

气候变化提高了居民电力消费

——基于适应性行为的视角

李捷瑜 何坤*

摘要：本文使用 2011—2020 年 244 个城市的面板数据，构造温度偏离度指标，从空调适应性行为视角评估了气候变化对居民电力消费的影响。研究发现，温度上偏将推高居民电力消费，居民购买和使用空调对此贡献约 58.7%—78.7%。异质性分析表明，极端温度、相对湿度和收入水平均会强化居民电力消费、空调购买对温度上偏的响应，令空调能耗降低的技术进步只能在一定程度上减缓空调使用时长对居民电力消费的正向影响。

关键词：气候变化；能源消费；适应性行为

DOI：10.13821/j.cnki.ceq.2024.03.12

一、引言

全球变暖的威胁是当今人类面临的最紧迫的问题之一。在此背景下，制冷消费是当前居民产生的一种最为重要的适应性行为。增加的制冷需求将导致居民对冷却家电的两种调整行为：集约边际调整（intensive margin adjustment）和广延边际调整（extensive margin adjustment）。前者是指家庭对已安装冷却家电的使用频率调整，后者是家庭对拟购买冷却家电的数量调整（Auffhammer and Mansur, 2014; Davis and Gertler, 2015）。作为冷却家电的典型代表——空调，在过去十年中，其全球销量呈爆炸式增长，尤其是在以中国为代表的发展中国家。从 1995 年到 2019 年，中国的空调销量增长了约 42 倍，达到 2.14 亿台。伴随着更频繁的高温事件和不断提高的生活水平，空调扩散率预计将进一步提高。

空调为生活在热带和亚热带地区的 30 多亿人带来清凉以适应高温的同时，其“冷却”用电需求的不断增长也给许多国家的电力系统带来了巨大的压力。IEA（2018）的报告表明，空调和电风扇的用电需求约占世界各地建筑物总用电量的 20%。在中国，电能终端能源消费中的占比持续走高，在全社会用电量分类中，居民生活用电也是连年攀升^①。另外，中国电力企业联合会（以下简称“中电联”）指出，2021 年中国的电力

* 李捷瑜、何坤，中山大学岭南学院。通信作者及地址：何坤，广东省广州市海珠区新港西路 135 号中山大学岭南学院，510275；电话：(020) 84110657；E-mail: hekun9@mail2.sysu.edu.cn。本文得到教育部人文社会科学项目“适应气候变化领域的中国科技创新战略研究”项目（21YJA790030）、国家社科基金重大项目（21ZDA036）的资助。感谢两位匿名审稿人、主编和周先波教授提出的宝贵意见和建议，文责自负。

① 附录 I 中的图 A1、图 A2 和图 A3 依次给出了中国空调销售量、中国电能终端能源消费中的比重以及中国全社会用电量中的居民生活用电情况。限于篇幅，附录未在正文列示，感兴趣的读者可在《经济学》（季刊）官网（<https://ceq.ccer.pku.edu.cn>）下载。

供需形势总体偏紧，迎峰度夏期间（6—8月），广东等12个省级电网在部分用电高峰时段电力供应紧张，负荷夏季高峰特征逐步呈现常态化。^①

由于全球电力生产仍然依赖化石燃料，空调的增长也意味着二氧化碳排放量增加数十亿吨（Davis and Gertler, 2015）。2022年世界气象组织的综合数据显示，最暖的7个年份都出现在2015年之后，且由于大气中的吸热温室气体达到了创纪录水平，通过降低能源消耗和减少碳排放减缓气候变暖迫在眉睫。为此，中国提出了碳达峰、碳中和的目标。^②然而，面对适应性行为对电力系统造成的压力，过度追求气候变化缓解将进一步加剧电力供给紧张。中电联指出，受到部分地区限制煤炭生产、加强“能耗双控”等因素影响，2021年9—10月共有超过20个省级电网采取了有序用电措施，个别地区少数时段出现拉闸限电。^③

综上，适应气候变化与缓解气候变化^④是应对气候变化挑战的两个有机组成部分^⑤，处理不好两者的关系将产生电力领域的供求矛盾：气候变暖下的空调调整的适应性行为将刺激电力需求，而追求“双碳”目标下应对减缓性气候问题的方案将抑制电力供应。如何兼顾、协调两者的关系，首要任务是深入研究适应性行为引发的居民电力消费规律。只有厘清这一规律，发电规模和输电设施的投资才能更好地匹配“冷却”用电需求；制冷技术发展策略以及其他非耗能适应方案才能更好地合理布局，寻求适应与缓解的平衡点。对此，本文详细剖析居民电力消费增长的空调机制，主要贡献概括为以下三点：

第一，通过数学推导对空调途径的影响进行分解，使用中介效应和调节效应模型，具体估计了空调的广延边际调整途径和集约边际调整途径对居民电力消费的影响程度。结果表明，在温度上偏度对全体居民电力消费的影响中，空调途径的贡献约是56.9%—85.8%；温度上偏度每提升1℃，空调通过广延边际调整对全体居民电力消费的影响为12.4千瓦时/人，空调通过集约边际调整对全体居民电力消费的影响是80.1千瓦时/人。分南北地区看，广延边际调整途径在北方城市占主导地位；集约边际调整途径在南方城市发挥更大作用。

第二，引入了气候、空调能效标准和收入水平等方面的异质性讨论，更周全地分析居民电力消费和空调购买决策对温度的响应规律。在气候异质性方面，极端温度对居民电力消费具有更大的边际影响，且极端高温比极端低温的影响更大，在空调购买决策中同样存在该异质性；同时，相对湿度的提高会强化人体的热不适性，导致居民电力消费、空调购买对温度上偏度的响应更强。空调能效的年份异质性讨论表明，目前空调能耗程度的技术进步并未能很好地抵消空调使用时长增长对居民电力消费的正向影响，迫切需要节能技术的新突破及其推广应用的新思路；对于收入水平，温度下偏度的收入异

① 2022年1月27日中电联发布《2021—2022年度全国电力供需形势分析预测报告》中提及。

② 2020年9月22日，习近平主席在第七十五届联合国大会上发表重要讲话，承诺中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。

③ 同注①。

④ 缓解气候变化是指通过节能减排、改善能源结构等手段减缓气候变暖的进程；适应气候变化则是在气候变暖趋势难以改变的现状下，采取有计划、系统、前瞻性的政策和行动提升社会生产和生活的适应性（郑艳等，2016），减少实体脆弱性，提高实体韧性。

⑤ 2008年国务院发布《国务院关于印发中国应对气候变化国家方案的通知》中提及。

质性响应缺乏证据支持,但收入将较大程度制约居民制冷服务的换取,进而强化居民电力消费、空调购买对温度上偏度的响应,这深化了“能源贫困”^①议题的重要性。

第三,构建了2011—2020年244个中国市级地区的独特数据集作为研究的有力支撑。据笔者所知,它是目前反映空调数量与居民电力消费最细分级别的统计指标,其统计口径能捕捉不同城市居民应对气候变化时在电力消费领域的适应性行为,有助于更准确地估计气候变化对居民电力消费和空调购买的影响。

本文的其余部分安排如下:第二部分概述文献并提出研究假说,第三部分介绍数据处理、指标构建与计量模型,第四部分是实证结果分析与稳健性检验,第五部分是异质性讨论,第六部分提出主要政策建议与未来展望。

二、文献综述与研究假说

(一) 气候变化与居民电力消费

越来越多的文献表明全球变暖对于居民电力消费具有重要影响(Pourazarm and Cooray, 2013; Auffhammer and Mansur, 2014)。早期研究表明居民电力消费与温度存在U形关系(Gupta, 2012),即存在一个温度阈值点,当温度超过或低于该点时,居民电力消费均会增加。这是因为炎热天气或寒冷天气都会刺激居民使用温度调节设备,从而增加家庭电力消费(Auffhammer and Mansur, 2014)。近期研究发现,居民电力消费对温度的响应可能存在温度“舒适区”而非阈值点,在舒适区内不需要加热或冷却来调节室内温度。这意味着电力消费与温度的关系应该考虑舒适区的存在,即允许居民电力消费对温度变化没有反应的温度间隔(Li et al., 2018; Fikru and Gautier, 2015; Du et al., 2020; 刘明辉等, 2022)。据此,本文构建考虑了舒适区的温度偏离度指标,并提出:

假说1 温度偏离度越大,居民舒适需求^②越大,居民电力消费越高。

在假说1的论证过程中,深入揭示温度对居民电力消费影响的异质性规律非常有必要,因为异质性比较是居民气候适应行为研究的重要研究方向(滕美萱等, 2022)。区域异质性方面, Li et al. (2018)发现居民电力消费对温度的响应在中国不同的气候区中存在差异,但省级层面数据的使用可能会低估气候敏感性。在收入异质性方面, Du et al. (2020)通过半参面板模型的估计,发现收入的异质性影响是非线性的,然而,其用电量指标为全社会用电量的绝对量,由于气候变化直接影响的城乡居民用电量仅构成其中的约15%(附录I的图A3),这将错误估计居民用电的气候敏感性。在气候异质性方面,极端温度相关的讨论较多,其他气象要素受到的关注较少。Cian and Wing (2019)基于国家层面数据,发现能源需求对温度的长期弹性往往大于短期弹性,尤其是在高温水平上。刘明辉等(2022)检验了不同温度区间对居民电力消费的影响,发现家庭会在极端温度下加大用电量,但他们在划分温度区间时没有考虑温度舒适区的因素。与上述

^① “能源贫困”的概念与负担能力问题有关(Randazzo et al., 2020)。能源贫困不仅仅是发展中国家的问题(Pachauri et al., 2004; Pourazarm and Cooray, 2013),即使在发达国家,很大一部分人口也无法充分支付能源服务费用(IEA, 2018)。

^② “温度偏离度”的定义在第三部分给出。本文将由温度偏离导致的制冷需求和采暖需求统称为“舒适需求”。

文献相比，本文除了分析温度偏离度对居民用电量的平均效应，还将利用更微观的地级市层面数据，进一步考虑区域、极端温度、相对湿度和收入等因素的异质性影响。

（二）气候变暖的适应性行为：空调调整

空调是当前人们应对气候变暖的重要工具，为了更好地从购买和使用两个途径了解温度对空调调整的影响，一些研究提出了空调的集约边际调整和广延边际调整的概念。在集约边际调整方面，学者普遍发现，温度对空调使用具有短期影响（Auffhammer and Aroonruengsawat, 2012; Fikru and Gautier, 2015）。在广延边际调整方面，Davis and Gertler (2015) 发现，凉爽地区的空调扩散度接近于零，温暖地区的空调拥有量随收入的增加而增加。在上述研究的启发下，本文结合中国空调工业品销量和居民生活用电量增长趋势的一致性（附录I的图A1和图A3），提出温度影响居民电力消费的中国空调调整规律：

假说2 温度上偏度对居民电力消费的影响部分通过广延边际调整途径实现，如购买更多的空调。

假说3 温度上偏度对居民电力消费的影响部分通过集约边际调整途径实现，如更频繁、更高强度地使用空调。

本文提出了运用中介效应模型和调节效应模型估计两种途径对应影响的方法，为验证假说2和假说3提供了可行思路。目前，适应气候变化是现阶段降低气候损失和脆弱性的重要战略，也是当前应对气候变化研究的相对薄弱环节（滕美萱等，2022），仅有少部分研究尝试阐明气候变化是如何通过居民的空调调整影响居民电力消费的，且很少通过计量模型对冷却家电的两种调整途径各自的影响进行明确区分。Randazzo et al. (2020) 利用跨国和跨家庭的横截面数据识别温度、空调和居民电力消费之间的因果关系，发现家庭为了应对过热天气而购买和使用空调的适应性行为会显著增加用电量。然而，他们的研究没有区分广延边际途径和集约边际途径，也没有识别极端温度的效应。Li et al. (2018) 通过数学推导将空调途径对居民电力消费的影响分解为广延边际调整途径和集约边际调整途径，但他们的模型隐含了一个强的约束，即居民电力消费对温度变化的响应全部来自空调的集约和广延边际调整，此外，中国省级数据的使用也会导致同一省份内城市间的差异被忽略。与此不同，本文使用市级数据，通过中介效应和调节效应模型依次分离出空调引起的广延边际调整效应和集约边际调整效应，从而能更加深入地描述气候变暖下空调调整这一适应性行为对居民电力消费的具体影响。

三、研究设计

（一）模型构建

1. 温度偏离度与居民电力消费的模型构建

为了衡量居民家庭的舒适需求，本文在沿用温度舒适区基本假设的基础上，借鉴 Li et al. (2018) 的方法分别构建温度上偏离度 (CDD^{thr_c}) 和温度下偏离度 (HDD^{thr_h}) 指标，前者是一段时间内日平均温度高于舒适区上界阈值累计度数的平均值，刻画了居民的制冷需求，后者是一段时间内日平均温度低于舒适区下界阈值累计度数的平均值，

刻画了居民的采暖需求。其计算公式如下:

$$\begin{cases} CDD_{it}^{thr_c} = \frac{\sum_{j=1}^d \max(tmpt_{ij} - thr_c, 0)}{d} \\ HDD_{it}^{thr_H} = \frac{\sum_{j=1}^d \max(thr_H - tmpt_{ij}, 0)}{d} \end{cases}, d = \begin{cases} 365 & \text{if } t \in \text{平年} \\ 366 & \text{if } t \in \text{闰年} \end{cases}$$

其中, $tmpt_{ij}$ 为第 i 个城市第 t 年第 j 天的日平均温度, $CDD_{it}^{thr_c}$ 和 $HDD_{it}^{thr_H}$ 分别为温度上偏度和温度下偏度, thr_c 和 thr_H 分别为舒适区上界阈值和舒适区下界阈值。本文后续将以 $[14^\circ\text{C}, 25^\circ\text{C}]$ 作为主检验的温度舒适区^①, 并另设 $[18^\circ\text{C}, 24^\circ\text{C}]$ 和 $[13^\circ\text{C}, 26^\circ\text{C}]$ 两组温度舒适区作为稳健研究。

为了检验温度依赖的舒适需求和居民电力消费的关系, 本文建立以下面板模型:

$$ele_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 CDD_{it}^{thr_c} + \alpha_2 HDD_{it}^{thr_H} + \alpha_3 Cli_{it} + \alpha_4 SE_{it} + city_i + year_t + \epsilon_{it}, \quad (1)$$

其中, i 和 t 分别代表城市和年份; ele_{it} 是人均居民电力消费水平; Cli_{it} 代表其他气候的控制变量组, 包括降雨量 (rai_{it})、夏季相对湿度 (rhu_{it}^{sum})、冬季相对湿度 (rhu_{it}^{win})、昼夜温差 (dif_{it})、风速 (wnd_{it})、日照 (sun_{it})。 SE_{it} 是衡量社会经济发展的控制变量组, 包括经过对数处理的人均可支配收入 ($\ln(ADPI_{it}^{de})$) 和城镇化率 ($UrbanRate_{it}$); $city_i$ 和 $year_t$ 分别为城市固定效应和年份固定效应, ϵ_{it} 为扰动项。系数 α_1 和 α_2 为重点关注的系数, 反映了温度偏离度对居民电力消费的影响。

2. 空调广延调整途径与集约调整途径的模型构建

为了检验温度上偏度影响居民电力消费的空调广延调整途径 (温度上偏度 \rightarrow 空调购买 \rightarrow 电力消费), 本文以居民平均每百户空调拥有量 (AC) 衡量其空调购买需求, 建立以下面板模型:

$$AC_{it} = \gamma_0 + \gamma_1 CDD_{it}^{thr_c} + \gamma_2 Cli_{it} + \gamma_3 SE_{it} + city_i + year_t + \epsilon_{it}, \quad (2)$$

$$ele_{it} = \delta_0 + \delta_1 CDD_{it}^{thr_c} + \delta_2 AC_{it} + \delta_3 HDD_{it}^{thr_H} + \delta_4 Cli_{it} + \delta_5 SE_{it} + city_i + year_t + \epsilon_{it}, \quad (3)$$

