure 3 Separation comparison of meteorological and load

### 3.2 气象负荷相关性分析结果

1) 单气象因素相关性。根据式(7)计算各区逐

日气象因素与电力负荷、气象负荷间的相关性分析结果如表 1 所示。

**表 1** 主城区负荷与单气象因素相关性计算结果  
**Table 1** Calculation results of correlation between urban load and single meteorological factor

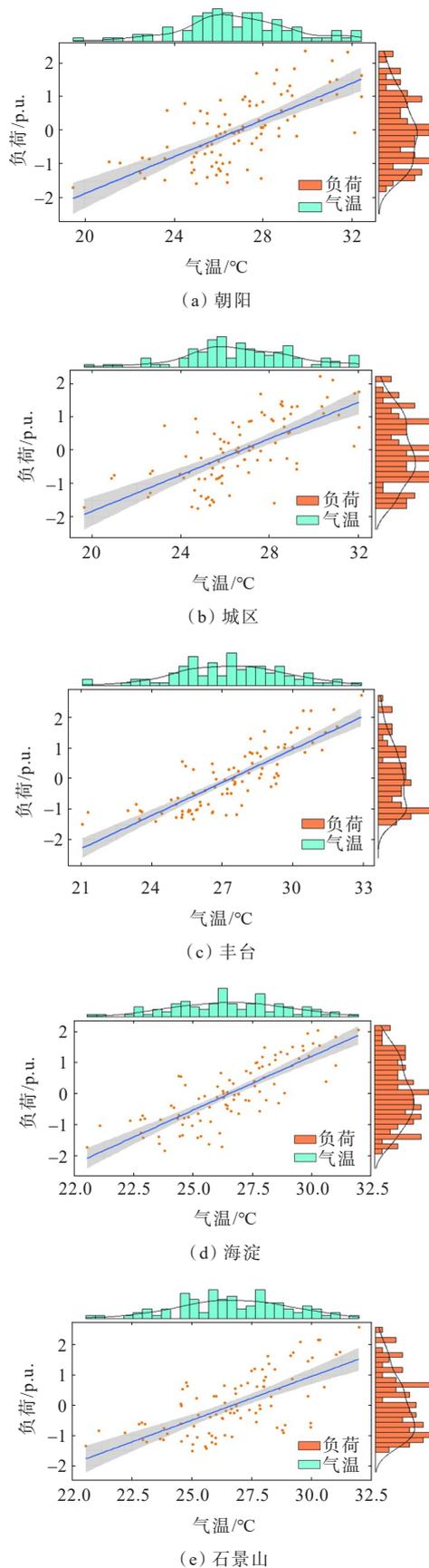
行政区	负荷类别	相关性系数		
		$T$	$V$	$R_H$
朝阳	电力	0.69	0.02	0.21
	气象	0.69	0.00	0.18
城区	电力	0.67	0.14	0.20
	气象	0.68	0.13	0.18
丰台	电力	0.79	0.25	0.17
	气象	0.83	0.23	0.11
海淀	电力	0.80	0.03	0.13
	气象	0.81	0.01	0.09
石景山	电力	0.59	0.15	0.38
	气象	0.67	0.17	0.33

由表 1 可知,气温的相关性 > 相对湿度的相关性 > 风速的相关性。各区的电力负荷、气象负荷与气温相关性最高,达到显著相关( $0.5 \leq |R| < 0.8$ )水平,其中丰台区气象负荷、海淀区的电力负荷与气象负荷与气温呈高度相关( $|R| \geq 0.8$ );石景山区电力、气象负荷与相对湿度均呈低度相关( $0.3 \leq |R| < 0.5$ ),其余各区负荷与相对湿度、风速的相关系数绝对值均小于 0.3。从各区两类负荷与气温的相关性来看,气象负荷的相关性优于电力负荷,其中丰台、石景山的气象负荷相关性比电力负荷分别高了 5%、13.6%,可见气象负荷对气象因素更敏感。

气象负荷与日平均气温相关性的二维分布如图 4 所示,各区气温数据呈离岛型分布,大部分数据分布在 24~28 °C,部分高温日的日平均气温在 30 °C 左右,少部分气温数据分布在 20~22 °C;朝阳、城区、海淀的气象负荷分布较均匀,呈较明显的正态分布,丰台、石景山的气象负荷呈偏态型分布,数据多分布在较低水平;由拟合曲线可见,气象负荷与日平均气温呈正相关,各区负荷的峰值都出现在 27 °C 附近。

2) 综合气象因素相关性。

根据式(1)~(3)计算各城区电力负荷、气象负荷与逐日综合气象指数间的相关性系数如表 2 所示。



**图 4** 气象负荷与温度二维分布  
**Figure 4** Two-dimensional distribution of meteorological load and temperature

表2 主城区负荷与综合气象因素相关性计算结果

Table 2 Calculation results of correlation between urban load and comprehensive meteorological factors

