

空气污染、规避行为和家庭电力消费

——来自中国地级市的证据

陈涵一 史铁 王临风 郑安刚*

摘要: 基于 2018—2019 年中国地级市居民家庭的日度电力消费数据, 本文估计了空气污染对居民家庭电力消费的影响。研究发现, 每日空气质量指数 (AQI) 每增加 1 个标准差, 会导致居民家庭日平均电力消费增加 0.05 千瓦·时。据此计算清洁空气的支付意愿和空气污染的额外损失: 居民家庭每年愿意为清洁空气多支付 14.6 元电费; 若空气质量达到 WHO 的标准, 全国每年平均电力消费将减少 125.1 亿千瓦·时, 全国居民每年可少支付 72.12 亿元电费, 这也意味着会减少 776 万吨电力部门的碳排放。

关键词: 电力消费; 空气污染; 规避行为

DOI: 10.13821/j.cnki.ceq.2023.05.13

一、引言

据报道, 全球每年大约有 300 万人死于空气污染 (ambient air pollution), 大约 90% 的人生活在空气质量低于世界卫生组织空气质量标准的地方 (WHO, 2016)。严重的空气污染威胁着数十亿人的健康, 同时也为经济带来了巨大的负担。政策制定者和科研人员普遍关注空气污染对人们身心健康的损害以及直接经济成本。例如, 空气污染会提高婴儿死亡率 (Arceo et al., 2016; Greenstone and Hanna, 2014)、减少平均预期寿命 (Chen et al., 2013; Ebenstein et al., 2015, 2017)、损害精神健康 (Chen et al., 2018)、降低主观幸福感 (Levinson, 2012; 杨继东和章逸然, 2014)、损害认知能力 (Zhang et al., 2018)、降低劳动生产率 (Graff Zivin and Neidell, 2012; Hanna and Oliva, 2015; He et al., 2019; 陈帅和张丹丹, 2020) 以及增加家庭医疗支出 (Barwick et al., 2021; Deryugina et al., 2019; 祁毓和卢洪友, 2015; 王玉泽和罗能生, 2020)。然而, 上述文献主要关注空气污染导致的直接经济后果, 缺少对空气污染造成的间接经济成本的讨论, 例如空气污染对家庭电力消费的影响 (He et al., 2020)。

理解空气污染导致的间接成本的关键在于理解空气污染和人类行为之间的关系。为了减少暴露在严重污染空气中的频率, 人们可能会采取一系列规避行为 (avoidance behavior)。已有一些文献对此进行了揭示: 在短期, 人们可能通过外出时使用 PM_{2.5} 或 PM₁₀ 防护口罩 (Eom et al., 2019; Liu et al., 2018; Zhang and Mu, 2018)、减少户外活动

* 陈涵一, 东北财经大学金融学院; 史铁, 嘉兴学院经济学院; 王临风, 南京财经大学财政与税务学院; 郑安刚, 中国电力科学研究院。通信作者及地址: 王临风, 江苏省南京市栖霞区文苑路 3 号南京财经大学, 210023; 电话: 18150367092; E-mail: wanglflr@163.com。感谢匿名审稿人的宝贵建议。作者文责自负。

(Graff Zivin and Neidell, 2009; Noonan, 2014; Saberian et al., 2017; Ward et al., 2016) 以及使用空气净化器 (Eom et al., 2019; Ito and Zhang, 2020; Liu et al., 2018) 等措施来减少在空气污染中的暴露; 在长期, 人们会向空气质量更好的国家或城市移民 (Qin and Zhu, 2018; Chen et al., 2022; 李明和张亦然, 2019; 刘欢和席鹏辉, 2019; 王兆华等, 2021)。这些污染规避行为通常伴随着额外的成本, 例如, Zhang and Mu (2018) 发现, 中国 2013 年 1 月至 2014 年 4 月这 16 个月的时间内, 严重空气污染 ($AQI \geq 201$) 导致的口罩消费增加 1.87 亿美元。

家庭电力消费的增加也是污染规避行为带来的额外成本之一。空气污染导致家庭电力消费增加的渠道主要有两个。第一, 空气污染增加了家庭的室内通风需求 (Tong et al., 2016)。空气污染严重时, 自然通风通常会被机器通风所取代, 这增加了空调或空气净化器的电力消费。例如, Eom et al. (2019) 发现污染暴露风险增加会提高家庭空气净化器使用频率。第二, 空气污染会降低人们的出行需求 (Graff Zivin and Neidell, 2009; Noonan, 2014; Ward et al., 2016; Saberian et al., 2017), 人们选择更多地停留在室内, 进而增加了室内项目的电力消费, 包括娱乐需求 (例如看电视)、制冷需求、厨房家电等。如果这些增加的电力消费来自火力发电, 火力发电厂会增加空气污染物排放。准确估计空气污染对家庭电力消费的影响会为政策制定者制定合理的空气污染防治政策和节能减排政策提供重要参考。

