

我国社会用电量对气温变化的响应及其时空差异

许畅^{1,2}, 陈正洪^{2,✉}, 刘军²

(1. 湖北经济学院, 湖北 武汉 430205; 2. 湖北省气象服务中心, 湖北 武汉 430205)

摘要: [目的]为了揭示我国各地用电量受气温变化影响的方式、程度及其差异。[方法]搜集我国 29 个省区市 2008~2020 年逐月全社会用电量及同期平均气温, 计算各省逐月的气象电量和相对气象电量及与同期气温的趋势系数及相关系数, 绘制相关参数的全国分布图, 并分析其空间差异及可能成因。[结果]结果表明: (1) 夏季气温升高, 气象电量呈现增加的趋势, 其中东部地区及重庆、陕西呈现极显著的关系, 而西部和北部地区(如新疆、青海、甘肃和黑龙江)则不显著。其中极显著地区相对气象电量趋势系数差异也很大, 东北 3 省平均趋势系数为 1.5%/°C, 华中和除福建以外的华东均达到了 5%/°C, 广西、重庆和陕西的平均值在 3%/°C 左右; (2) 冬季气温变化与我国各地用电量也具有一定的关系, 冬季温度降低时, 用电量呈现增加的趋势, 而且我国大部分区域除南部沿海地区及贵州外都呈现显著的关系, 其中东北、华北向西南地区一线达到极显著的关系, 相对气象电量趋势系数从-2.0%/°C 到 -7.5%/°C; (3) 空间相关性表明, 夏季气象电量、相对气象电量趋势系数与气温显著正相关, 气温每升高 1 °C, 气象电量、相对气象电量均呈显著增加, 而冬季为弱的负相关。[结论]研究结果对能源需求预测、能源保供、应对气候变化及实现“双碳”目标具有重要的参考价值。

关键词: 社会用电量; 气象电量; 相对气象电量; 气温; 相关性; 趋势性

中图分类号: TK01; P467

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)

OA: <https://www.energychina.press/>

The Response of Social Electricity Consumption on Temperature Changes and Its Temporal and Spatial Variations in China

XU Chang^{1,2}, CHEN Zhenghong^{2,✉}, LIU Jun²

(1. Hubei University of Economics, Hubei 430205, Wuhan, China; 2. Hubei Meteorological Service Center, Hubei 430205, Wuhan, China)

Abstract: [Introduction] The purpose is to reveal the ways, extents and differences in how electricity consumption across various regions in China is influenced by temperature changes. [Method] Data on monthly total social electricity consumption and corresponding average temperatures for 29 provinces municipalities and autonomous regions from 2008 to 2020 were collected. Monthly meteorological electricity consumption and relative meteorological electricity consumption were calculated for each province, along with trend coefficients and correlation coefficients with concurrent temperatures. National distribution maps of these parameters were drawn, and their spatial differences and possible causes were analyzed. [Result] The results show that: (1) With rising summer temperatures, meteorological electricity consumption shows an increasing trend, especially significant in the eastern regions, Chongqing, and Shaanxi, while it is not significant in western and northern regions (such as Xinjiang, Qinghai, Gansu and Heilongjiang). The trend coefficients of relative meteorological electricity consumption also vary significantly among regions with a significant relationship, with an average trend coefficient of 1.5%/°C in the three northeastern provinces, reaching 5%/°C in Central China and Eastern China (excluding Fujian), and about 3%/°C in Guangxi, Chongqing and Shaanxi. (2) Winter temperature changes also have a certain relationship with electricity consumption in various regions of China. When winter temperatures decrease, electricity consumption shows an increasing trend, and a significant relationship is observed in most areas of China, except for the southern coastal regions and Guizhou, with an extremely significant relationship extending from the northeast and north China to the southwest region. The trend coefficients of relative

收稿日期: 2024-06-01 修回日期: 2024-07-27

基金项目: 中国气象局“揭榜挂帅”科技项目“能源保供气象服务关键技术及产品研发”(CMAJBGS202323); 中国气象局气候变化专项“极端冷热天气影响能源系统供需安全研究”(QBZ202409); 云南省气象局“揭榜挂帅”科技项目“楚雄州电网精细化气象预报预警服务研究”(YNJBGS202309)

meteorological electricity consumption range from $-2.0\%/^{\circ}\text{C}$ to $-7.5\%/^{\circ}\text{C}$. (3) Spatial correlation analysis shows that summer meteorological electricity consumption and the trend coefficients of relative meteorological electricity consumption are significantly positively correlated with temperature. For each 1°C increase in temperature, both meteorological electricity consumption and relative meteorological electricity consumption show a significant increase, while in winter, the correlation is weakly negative. [Conclusion] These results have important reference value for energy demand forecasting, energy supply assurance, addressing climate change, and achieving the carbon peaking and carbon neutrality goals.

Key words: social electricity consumption; meteorological electricity consumption; relative meteorological electricity consumption; temperature; correlation; trend

0 引言

能源是社会经济发展的命脉,电力是能源最重要的组成部分之一。随着全球气候变化的加剧,气温的升高及其急剧波动对社会经济活动产生了显著影响^[1],尤其是电力的消耗和供应^[2-4]。在炎热的夏季,人们依赖空调和其他冷却设备来降温,将会导致用电量激增,供电压力也会相应加剧。另外,在寒冷的冬季,供暖需求同样推高了电力消耗。因此,深入理解气温高低及其变化对社会用电量影响的方式和程度,对于预测未来的电力需求、电力供应的规划和管理,优化资源配置以及制定实现“双碳”目标及应对气候变化的策略至关重要^[5-6]。

过去的研究表明,用电量与气温之间存在显著的相关性^[7-8]。刘静等^[9]发现近年来武汉市电力负荷和日负荷峰谷差屡破新高,夏季高温持续时间和强度大小对电力负荷影响最为显著。廖春花等^[10]研究得出长沙市日最大电力负荷在1年内有2个峰值,分别出现在夏季和冬季,长沙市日最大电力负荷整体呈现增长趋势。李明节等^[11]采用负荷分解理论,提出了基于敏感气温空间分布的夏季和冬季日最大负荷预测方法,这些研究更多聚焦于逐日气温波动对电力负荷的影响。一些学者还指出极端天气事件,如热浪和寒潮,能够导致短期内的电力需求剧增,高红均等^[12]研究发现,2022年8月,四川极端高温天气导致水电大幅减发,负荷急剧攀升,发生严峻的应急限电事件。肖声玲^[13]研究发现电力作为经济发展的重要支持,迎峰度夏期间受高温影响严重。郭崇兰^[14]分析杭州极端气象因子与工业电力消费关系时发现,杭州能源消费量大的原因除了经济发展因素外,极端气象因子变化异常也是重要的原因。也有一些研究表明,用电量与气温之间的关系存在季节性变化,不同季节气温对用电量的影响不同。陈圣劼等^[15]研究发现南京市7~8月、12月至翌年1月为两个峰