行政区	负荷类别	综合气象因素相关性系数								
		$H_{lmax}$	$H_{lavg}$	$H_{lmin}$	$S_{max}$	$S_{avg}$	$S_{min}$	$D_{lmax}$	$D_{lavg}$	$D_{lmin}$
朝阳	电力	0.79	0.76	0.26	0.07	0.10	0.28	0.12	0.12	0.13
	气象	0.79	0.76	0.28	0.09	0.13	0.30	0.15	0.15	0.15
城区	电力	0.76	0.72	0.23	0.13	0.16	0.32	0.13	0.14	0.17
	气象	0.76	0.72	0.22	0.12	0.15	0.32	0.15	0.16	0.20
丰台	电力	0.77	0.88	0.41	0.02	0.04	0.25	0.18	0.22	0.26
	气象	0.76	0.89	0.38	0.00	0.00	0.24	0.23	0.29	0.35
海淀	电力	0.69	0.80	0.14	0.01	0.03	0.31	0.17	0.23	0.32
	气象	0.68	0.79	0.13	0.00	0.02	0.31	0.20	0.27	0.37
石景山	电力	0.68	0.74	0.11	0.24	0.25	0.40	0.09	0.06	0.00
	气象	0.73	0.80	0.08	0.27	0.28	0.47	0.01	0.02	0.11

由表2可知,对于各综合气象因素相关性模型,酷热指数相关性>人体舒适度指数>综合舒适度指数;对于同类相关性模型,日平均气温相关性水平普遍高于日最高气温和日最低气温。各区的电力、气象负荷与酷热指数的相关性在0.68~0.9之间,达到显著相关( $0.5 \leq |R| < 0.8$ )水平以上,其中,丰台区电力与气象负荷、海淀区电力负荷、石景山区气象负荷与酷热指数呈高度相关( $|R| \geq 0.8$ );各区负荷与基于最低气温求得

的综合舒适度指数呈低度相关( $0.3 \leq |R| < 0.5$ );海淀区负荷与基于最低气温求得的人体舒适度指数呈低度相关( $0.3 \leq |R| < 0.5$ );3种综合气象指数中,负荷与酷热指数的相关性优于其他指数模型;从各区负荷与基于日平均气温酷热指数的相关性来看,除海淀区略低(约1%)外,气象负荷基本均优于电力负荷,其中石景山区的气象负荷相关性系数高于电力负荷8%。同样,基于趋势负荷方法提取的气象负荷与酷热指数相关性的二维分布如图5所