我们关注空气污染对城市家庭电力消费的正向影响。仅有少数文献讨论了空气污染与家庭电力消费之间的因果关系。^① 由于数据的可获得性, 这些研究主要关注发达国家的情况 (Eom et al., 2020; He et al., 2020; Salvo, 2020), 忽略了对发展中国家的讨论。然而, 发达国家的空气质量通常远远好于发展中国家, 尤其是中国、印度、墨西哥等空气污染严重的地区。^② 因此, 研究人员会谨慎地对待这些研究结论的外部有效性, 发展中国家直接证据的缺乏仍是文献中的一大空白 (He et al., 2020)。仅有的来自中国的研究 (Yi et al., 2020) 则使用中国劳动力动态调查数据 (CLDS) 2013 年和 2015 年的家庭年度电力消费数据估计了空气污染对家庭年平均电力消费的影响, 但没能可靠地识别两者之间的因果关系。我们使用国家电网中国电力科学研究院通过家庭电表采集的 144 个地级及以上城市 2018 年 1 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日家庭日度电力消费数据估计了空气污染对中国城市家庭电力消费的影响, 提供了污染相对严重的发展中国家的证据。

估计空气污染对家庭电力消费的因果效应的主要挑战是如下三个方面的内生性问题:

第一, 遗漏变量问题。即使我们控制了最严格的固定效应 (“城市-年-周” 和 “日” 固定效应), 但双向固定效应模型依然无法解决遗漏在城市-日度层面变化的不可观测因

^① He et al. (2020)、Eom et al. (2020) 和 Salvo (2020) 使用家庭-日度或家庭-月度数据分别研究了美国凤凰城、韩国和新加坡等地区家庭电力消费对于空气污染的响应程度, Yi et al. (2020) 利用中国劳动力动态调查数据 (2013 年和 2015 年) 家庭-年度数据研究空气污染对家庭电力消费的影响。

^② 例如, Brauer et al. (2016) 研究发现, 2013 年中国的 PM_{10} 年平均暴露量是美国的 5 倍多。WHO (2016) 指出, 西太平洋和东南亚地区的空气污染尤为严重, 这些地区多为欠发达地区。

素所导致的有偏估计的问题。例如，我们遗漏了口罩消费量这一重要变量，因为使用PM_{2.5}或PM₁₀防护口罩是人们面对空气污染所采取的另一种规避行为（Zhang and Mu, 2018），人们通过口罩的使用增加户外活动，减少室内停留的时间，进而影响了家庭电力消费。

第二，可能存在反向因果问题。电力消费需求更高的城市，可能面临更大的电力供给压力，因而可能拥有更高的城市发电量，而火力发电是发展中国家空气污染物的主要来源之一（Zhu et al., 2014），因此，城市电力消费的提高可能会导致空气污染程度的加剧。

第三，空气污染可以同时影响电力需求和供给，我们使用简约式模型对电力需求函数进行估计会产生偏误。例如，为了应对碳排放导致的全球气候变暖，近年来中国大力推广光伏发电，并承诺在2030年光伏发电占总发电量的比例会达到10%（Li et al., 2017）。PM₁₀会吸收和散射太阳辐射能，如果气溶胶层很厚的话，大量的太阳辐射能在落到太阳能发电板上之前就被损耗掉了，因此空气污染对电力供给有负面影响（Li et al., 2017；Sweerts et al., 2019）。

为了解决内生性问题，我们使用工具变量法估计空气污染对城市活跃用户平均电力消费的影响。我们参考现有研究，使用目标城市每日上风向城市的空气污染物浓度基于距离和角度的加权平均作为目标城市当日空气污染物浓度的工具变量（Jia and Ku, 2019；Schlenker and Walker, 2016；Zheng et al., 2019）。由于风可以把上风向城市的污染物传输到目标城市，这为目标城市的污染物浓度带来了外生变异（Zheng et al., 2019）。这些外生的变异不太可能通过其他渠道影响目标城市的社会和经济行为，因此它是一个理想的工具变量（Barwick et al., 2021；Zheng et al., 2019）。

我们的研究表明，AQI每增加1个标准差会导致城市活跃用户每天的平均电力消费增加0.05千瓦·时（或0.06%）。虽然我们估计的电力消费衡量的防御性支出是上限（upper bound），但我们发现，这个上限代表的防御性行为依然远远低于发达国家，纵使中国的平均空气污染程度远远高于发达国家。^① 我们的结论可以解释为什么中国因空气污染导致的医疗支出高于发达国家。^②

最后，我们计算了清洁空气的支付意愿和空气污染带来的额外损失。我们发现，家庭用户每年愿意为清洁空气多支付14.6元电费。如果空气质量达到WHO标准，全国每年平均电力消费则会减少125.1亿千瓦·时，这意味着全国居民家庭每年可以少支付72.12亿元电费，这也意味着会减少776万吨电力碳排放。