其中, 模型 (2) 未引入温度下偏度 ($HDD_{it}^{thr_H}$), 原因在于作为制冷设备, 空调的效用取决于炎热天气, 与采暖需求不相关。例如, 在北欧, 尽管大多数家庭负担得起空调, 但空调使用率仍然很低 (McNeil and Letschert, 2010)^②。模型 (2) 和模型 (3) 中的 γ_1 和 δ_2 为重点关注的系数, γ_1 刻画了温度上偏度作用于空调购买的效应, δ_2 刻画了空调购买作用于居民电力消费的效应, 因此 $\gamma_1 \times \delta_2$ 刻画了空调中介效应的大小。

温度上偏度影响居民电力消费的空调集约调整途径 (温度上偏度 \rightarrow 空调使用 \rightarrow 居民电力消费) 可通过空调的调节效应反映, 本文将空调 (AC) 及其与温度上偏度 ($CDD_{it}^{thr_c}$) 的交互项引入模型 (1), 得到以下面板模型:

^① Li et al. (2019) 发现, 当温度范围为 $13^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}$ 时上海家庭住宅用电量对温度的响应曲线相当平坦; 同时舒适度指数中湿度对体感温度影响的最小温度为 14.4°C (朱寿燕等, 2020)。为避免湿度对体感温度的过度干扰, 以及过大设置舒适区导致电力消费响应温度的有效信息过多丢失, 本文分别设定 14°C 和 25°C 为主检验舒适区下界阈值和上界阈值。

^② 在实证中加入温度下偏度, 没有对空调购买响应温度上偏度的系数产生干扰, 结论没有受到影响。

$$ele_{it} = \xi_0 + \xi_1 CDD_{it}^{hr,c} + \xi_2 AC_{it} + \xi_3 CDD_{it}^{hr,c} \times AC_{it} + \xi_4 HDD_{it}^{hr,H} + \xi_5 Cli_{it} + \xi_6 SE_{it} + city_i + year_t + \epsilon_{it}, \quad (4)$$

其中， ξ_3 为模型(4)重点关注的系数，表示每百户居民家庭每台空调的增加对人均居民电力消费响应边际温度变化的程度的影响。

下面本文对居民电力消费进行分解推导，论证空调的中介效应和调节效应的检验模型能够恰当地刻画空调的广延边际调整途径和集约边际调整途径。空调引致的居民电力消费可表达为： $E = AC \times \frac{E}{AC}$ ，其变化量可分解为： $\Delta E = AC \times \Delta\left(\frac{E}{AC}\right) + \Delta AC \times \left(\frac{E}{AC}\right)$ ，其中，第一项衡量的是给定当前空调数量时居民电力消费对于空调使用的响应，第二项衡量的是给定当前居民对单位空调的使用程度时居民电力消费对于空调购买的响应。

在模型(2)中，温度上偏度每提升 1°C ，将使得空调增加 γ_1 台，给定当前居民对单位空调的使用程度时（即 $\Delta\left(\frac{E}{AC}\right) = 0$ ），居民电力消费将会提升 $\gamma_1 \times \left(\frac{E}{AC}\right)$ ，其中， ΔAC 由系数 γ_1 进行刻画，而 $\left(\frac{E}{AC}\right)$ 为定值，由系数 δ_2 进行刻画，故 $\gamma_1 \times \delta_2$ 能够较好地刻画空调广延边际调整对居民电力消费的影响。在中介效应检验过程中，第三步回归方程对温度上偏度系数 δ_1 的估计，相当于吸收了除空调广延途径外的其余途径对居民电力消费的影响，将空调广延途径的影响单独剥离了出来，进一步地，可将空调广延途径的影响在温度上偏度对居民电力消费总影响的占比表示为 $\left(\frac{\gamma_1 \times \delta_2}{\delta_1 + \gamma_1 \times \delta_2}\right)$ 。在模型(4)中，温度上偏度每提升 1°C ，给定当前空调数量时（即 $\Delta AC = 0$ ），将使得居民电力消费增加 $\xi_1 + \xi_3 AC$ 千瓦时/人，其中， $\Delta\left(\frac{E}{AC}\right)$ 由系数 ξ_3 进行刻画，而 AC 为定值，故 $\xi_3 \times AC$ 能够较好地刻画空调集约边际调整对居民电力消费的影响。在调节效应回归方程中对于温度上偏度系数 ξ_1 的估计，相当于吸收了除空调集约途径外的其余途径对居民电力消费的影响，将空调集约途径的影响单独剥离了出来，进一步地，可将空调集约途径的影响在温度上偏度对居民电力消费总影响的占比表示为 $\left(\frac{\xi_3 \times AC}{\xi_1 + \xi_3 \times AC}\right)$ 。综上，空调途径的影响在温度上偏度对居民电力消费总影响的占比表示为 $\left(\frac{\gamma_1 \times \delta_2}{\delta_1 + \gamma_1 \times \delta_2}\right) + \left(\frac{\xi_3 \times AC}{\xi_1 + \xi_3 \times AC}\right)$ 。

(二) 样本、数据与统计描述

本文采用244个中国地级市行政单位作为研究对象，在证伪检验时使用31个省级行政单位（不含台湾省、香港特别行政区、澳门特别行政区）作为补充。验证假说1的样本范围是2011—2020年，验证假说2和假说3的样本范围是2014—2020年。后者从2014年开始是因为国家统计局实施的一体化改革导致改革前后耐用消费品数据不具有可比性，2014年是绝大部分地级市彻底完成该项改革的年份。

气候指标包括温度、降雨量、相对湿度、风速、日照，均来源于国家气象信息中心的中国地面气候资料日值数据集(V3.0)。居民平均每百户空调拥有量、城乡居民生活

用电量、常住人口、城镇化率和居民人均可支配收入的统计范围为全市的年度数据,均来自中国各省份、地级市的统计年鉴和统计公报。其中,常住人口、城镇化率、全体居民耐用消费品拥有量与全体居民人均可支配收入在样本期间的缺失值均通过一定的规则进行适当的补充。^①省级水电燃料类居民消费价格指数和家用器具类居民消费价格指数来自CSMAR数据库,这些价格指数用于对居民全体人均可支配收入平减至2010年不变价,分别用 $ADPI^{ete}$ 、 $ADPI^{AC}$ 表示,并将其对数形式分别作为居民电力消费、空调拥有量回归方程中的控制变量。最后,部分地级市城乡居民生活用电量和每百户空调拥有量的数据因不予公开仍有缺失,在剔除观测值少于两年的地区后,本文得到一个非平衡面板数据集,主要变量的描述性统计如表1所示。

表1 变量的描述性统计结果

变量	变量描述	单位	样本量	均值	标准差	最小值	最大值
<i>ele</i>	人均城乡居民生活用电量	千瓦时/人	1 454	602.48	220.53	122.79	1 391.14
<i>tmpt</i>	年平均温度	℃	1 781	14.55	4.90	-1.28	25.66
<i>AC</i>	居民平均每百户空调拥有量	台/百户	1 367	93.11	68.54	0.10	287.10
<i>CDD</i> ²⁵	阈值为25℃的温度上偏度	℃	1 781	0.48	0.42	0	1.97
<i>HDD</i> ¹⁴	阈值为14℃的温度下偏度	℃	1 781	4.19	3.11	0	16.60
<i>ADPI</i> ^{AC}	居民人均可支配收入	万元/人	1 650	2.50	1.00	0.66	8.47
<i>ADPI</i> ^{ete}	居民人均可支配收入	万元/人	1 650	2.33	0.93	0.64	6.29
<i>UrbanRate</i>	城镇化率	%	1 781	58.88	14.87	16.58	95.37
<i>rai</i>	年平均降雨量(日均值)	毫米/天	1 781	2.87	1.48	0.20	7.54
<i>rhu</i> ^{sum}	夏季平均相对湿度	%	1 781	74.48	8.54	38.81	87.83
<i>rhu</i> ^{win}	冬季平均相对湿度	%	1 781	66.55	11.68	25.47	87.97
<i>dif</i>	年平均昼夜温差	℃	1 781	9.17	2.11	2.61	15.47
<i>wnd</i>	年平均风速	米/秒	1 781	2.17	0.47	0.98	4.09
<i>sun</i>	年平均日照时数(日均值)	小时/天	1 781	5.48	1.41	2.06	9.20