值,4月、10月为谷值,季节变化明显。Pardo等^[16]研究发现温度和季节性变化对西班牙电力负荷影响严重。而少量研究则探讨了长期气候变化对电力供应的影响,强调了适应这些变化的重要性^[17-18]。王丽娟等^[19]利用气候预测模式研究了长江经济带的中大型城市夏季日最大电力负荷的变化规律,发现夏季平均气温与气象敏感负荷关联度最大。Wenz等^[20]研究发现未来气候变暖情况下,欧洲电力消费将呈南北两级分化,南欧和西欧的平均每日峰值负荷和总体用电量显著增加,而北欧则显著下降。Li等^[21]利用日常家庭用电数据估算气候变化背景下上海用电量的变化,结合全球气候模型构建未来年度全球平均表面温度(GMST)变化与年度住宅用电量之间的关系,发现每年GMST每升高 1°C ,年用电量就会增加9.2%。相比之下,每年GMST每升高 1°C ,年峰值用电量增加高达36.1%。

然而,大多数现有研究范围通常局限为某一区域,对中国各省区市用电量与气温的关系缺乏系统性分析和认识。此外,很少有研究考虑到地理差异、经济发展水平和居民生活习惯对该关系差异的潜在影响。本研究旨在深入分析中国各省区市社会用电量与气温变化之间的关系,利用我国29个省区市(以下简称省)2008~2020年逐月全社会用电量及同期平均气温,计算并分析不同地区冬夏两季用电量与气温关联性指标的空间差异,更好地理解我国及各省能源消耗的特点和规律,为能源管理提供科学依据。此外,随着气候变暖等环境问题日益突出,深入研究社会用电量与气温关系,有助于制定应对气候变化、实现双碳目标的政策和措施。

1 资料与方法

1.1 数据来源

搜集了中国各省(未含内蒙古和西藏)2008~2020年逐月社会用电量和同期平均气温数据,其中

社会用电量数据从中国能源统计年鉴获取, 而气温数据从国家气候中心获取 (http://cmdp.ncc-cma.net/influ/moni_china.php?product=moni_assessment)。其中新疆 2019 年 12 月、2020 年 12 月用电量数据异常存疑, 暂未使用。

1.2 数据处理

1) 季节选取: 考虑到用电量和气温相关性的季节差异, 将其中数据按冬季(12 月、1 月、2 月)和夏季(6 月、7 月、8 月)进行统计分析。考虑到年份相对较少, 为了扩大样本, 统一采用月社会用电量(E , 亿 kWh)和月平均气温(T , $^{\circ}\text{C}$), 所以各省计算样本数均为 39(新疆为 37)。

2) 趋势用电量的拟合: 要研究气温条件对社会用电量的影响, 需要除去国民经济发展拉动的增长。首先取一个省某一季度逐月用电量随时间(年)制成散点图, 采用线性回归得到趋势线即月趋势用电量(E' , 亿 kWh)。

3) 气象电量的提取: 各散点距平即为实际用电量与趋势用电量的差值, 通常该值为气温变化所致, 称之为月气象电量(ΔE , 亿 kWh)^[22-24]。公式如下:

$$\Delta E = E - E' \quad (1)$$

4) 相对气象电量的计算: 气象电量与趋势用电量之比反映了气温变化所造成的社会用电量相对波动状况, 称之为月相对气象电量(η , %)。该值能更好描述各区域社会用电量对气温的敏感性, 更便于差异性比较。公式如下:

$$\eta = \Delta E / E' \times 100\% \quad (2)$$

数据的具体处理方法见章节 2。

5) 空间分布分析: 运用 ArcGIS 软件的反距离加权插值和自然间断点分级法对本研究数据进行空间分析, 绘制空间分布图。

1.3 回归方程的建立

分冬、夏季分别建立逐月气象电量和逐月相对气象电量与同期平均气温的线性回归方程^[25], 公式如下:

$$y_i = a_i x + b_i \quad (3)$$

当 $i=1$ 时, 表示逐月气象电量与同期平均气温的线性回归方程, 当 $i=2$ 时表示逐月相对气象电量与同期平均气温的线性回归方程。 y_1 为月气象电量

(ΔE), y_2 为月相对气象电量(η), x 为月平均气温(T), a_1 、 a_2 为回归方程的趋势系数即 1°C 效应量, 单位分别为亿 kWh/ $^{\circ}\text{C}$ 、%/ $^{\circ}\text{C}$, 正负值分别对应正负相关性。对应的相关系数分别用 r_1 、 r_2 表示。

1.4 趋势系数与平均气温的空间相关分析

分冬、夏季分别建立 29 个省市区 a_1 、 a_2 值与同区域 2008 ~ 2020 年月(季)平均气温的线性回归方程, 公式如下:

$$a_i = m_i \bar{T} + n_i \quad (4)$$

其中, $i=1$ 或 2 , a_1 或 a_2 为趋势系数, \bar{T} 为 2008 ~ 2020 年多年月(季)平均气温。

1.5 显著性检验

查相关系数显著性检验表, 可对公式(3)进行显著性检验, 各省市区样本数为 39, 结果如下, 以信度(α)为 0.1、0.05、0.01、0.001 的相关系数阈值分别为 0.267、0.316、0.408、0.507, 其中新疆样本数为 37, 相应的数值分别为 0.275、0.325、0.418、0.519。

2 数据处理及分析—以重庆市夏季为例

2.1 趋势用电量的拟合

图 1 为 2008 ~ 2020 年重庆市夏季(6 ~ 8 月)逐月社会用电量时间趋势图。图中为趋势用电量的具体方程, 该回归方程达到了极显著的程度, 社会用电量每月的平均增量为 200 GWh。随着时间的推移, 月用电量逐步增多, 从 2008 年 6 月的 4.2 TWh 到 2020 年 8 月的 13.8 TWh, 扩大为 3.28 倍。

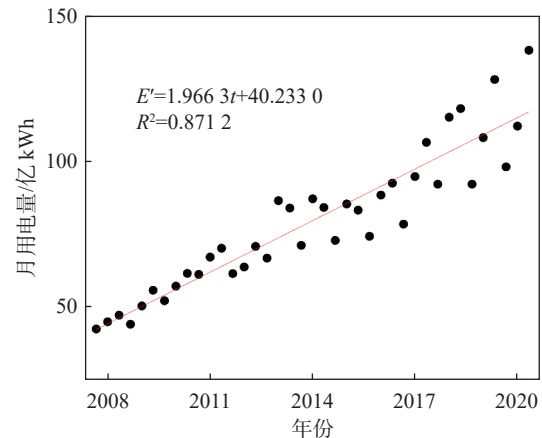


图 1 2008 ~ 2020 年重庆市夏季(6 ~ 8 月)逐月社会用电量变化趋势

Fig. 1 Monthly trend of social electricity consumption in Chongqing during the summer (June to August) from 2008 to 2020

2.2 气象电量的提取及与气温的相关分析

根据公式(1)计算出重庆市夏季(6~8月)逐月气象电量,并绘制出重庆市夏季(6~8月)月气象电量与月平均气温的相关趋势图,见图2。由图可见,气温上升,气象电量显著增加,达到极显著的程度,且每上升1℃,气象电量增加量高达约340 GWh。

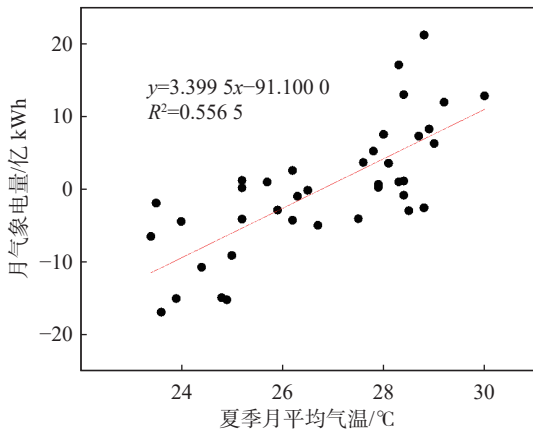


图2 重庆市夏季(6~8月)月气象电量与月平均气温的相关趋势图

Fig. 2 Correlation trend chart of monthly meteorological electricity consumption and monthly average temperature in Chongqing during the summer (June to August)