我们的研究主要有三个贡献。第一，本文首次使用中国城市日度家庭电力消费数据估计了空气污染对城市家庭电力消费的影响，提供了污染相对严重的发展中国家的证据。

第二，我们的研究丰富了空气污染导致人们规避行为的文献。现有文献主要提供了

^① 美国的证据表明，PM₁₀增加1个标准差会导致家庭电力消费增加0.85%，PM_{2.5}每增加1个标准差会导致家庭电力消费增加1.74%；韩国PM_{2.5}增加一个标准差会导致家庭电力消费增加2.88%；新加坡PM_{2.5}增加1个标准差会导致家庭电力消费增加1.31%。

^② Barwick et al. (2021) 发现，PM_{2.5}每增加1个标准差，中国呼吸道疾病的医疗支出增加33%，而美国仅为22%。

空气污染导致人们减少出行的直接证据 (Graff Zivin and Neidell, 2009; Noonan, 2014; Saberian et al., 2017; Ward et al., 2016), 我们的研究表明空气污染会导致人们更多地停留在室内, 从另一个角度提供了证据。

第三, 我们的研究丰富了清洁空气支付意愿相关的文献。现有文献从不同角度估计了中国的清洁空气的支付意愿, 包括房价 (陈永伟和陈立中, 2012; 韩璇和赵波, 2021)、防护口罩消费支出 (Zhang and Mu, 2018) 和空气净化器购买支出 (Ito and Zhang, 2020) 衡量的清洁空气的支付意愿。我们的研究从家庭电力消费的角度出发, 估计了由于空气污染使得人们更长时间停留在室内所导致的整体电力消耗成本。

本文剩余部分组织如下: 第二部分介绍本文使用的数据和主要变量; 第三部分介绍识别策略; 第四部分是主要实证结果; 第五部分是结论和政策意义。

二、数据

本文使用中国 144 个地级及以上城市 2018 年 1 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日的日度数据 (非平衡面板), 研究空气污染对城市居民电力消费的影响。具体包括以下四个数据集: 城市居民日度电力消费数据集、空气质量数据集、气象条件数据集以及风向数据集。

(一) 城市居民日度电力消费数据集

城市居民日度电力消费数据集来自国家电网中国电力科学研究院 (China Electric Power Research Institute, CEPRI)。国家电网及其各省的电力分公司是中国家庭电力消费的主要供给单位。CEPRI 的电力消费原始数据采集自各地供电分公司在用户家庭安装的智能电表, 这些智能电表会记录每个家庭每天的电力消费量。CEPRI 向我们提供了 2018—2019 年的地级市日度电力消费数据, 这些数据来自各市供电分公司对各自辖区智能电表数据的加总。^① CEPRI 将日电力消费高于 5 度的家庭定义为活跃用户, 他们认为活跃用户的用电量能更真实地反映家庭的电力消费状况。我们使用每个城市的活跃用户日度平均电力消费量作为被解释变量, 用来衡量城市居民家庭的日度平均电力消费水平。

(二) 空气质量数据集

空气质量数据包括全国各城市每日空气质量指数 (AQI)、主要污染物浓度和空气质量等级等信息。我们用中国生态环境部发布的每日空气质量指数 (AQI) 来衡量空气质量变量。AQI 的计算取决于不同污染物的浓度: 包括 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 NO_2 、 SO_2 、CO 和 O_3 。AQI 分别计算上述所有污染物的数值, 并报告其中的最大值。

图 1 展示了我们的样本中每日主要污染物的分布情况。我们发现, 样本期内报告频率最高的污染物是 O_3 , 高达 31.8%, 其次是 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} , 分别为 23% 和 19.6%。另

^① 样本覆盖 144 个地级市, 若以 2010 年人口普查数据计算, 覆盖人口约 7.5 亿, 占总人口比例为 56.6%。

外，样本期内还有 21.6% 的天数空气质量为优（即 $AQI \leq 50$ ），没有报告主要污染物类型。

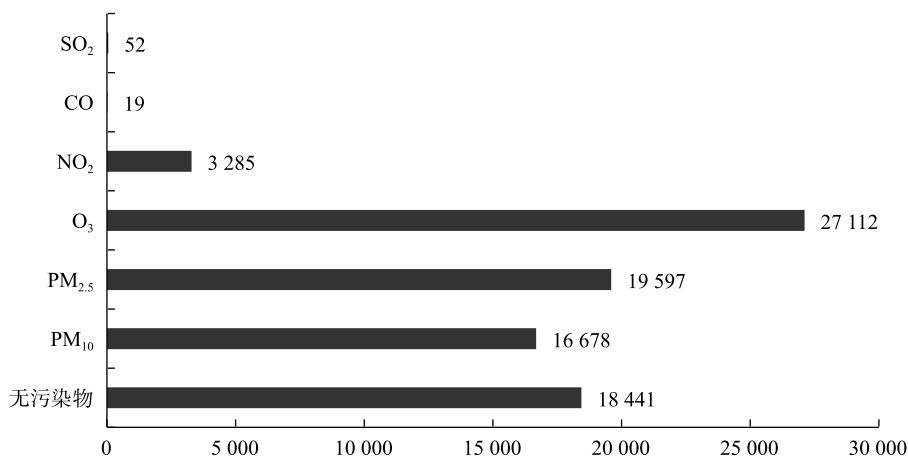


图 1 2018—2019 年样本城市每日报告的主要污染物分布情况

注：横坐标轴为样本中报告某类主要污染物的总天数。所有污染物的累计报告天数略多于样本数，是因为有些天会报告两种或两种以上主要污染物。

由于各国的空气质量指数（AQI）分级存在差异，为了便于将我们的估计结果与其他国家的研究结果对比，在基准模型里，我们同时也考察了 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 对电力消费的影响。