注:夏季包括6、7、8月,冬季包括12、1、2月。

四、结果与分析

(一) 温度偏离度与居民电力消费

1. 居民电力消费的基准分析

表2显示了居民电力消费如何响应温度偏离度的变化,其中,前三列仅对其他气候变量组(*Cli*)进行了控制,后三列额外引入了社会经济发展变量组(*SE*)。温度上偏度

^① 本文利用各地级市第六次和第七次人口普查结果中的全市常住人口数计算10年复合增长率,以此推断2011—2019年中常住人口的缺失值;利用两次人口普查的城镇常住人口数计算2010年和2020年的城镇化率,通过直线平均的方法估计2011—2019年的城镇化率缺失值。针对只有城镇和农村范围数据但缺失全体居民数据的情况,全体居民耐用消费品拥有量与全体居民人均可支配收入的缺失值,本文按下述计算方法进行推断:全体范围=城镇范围×*UrbanRate*+农村范围×(1-*UrbanRate*)。

(CDD^{thr_C}) 在不同温度舒适区、不同控制条件下均显著为正。以引入所有控制变量的 [14℃, 25℃] 舒适区为例, 温度上偏度每提升 1℃, 人均居民电力消费约增加 173.5 千瓦时。然而, 温度下偏度 (HDD^{thr_H}) 估计系数不显著, 本文后续将从温度偏离度估计系数的地域异质性做出合理解释。

在其他气候变量方面, 夏季相对湿度和冬季相对湿度的边际效应为正, 其中冬季相对湿度具有 1% 的显著性水平, 这可能与极端温度下相对湿度对热不适性的放大有关 (朱寿燕等, 2020)。降雨量和风速与居民电力消费有负向关系, 一方面受到降雨与空气流速的降温作用的影响, 另一方面也可能与极端暴雨和飓风对电力系统的破坏作用密切相关 (吴勇军等, 2016)。昼夜温差的扩大将会带来更大的温度偏离度, 刺激居民的舒适需求从而使其估计系数为正。尽管日照与居民电力消费显著负相关, 但其中可能包含复杂的生理学与气象学机理^①。另外, 在社会经济发展指标方面, 人均可支配收入对居民电力消费的影响显著为正, 其每增加 1% 将刺激约 0.8 千瓦时的人均居民电力消费。

表 2 基准回归：温度偏离度对居民电力消费的影响

	<i>ele</i>					
	[18℃, 24℃]	[14℃, 25℃]	[13℃, 26℃]	[18℃, 24℃]	[14℃, 25℃]	[13℃, 26℃]
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
CDD^{thr_C}	156.856*** (17.180)	174.286*** (18.107)	193.882*** (19.308)	156.899*** (15.371)	173.546*** (16.299)	191.916*** (17.957)
HDD^{thr_H}	-13.674 (14.775)	-11.254 (17.024)	-9.154 (17.751)	-7.242 (17.294)	-3.327 (18.721)	-1.811 (19.252)
$\ln(ADPI^{ele})$				75.145*** (27.518)	75.649*** (27.732)	74.188*** (28.000)
$UrbanRate$				3.065 (2.628)	3.209 (2.559)	3.332 (2.561)
rhu^{sum}	1.655* (0.917)	1.627* (0.903)	1.415 (0.883)	1.118 (0.810)	1.005 (0.816)	0.726 (0.807)
rhu^{win}	2.005*** (0.510)	1.960*** (0.516)	2.010*** (0.512)	1.802*** (0.660)	1.771*** (0.673)	1.826*** (0.676)
rai	-5.622* (2.902)	-5.816* (2.963)	-5.931** (2.974)	-6.179** (2.850)	-6.098** (3.000)	-5.990* (3.039)
wnd	-16.732 (22.253)	-18.800 (22.090)	-19.791 (22.089)	-22.537 (20.812)	-23.854 (20.726)	-24.536 (20.767)

^① 美国著名生物气象学家 R. G. 斯蒂德曼 (R. G. Steadman) 提出的以人体热量平衡为基础的体感温度模型表明, 日照仅在无遮蔽的条件下影响体感温度, 且其影响方向由直接辐射和散射辐射共同决定, 不存在唯一的影响方向。

(续表)

	<i>ele</i>					
	[18°C, 24°C]	[14°C, 25°C]	[13°C, 26°C]	[18°C, 24°C]	[14°C, 25°C]	[13°C, 26°C]
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
<i>sun</i>	-13.499** (6.468)	-13.634** (6.546)	-13.162** (6.614)	-14.185** (6.517)	-14.194** (6.580)	-13.687** (6.642)
<i>dif</i>	1.645 (2.228)	1.594 (2.228)	1.683 (2.226)	1.193 (2.318)	1.138 (2.318)	1.239 (2.320)
Control	<i>Cli</i>	<i>Cli</i>	<i>Cli</i>	<i>Cli</i> & <i>SE</i>	<i>Cli</i> & <i>SE</i>	<i>Cli</i> & <i>SE</i>
Adj. <i>W/I R</i> ²	0.113	0.111	0.107	0.135	0.134	0.130
Obs	1 451	1 451	1 451	1 319	1 319	1 319

注：*、**和***分别表示系数在10%、5%和1%的置信水平上显著；表中所有回归已控制年份固定效应与城市固定效应，括号内为聚类到城市层面的稳健标准误；Adj. *W/I R*²为调整的组内拟合优度，这一指标已剔除了时间固定效应和地区固定效应的解释能力，以下各表同。

2. 居民电力消费的南北差异

在中国，南方和北方存在诸多地域差异。首先是气候差异，如南方有更高的平均温度、更长的炎热暴露时间和更高的平均相对湿度。其次，空气调节设备差异，北方冬季集中供暖、南方空调扩散度更高；最后，居民天气适应差异，如北方居民更不耐热(Albouy et al., 2016; Li et al., 2018)。这些差异很可能导致居民电力消费对温度偏离度的响应呈现出地区异质性。为了更好地验证假说1，特别是寻求表2中温度下偏度不显著的原因，本文定义了一个地理位置虚拟变量(*Loc*) (取值为1时表示南方，取值为0时表示北方)^①，将其与温度上偏度(CDD^{thr_c})和温度下偏度(HDD^{thr_H})的交互项引入模型(1)。

表3显示，温度偏离度的效应确实存在南北异质性。以列(5)为例， $HDD^{thr_H} \times Loc$ 显著为负， HDD^{thr_H} 显著为正，表明在温度下偏度对居民电力消费的正向影响上北方显著高于南方，在北方温度下偏度每提升1°C，人均居民电力消费将显著增加42.155千瓦时；在南方，温度下偏度的影响是 HDD^{thr_H} 与 $HDD^{thr_H} \times Loc$ 的系数之和，经检验不显著。这一结果与“北方地区冬季大规模集中采暖”的现实相符，即相同温度下偏的条件下，北方更高的采暖需求促进了居民电力消费的提高。^②对于温度上偏度(CDD^{thr_c})来说，其对居民电力消费的影响均显著为正，但不存在显著的南北差异，该结果说明南方和北方家庭在生活上对炎热天气都不耐受，均具有强的应对炎热的电力需求。从数值上看，随着舒适区上界阈值的增大， $CDD^{thr_c} \times Loc$ 的估计系数逐渐变小，即温度上偏度的影响在南北方趋同，可能是因为北方家庭更不耐热，更大幅度地调整其

① 参考张剑(2012)依据气候类型对中国南北方进行划分：将南北分界过渡带以北属于温带季风气候的城市作为检验的北方子样本，将过渡带以南属于热带季风气候和亚热带季风气候的城市作为检验的南方子样本。因此，南北划分的处理是剔除了过渡带观测值，这会导致在相同控制变量条件下样本容量在表3与表2中不同。

② 本文关注的重点是温度上偏、空调以及居民电力消费的关系，但在意见答辩中，本文的实证分析发现2017年大力推行的煤改电政策并没有显著增加居民用电量，这一有趣的事实表明在居民用电量对北方地区温度下偏有显著响应的结果下，或许这一政策实际实施效果低，或者政策推行的同时也促进了用电效率的提升。煤改电政策效应的内在机制值得深入分析。

适应性行为，导致其电力消费对温度上偏度的响应更加强烈。至此，假说1得以验证，即温度偏离度对居民电力消费有显著正影响，但具有一定的区域异质性。从表3我们还看到，温度上偏度的估计值均远远高于温度下偏度的估计值，说明高温天气对居民电力消费的影响强于低温天气。