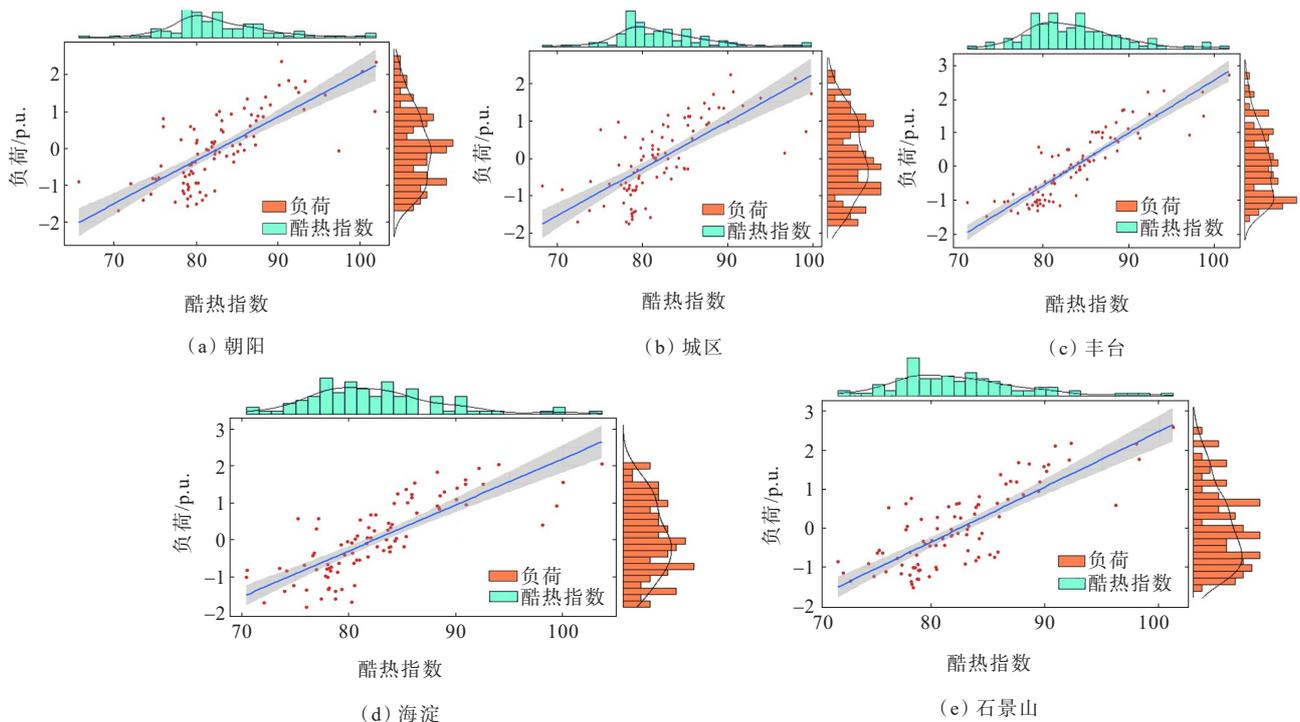


图5 气象负荷与酷热指数二维分布

Figure 5 Two-dimensional distribution of meteorological load and heat index

示,二者呈正相关分布。各区酷热指数数据呈离岛型分布,多数分布在 75~90,与其他两区相比,朝阳、城区、石景山的数据分布更加集中,在 80 附近,各区小部分高温日的酷热指数分布在 90~100。与图 4 相比,图 5 中的散点分布更聚集,更接近趋势线,这表明气象负荷与酷热指数的相关性更高。

3) 积温效应修正。

对各区气象负荷与综合气象因素相关性进行积温修正后,各相关性系数及修正效果如表 3 所示。

结果总体表明,考虑累积效应系数的气温修正在各区的修正效果普遍优于考虑累积天数的气温修正,经过积温修正后的温度,与负荷的相关性可提高 2%~8%。各区修正前后的负荷—温度日变化曲线对比如图 6 所示,与修正前温度相比,修正后

表 3 主城区 2 种积温修正效果

Table 3 Two kinds of accumulated temperature correction effect in main urban area

行政区	修正方法	积温修正相关性系数		修正效果/ %
		修正前	修正后	
朝阳	1	0.69	0.72	4.35
	2	0.69	0.74	7.39
城区	1	0.68	0.65	-4.41
	2	0.68	0.71	4.66
丰台	1	0.83	0.76	-8.43
	2	0.83	0.87	4.44
海淀	1	0.81	0.71	-12.35
	2	0.81	0.83	2.54
石景山	1	0.67	0.67	0.00
	2	0.67	0.71	6.47