（三）气象条件数据集

气象数据来自美国国家环境信息中心（NCEI）发布的 Global Surface Summary of the Day（GSOD）数据集。GSOD 提供了中国八百多个气象观测站的地面日度观测数据。如果一个城市有多个气象观测站，我们计算该城市所有气象站相应指标的平均值，并将其作为该城市当天的气象条件的测度。本文用到的气象条件变量包括温度、风速、降雨量以及异常天气哑变量（雨、雾、霜、雪、雷暴）。此外，我们还使用 GSOD 的露点和温度数据计算了相对湿度。^①

（四）风向数据集

美国国家环境信息中心（NCEI）提供了气象观测站的日度风向数据。^② 这个数据集提供了每 3 小时 1 次的、以正北方向作为基准，吹过该监测站的风的平均风速和风向。风向的变化范围是 0 到 359 度。^③ 我们选择每日出现次数最多的风向作为当天的主导风向。如果出现次数最多的风向不止一个，则选择平均风速最大的风向作为当日的主导风向。

表 1 报告了主要变量的描述性统计情况。

① 相对湿度根据露点和气温计算得出，计算公式详见 <http://bmcnoldy.rsmas.miami.edu/Humidity.html>

② 数据来自 NCEI 官方网站，下载地址：<https://www.ncei.noaa.gov/access>，访问时间：2020 年 10 月 20 日。

③ 有些监测站的风向数据频率为 30 分钟 1 次。

表 1 描述性统计

变量	样本量	均值	标准误	最小值	最大值
地级市 <i>Elec</i> (kW·h)	83 940	11.48	2.88	5.66	25.79
其中: 城镇家庭 <i>Elec</i> (kW·h)	83 330	11.91	3.29	5.63	27.38
农村家庭 <i>Elec</i> (kW·h)	82 312	11.01	2.75	5.80	24.31
<i>PM</i> ₁₀	83 940	77.60	56.68	4	1 588
<i>PM</i> _{2.5}	83 940	42.75	34.15	1	536
<i>AQI</i>	83 940	81.58	43.88	10	500
<i>IV</i> _ <i>PM</i> ₁₀	83 940	36.98	39.63	0	654.02
<i>IV</i> _ <i>PM</i> _{2.5}	83 940	20.87	24.66	0	438.97
<i>IV</i> _ <i>AQI</i>	83 940	39.21	36.71	0.01	519.99
温度 (°C)	83 940	14.12	11.19	-32.89	35.11
风速 (m/s)	83 940	4.99	2.74	0	42.1
降雨量 (inch)	83 940	0.12	0.36	0	10.5
相对湿度	83 940	64.68	20.26	5.42	100
雾	83 940	0.10	0.30	0	1
雨	83 940	0.30	0.46	0	1
雪	83 940	0.03	0.18	0	1
霜	83 940	0.00	0.02	0	1
雷暴	83 940	0.01	0.08	0	1
<i>HDD</i> (°C)	83 940	0.39	1.16	0	9.11
<i>CDD</i> (°C)	83 940	2.36	5.16	0	40.89

注: *HDD* 和 *CDD* 分别表示日度制热指数 (heating degree for a day) 和日度制冷指数 (cooling degree for a day)。

三、计量模型设定与识别策略

(一) 计量模型设定

我们使用双向固定效应模型估计空气污染对城市活跃用户平均电力消费的影响。模型设定如下:

$$Elec_{id} = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot Pollution_{id} + \beta \cdot Weather_{id} + \delta_{iyr} + \delta_d + \epsilon_{id}, \quad (1)$$

其中, $Elec_{id}$ 为被解释变量, 它表示城市 i 第 d 天的活跃用户平均电力消费量。 $Pollution_{id}$ 是解释变量, 它表示城市 i 第 d 天的空气质量水平, 这里我们用三个变量来衡量, 分别为 AQI 、 PM_{10} 浓度和 $PM_{2.5}$ 浓度。

$Weather_{id}$ 为气象条件变量。研究发现, 温度、风速、降雨量和相对湿度这些气象条件会影响居民的电力消费 (Bessec and Fouquau, 2008; Akil and Miyauchi, 2010), 并且气象变量的影响可能是非线性的 (Arceo et al., 2016), 因此我们在所有模型中均控