表3 居民电力消费的南北异质性

	<i>ele</i>					
	[18℃, 24℃]	[14℃, 25℃]	[13℃, 26℃]	[18℃, 24℃]	[14℃, 25℃]	[13℃, 26℃]
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
CDD^{thr_C}	73.844** (34.730)	94.249** (42.144)	126.688** (54.125)	100.696** (45.054)	132.263** (56.179)	179.858** (75.840)
$CDD^{thr_C} \times Loc$	71.795** (35.516)	69.289 (43.283)	56.435 (55.049)	41.083 (44.409)	27.473 (55.288)	-0.900 (74.991)
HDD^{thr_H}	34.914*** (10.716)	37.546*** (12.565)	39.014*** (13.199)	39.192*** (11.770)	42.155*** (12.876)	43.204*** (13.180)
$HDD^{thr_H} \times Loc$	-47.486*** (13.455)	-46.222*** (12.193)	-42.812*** (12.308)	-41.395*** (13.344)	-36.309*** (12.306)	-32.327** (12.414)
Control	<i>Cli</i>	<i>Cli</i>	<i>Cli</i>	<i>Cli</i> & <i>SE</i>	<i>Cli</i> & <i>SE</i>	<i>Cli</i> & <i>SE</i>
Adj. W/IR^2	0.178	0.179	0.176	0.196	0.202	0.203
Obs	1 176	1 176	1 176	1 062	1 062	1 062

(二) 气候变暖的适应性行为：空调整整

1. 空调的中介效应：广延边际调整

中介效应分析的第一步对应方程(1)，已于前文验证(表2和表3)；表4给出了中介效应分析的第二步和第三步，即对应本文用以研究广延边际调整的方程(2)和方程(3)。首先看前三列回归结果，第二步检验中温度上偏度(CDD^{thr_C})在不同的温度舒适区中均能以1%的显著性水平显著为正，说明温度上偏度的升高促进了居民的空调购买决策，第三步检验中，空调(AC)的估计系数均显著为正，说明在控制温度上偏度对居民电力消费的直接影响后，空调的增加依旧会显著地刺激居民电力消费。依据中介效应逐步检验回归系数含义，以[14℃, 25℃]舒适区的列(2)为例，温度上偏度每提升1℃，居民电力消费对气候变暖响应中的7.5%通过空调购买途径实现， CDD^{thr_C} 的直接效应为153.9千瓦时/人，中介效应为12.4千瓦时/人。后三列是考虑了南北差异的结果。列(5)显示，对于北方居民，居民电力消费对气候变暖响应中的12.1%通过空调购买途径实现， CDD^{thr_C} 的直接效应为159.4千瓦时/人，中介效应为21.9千瓦时/人；对于南方居民，居民电力消费对气候变暖响应中的2.4%通过空调购买途径实现， CDD^{thr_C} 的直接效应为158.9千瓦时/人，中介效应为3.9千瓦时/人。至此，假说2得以验证。

从表4结果还看到，当舒适区上界阈值增大时，北方居民的空调购买对温度上偏度

的响应强于南方居民,结合南方居民每百户空调拥有量更高的事实,可以推测温度上偏度对于空调购买的影响存在“饱和点”,即随着居民空调扩散率的增加,其将会抑制温度上偏度的影响,这也是南方空调购买途径对居民电力消费影响弱于北方的原因。

表4 空调中介效应:居民电力消费适应温度变化的广延边际调整途径

第二阶段: AC						
	[18°C, 24°C]	[14°C, 25°C]	[13°C, 26°C]	[18°C, 24°C]	[14°C, 25°C]	[13°C, 26°C]
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
CDD^{thrc}	14.876*** (4.338)	16.590*** (4.759)	17.800*** (5.413)	27.336*** (7.409)	35.869*** (8.361)	48.119*** (10.053)
$CDD^{thrc} \times Loc$				-23.190*** (6.601)	-29.552*** (7.473)	-39.698*** (9.132)
Obs	1 218	1 218	1 218	920	920	920
Adj. W/IR ²	0.0744	0.0741	0.0722	0.0677	0.0719	0.0755
第三阶段: ele						
	[18°C, 24°C]	[14°C, 25°C]	[13°C, 26°C]	[18°C, 24°C]	[14°C, 25°C]	[13°C, 26°C]
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
AC	0.733*** (0.238)	0.750*** (0.244)	0.767*** (0.247)	0.619** (0.280)	0.610** (0.286)	0.597** (0.287)
CDD^{thrc}	143.039*** (17.782)	153.947*** (19.923)	166.312*** (23.059)	131.432** (56.522)	159.384** (71.277)	197.308** (97.473)
$CDD^{thrc} \times Loc$				8.035 (54.886)	-0.477 (69.202)	-19.342 (94.976)
Obs	893	893	893	709	709	709
Adj. W/IR ²	0.213	0.209	0.202	0.299	0.306	0.302
Control	<i>Cl</i> & <i>SE</i>	<i>Cl</i> & <i>SE</i>	<i>Cl</i> & <i>SE</i>	<i>Cl</i> & <i>SE</i>	<i>Cl</i> & <i>SE</i>	<i>Cl</i> & <i>SE</i>
AC purchase	7.1%	7.5%	7.6%	N: 11.4% S: 1.8%	N: 12.1% S: 2.4%	N: 12.7% S: 2.7%

注: AC purchase 是指温度上偏度对居民电力消费影响中通过空调购买途径实现的占比,以下各表同。

2. 空调的调节效应: 集约边际调整

空调调节效应的回归结果由表5给出。无论是否控制了温度偏离度对电力消费的区域异质性影响,温度上偏度和空调的交互项($CDD^{thrc} \times AC$)均能在1%的水平下显著为正,说明更多的空调拥有量强化了居民电力消费对于温度上偏度的响应。以列(2)和列(5)的结果为例,每百户空调拥有量每增加1台,温度上偏度对居民电力消费的边际影响将强化约0.7千瓦时/人或0.8千瓦时/人;利用公式 $\xi_3 \times AC$ 计算空调集约途径的影响,温度上偏度每提升1°C,全体居民、北方居民和南方居民对应的空调集约途径的影响分别为80.1千瓦时/人、64.3千瓦时/人、113.9千瓦时/人,该影响在气候变暖对居民电力消费总影响中的占比分别为61.5%、46.7%、76.3%,空调集约途径影响占比在南方更高可能与南方城市更多遭遇极端高温有关。另外,系数 ξ_3 的估计值随着舒

适区上界阈值的增大而增大，表明极端温度可能更多地通过集约途径强化对居民电力消费的影响。至此，假说3得以验证。

表5 空调调节效应：居民电力消费适应温度变化的集约边际调整途径

	<i>ele</i>					
	[18℃, 24℃]	[14℃, 25℃]	[13℃, 26℃]	[18℃, 24℃]	[14℃, 25℃]	[13℃, 26℃]
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
CDD^{thr_C}	64.649*	50.094	28.405	61.065	73.498	85.426
	(35.471)	(41.102)	(51.266)	(53.639)	(67.749)	(91.023)
$CDD^{thr_C} \times AC$	0.566***	0.706***	0.898***	0.719***	0.796***	0.990***
	(0.198)	(0.226)	(0.281)	(0.210)	(0.255)	(0.315)
$CDD^{thr_C} \times Loc$				-29.376	-38.193	-66.016
				(54.356)	(67.892)	(92.087)
AC	0.111	0.177	0.271	-0.308	-0.152	-0.049
	(0.322)	(0.287)	(0.272)	(0.332)	(0.312)	(0.301)
HDD^{thr_H}	-35.940	-44.997	-47.788	39.621**	37.740*	36.374*
	(30.355)	(33.220)	(34.943)	(17.045)	(19.548)	(19.982)
$HDD^{thr_H} \times Loc$				-32.349*	-50.073***	-47.675**
				(18.768)	(18.747)	(19.071)
Control	<i>Cli</i> & <i>SE</i>	<i>Cli</i> & <i>SE</i>	<i>Cli</i> & <i>SE</i>	<i>Cli</i> & <i>SE</i>	<i>Cli</i> & <i>SE</i>	<i>Cli</i> & <i>SE</i>
Adj. $W/I R^2$	0.229	0.226	0.218	0.343	0.345	0.339
Obs	893	893	893	709	709	709
AC use	49.8%	61.5%	78.2%	N: 48.8% S: 76.5%	N: 46.7% S: 76.3%	N: 48.4% S: 88.0%