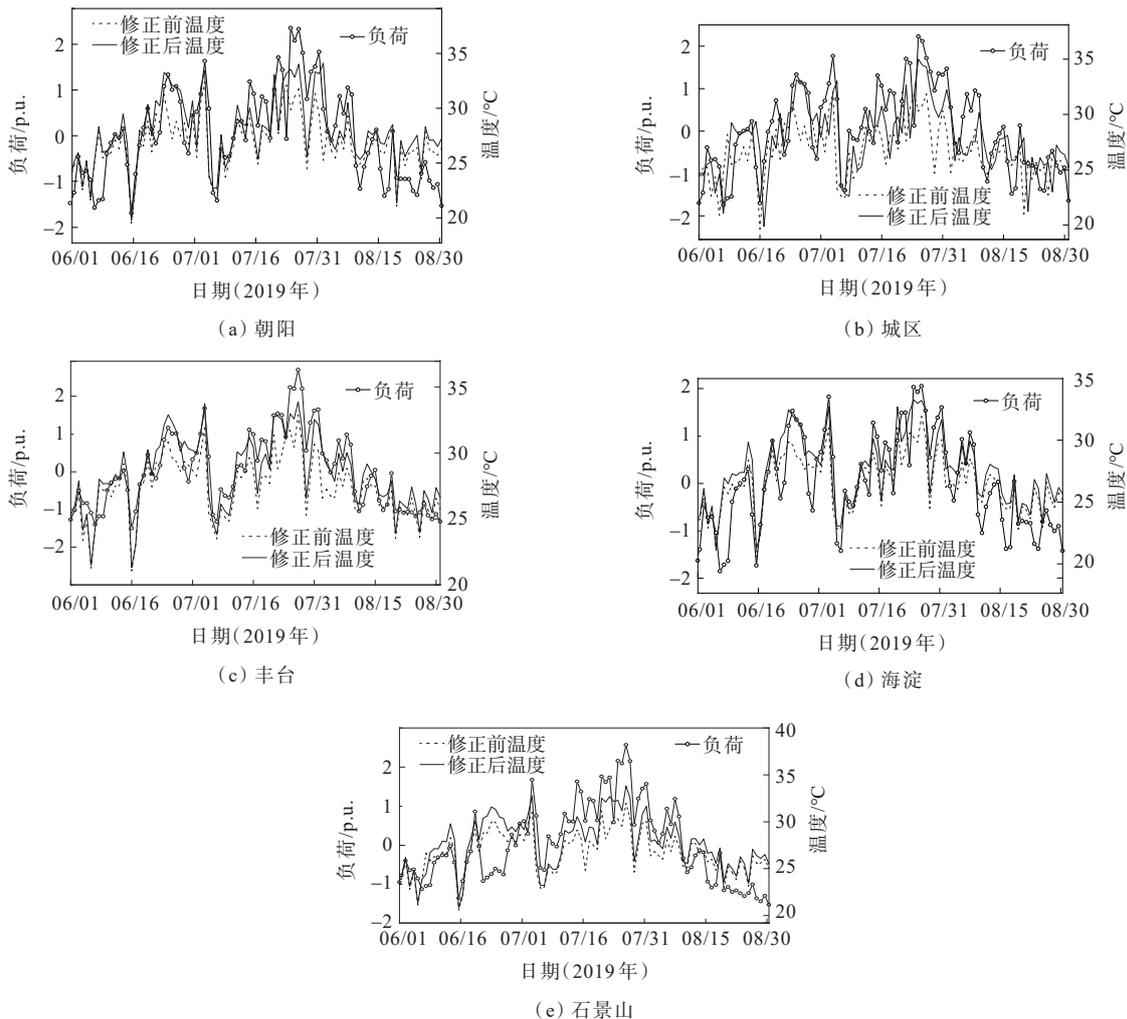


图 6 气象负荷相关性积温修正前后对比

Figure 6 Correlation of meteorological load and accumulated temperature before and after correction

的温度日变化曲线更贴近负荷的变化趋势。此外,各区在6月25日、7月25日左右出现气温下降,但由于前几日较高气温的积温效应影响,负荷降低出现滞后现象,与修正前相比,修正后温度可以更好地描述这一现象。

### 3.3 基于积温修正的综合气象指数分析

根据前文结论,选取修正后的气温计算酷热指数,对比分析其与气象负荷的相关性变化,结果如表4所示。

由表4可知,基于修正后气温求得的酷热指数和气象负荷的相关性,与基于修正前气温相比有所提升,各主城区相关系数提高了5%左右,其中丰台区和石景山区的相关性由显著相关提高为高度相关水平。

修正前后的负荷—酷热指数日变化曲线

表4 各主城区积温修正对酷热指数相关性的影响

Table 4 Influence of accumulated temperature correction on correlation of extreme heat index in Beijing

行政区	酷热指数相关性系数		修正效果/ %
	修正前	修正后	
朝阳	0.76	0.79	4.86
城区	0.72	0.75	3.99
丰台	0.89	0.92	3.36
海淀	0.79	0.80	1.76
石景山	0.80	0.82	2.67