制了温度、风速、相对湿度、降雨量以及这些气象变量的二次项。^① 同时我们还控制了异常天气哑变量，包括下雨、下雪、霜冻、起雾和雷暴。

为了缓解遗漏变量偏误，我们参考 Agarwal et al. (2021) 的做法，控制了“城市-年-周”固定效应和“日度(天)”固定效应。控制“城市-年-周”固定效应可以缓解那些随城市变化同时也会随时间变化(包括年、月和周)的不可观测因素对估计结果的影响，如2018年下半年第四次全国电价调整、各个城市的交通限行政策和季节效应等。控制“日度(天)”固定效应可以缓解那些不随城市变化但会随着时间变化而变化的不可观测因素对估计结果带来的偏误，例如节假日和周末效应。

参考 Agarwal et al. (2021) 的做法，我们使用双重聚类(two-way cluster)标准误，将所有回归的标准误聚类到“城市”和“日度(天)”层面，以解决序列相关导致的过度拒绝原假设的风险。

(二) 识别策略

虽然我们在基准模型中控制了最保守的固定效应，以尽可能控制不可观测的因素对估计结果的影响，但上述做法并不能完全解决内生性问题对模型估计结果带来的偏误。内生性来源主要有三个。第一，遗漏变量问题。例如，我们遗漏了口罩消费量，人们通过口罩减少室内停留时间，进而影响家庭电力消费。第二，可能存在反向因果问题。电力需求更高的城市，可能面临更大的电力供给压力，因而可能拥有更高的城市发电量。由于火力发电会增加污染物浓度，因此城市电力消费的提高可能会导致空气污染程度的加剧。第三，空气污染可以同时影响电力需求和供给，我们使用简约式模型对电力需求进行估计会产生偏误。

我们使用工具变量来缓解内生性问题。参考现有研究，我们使用目标城市每日上风向城市的空气污染物浓度基于距离和角度的加权平均作为目标城市当日空气污染物浓度的工具变量(Schlenker and Walker, 2016; Jia and Ku, 2019; Zheng et al., 2019)。由于风可以把上风向城市的污染物传输到目标城市，这为目标城市的污染物浓度带来了外生变异(Zheng et al., 2019)。这些外生的变异不太可能通过其他渠道影响目标城市的社会和经济行为，因此它是一个理想的工具变量(Barwick et al., 2021; Zheng et al., 2019)。工具变量(IV)的具体构造如下：

$$IV_{id} = \sum_j \max(\cos\theta_{idj}, \cos(\pm 45^\circ)) \times Pollution_{jd} / e^{d_{ij}}, 60\text{km} \leq d_{ij} \leq 300\text{km},$$

其中， $Pollution_{jd}$ 是城市 j 第 d 天的空气污染物浓度。 θ_{idj} 为目标城市 i 第 d 天的风向以及城市 j 到目标城市 i 的方向的夹角。 d_{ij} 表示目标城市 i 和城市 j 之间的地理距离，单位为百千米。我们参考 Zheng et al. (2019) 的做法，排除了距离目标城市 i 60km 以内及 300km 以外的城市。因为距离 60km 以内的两个城市可能会因为集聚经济导致经济活动的相关性，而距离 300km 以外则可能因为距离太远而损失工具变量的效率。^② 最后，我们选择 90 度风向夹角范围为有效风向。我们将在稳健性检验部分报告其他风向的估计结果。

^① 例如，当温度极低时，家庭用电会随着温度的下降而增多；当温度极高时，家庭用电反而会随着温度的上升而增加，电力消费对温度的响应整体上呈“U”形(Li et al., 2018)。

^② 距离的选择可以参考 Lai et al. (2021) 和 Zheng et al. (2019)。

参考 Zheng et al. (2019), 我们绘制了风向图^①以展示工具变量的构造方法。其中, 城市 A 为目标城市, 城市 B、C、D 和 E 为邻近城市, 箭头表示当天 A 的主导风向。B 的质心到 A 的质心连线与风向的夹角 θ_{ab} 小于 90 度, 故可认为 B 对 A 的空气质量的影响程度为 $\cos\theta_{ab} \times Pollution_b / e^{d_{ab}}$, 同理, C 距离 A 较远且风向与城市质心连线的夹角 θ_{ac} 大于 θ_{ab} , 所以 C 的空气污染对 A 的空气质量影响较小。我们使用 B 和 C 的空气质量按距离的加权平均构成 A 的空气质量的工具变量。另外, 我们的工具变量构造不包括 D 和 E, 因为 D 的夹角超过了 90 度, E 距离 A 超过了 300km。

四、实证结果

(一) 基准结果

表 2 各列分别报告了 AQI、 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 对城市活跃家庭用户电力消费的影响。奇数列和偶数列分别报告了单重聚类(聚类在城市层面)和双重聚类标准误(城市 and 天)的估计结果。我们发现, 双重聚类确实提高了估计标准误, 因而减低了序列相关导致的过度拒绝原假设的风险。因此我们将双重聚类标准误的结果作为基准结果报告。