注：AC use 是指温度上偏度对居民电力消费影响中通过空调使用途径实现的占比，以下各表同。

(三) 稳健性检验

本小节从四个方面证明假说的稳健性，分别是非气候敏感耐用消费品的证伪检验、内生性问题、历史空调存量问题以及历史温度的滞后效应检验。^①

在证伪检验中，两种非气候敏感的耐用消费品（洗衣机和移动电话）被挑选出来与空调作比较。结果显示，洗衣机和移动电话的估计系数在统计上均不显著，且估计系数数值很小，证伪检验通过。对于空调拥有量作为解释变量可能存在的内生性问题，本文通过添加额外社会经济影响因素（性别结构、年龄结构和教育水平）以及 Lewbel (2012) 异方差策略构建工具变量的方法验证了假说2和假说3的稳健性。对于历史空调存量对空调购买决策影响的问题，本文首先通过扩散模型模拟空调“饱和点”的存在，初步检验“温度上偏度增大促进空调购买决策”这一结论的稳健性；进一步地，空调拥有量的动态面板模型的结果验证了在控制空调历史存量及其非线性影响后，表4第二阶段的回归结果依然能保持稳健。对于历史温度对空调购买决策和空调使用决策的潜在影

① 由于篇幅所限，稳健性检验的结果及其分析放在附录II。

响,本文分别考虑了温度偏离度滞后一期的广延边际调整模型、集约边际调整模型以及温度偏离度滞后两期的广延边际调整模型,结果表明了表4广延边际调整模型和表5集约边际调整模型的稳健性;此外,不论南北方,空调集约边际调整途径不存在滞后效应,而对于空调广延边际调整途径,仅北方地区可能存在一定的滞后效应。

五、异质性分析

本部分将进一步从气候因素、空调能效和收入水平三个方面讨论居民电力消费和空调购买的异质性,这些分析有助于更深入地了解我国居民电力消费的规律,为政策建议提供更细致的依据。

(一) 气候因素异质性

1. 极端气候异质性

全球变暖下极端天气事件频发,尤其是极端高温极大地威胁到了居民的热健康,引致居民做出更强的换取热健康的适应性行为。对此,本文借鉴 Deschênes and Greenstone (2011) 的方法构建温度区间变量,即不同日平均温度落入不同温度区间的总天数,进行以下方程回归识别南北方的极端天气的异质性:

$$ele_{it} = \nu_0 + \sum_n \nu_1^n tbin_{it}^n + \sum_n \nu_2^n tbin_{it}^n \times Loc_i + \nu_3 Cli_{it} + \nu_4 SE_{it} + city_i + year_t + \varepsilon_{it}, \quad (5)$$

其中,以舒适区作为基准组,那么 $tbin_{it}^n$ 表示第 i 个城市第 t 年日平均温度落入第 n 个非舒适区温度区间的总天数, ν_1^n 和 $\nu_1^n + \nu_2^n$ 分别估计了第 n 个温度区间的总天数对北方居民和南方居民电力消费的影响。本文选择第七个温度区间 $[15^\circ\text{C}, 25^\circ\text{C})$ 作为舒适区基准组^①,以 5°C 为长度分别向上和向下划分了以下 9 个温度区间: $(-\infty, -10^\circ\text{C})$ 、 $[-10^\circ\text{C}, -5^\circ\text{C})$ 、 $[-5^\circ\text{C}, 0^\circ\text{C})$ 、 $[0^\circ\text{C}, 5^\circ\text{C})$ 、 $[5^\circ\text{C}, 10^\circ\text{C})$ 、 $[10^\circ\text{C}, 15^\circ\text{C})$ 、 $[15^\circ\text{C}, 25^\circ\text{C})$ 、 $[25^\circ\text{C}, 30^\circ\text{C})$ 、 $[30^\circ\text{C}, +\infty)$ 。为了检验基准组界限扩大情况下结论的稳健性,本文另外尝试使用更大界限的舒适区 $[10^\circ\text{C}, 25^\circ\text{C})$ 作为方程 (5) 回归的基准组。

根据模型 (5) 的回归结果(详见附录 I 中的表 A1),图 1 的左图(基准组为 $[15^\circ\text{C}, 25^\circ\text{C})$) 和右图(基准组为 $[10^\circ\text{C}, 25^\circ\text{C})$) 呈现了不同温度区间总天数对居民电力消费的边际影响。可以看到,无论是以哪一个基准组进行回归,对于北方居民来说,居民电力消费响应最强的三个区间都依次为: $[30^\circ\text{C}, +\infty)$ 、 $(-\infty, -10^\circ\text{C})$ 、 $[-10^\circ\text{C}, -5^\circ\text{C})$; 对于南方居民来说,全年不存在 $(-\infty, -10^\circ\text{C})$ 区间,居民电力消费响应最强的三个区间依次为: $[-10^\circ\text{C}, -5^\circ\text{C})$ 、 $[30^\circ\text{C}, +\infty)$ 、 $[25^\circ\text{C}, 30^\circ\text{C})$ 。因此,居民电力消费对极端天气的响应更强。另外,若剔除南方城市 $[-10^\circ\text{C}, -5^\circ\text{C})$ 区间异常的估计系数,可以得出极端高温对居民电力消费的影响大于极端低温的结论。^②

^① 本文在主检验舒适区的基础上略微调整,原因在于 0°C 等温线在气候学中具有重要意义,以 5°C 为长度可以使其成为温度区间的临界点。

^② 本文认为回归结果高估了南方城市 $[-10^\circ\text{C}, -5^\circ\text{C})$ 区间对居民电力消费的真实影响,具体理由如下:第一,南方城市 $[-10^\circ\text{C}, -5^\circ\text{C})$ 区间的样本量极小,仅有 21 个观测值,约占全部南方样本的 3.2%;第二,如附录 I 的图 A4 所示,该区间累计天数数值极小,平均全年仅有 0.04 天,且变化极小,方差仅为 0.22,总体而言该区间对居民电力消费的影响非常有限。

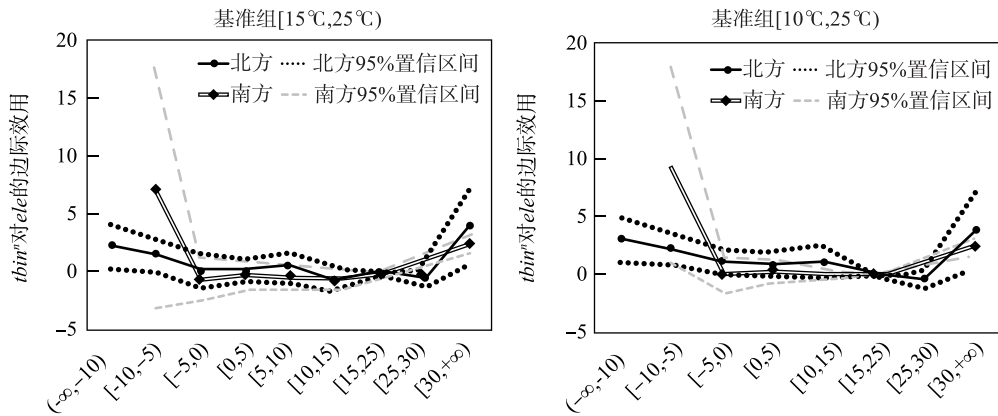


图1 不同舒适区基准组的中国南北居民电力消费极端气候异质性

进一步地，为了考察极端高温冲击对居民空调购买决策的异质性影响，本文参照模型(5)保留 $[25^{\circ}\text{C}, 30^{\circ}\text{C})$ 和 $[30^{\circ}\text{C}, +\infty)$ 温度区间的总天数($tbin^8$ 和 $tbin^9$)，将其余区间合并作基准组，并以($tbin^9$)作为衡量极端高温的指标，得到以下回归方程：

$$AC_{it} = \rho_0 + \sum_{n=8,9} \rho_1^n tbin_{it}^n + \sum_{n=8,9} \rho_2^n tbin_{it}^n \times Loc_i + \rho_3 Cli_{it} + \rho_4 SE_{it} + city_i + year_t + \epsilon_{it}.$$