2.3 相对气象电量的计算及与气温的相关分析

根据公式(2)计算出重庆市夏季(6~8月)逐月相对气象电量,并绘制出重庆市夏季(6~8月)月相对气象电量与月平均气温的相关趋势图,见图3。由图可见,气温上升,月相对气象电量也呈显著增加的趋势,达到极显著的程度,且月平均气温每上升1℃,月相对气象电量增加3.82%。

3 我国冬夏季气象电量和相对气象电量气温趋势系数空间差异分析

3.1 2020年社会用电量空间分布特征

我国各地2020年社会用电量空间分布特征如图4所示,东部沿海地区大于中西部,在东部地区以珠三角(以广东为代表)、长三角(江苏和浙江为代表)和华北地区(以山东、河北为代表)为用电量高值中心,山东、广东、江苏均突破600 TWh,其中山东以694 TWh位居第一。天津、吉林、青海、海南用电量均低于100 TWh,其中海南仅为36.2 TWh。最高值是最低值的19.2倍。

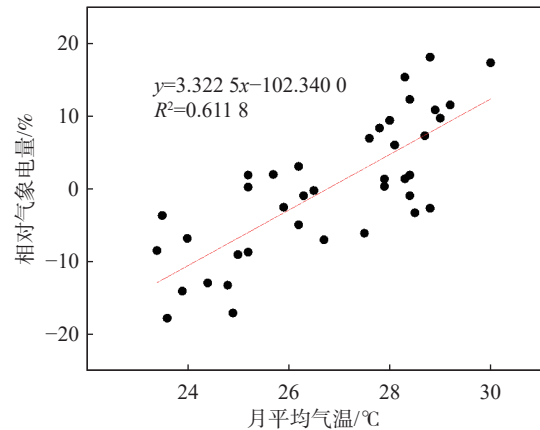


图3 重庆市夏季(6~8月)月相对气象电量与月平均气温的相关图

Fig. 3 Correlation chart of monthly relative meteorological electricity consumption and monthly average temperature in Chongqing during the summer (June to August)

3.2 夏季(6~8月)月气象电量和月相对气象电量气温趋势系数空间差异分析

图5(a)中,趋势系数(a_1)表示的是每单位气温变化导致的气象电量变化。数值越高,表示气温对电量的影响越大。地图上的颜色从绿色(影响较小)到红色(影响较大)变化。

中国东部沿海地区(包括上海、江苏、浙江、福建、广东)和一部分中部地区(如湖南、江西)的趋势系数较高,都达到了500 GWh/℃以上,广东和浙江更是高达1.7 TWh/℃以上,趋势系数较高的区域往往有更密集的人口和更发达的经济,尤其是在需求大的工业和服务业中。例如,珠三角、长三角和京津

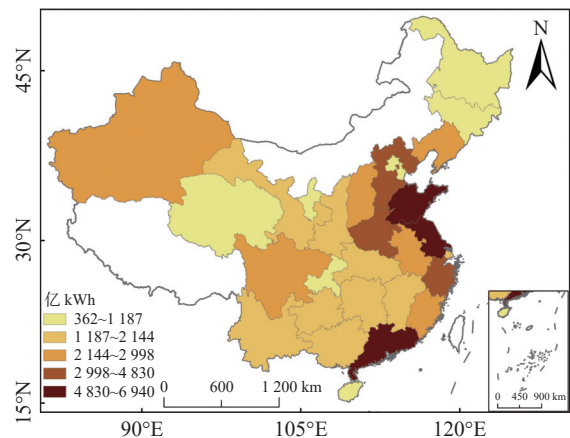


图4 我国2020年社会用电量空间分布示意图

Fig. 4 Spatial distribution sketch map of social electricity consumption in China in 2020

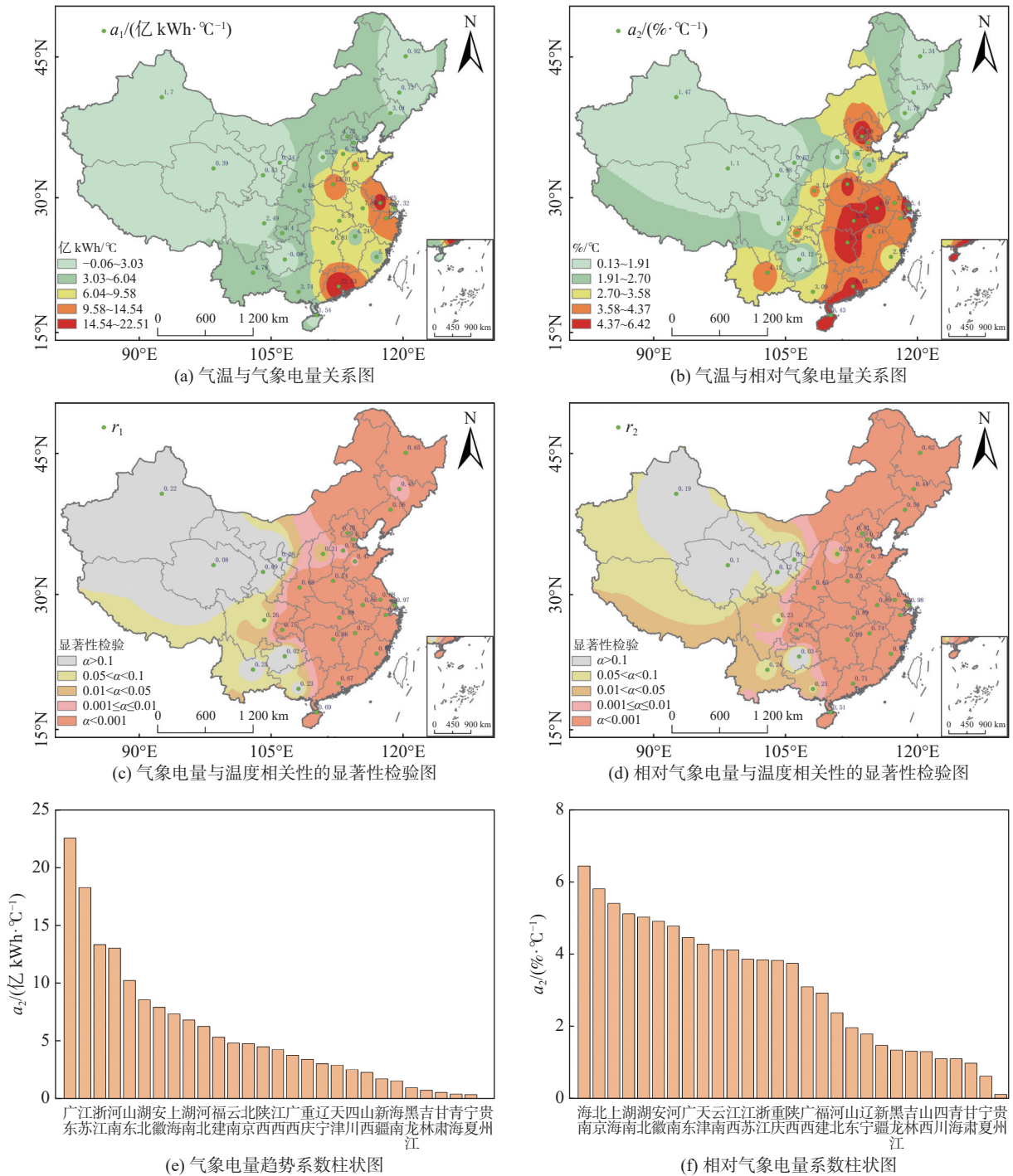


图 5 我国夏季(6~8月)月气象电量和月相对气象电量的趋势系数空间差异及显著性检验

Fig. 5 Spatial differences and significance testing of trend coefficients for monthly meteorological electricity consumption and relative meteorological electricity consumption during the summer (June to August) in China