对比如图7所示。由图7可知,修正后的酷热指数曲线趋势与负荷曲线的贴近程度有所提高,特别是指数高于90时,修正后变化趋势接近得更明显。

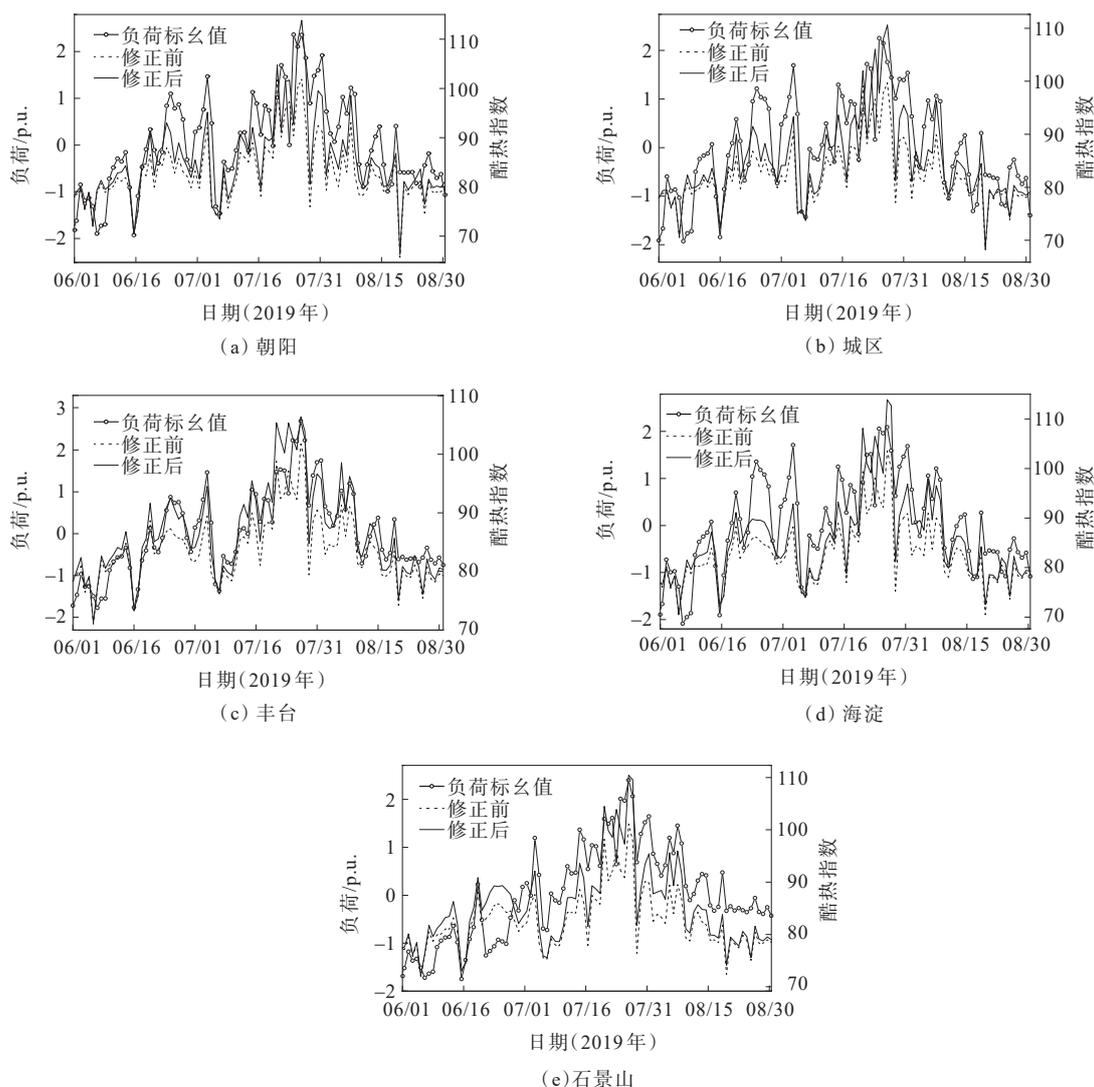


图7 基于积温修正前后的酷热指数与气象负荷趋势

Figure 7 Trend of heat index and meteorological load before and after accumulated temperature correction

### 3.4 基于综合气象因素与积温效应的拟合关系式分析

根据前文分析结果,选取酷热指数和修正气温为拟合函数的自变量,对气象负荷进行拟合分析。由图 4、5 可知,酷热指数和气温与气象负荷分别可呈较好的一次函数相关性。

$$f(H_i, T') = b_0 + b_1 H_i + b_2 T' \quad (16)$$

式中,  $b_i$  为参数 ( $i=0, 1, 2$ );  $T'$  为积温修正后的气温,  $^{\circ}\text{C}$ 。

基于式(16),根据 2019 年北京各区实际数据得到气象负荷与气象因素间的拟合关系式并对拟合度 ( $R^2$ ) 检验,如表 5 所示。

表 5 各主城区气象负荷拟合关系

Table 5 Fitting relationship of meteorological load in each main urban area

行政区	拟合关系式	拟合度 $R^2$
朝阳	$f(H_1, T') = 28.3H_1 + 13.0T' - 2701.4$	0.57
城区	$f(H_1, T') = 13.9H_1 + 18.2T' - 1642.0$	0.53
丰台	$f(H_1, T') = 16.3H_1 + 18.7T' - 1895.7$	0.81
海淀	$f(H_1, T') = 8.8H_1 + 51.7T' - 2143.7$	0.69
石景山	$f(H_1, T') = 6.7H_1 - 2.8T' - 478.1$	0.65

由表 5 可知,各区拟合度  $R^2$  均大于 0.5,其中丰台区  $R^2 > 0.8$ ,拟合效果相对较好。根据拟合关系式计算各区气象负荷,并与实际负荷值对比,采用平均绝对百分比误差分析指标<sup>[32]</sup>验证评价各拟合关系式的合理性,得出各区拟合值与实际值的相对误差绝对值平均值分布如图 8 所示,各区的相对误差大多分布在 0.5% 附近,各区的相对误差绝对值平均值均在 4.7% 以下,符合电力部门内部业务考核目标预测误差小于 5%<sup>[10]</sup>的要求,因此拟合关系式合理。

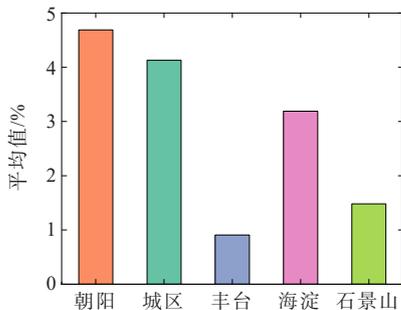


图 8 拟合值与实际值的相对误差绝对值的平均值  
Figure 8 Average absolute value of relative error between fitted value and actual value

气象负荷相关性模型修正曲线对比如图 9 所示,相对于仅考虑酷热指数的相关性曲线,本文提出的拟合关系式曲线与真实值曲线吻合度更显著,在电力负荷分析预测中更能够提高结果的准确性。