该模型的回归结果(详见附录I中的表A1)表明，全体居民空调购买行为在极端高温的条件下受到更大的影响；无论南方还是北方， $[30^{\circ}\text{C}, +\infty)$ 区间的累计天数对空调购买的正向影响均在1%的水平上显著，相比之下， $[25^{\circ}\text{C}, 30^{\circ}\text{C})$ 区间的累计天数的估计系数未通过显著性测试，验证了极端高温对空调购买的异质性，表明极端高温还会通过广延途径对居民电力消费产生影响。同时，极端高温对空调购买在北方的影响更大，由于南方平均的空调存量大于北方，该结果表明高水平的空调存量会对极端高温的广延途径产生抑制作用。

2. 相对湿度异质性

相对湿度是指在一定温度和压力下，空气中实际水分含量与饱和空气中水蒸气含量之比。湿度会直接影响人体皮肤的蒸发散热，以及通过皮肤的水分扩散，继而影响人体代谢平衡，从而影响人体温度、热感觉。本小节讨论居民电力消费和空调购买响应温度偏离度时在相对湿度上的异质性，回归结果表明，在极端高温的条件下，相对湿度对体感温度具有正向强化作用，居民电力消费以及空调购买对于温度上偏离度的响应都会随着夏季相对湿度的提高而增强。^①

(二) 空调能效标准异质性

从表5的分析看到，空调集约途径的影响在气候变暖对居民电力消费总影响中的占比约为48.8%—88.0%，占据主导地位。一个令人感兴趣的问题是，空调制冷技术的进步是否能抵消空调使用时长增长带来的居民用电量的增加。本小节将通过估计分年份的空调调节效应，推测样本区间内空调能耗强度与空调使用时长的可能互动规律。

① 由于篇幅所限，关于相对湿度异质性的回归结果与详细的讨论放在附录III。

分析思路基于中国的两个基本事实,一是中国实施的强制性能效标准制度(即终端用能产品能效强制性国家标准规定用能产品、设备进入市场的最低能源效率)经历多次强制性能效、能耗限额标准的修订^①,倒逼相关企业转型升级。因此,中国空调的能耗程度会随年份呈现下降趋势,从而使得居民用电量减少。二是随着人均可支配收入不断提高以及全球变暖趋势,空调使用时长会不断增长,从而导致居民用电量增加。在这两个基本事实下,我们可以通过观察各年份温度上偏度与空调拥有量交互项估计系数的符号和大小变化,判断这些年来使用时长和空调能耗强度各自的可能影响。

具体来说,在模型(4)的基础上,本文进一步加入年份与 $CDD^{thrc} \times AC$ 的交互项,借此反映空调使用程度对居民电力消费综合影响的变化趋势。回归结果详见附录 I 表 A3。 $CDD^{thrc} \times AC \times year$ 的估计系数反映了 $year$ 当年的集约边际调整效应的大小,列(4)至列(6)都呈现了其相似的变化趋势。2014—2016 年温度上偏度与空调拥有量交互项的估计系数不断变小,2016—2019 年不断上升,直到 2020 年才又发生了一定的下降。笔者进一步检验了分年份的调节效应差异的显著性,2014—2016 年的估计系数没有显著差异,2016—2019 年的估计系数显著上升,2019 年与 2020 年的估计系数没有显著差异。以上结果表明,对于 2014—2016 年而言,在空调使用时长不断增长的假定下,空调能耗程度的技术进步能在一定程度上减缓空调使用时长对居民电力消费的促进作用;对于 2016—2019 年而言,空调能耗程度的技术进步并未抵消空调使用时长增长的正向影响,此时,空调使用时长在空调使用途径影响中占据主导作用。这些分析意味着,一方面,促进空调能耗降低的技术进步能帮助减缓集约边际调整途径的影响,但是目前这些技术的作用有限,迫切需要节能技术的新突破及其推广应用的新思路;另一方面,未来热舒适需求而引致的空调使用时长的增长大概率会进一步推高居民用电量。

(三) 收入水平异质性

为考察收入的异质性,本文分别在模型(1)和模型(2)基础上引入温度偏离度和收入的交互项。表 6 呈现了收入水平异质性检验的回归结果。前三列为居民电力消费响应温度的收入异质性,从中看到,交互项 ($CDD^{thrc} \times \ln(ADPI^{ele})$) 的估计系数在 1% 的水平下显著为正。以 $[14^{\circ}\text{C}, 25^{\circ}\text{C}]$ 舒适区为例,收入每提升 1%,居民电力消费对于温度上偏度的响应将强化约 1.1 千瓦时/人。同时,交互项 ($HDD^{thrc} \times \ln(ADPI^{ele})$) 的估计系数不显著,且数值较小,表明居民电力消费对温度下偏度 (HDD^{thru}) 的响应函数不存在收入异质性。对此,本文给出两方面的解释。一方面,极端高温对居民的热健康产生更大的威胁,制冷需求的收入弹性较大,当收入增加时,相比换取采暖服务,居民购买冷却家电或服务的意愿相对更大。另一方面,居民电力消费响应气候变化最主要的途径为耐用消费品的调整,特别是空调的使用,相对于替代品较多的采暖家电,目前作为冷却家电的空调可替代性仍较差,价格更为昂贵,因而更可能受制于居民的收入水平。可以预见,居民收入提高时,其对于空调的经济可负担能力提高,刺激对空调的需求,进而消费更多电力,呈现为居民电力消费存在响应温度上偏度 (CDD^{thrc}) 的收

^① 附录 I 中的表 A2 给出了 2005 年以来空调的能源效率标识管理办法。

入异质性。

更进一步，如果上述解释成立，表明收入水平与空调的广延途径具有密切关系。观察列(4)至列(6)，后三列为空调购买响应温度的收入异质性。可以看到，对于空调购买响应温度上偏度(CDD^{thr_C})的收入异质性，交互项($CDD^{thr_C} \times \ln(ADPI^{ele})$)的估计系数在1%的水平上显著为正，表明收入水平很可能发挥了强化空调的长期广延边际调整途径的作用。从经济意义来说，以 $[14^\circ\text{C}, 25^\circ\text{C}]$ 舒适区为例，在控制变量的情况下，收入每提升1%，将使得空调购买对于温度上偏度的响应强化约0.5台/每百户。

表6 南北方居民电力消费的收入水平异质性

	<i>ele</i>			<i>AC</i>		
	[18°C, 24°C]	[14°C, 25°C]	[13°C, 26°C]	[18°C, 24°C]	[14°C, 25°C]	[13°C, 26°C]
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
CDD^{thr_C}	18.977 (42.112)	43.721 (51.694)	73.880 (67.964)	-17.739* (9.179)	-19.535* (11.250)	-20.710 (14.396)
$CDD^{thr_C} \times Loc$	0.348 (41.046)	-17.370 (50.829)	-50.919 (69.120)	-29.973*** (6.707)	-37.484*** (7.843)	-50.890*** (9.860)
$CDD^{thr_C} \times \ln(ADPI^{ele})$	100.742*** (30.134)	108.436*** (34.464)	126.276*** (39.900)	44.942*** (6.388)	53.696*** (8.192)	66.899*** (11.002)
HDD^{thr_H}	28.269*** (10.500)	29.913*** (11.368)	31.688*** (11.729)			
$HDD^{thr_H} \times Loc$	-1.377 (12.947)	0.718 (15.456)	5.716 (16.575)			
$HDD^{thr_H} \times \ln(ADPI^{ele})$	-4.833 (6.067)	-8.443 (6.901)	-11.144 (7.183)			
Control	<i>Cl</i> & <i>SE</i>	<i>Cl</i> & <i>SE</i>	<i>Cl</i> & <i>SE</i>	<i>Cl</i> & <i>SE</i>	<i>Cl</i> & <i>SE</i>	<i>Cl</i> & <i>SE</i>
Adj. $W/I R^2$	0.255	0.257	0.254	0.238	0.222	0.204
Obs	1 062	1 062	1 062	920	920	920