表 2 结果表明, AQI 每增加 1, 会导致城市活跃居民日度平均电力消费增加 0.001 千瓦·时。然而, PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的效应不显著。这个结果是符合直觉的, 人们通常会根据接收到的空气质量信息(即当日的 AQI 指数及其对应的空气质量等级)判断是否需要采取规避行为。^② 总的来说, 人们只会对 AQI 做出反应, 较差的空气质量等级播报会导致人们减少户外出行, 进而导致了家庭电力消费量的增加。同时, AQI 的计算取决于不同污染物的浓度, 包括 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 NO_2 、 SO_2 、CO 和 O_3 。AQI 的数值取决于上述各类污染物的分指数, 并取所有分指数中的最大值。因此, 这六类污染物对家庭电力消费的影响取决于它们在所有样本中对 AQI 的贡献。图 1 表明, AQI 的计算中, 31.8% 的天数由臭氧决定, 仅有 19.6% 和 23% 的天数由 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 决定。不难看出, 样本期间主导 AQI 变化的是臭氧, 这意味着相比臭氧, 其他污染物在时空上的差异和 AQI 关联较弱。因此, 我们没有观测到 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 对家庭电力消费的显著影响。我们也在附录 I 表 A2 和表 A3 中提供了其他四类污染物对家庭电力消费影响的估计结果, 发现几乎所有污染物的影响都为正, 但只有臭氧的估计系数具有统计意义上的显著性。

表 2 空气污染对城市活跃用户平均电力消费的影响 (OLS)

	被解释变量: Elec					
	AQI (1)	AQI (2)	PM_{10} (3)	PM_{10} (4)	$PM_{2.5}$ (5)	$PM_{2.5}$ (6)
Pollution	0.0010*** (0.0002)	0.0010*** (0.0002)	0.0003** (0.0001)	0.0003 (0.0002)	0.0002 (0.0002)	0.0002 (0.0004)

① 见附录 I 图 A1。篇幅所限, 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。

② 附录 I 表 A1 报告了 AQI 等级划分标准以及推荐的规避行为。

(续表)

	被解释变量: <i>Elec</i>					
	<i>AQI</i>	<i>AQI</i>	<i>PM</i> ₁₀	<i>PM</i> ₁₀	<i>PM</i> _{2.5}	<i>PM</i> _{2.5}
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Control	是	是	是	是	是	是
City-Year-Week FE	是	是	是	是	是	是
Day FE	是	是	是	是	是	是
<i>N</i>	83 622	83 622	83 622	83 622	83 622	83 622
<i>R</i> -squared	0.942	0.942	0.942	0.942	0.942	0.942
Cluster	one-way	two-way	one-way	two-way	one-way	two-way

注:*、**和***分别表示10%、5%和1%的显著性水平。控制变量包括平均温度、风速、降雨量、湿度以及这些气象变量的平方。控制变量还包括异常天气(雨、雪、雾、霜、雷暴)。本文后面所有回归的默认控制变量均与表2相同,故不再赘述。

表3报告了两阶段最小二乘法的回归结果。Panel A为第一阶段回归,结果表明当风从附近城市吹往目标城市时,目标城市的*AQI*、*PM*₁₀和*PM*_{2.5}分别与附近城市的*AQI*、*PM*₁₀和*PM*_{2.5}的加权平均值显著正相关,同时Kleibergen-Paap rk Wald *F*统计量拒绝了弱工具变量原假设。Panel B为第二阶段回归结果。结果表明,*AQI*每增加1个单位,会导致每日城市活跃用户平均电力消费增加0.0012kW·h。*PM*₁₀和*PM*_{2.5}的估计结果依然不显著。工具变量回归的结果与基准回归的结果是一致的。为了便于比较,我们将估计的结果进行标准化。即*AQI*每提高1个标准差,会导致城市活跃用户平均电力消费增加0.053kW·h,或0.06%。需要指出的是,由于家庭电力消费中有一部分属于非防御性支出,因此我们估计的结果是空气污染导致以电力消费衡量的家庭防御性支出的上限(upper bound)。

表3 空气污染对城市活跃用户平均电力消费的影响(2SLS)

Panel A		一阶段回归结果					
变量	<i>AQI</i>	<i>AQI</i>	<i>PM</i> ₁₀	<i>PM</i> ₁₀	<i>PM</i> _{2.5}	<i>PM</i> _{2.5}	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	
<i>IV_Pollution</i>	0.3100*** (0.0158)	0.3100*** (0.0177)	0.4179*** (0.0346)	0.4179*** (0.0390)	0.3779*** (0.0179)	0.3779*** (0.0204)	
Panel B		二阶段回归结果					
被解释变量: <i>Elec</i>							
变量	<i>AQI</i>	<i>AQI</i>	<i>PM</i> ₁₀	<i>PM</i> ₁₀	<i>PM</i> _{2.5}	<i>PM</i> _{2.5}	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	
<i>Pollution</i>	0.0012*** (0.0004)	0.0012*** (0.0004)	0.0001 (0.0002)	0.0001 (0.0003)	-0.0004 (0.0005)	-0.0004 (0.0006)	
Control	是	是	是	是	是	是	
City-Year-Week FE	是	是	是	是	是	是	