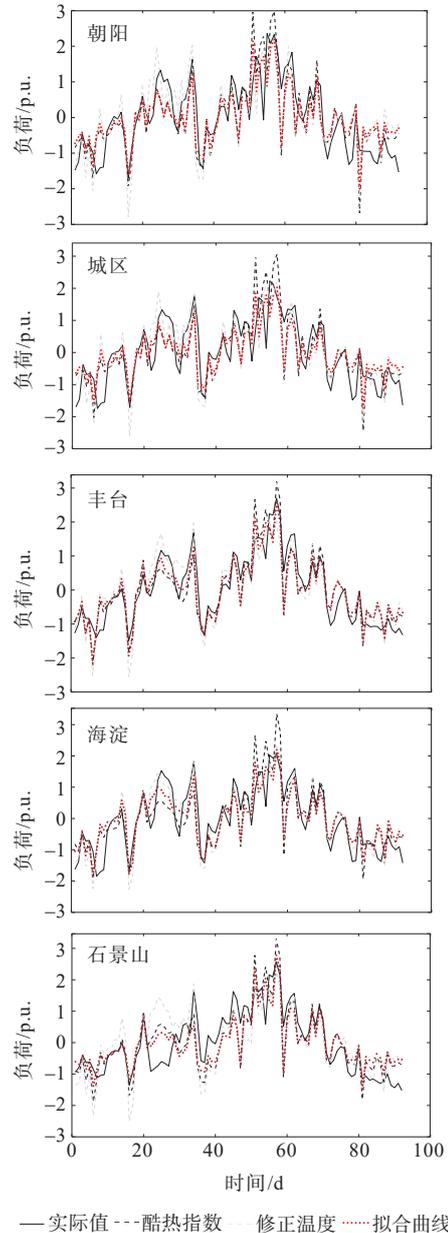


图 9 气象负荷相关性模型修正曲线对比

Figure 9 Comparison of correlation model of meteorological load

## 4 结语

1) 基于爬虫技术与趋势分析分别采集气象数据并提取气象负荷,考虑综合气象指数与积温效应,提出了一种夏季气象负荷相关性模型修正方法,提高了气象负荷相关性系数。

2) 北京市主城区 2019 年夏季实例分析结果表明:相对单气象因素,各区电力负荷、气象负荷与综合气象指数的相关性更高;气象负荷的酷热指数相关性模型优于人体舒适度指数、综合舒适度指数模型,基于日平均气温的酷热指数相关性系数最高;考虑累计

效应系数的气温积温效应修正方法效果更好,修正后的气象负荷与气温的相关性系数提高幅度最高达7.39%,负荷与气温的日变化曲线趋势更接近。

3) 将积温修正与综合气象指数耦合,得到新的综合气象指数结果,该结果与气象负荷的相关性有所提高;提出以酷热指数和气温积温修正为自变量的气象负荷拟合关系式,与各区实际负荷的拟合度较高,误差水平较低,较其他经验模型关系式,与实际负荷变化曲线吻合度更高,为更准确预测北京市电力负荷提供经验参考。