注: a_1 、 a_2 分别为气象电量、相对气象电量与气温回归方程的趋势系数; r_1 、 r_2 分别为相关系数, 下同。

冀地区, 这些都是中国经济最发达、人口最密集的区域, 夏季用电量非常大。同时还意味着这些区域用电量受气温变化的影响特别大, 因为这些区域巨大的用电量和高温多湿的气候导致空调等制冷设备大

量使用密切相关。

在四川盆地和华南部分地区, 趋势系数也较高, 因为这些区域夏季非常热, 而且高温期持续时间较长, 导致居民和企业使用空调等冷却设备的时间和

强度大幅增加。

中国西部和北部地区(如新疆、青海、甘肃、内蒙古和黑龙江)本身的用电量就很低,因此趋势系数相对较低,贵州用电量和平均气温都较低导致计算得到趋势系数最小,仅为-8 GWh/°C,说明这些地区的气象用电量对气温变化的响应不像东部和中部地区那么大。

图 5(b)中,趋势系数(a_2)表示的是气温每变化 1 °C,相对气象电量消耗(气象电量与趋势用电量的比例变化)的变化。颜色的深浅代表趋势系数的大小,从浅绿色(敏感性较小)到深红色(敏感性较大)。此图与图 5(a)大体相致,华东和华南地区,包括长江三角洲和珠江三角洲的部分城市以及中部的省份(湖北、湖南、河南)还有北京,这些人口密度很大,经济很发达的城市都呈现了极显著的敏感性,此系数很大的地区同时也是人均 GDP 排名前列的地区。

而旅游景点集中的地区,如海南和云南,气象电量趋势系数不高,但相对气象电量系数极高,是因为夏季会迎来大量游客,酒店和娱乐场所的用电量随之增加。

图 5(c)和图 5(d)分别为气象电量、相对气象电量与温度相关性的显著性检验图,两幅图高度相似,显著性东高西低,东部地区显著性极高,均通过信度 0.01 的显著性检验,甚至大多省份通过了信度为 0.001 的显著性检验。西部除了重庆和陕西都未通过信度为 0.05 的显著性检验。

相应地,还绘制了中国各省夏季气象电量、相对气象电量趋势系数的柱状图,即图 5(e)和图 5(f),各省之间的差异一目了然。

基于图 5 提供的信息,我们可以对中国各地区夏季(相对)气象电量随气温变化的趋势系数进行进一步的原因分析。这些趋势系数高低的背后原因可能包括:

1)地理和气候特征:统计分析夏季全国平均气温分布,除青藏高原等地势高的地区外,全国普遍高温,南北气温差别不大。但是由于湿度的影响,华东和华南地区夏季的高温伴随着高湿度,这种湿热型高温会加重人体感温度,人们对空调依赖性强,导致用电量随气温上升而急剧增加。

2)社会经济因素:人口密集的地区,如长江三角洲和珠江三角洲,居住和商业空间密集,导致夏季用

电需求增加。同时经济水平高、工业发达的地区需要更多的电力用于生产活动,特别是那些依赖温度控制的工业过程,例如化工生产、金属加工等,而信息产业发达的地区,也需要对工作电子设备和数据库机房进行散热降温。

3)生活习惯和经济发展水平:经济较发达地区空调普及率高,居民对舒适生活的追求导致用电量与温度变化正相关。现代城市中,玻璃幕墙等设计可能导致室内温度升高,增加了冷却需求。快速城市化的地区夏季用电需求急剧增长,特别是新建住宅和商业区。

4)能源政策和管理:电力调度方面,电网公司可能会根据气候和季节变化预先规划电力供应,以确保高温期间的电力供应稳定。节能措施方面,政府和企业推行的节能措施能够减少气象因素对电力需求的影响。

总之,影响(相对)气象电量与气温变化关系的因素是多方面的,包括地理位置、气候条件、社会经济水平、居民生活习惯、能源供应能力和管理政策等。每个地区的具体情况可能会有所不同,需要综合考虑多个因素来分析。

3.3 冬季(12~2月)月气象电量和月相对气象电量气温趋势系数空间差异分析

图 6(a)中,趋势系数(a_1)表示的是每单位气温变化导致的气象电量变化。数值越低,表示气温对电量的影响越大。地图上的颜色从绿色(影响较大)到红色(影响较小)变化。

浅绿色区域:新疆、青海和甘肃,这些区域的趋势系数为负的小数值,暗示气温下降时气象电量的增加相对较少。绿色至黄色区域:包括华中、西南及华南的大部分地区,趋势系数较低但仍为负值,表示这些地区在气温下降时,气象电量增加较多。红色区域:如华东地区和云南,广东等地,显示出更低的趋势系数,暗示当气温下降时,这些地区气象电量的增加最为显著。

图 6(b)中,趋势系数(a_2)表示的是每单位气温变化导致的相对气象电量(气象电量与趋势用电量的比例变化)的变化。气温每下降 1 °C 时,相对气象电量变化的百分比。趋势系数越低(颜色越深),表明相对气象电量增加越多。

绿色区域:例如新疆、青海及东北、华南地区,

这里的趋势系数较高,表示在气温下降时,相对气象电量增加较少。黄色区域:如华中和华东的大部分区域,趋势系数中等,表明这些区域的相对气象电量增加在中等范围内。红色区域:云南、重庆、北京、天津和湖北,这些区域的趋势系数较低,意味着气温

下降时相对电量的增加最为显著。

图 6(c)和图 6(d)分别为两组趋势系数与温度的显著性检验图,沿海城市显著性最低,未能通过显著性检验,内陆地区均通过信度为 0.05 的显著性检验,其中华北地区和中部极其显著,通过了信度为