(续表)

变量	二阶段回归结果					
	被解释变量: <i>Elec</i>					
	<i>AQI</i>	<i>AQI</i>	<i>PM</i> ₁₀	<i>PM</i> ₁₀	<i>PM</i> _{2.5}	<i>PM</i> _{2.5}
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Day FE	是	是	是	是	是	是
N	83 622	83 622	83 622	83 622	83 622	83 622
R-squared	0.037	0.037	0.036	0.036	0.035	0.035
Cluster	one-way	two-way	one-way	two-way	one-way	two-way
K-P rk F 统计量	385.704	305.729	146.010	115.013	444.137	343.860

注: *、**和***分别表示10%、5%和1%的显著性水平。

表4展示了文献中其他地区的空气污染对家庭电力消费影响的估计结果。不难发现,即使中国的空气污染程度要比发达国家严重得多^①,但中国居民家庭电力消费对于空气污染的响应程度依然明显低于发达国家。中国居民较低的污染规避行为的一个可能的后果便是事后较高的医疗支出,这也与Barwick et al. (2021)估计出的较高的空气污染的医疗成本相一致。

表4 文献的估计结果比较

文献	数据	方法	空气污染对电力消费的影响
本文	中国2018—2019年城市-日度电力消费数据	风向IV	<i>AQI</i> : 0.06%
Yi et al. (2020)	中国劳动力动态调查数据(2013年和2015年,家庭-年度数据)	逆温IV	不可比
He et al. (2020)	美国凤凰城2013—2018年家庭日度-小时电力消费数据	风向IV	<i>PM</i> _{2.5} : 1.74% <i>PM</i> ₁₀ : 0.85%
Eom et al. (2020)	韩国2017年7月—2018年3月853个家庭的小时电力消费数据	风向IV	<i>PM</i> _{2.5} : 2.88%
Salvo (2020)	新加坡2012年9月—2015年12月家庭-月度电力消费数据	工具变量(火灾强度、逆温频度)	<i>PM</i> _{2.5} : 1.31%

注:“空气污染对电力消费的影响”表示1单位污染物浓度增加1个标准差导致电力消费增加的百分比。Yi et al. (2020)的回归模型中自变量为每年 $PM_{2.5}$ 大于75 $\mu g/m^3$ 的天数,故该结果与其他研究较不具有可比性。

(二) 稳健性检验^②

考虑到气温对电力消费的非线性影响,我们分别尝试了控制极端气温和温度区间来检验结果的稳健性;此外,我们也尝试选择不同的距离阈值和夹角范围来构造工具变量,其估计结果与基准回归一致。

① 我们的样本中 $PM_{2.5}$ 的均值为42.75,韩国样本中 $PM_{2.5}$ 的均值是25.4,新加坡样本中 $PM_{2.5}$ 的均值是22.3,美国凤凰城的样本中 $PM_{2.5}$ 的均值为8.07。

② 稳健性检验部分见附录II。

(三) 空气污染对电力消费的非线性影响

空气污染的非线性效应首先会体现在不同的污染等级。中国自 2013 年开始报告日度空气质量指数 (AQI)。我们认为, 人们会对每日播报的 AQI 等级做出反应。当播报的 AQI 等级较高, 即污染比较严重时, 人们将更不愿意暴露在空气污染中, 从而更多地待在家中, 导致更高的家庭电力消费。表 5 选择 AQI 小于或等于 50 的样本作为基准组, 结果表明, 当 AQI 播报等级为良时人们即会做出反应, 当重度污染和严重污染时反应更为强烈, 同时系数随着播报等级的增加而加大 (严重污染的系数是“良”系数的 4 倍)。这表明, 与 AQI 播报等级为优的情况相比, 当 AQI 播报等级为良及以上时, 人们会更有可能采取污染规避行为, 减少户外活动, 使得家庭电力消费的显著增加。同时, 这个效应会随着 AQI 播报的污染等级的提高而加剧。

表 5 AQI 播报等级对活跃用户电力消费的影响

变量	<i>Elec</i> (1)	$\log(Elec)$ (2)
AQI 播报等级:		
良 ($50 < AQI \leq 100$)	0.0633*** (0.0167)	0.0049*** (0.0013)
轻度污染 ($100 < AQI \leq 150$)	0.1122*** (0.0240)	0.0089*** (0.0018)
中度污染 ($150 < AQI \leq 200$)	0.1518*** (0.0369)	0.0123*** (0.0028)
重度污染 ($200 < AQI \leq 300$)	0.1233*** (0.0449)	0.0110*** (0.0033)
严重污染 ($AQI > 300$)	0.2646*** (0.0923)	0.0221*** (0.0074)
Control	是	是
City-Year-Week FE	是	是
Day FE	是	是
N	83 622	83 622
R-squared	0.942	0.951
Cluster	two-way	two-way