### 参考文献:

- [1] 陈凤,高大兵,苏盛. 气候变化对长江中下游地区采暖制冷负荷需求影响分析[J]. 电力科学与技术学报,2016,31(1):140-144.  
CHEN Feng, GAO Dabing, SU Sheng. Climate Change impact analysis on heating & cooling electricity demand in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2016, 31(1):140-144.
- [2] 陈宋宋,王阳,周颖,等. 基于客户用电数据的多时空维度负荷预测综述[J]. 电网与清洁能源,2023,39(12):28-40.  
CHEN Songsong, WANG Yang, ZHOU Ying, et al. A review of multi-time-space load forecasting based on customer electricity consumption data[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(12): 28-40.
- [4] 张夏韦,梁军,王要强,等. 电动汽车充电负荷时空分布预测研究综述[J]. 电力建设,2023,44(12):161-173.  
ZHANG Xiawei, LIANG Jun, WANG Yaoqiang, et al. Overview of research on spatiotemporal distribution prediction of electric vehicle charging[J]. Electric Power Construction,2023,44(12):161-173
- [5] 寿绍安,罗海荣,王晓康,等. 基于VMD-ISODATA-DBN的配电台区短期负荷预测方法[J]. 智慧电力,2023,51(11):53-60.  
SHOU Shaoan, LUO Hairong, WANG Xiaokang, et al. Forecasting method of short-term load in distribution station area based on VMD-ISODATA-DBN[J]. Smart Power,2023,51(11):53-60.
- [6] 马传杰,孙宇贞,彭道刚,等. 基于XGBoost-MTL的综合能源系统多元负荷预测[J]. 电力工程技术,2023,42(5):158-166.  
MA Chuanjie, SUN Yuzhen, PENG Daogang, et al. Multivariate load forecasting for integrated energy system based on XGBoost-MTL[J]. Electric Power Engineering Technology,2023,42(5):158-166.
- [7] 郭占伍,张泽亚,周兴华,等. 考虑气象因素的电采暖负荷预测研究[J]. 电测与仪表,2022,59(2):154-158.  
GUO Zhanwu, ZHANG Zeya, ZHOU Xinghua, et al. Study on forecasting method of electric heating load considering meteorological factors[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2022,59(2):154-158.
- [8] 彭道刚,税纪钧,王丹豪,等. “双碳”背景下虚拟电厂研究综述[J]. 发电技术,2023,43(5):602-615.  
PENG Daogang, SHUI Jijun, WANG Danhao, et al. Review of virtual power plant under the background of “Dual Carbon” [J]. Power Generation Technology, 2023, 43(5):602-615.
- [9] 北京市城市管理委员会. 北京市城市管理委员会关于印发《北京市“十四五”时期电力发展规划》的通知(京管发〔2022〕14号)[EB/OL]. [http://csglw.beijing.gov.cn/zwxw/zcwj/qtwj/202206/t20220629\\_2755305.html](http://csglw.beijing.gov.cn/zwxw/zcwj/qtwj/202206/t20220629_2755305.html),2022-10-12.  
Beijing Municipal Administrative Commission. Notice of Beijing Municipal Commission of Urban Administration on the Printing and Distribution of "Beijing's 14th Five-Year Plan for Electric Power Development" (Beijing Guanfa (2022) No. 14)[EB/OL]. [http://csglw.beijing.gov.cn/zwxw/zcwj/qtwj/202206/t20220629\\_2755305.html](http://csglw.beijing.gov.cn/zwxw/zcwj/qtwj/202206/t20220629_2755305.html),2022-10-12.
- [10] 李艳,俞剑蔚,蔡芴宁,等. 南京市电力负荷特征及夏季极端负荷与气象条件关系[J]. 气象科技,2021,49(4):637-646.  
LI Yan, YU Jianwei, CAI Xiangning, et al. Characteristics of electric loads in Nanjing and relationship between extreme loads and meteorological conditions in summer [J]. Meteorological Science and Technology, 2021, 49(4): 637-646.
- [11] 任永建,熊守权,洪国平,等. 气象因子对夏季最大电力负荷的敏感性分析[J]. 气象,2020,46(9):1245-1253.  
REN Yongjian, XIONG Shouquan, HONG Guoping, et al. Sensitivity analysis of meteorological factors to summer maximum power load[J]. Meteorological Monthly, 2020, 46(9):1245-1253.
- [12] 尹灼寅,范进进,陈幼姣,等. 体感温度对夏季气象负荷率变化的影响研究:以湖北省黄石市为例[J]. 气象,2017,43(5):620-627.  
YIN Zhaoyin, FAN Jinjin, CHEN Youjiao, et al. Impact of sensible temperature on summer weather-sensitive power load rate in Huangshi city[J]. Meteorological Monthly, 2017, 43(5):620-627.
- [13] 刘炬,刘闯,徐达,等. 基于综合气象指数的EA-SNN组合负荷预测模型[J]. 山东电力技术,2022,49(8):10-14+41.  
LIU Ju, LIU Chuang, XU Da, et al. EA-SNN combined load forecasting model based on comprehensive meteorological index[J]. Shandong Electric Power, 2022, 49(8):10-14+41.
- [14] 吴迪,王正风. 气象敏感性负荷特性分析及预测[J]. 东北电力技术,2020,41(1):4-8.  
WU Di, WANG Zhengfeng. Analysis and forecast of whether sensitive load characteristic[J]. Northeast Electric Power Technology, 2020, 41(1):4-8.
- [15] 成丹,刘静,郭淳薇,等. 基于积温效应的华中电网电力负荷预测[J]. 气象科技,2018,46(4):814-821.  
CHENG Dan, LIU Jing, GUO Chunwei, et al. Prediction of