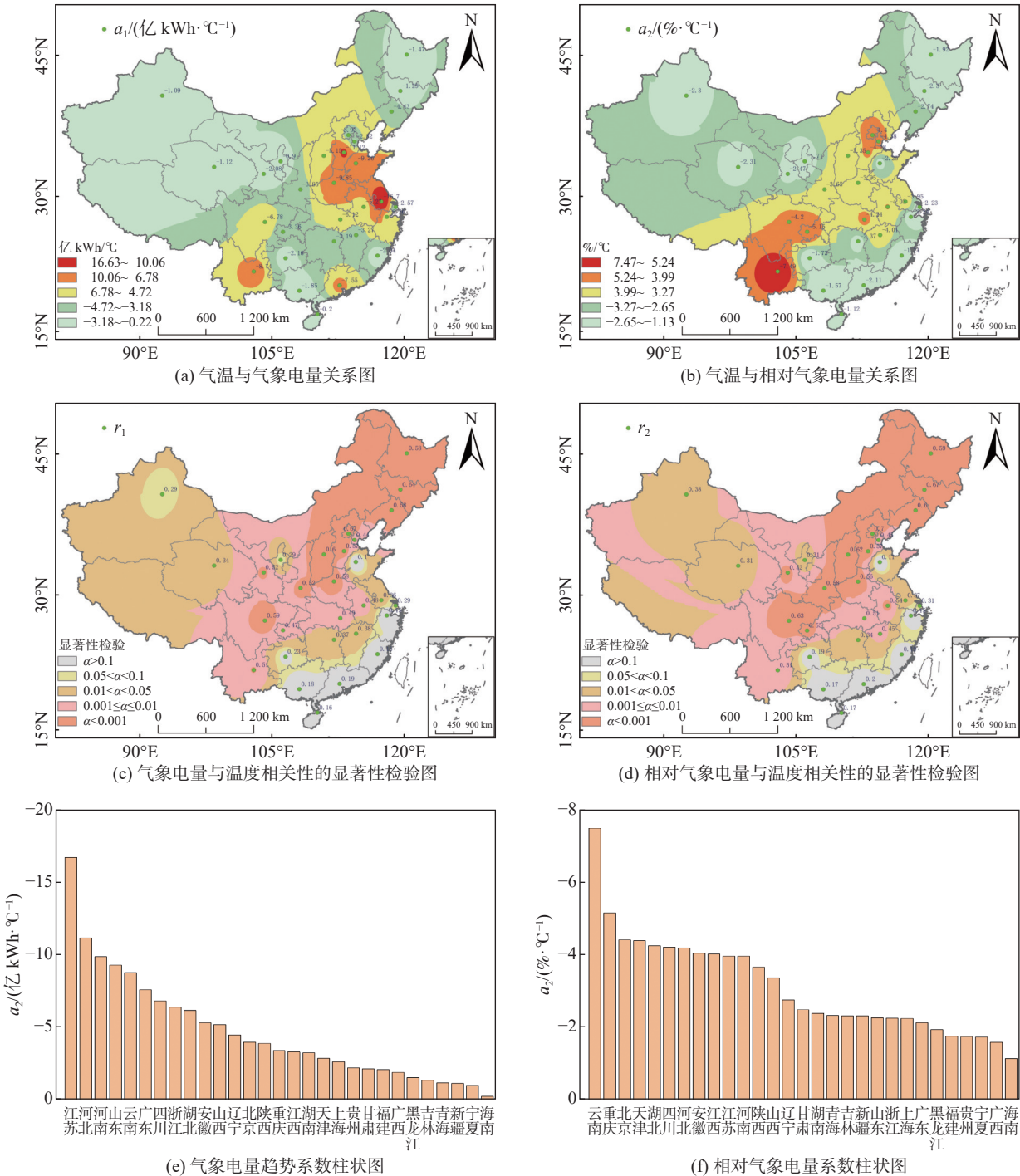


图 6 我国冬季(12~2月)月气象电量和月相对气象电量的趋势系数空间差异及对应显著性检验

Fig. 6 Spatial differences and corresponding significance testing of trend coefficients for monthly meteorological electricity consumption and relative meteorological electricity consumption during the winter (December to February) in China

0.001 的显著性检验。

相应地,还绘制了中国各省冬季气象电量、相对气象电量趋势系数的柱状图,即图 6(e)和图 6(f)。

基于图 6 提供的信息,我们可以对中国各地区冬季气象电量随气温变化的趋势系数进行进一步的原因分析。这些趋势系数高低的背后原因可能包括:

1)气候特征:统计分析冬季全国平均气温分布,南方温暖,北方寒冷,南北气温差别大。新疆和西藏这些地区,冬季虽然寒冷,但可能由于住宅和建筑的保暖措施较好,导致对电力供暖的需求不如中部地区那么高。湖北、江西这些中部地区可能因为冬季冷湿特征明显,加剧了寒冷的程度,从而显著增加了室内取暖需求,特别是在过渡季节,公共场所、宾馆、居民区可能会频繁使用电力加热设备。南部沿海地区冬季气温相对较高,取暖需求较少。

2)社会经济因素:与夏季情况类似,随着城市化的发展,人口密度高的地区,家庭取暖、工业、商业、基础设施等用电需求大,推高了电力消耗。

3)经济活动与生活标准:经济发展水平发达和居民对舒适生活的追求高的地区可能导致在气温下降时用电量增加。这些区域的居民因为经济条件允许,更倾向于在气温下降时使用电力加热设施来保持舒适的室温。

4)能源多样性:西部地区有多元化的能源供暖系统,包括煤炭、天然气或生物质能源,减少了对电力的依赖。

5)居民适应性:生活在气候极端地区的居民可能对冬季的低温有更高的适应性,因此即使气温下降,对室内加热的需求增加量也不大。

3.4 气象电量、相对气象电量趋势系数与气温的空间相关性分析

图 7(a)和图 7(b)分别为我国各地区月夏季气象电量、相对气象电量与多年平均气温回归方程的趋势系数和同地区的 2008~2020 年同期平均气温散点图,发现二者呈现正相关,其中夏季相对气象电量趋势系数和季度平均气温的图线建立线性回归方程通过信度为 0.01 的显著性检验。由于青海夏季平均气温较低,与其他地区差异过大,我们将其从样本中除去再次绘成散点图(图 7(c)、图 7(d)),发现夏季(6~8 月)相对气象电量趋势系数和季平均气温的图线建立线性回归方程通过信度为 0.001 的显著性

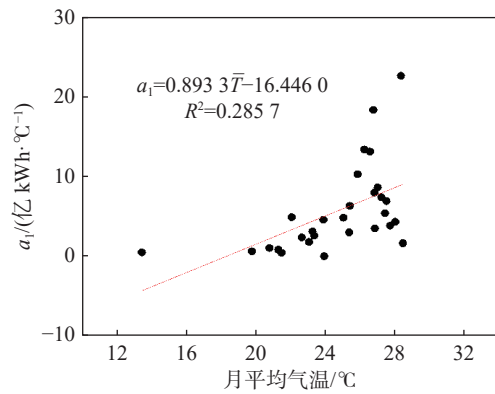
检验,二者呈现极显著的关系。

图 8(a)和图 8(b)分别为我国各地区(12~2 月)月夏季气象电量、相对气象电量与多年平均气温回归方程的趋势系数和同地区的 2008~2020 年同期平均气温散点图,发现二者呈现一定程度的负相关,然而建立的线性回归方程均未通过显著性检验。