六、政策含义和未来展望

全球变暖和能源危机在现实上的交织凸显了缓解与适应气候变化协调发展的重要性，深入把握电力消费的规律和特点为气候适应与缓解能够寻求共同利益的关键前提。对此，本文使用2011—2020年244个市级地区的非平衡面板数据，从空调适应性行为的视角对气候变化与居民电力消费的关系进行了实证分析。主要的政策建议如下：

第一，综合考虑区域异质性，因地制宜保障电力供应。由于南方城市平均气温高、炎热周期长以及空调集约途径占比高，空调电力消费将保持较高的水平，且随全球气候

变暖现象越发严峻,夏季南方的电力系统将面临更大的用电负荷,电网公司需保证南方城市发电和输电基础设施建设以提高承压能力;对于北方城市,平均气温相对更低,炎热周期更短,故大多数时间中,空调电力消费相对处于低位,但由于其空调广延途径占比高,且北方居民更不耐热,其空调电力消费预期将随气候变暖的加剧具有更大增速,另外,上述因素也使得北方城市对极端高温天气更为敏感,空调电力消费也随之具有更大的波动性,因此电网公司需更关注对北方城市居民电力消费的预测,做好供电规划,避免因高峰负荷带来的经济成本。

第二,将居民电力消费、空调购买的异质性分析结论纳入应对气候变化政策的考虑范围之中。极端气候对人体健康的威胁边际递增,因此需全面提升极端天气气候事件下的健康适应水平,建立极端天气气候事件下的监测预警、输配电系统保护和应急调度等适应策略;相对湿度与体感温度密切相关,应充分挖掘其在优化电力负荷供需匹配、热舒适调节设备研发的潜在可能性;与空调能效相关的节能标准与技术进步能帮助减缓集约边际调整途径的影响,故应加快实施制冷技术、设备更新升级,制冷系统能效水平提升,绿色高效制冷产品市场占有率提高等行动;由制冷需求引致的空调需求收入弹性较大,很大程度制约居民制冷服务的换取,因此,全球变暖下需要关注低收入人群,避免因空调购买力不足受到热健康威胁、产生“能源贫困”问题,实现“节电减排”“民生保障”双达标。

本文是利用计量方法在适应气候领域的实证探索,具有一定的局限性。从长远来看,人们将对气候变化做出更广泛的适应性反应。除了购买和使用空调,他们还可能改变建筑特征、建设韧性城市,甚至进行大规模的迁移,等等。未来研究可以进一步厘清这些适应性措施实施的条件和规律,为适应气候提供更多的高效、可行的政策建议。另外,技术进步将深刻影响适应气候变化领域的发展,本文通过分年份的空调调节效应对这一话题进行了简单的讨论,未来可以更深入地定量预测技术进步对适应气候变化某个具体领域的影响。

参考文献

- [1] Albouy, D., W. Graf, R. Kellogg, and H. Wolff, “Climate Amenities, Climate Change, and American Quality of Life”, *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 2016, 3 (1), 205-246.
- [2] Auffhammer, M., and A. Aroonruengsawat, “Simulating the Impacts of Climate Change, Prices and Population on California’s Residential Electricity Consumption”, *Climatic Change*, 2012, 109 (1), 191-210.
- [3] Auffhammer, M., and E. T. Mansur, “Measuring Climatic Impacts on Energy Consumption: A Review of the Empirical Literature”, *Energy Economics*, 2014, 46, 522-530.
- [4] Cian, D. E., and S. I. Wing, “Global Energy Consumption in a Warming Climate”, *Environmental and Resource Economics*, 2019, 72 (2), 365-410.
- [5] Davis, L. W., and P. J. Gertler, “Contribution of Air Conditioning Adoption to Future Energy Use Under Global Warming”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112 (19), 5962-5967.
- [6] Deschênes, O. and M. Greenstone, “Climate Change, Mortality, and Adaptation: Evidence from Annual Fluctuations in Weather in the US”, *American Economic Journal: Applied Economics*, 2011, 3 (4), 152-185.

- [7] Du, K., Y. Yu, and C. Wei, "Climatic Impact on China's Residential Electricity Consumption: Does the Income Level Matter?", *China Economic Review*, 2020, 63, 101520.
- [8] Fikru, G. M., and L. Gautier, "The Impact of Weather Variation on Energy Consumption in Residential Houses", *Applied Energy*, 2015, 144, 19-30.
- [9] Gupta, E., "Global Warming and Electricity Demand in the Rapidly Growing City of Delhi: A Semi-parametric Variable Coefficient Approach", *Energy Economics*, 2012, 34 (5), 1407-1421.
- [10] IEA, *The Future of Cooling: Opportunities for Energy-Efficient Air Conditioning*. Paris: OECD/IEA, 2018.
- [11] 刘明辉、李江龙、孟观飞、杨秀汪, "气候冲击背景下温度变化如何影响家庭能源消费? ——基于需求异质性视角", 《西安交通大学学报(社会科学版)》, 2022年第4期第42卷, 第74—85页。
- [12] Lewbel, A., "Using Heteroscedasticity to Identify and Estimate Mismeasured and Endogenous Regressor Models", *Journal of Business & Economic Statistics*, 2012, 30 (1), 67-80.
- [13] Li, J., L. Yang, and H. Long, "Climatic Impacts on Energy Consumption: Intensive and Extensive Margins", *Energy Economics*, 2018, 71, 332-343.
- [14] Li, Y., W. A. Pizer, and L. Wu, "Climate Change and Residential Electricity Consumption in the Yangtze River Delta, China", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116 (2), 472-477.
- [15] McNeil, A. M., and E. V. Letschert, "Modeling Diffusion of Electrical Appliances in the Residential Sector", *Energy & Buildings*, 2009, 42 (6), 783-790.
- [16] Pachauri, S., A. Mueller, A. Kemmler, and D. Spreng, "On Measuring Energy Poverty in Indian Households", *World Development*, 2004, 32 (12), 2083-2104.
- [17] Pourazarm, E., and A. Cooray, "Estimating and Forecasting Residential Electricity Demand in Iran", *Economic Modelling*, 2013, 35, 546-558.
- [18] Randazzo, T., D. E. Cian, and N. M. Mistry, "Air Conditioning and Electricity Expenditure: The Role of Climate in Temperate Countries", *Economic Modelling*, 2020, 90, 273-287.
- [19] 滕美莹、廖华、王方志, "居民气候适应行为研究进展综述", 《环境经济研究》, 2022年第3期第7卷, 第143—166页。
- [20] 吴勇军、薛禹胜、谢云云、王昊昊、段荣华、黄伟, "台风及暴雨对电网故障率的时空影响", 《电力系统自动化》, 2016年第2期第40卷, 第20—29页。
- [21] 郑艳、潘家华、谢欣露、周亚敏、刘昌义, "基于气候变化脆弱性的适应规划: 一个福利经济学分析", 《经济研究》, 2016年第2期第51卷, 第140—153页。
- [22] 张剑、柳小妮、谭忠厚、陈全功, "基于GIS的中国南北地理气候分界带模拟", 《兰州大学学报(自然科学版)》, 2012年第3期第48卷, 第28—33页。
- [23] 朱寿燕、郇统哲、王亮、杨聃、曾雨晴, "体感温度计算方法研究", 《科技创新与应用》, 2020年第22期, 第116—117页。

Climate Change Has Increased Household Electricity Consumption

—An Adaptive Behavioral Perspective

LI Jieyu HE Kun*
(Sun Yat-sen University)

Abstract: Using the panel data of 244 cities from 2011 to 2020, we construct temperature deviation indicators, and evaluate the effects of climate change on electricity consumption from an adaptive behavioral perspective. We find cooling degree days (CDD) pushes up electricity consumption, among which the purchase and use of air conditioners contribute about 58.7%—78.7%. Heterogeneity analysis shows extreme temperature, humidity and income strengthen the response of electricity consumption and air conditioners purchase to CDD. Technological advancements that reduce air conditioning energy consumption can only partially alleviate the positive impact of air conditioning usage duration on household electricity consumption.

Keywords: climate change; energy consumption; adaptive behavior

JEL Classification: Q54, Q41, D12

* Corresponding Author: HE Kun, Lingnan College, Sun Yat-sen University, No. 135 Xingang Xi Road, Guangzhou, Guangdong 510275, China; Tel: 86-20-84110657; E-mail: hekun9@mail2.sysu.edu.cn.