- electric loads over central China based on accumulated temperature effect[J]. *Meteorological Science and Technology*,2018,46(4):814-821.
- [16] 朱瞰. 基于位置数据的空气质量分类预测混合模型研究[D]. 杭州:浙江大学,2017.  
ZHU Tun. Research on air quality classification forecasting hybrid model based on position data[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2017.
- [17] 胡戎,冯仲科,蒋君志伟. 基于Cheerio的MEAN Stack气象数据网络爬虫研究[J]. *农业机械学报*,2016,47(6):275-282.  
HU Rong, FENG Zhongke, JIANG Junzhiwei. Web crawler of atmosphere and weather data based on MEAN stack with CheerIO[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2016,47(6):275-282.
- [18] 白红涛,彭苗,牛振涛,等. 爬虫技术在分布式能源站负荷预测中的应用[J]. *科学技术创新*,2021(4):62-66.  
BAI Hongtao, PENG Miao, NIU Zhentao, et al. Application of crawler technology in load forecasting of distributed energy station[J]. *Scientific and Technological Innovation*,2021(4):62-66.
- [19] 李琛,郭文利,吴进,等. 北京市夏季日最大电力负荷与气象因子的关系[J]. *气象与环境学报*,2018,34(3):99-105.  
LI Chen, GUO Wenli, WU Jin, et al. Relationship between daily maximum electric power load and meteorological factors in summer in Beijing[J]. *Journal of Meteorology and Environment*,2018,34(3):99-105.
- [20] 张杰,崔秀云,曲晓黎. 邢台市夏季制冷期电力负荷变化特征及其预报模型[J]. *气象与环境科学*,2022,45(4):106-111.  
ZHANG Jie, CUI Xiuyun, QU Xiaoli. Variation characteristics and prediction model of power load during the summer cooling period in Xingtai city[J]. *Meteorological and Environmental Sciences*,2022,45(4):106-111.
- [21] 马得银,孙波,刘澈. 基于天气信息的短期冷热电负荷联合预测方法[J]. *电网技术*,2021,45(3):1015-1022.  
MA Deyin, SUN Bo, LIU Che. Short-term cooling and heating power load prediction method based on multi-weather information[J]. *Power System Technology*,2021,45(3):1015-1022.
- [22] BUCHELI J, DALHAUS T, FINGER R. Temperature effects on crop yields in heat index insurance[J]. *Food Policy*,2022,107:102214.
- [23] 陆鼎煌,崔森. 北京城市绿化夏季小气候条件对人体的适宜度[M]. 北京:气象出版社,1984:144-152.  
LU Dinghuang, CUI Miao. Suitability of microclimate conditions for human body in Beijing city in summer[M]. Beijing:China Meteorological Press,1984:144-152.
- [24] 刘红敏,时浩,钱嘉鑫,等. 基于代换合成法的高校教室综合舒适度研究[J]. *热科学与技术*,2022,21(2):201-208.  
LIU Hongmin, SHI Hao, QIAN Jiabin, et al. Research on comprehensive comfort of college classroom based on substitution and synthesis[J]. *Journal of Thermal Science and Technology*,2022,21(2):201-208.
- [25] 詹传骅. 基于气象因素和集成学习的长沙市短期电力预测研究[D]. 长沙:湖南大学,2016.  
ZHAN Chuanhua. A research of short-term load forecasting of Changsha based on meteorological factors and integrated study[D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [26] 唐浩. 考虑典型气象因素影响的湖南电网夏季日最大负荷预测[D]. 长沙:长沙理工大学,2013.  
TANG Hao. The prediction of daily peak load of summer in Hunan Province considering the effects of typical meteorological factors[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology,2013.
- [27] 高赐威,李倩玉,苏卫华,等. 短期负荷预测中考虑积温效应的温度修正模型研究[J]. *电工技术学报*,2015,30(4):242-248.  
GAO Ciwei, LI Qianyu, SU Weihua, et al. Temperature correction model research considering temperature cumulative effect in short-term load forecasting[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*,2015,30(4):242-248.
- [28] 金丽莉,谭风雷,吴志坚,等. 考虑积温效应的负荷预测研究[J]. *电力需求侧管理*,2013,15(1):7-10+14.  
JIN Lili, TAN Fenglei, WU Zhijian, et al. The study of load forecasting accounting accumulated temperature effect[J]. *Power Demand Side Management*,2013,15(1):7-10+14.
- [29] 张远亲. 气象条件对上海浦东电力需求的影响分析及预报[D]. 杭州:浙江大学,2005.  
ZHANG Yuanqin. Study on characteristics of electric load of Pudong and its relationship with meteorological elements[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2005.
- [30] 911查询. 天气预报、未来一周15天天气查询—天气预报-911查询[EB/OL]. <https://tianqi.911cha.com/beijing/>, 2022-10-18.  
911 queries. Weather forecast, 15-day weather enquiries in the coming week-Weather forecast-911 enquiries[EB/OL]. <https://tianqi.911cha.com/beijing/>,2022-10-18.
- [31] 董莉娜,张志劲,王茂政. 基于历史天气的区域电网负荷预测的研究[J/OL]. *中国测试*,2021:1-7.(2021-07-23). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1714.TB.20210722.0952.002.html>.
- [32] 卢珊,浩宇,王百朋,等. 引入积温效应预测夏季西安市电力气象负荷[J]. *气象科技*,2017,45(6):1090-1094.  
LU Shan,HAO Yu,WANG Baipeng,et al.Forecasting model of meteorological power load in Xi'an in summer based on accumulated temperature effect[J]. *Meteorological Science and Technology*,2017,45(6):1090-1094.