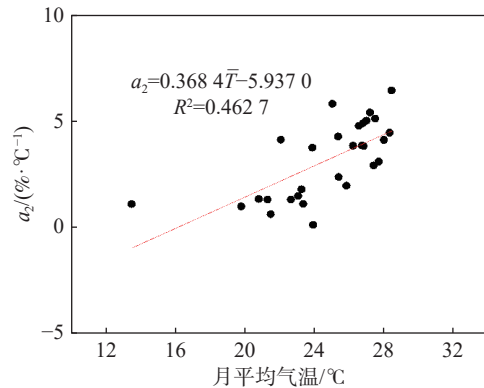
4 结论

4.1 结果

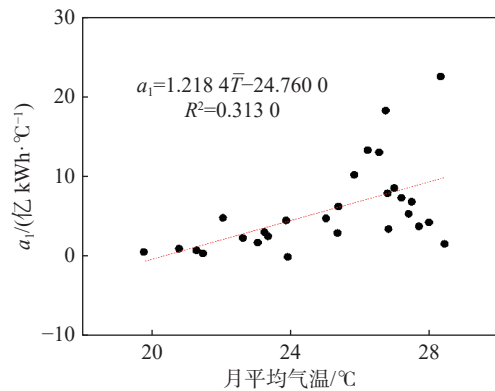
利用我国 29 个省区市 2008~2020 年逐月全社



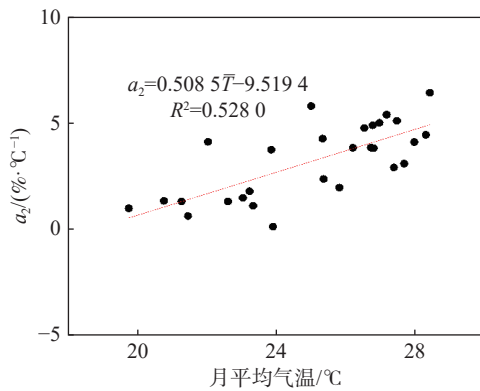
(a) 气象电量与温度趋势系数图



(b) 相对气象电量与温度趋势系数图



(c) 气象电量与温度趋势散点图



(d) 相对气象电量与温度趋势散点图

图 7 我国夏季(6~8月)月气象电量、相对气象电量趋势系数与月平均气温的空间相关性分析(c、d均不含青海数据)

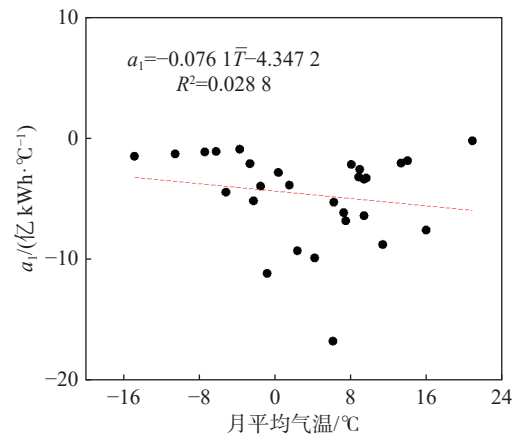
Fig. 7 Spatial correlation analysis of trend coefficients for monthly meteorological electricity consumption and relative meteorological electricity consumption, and temperature during the winter (June to August) in China (c and d do not include data from Qinghai)

会用电量及同期平均气温,计算并分析各地区冬夏两季用电量与气温关联性指标的空间差异,结果表明:

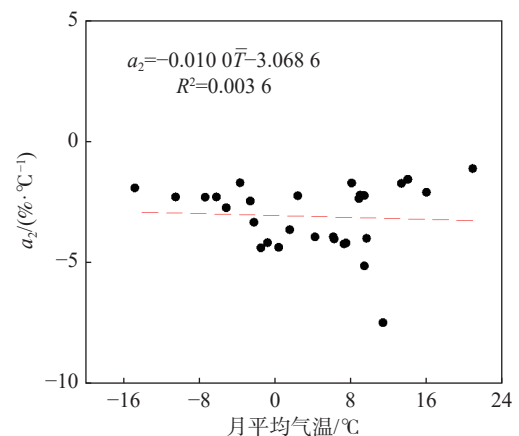
1) 夏季气温变化对我国各地用电量具有较大影响,夏季气温升高,气象电量呈现增加的趋势,其中东部地区及重庆陕西呈现极显著的关系,而西部和北部地区(如新疆、青海、甘肃和黑龙江)则不显著,华东和华北地区均高于 500 GWh/°C,其中广东、江苏、浙江超过 1.3 TWh/°C,广东更是达到了 2.2 TWh/°C。极显著地区相对气象电量趋势系数差异也很大,东北三省平均趋势系数为 1.5%/°C,华中和除福建以外的华东均达到了 5%/°C,广西、重庆和陕西的平均值在 3%/°C 左右。

2) 冬季气温变化与我国各地用电量也具有一定的关系,冬季温度降低时,用电量呈现增加的趋势,气象电量趋势系数以江苏、河北、河南、山东最高,均超-900 GWh/°C。我国大部分区域除南部沿海地区及贵州外都呈现显著的关系,其中东北、华北向西南地区一线达到极显著的关系,它们的相对气象电量趋势系数从-2.0%/°C到-7.5%/°C。值得注意的是,浙江、山东、江苏气象电量趋势系数最大,但相对气象电量趋势系数并不高,同时显著性也较低。

3) 空间相关性表明,夏季气象电量、相对气象电量趋势系数与气温显著正相关,气温每升高 1 °C,气象电量趋势系数、相对气象电量趋势系数均呈显著



(a) 气象电量与气温相关性



(b) 相对气象电量与气温相关性

图 8 我国冬季(12~2月)月气象电量、相对气象电量趋势系数与气温的空间相关性分析

Fig. 8 Spatial correlation analysis of trend coefficients for monthly meteorological electricity consumption and relative meteorological electricity consumption, and temperature during the winter (December to February) in China

增加,即随着温度的增高,气象电量对温度的敏感性越来越强,而冬季气象电量、相对气象电量趋势系数与气温为弱的负相关。

本研究的分析结果揭示了气温变化对社会用电量的影响。确定了气温变化导致用电量增加的具体趋势,尤其在夏季,空调等冷却设备的使用显著增加。此外,冬季在一些寒冷地区,气温的下降同样会导致用电量的增加,尽管这一效应的幅度和普遍性可能不及夏季那么显著。这些发现与先前的研究结果相一致,进一步证实了气温波动对电力需求具有重要影响。

而本研究的创新之处为揭示了我国不同省份之间气温变化对社会用电量影响的巨大差异,并从气

候特征、经济发展水平和居民生活习惯等方面进行了合理的解释。例如,经济更发达、人口密度更高的地区,尤其是那些依赖工业和服务业的省份,在气温变化时用电量增加的幅度更大,是因为这些地区制冷和取暖设备的普及率更高,工业和商业活动对温度的敏感度更强。

4.2 讨论

经济增长与能源消耗之间存在着 1 个相互作用的复杂关系。在经济发展的过程中,能源扮演着基础支撑的角色,因为产业活动、服务业、居民生活等各个方面都需要能源作为驱动力。然而,能源的大规模消耗尤其是化石燃料的燃烧会产生大量温室气体排放,这是导致全球气候变化和气温上升的主要原因之一。

随着气温的上升,气候环境会陷入 1 个自我强化的循环:温度的升高会增加冷却设备如空调的使用,从而导致能源消耗进一步增加。同理,在冬季,尽管更暖和的气候可能会减少传统供暖的需求,但极端天气的频发却可能导致不规则的能源使用波动,例如偶尔的极寒天气将导致突然的供暖需求增加。如果这些能源需求主要由化石能源来满足,那么温室气体的排放将继续推高气温,形成 1 个恶性循环。

在这个过程中,如果不加以有效管理和转向可持续的能源解决方案,我们可能会面临能源供应的不稳定和最终的能源枯竭。这个动态反馈机制突显了发展可再生能源、提升能源效率、创新低碳技术以及制定适应气候变化的政策的重要性,以确保我们的经济增长与环境的健康和可持续性相协调。

尽管本研究对我国各地社会用电量与气温的关系进行了一定程度的分析,但仍存在些不足,数据的年限较短,分析方法也只运用了相对简单的线性关系,对导致气象电量、相对气象电量趋势系数空间差异巨大的各个影响因素分析还比较浅显。

4.3 建议

中国的可持续发展需要在保障能源供应的同时,积极响应节能减排的政策。以下是一些针对能源保供和政府政策的建议:

4.3.1 能源保供策略

1) 优化西电东送和北电南送:加强跨区域输电电网的建设和管理,以确保电力在全国范围内的高效分配。通过直流超高压、高温超导等新技术提升远

距离输电的效率,减少能量在输电过程中的损耗。

2) 优化地区能源系统:在东部能源密集的地区,推广分布式能源系统和微电网技术,利用本地可再生能源,减轻长距离输电压力。利用先进的信息技术和自动化技术,建设智能电网,提高电网的响应能力和灵活性,优化电力调度,提升电网的稳定性和可靠性。

3) 推进能源多元化:鼓励在中东部及沿海地区开发和利用更多的可再生能源资源,减少对西部和北方电力的依赖,实现能源的地区平衡。建设更多的新型能源存储设施,如抽水蓄能、电池存储、液流储能、地下储能等,以平衡供需波动,特别是可再生能源的间歇性输出。

4.3.2 政府政策

1) 支持绿色技术和可再生能源的研发:加大对提高能源效率和新能源技术研发的投入,支持创新企业和科研机构。能源效率方面鼓励研发和采用节能技术,如高效电机、LED 照明和能效标签制度,提高能源使用效率。新能源的研发可通过补贴、税收优惠等激励措施,加速风能、太阳能等可再生能源的开发和利用。

2) 制定和实施严格的节能标准:为建筑、工业和交通等主要领域制定高效能源使用的法规和标准,并强制执行严格的各类能效标准,比如建筑节能方面,室内环境控制(室内温度应保持在适宜范围内,冬季全天温度约为 18℃,夏季约为 26℃)、使用新型节能型建筑材料和将公共建筑普遍执行的 50% 节能标准提高为 65% 甚至 80%。

3) 发展碳交易和市场机制:建立和完善国家碳交易市场,实现碳定价,激励低碳发展。通过市场机制推动减排技术的应用和低碳经济的发展。

4) 增强能源教育和意识:通过教育和公众宣传活动提高公众的节能减排意识,增强公民节能减排的社会责任感,倡导节约型和清洁型的生活方式(公共交通出行,新能源车使用),提高全社会的节能减排意识。

5) 加强国际合作:在能源技术和政策上与其他国家合作,参与全球气候治理,共同实现国际减排目标。

中国可持续发展的能源保供和节能减排策略需要综合考虑技术创新、经济激励、法规标准以及公众参与等多方面因素。通过政府、企业和公众的共同努力,中国才能在确保经济稳定增长的同时,有效

应对气候变化, 走向一个绿色、低碳的未来。

参考文献:

- [1] 周天军, 陈晓龙, 张文霞, 等. 气候变化与碳中和 [J]. *自然杂志*, 2024, 46(1): 1-11. DOI: [10.3969/j.issn.0253-9608.2024.01.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-9608.2024.01.001).
ZHOU T J, CHEN X L, ZHANG W X, et al. Climate change and carbon neutrality [J]. *Chinese journal of nature*, 2024, 46(1): 1-11. DOI: [10.3969/j.issn.0253-9608.2024.01.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-9608.2024.01.001).
- [2] 王洁, 曲晓黎, 尤琦, 等. 夏季日峰降温电力负荷预测灰色模型及其应用 [J]. *气象*, 2024, 50(1): 95-102. DOI: [10.7519/j.issn.1000-0526.2023.050603](https://doi.org/10.7519/j.issn.1000-0526.2023.050603).
WANG J, QU X L, YOU Q, et al. A grey model for power load prediction of summer peak cooling and its application [J]. *Meteorological monthly*, 2024, 50(1): 95-102. DOI: [10.7519/j.issn.1000-0526.2023.050603](https://doi.org/10.7519/j.issn.1000-0526.2023.050603).
- [3] 付桂琴, 尤凤春, 曹欣, 等. 积温效应在电力日峰谷负荷中的应用及检验 [J]. *应用气象学报*, 2015, 26(4): 492-499. DOI: [10.11898/1001-7313.20150411](https://doi.org/10.11898/1001-7313.20150411).
FU G Q, YOU F C, CAO X, et al. Application and verification of accumulated temperature effects on daily peak load and daily valley load of power [J]. *Journal of applied meteorological science*, 2015, 26(4): 492-499. DOI: [10.11898/1001-7313.20150411](https://doi.org/10.11898/1001-7313.20150411).
- [4] 陈正洪, 洪斌. 华中电网四省日用电量与气温关系的评估 [J]. *地理学报*, 2000, 55(增刊1): 34-38. DOI: [10.11821/xb2000S1006](https://doi.org/10.11821/xb2000S1006).
CHEN Z H, HONG B. Relationship between daily energy consumption and temperature in central China [J]. *Acta geographica sinica*, 2000, 55(Sup.1): 34-38. DOI: [10.11821/xb2000S1006](https://doi.org/10.11821/xb2000S1006).
- [5] ZHANG S H, GUO Q X, SMYTH R, et al. Extreme temperatures and residential electricity consumption: evidence from Chinese households [J]. *Energy economics*, 2022, 107: 105890. DOI: [10.1016/j.eneco.2022.105890](https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.105890).
- [6] JOVANOVIĆ S, SAVIĆ S, BOJIĆ M, et al. The impact of the mean daily air temperature change on electricity consumption [J]. *Energy*, 2015, 88: 604-609. DOI: [10.1016/j.energy.2015.06.001](https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.001).
- [7] 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. DOI: [10.7519/j.issn.1000-0526.2020.09.011](https://doi.org/10.7519/j.issn.1000-0526.2020.09.011).
REN Y J, XIONG S Q, HONG G P, et al. Sensitivity analysis of meteorological factors to summer maximum power load [J]. *Meteorological monthly*, 2020, 46(9): 1245-1253. DOI: [10.7519/j.issn.1000-0526.2020.09.011](https://doi.org/10.7519/j.issn.1000-0526.2020.09.011).
- [8] 王治华, 杨晓梅, 李扬, 等. 气温与典型季节电力负荷关系的研究 [J]. *电力自动化设备*, 2002, 22(3): 16-18. DOI: [10.3969/j.issn.1006-6047.2002.03.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-6047.2002.03.005).
WANG Z H, YANG X M, LI Y, et al. Study on relationship between temperature and electrical loads in typical seasons [J]. *Electric power automation equipment*, 2002, 22(3): 16-18. DOI: [10.3969/j.issn.1006-6047.2002.03.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-6047.2002.03.005).
- [9] 刘静, 王丽娟, 成丹, 等. 武汉市电力负荷特征及其与气象因子的关系 [J]. *暴雨灾害*, 2023, 42(2): 232-240. DOI: [10.12406/byzh.2023-022](https://doi.org/10.12406/byzh.2023-022).
LIU J, WANG L J, CHENG D, et al. Characteristics of power load in Wuhan and its relationship with meteorological factors [J]. *Torrential rain and disasters*, 2023, 42(2): 232-240. DOI: [10.12406/byzh.2023-022](https://doi.org/10.12406/byzh.2023-022).
- [10] 廖春花, 罗潇, 谢睿恒, 等. 基于气象因子的长沙市日最大电力负荷预测对比研究 [J]. *自然灾害学报*, 2023, 32(1): 183-190. DOI: [10.13577/j.jnd.2023.0120](https://doi.org/10.13577/j.jnd.2023.0120).
LIAO C H, LUO X, XIE R H, et al. Comparative study on the forecast of the maximum daily electric load in Changsha city based on meteorological factors [J]. *Journal of natural disasters*, 2023, 32(1): 183-190. DOI: [10.13577/j.jnd.2023.0120](https://doi.org/10.13577/j.jnd.2023.0120).
- [11] 李明节, 梁志峰, 许涛, 等. 基于敏感气温空间分布的度夏度冬日最大负荷预测与应用研究 [J]. *电网技术*, 2023, 47(3): 1088-1097. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2022.2144](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.2144).
LI M J, LIANG Z F, XU T, et al. Prediction and application of maximum daily load in summer and winter based on spatial distribution of sensitive temperatures [J]. *Power system technology*, 2023, 47(3): 1088-1097. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2022.2144](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.2144).
- [12] 高红均, 郭明浩, 刘俊勇, 等. 从四川高温干旱限电事件看新型电力系统保供挑战与应对展望 [J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(12): 4517-4537. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.222971](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.222971).
GAO H J, GUO M H, LIU J Y, et al. Power supply challenges and prospects in new power system from Sichuan electricity curtailment events caused by high-temperature drought weather [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(12): 4517-4537. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.222971](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.222971).
- [13] 肖声玲. 计及高温天气的短期负荷预测及优化调度策略研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2021. DOI: [10.27139/d.cnki.ghbdu.2021.000527](https://doi.org/10.27139/d.cnki.ghbdu.2021.000527).
XIAO S L. Research on optimal dispatching strategy of power system considering high-temperature weather [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2021. DOI: [10.27139/d.cnki.ghbdu.2021.000527](https://doi.org/10.27139/d.cnki.ghbdu.2021.000527).
- [14] 郭崇兰. 杭州市极端气象因子与工业电力消费关联研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.
GUO C L. On the incidence relation between the extreme meteorological factors and industrial power consumption in Hangzhou city [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2014.
- [15] 陈圣劫, 田心如, 姚阮, 等. 基于气象因子的南京市冬季和夏季用电量预测研究 [J]. *气象与环境学报*, 2022, 38(4): 127-135. DOI: [10.3969/j.issn.1673-503X.2022.04.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-503X.2022.04.015).
CHEN S J, TIAN X R, YAO R, et al. Forecast of electricity consumption in Nanjing based on meteorological factors in

- winter and summer [J]. *Journal of meteorology and environment*, 2022, 38(4): 127-135. DOI: [10.3969/j.issn.1673-503X.2022.04.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-503X.2022.04.015).
- [16] PARDO A, MENEU V, VALOR E. Temperature and seasonality influences on Spanish electricity load [J]. *Energy economics*, 2002, 24(1): 55-70. DOI: [10.1016/s0140-9883\(01\)00082-2](https://doi.org/10.1016/s0140-9883(01)00082-2).
- [17] 魏朋邦. 电力部门应对气候变化机制与策略研究 [D]. 天津: 天津大学, 2021. DOI: [10.27356/d.cnki.gtjdu.2021.000508](https://doi.org/10.27356/d.cnki.gtjdu.2021.000508).
WEI P B. Research on mechanisms and strategies of electricity sector to deal with climate change [D]. Tianjin: Tianjin University, 2021. DOI: [10.27356/d.cnki.gtjdu.2021.000508](https://doi.org/10.27356/d.cnki.gtjdu.2021.000508).
- [18] 段凯旋. 气候变化对我国城市居民电力消费的影响及其国际比较 [D]. 长沙: 湖南大学, 2020. DOI: [10.27135/d.cnki.ghudu.2020.004528](https://doi.org/10.27135/d.cnki.ghudu.2020.004528).
DUAN K X. Impact of climate change on electricity consumption of urban residents in China and its international Comparison [D]. Changsha: Hunan University, 2020. DOI: [10.27135/d.cnki.ghudu.2020.004528](https://doi.org/10.27135/d.cnki.ghudu.2020.004528).
- [19] 王丽娟, 任永建, 王俊超, 等. 基于气象因素的长江经济带湖北段夏季日最大电力负荷预测 [J]. *南方能源建设*, 2024, 11(1): 133-142. DOI: [10.16516/j.ceec.2024.1.14](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024.1.14).
WANG L J, REN Y J, WANG J C, et al. Prediction of summer daily maximum power load in the Hubei section of the Yangtze River economic belt based on meteorological factors [J]. *Southern energy construction*, 2024, 11(1): 133-142. DOI: [10.16516/j.ceec.2024.1.14](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024.1.14).
- [20] WENZ L, LEVERMANN A, AUFFHAMMER M. North-south polarization of European electricity consumption under future warming [J]. *Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America*, 2017, 114(38): E7910-E7918. DOI: [10.1073/pnas.1704339114](https://doi.org/10.1073/pnas.1704339114).
- [21] LI Y T, PIZER W A, WU L B. Climate change and residential electricity consumption in the Yangtze River Delta, China [J]. *Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America*, 2019, 116(2): 472-477. DOI: [10.1073/pnas.1804667115](https://doi.org/10.1073/pnas.1804667115).
- [22] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 用电需求气象条件等级: GB/T 40242—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Meteorological grades for power consuming: GB/T 40242—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [23] 阎访, 陈静, 车少静. 石家庄夏季用电量对天气的响应及其预测模型 [J]. *干旱气象*, 2009, 27(3): 282-287. DOI: [10.3969/j.issn.1006-7639.2009.03.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-7639.2009.03.014).
YAN F, CHEN J, CHE S J. Response of electric power load to weather in summer of Shijiazhuang and its prediction model [J]. *Journal of arid meteorology*, 2009, 27(3): 282-287. DOI: [10.3969/j.issn.1006-7639.2009.03.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-7639.2009.03.014).
- [24] 郭崇兰, 徐晓霞, 巩在武. 杭州市气象因子与气象电量的灰色关联分析 [C]//中国高等科学技术中心. 第25届全国灰色系统会议论文集, 北京, 2014-04-22. 北京: 中国高等科学技术中心, 2014: 8.
GUO C L, XU X X, GONG Z W. Correlation analysis on meteorological factors and industrial meteorological electricity consumption of Hangzhou city [C]//China Center of Advanced Science and Technology. Proceedings of the 25th National Grey System Conference, Beijing, April 22, 2014. Beijing: China Center of Advanced Science and Technology, 2014: 8.
- [25] 李湘阁, 胡凝. 实用气象统计方法 [M]. 北京: 气象出版社, 2015.
LI X G, HU N. Practical meteorological statistical methods [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2015.

作者简介:



许畅

许畅(第一作者)

1999-, 男, 本科在读(e-mail) yuai8699@163.com。



陈正洪

陈正洪(通信作者)

1964-, 男, 正研级高级工程师, 硕士, 主要从事应用气象、气候变化及防灾减灾研究工作(e-mail) chenzh64@qq.com。

刘军

1989-, 男, 工程师, 硕士, 主要从事应用气象研究工作(e-mail) 5108881@qq.com。

(责任编辑 孙舒)