注: *、**和***分别表示 10%、5%和 1%的显著性水平。

空气污染的非线性效应还会体现在城市层面。在一些重污染的城市中, 家庭更有可能购买空气净化器或空调以便在空气污染严重的日子使用。但是, 在低污染的城市, 即使偶尔有污染高的日子, 但因为其频率较低, 购买相关设备的家庭较少, 从而无法在污染严重的日子使用。附录表 A4 报告了按不同空气污染程度的城市分组的结果。我们按

照污染播报等级,将两年内平均AQI小于或等于50的城市定义为“空气质量优”的城市,将51—100之间的城市定义为“良”,将AQI大于或等于101的城市定义为“污染”。我们发现,空气质量“优”的城市的居民不会因为空气污染的增加而提高家庭电力消费,但是,空气质量“良”以及“污染”的城市居民的电力消费水平则会随着空气污染程度的上升而增加。^①

(四) 异质性分析

表6报告了空气污染对城镇活跃用户平均电力消费和农村活跃用户平均电力消费的影响。^②我们发现,空气污染程度的上升显著提高了城镇活跃用户的电力消费,但没有影响农村用户的电力消费水平。

表6 空气污染对城镇活跃用户和农村活跃用户电力消费的影响(2SLS)

变量	城镇居民	城镇居民	农村居民	农村居民
	<i>Elec</i>	$\log(Elec)$	<i>Elec</i>	$\log(Elec)$
	(1)	(2)	(3)	(4)
AQI	0.0016*** (0.0005)	0.0001*** (0.0000)	0.0007 (0.0005)	0.0001* (0.0000)
Control	是	是	是	是
City-Year-Week FE	是	是	是	是
Day FE	是	是	是	是
N	82 993	82 993	81 999	81 999
R-squared	0.039	0.043	0.037	0.043
Cluster	two-way	two-way	two-way	two-way
K-P rk F 统计量	320.923	320.923	308.846	308.846

注:*,**和***分别表示10%、5%和1%的显著性水平。

为了探究空气污染对不同收入水平城市的居民电力消费的影响,我们按照2018—2019年城市年均人均GDP对样本城市进行分组。将人均GDP前50%的城市定义为高收入城市,后50%的城市定义为低收入城市。附录表A5报告了这一结果。我们发现,空气污染对城市居民电力消费的影响只有在高收入城市中才具有统计显著性。

(五) 污染规避行为的证据

我们希望为空气污染导致人们更多地待在家里这一假设提供更多的经验证据。空气污染会导致家庭居民产生规避行为,但在不同时段居民对于规避行为的选择是不同的。具体来说,工作日的时候,在白天,居民没办法通过留在家里这一手段来避免暴露在空气污染中,因为他们需要工作(Yi et al., 2020),因此空气污染只会影响居民晚上的电

^① “优”级城市的估计中,K-P rk F 统计量表明该工具变量是弱工具变量,但这不会影响我们的结论。因为弱工具变量可能会导致我们过度拒绝原假设,但不显著的结果依然可信。

^② 地级市城镇和农村活跃用户平均电力消费均来自该市所有城镇居民和农村居民电表数据的加总。

力消费。而周末的白天，由于假期比较短（考虑到加班，通常只有 1 天），空气污染严重时人们更有可能减少户外活动，更多地留在室内，导致整天的电力消费都会增加。表 7 报告了这一检验的结果。(1)–(3) 列的结果表明，在工作日的时候（考虑了法定节假日的调休），空气污染对城市活跃用户平均电力消费的影响显著为正，周末时效应不仅显著为正，并且这个效应比工作日大很多（AQI 的周末效应是工作日效应的 1.4 倍）。节假日的效应为正但统计上不显著。在第 (4) 列中我们将周末和节假日定义为非工作日，我们发现非工作日时 AQI 对电力消费的影响是工作日的 1.7 倍。考虑到周六加班在最近这些年非常常见，我们在 (5)–(6) 列中把周六也定义为工作日，重新进行估计。我们发现，考虑加班后，非工作日时 AQI 对电力消费的影响是工作日的 3.3 倍。表 7 的结果表明，在空气污染严重的日子里，人们确实会在室内停留更长的时间，以避免暴露在空气污染中，从而表现出更高的电力消费水平。

表 7 工作日、周末和节假日空气污染对电力消费的影响 (2SLS)

变量	被解释变量: <i>Elec</i>					
	工作日	周末	节假日	非工作日	工作日 (加班)	非工作日 (加班)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
AQI	0.0007*** (0.0002)	0.0010** (0.0005)	0.0010 (0.0008)	0.0012** (0.0005)	0.0006*** (0.0002)	0.0020** (0.0009)
Control	是	是	是	是	是	是
City-Year-Week FE	是	是	是	是	是	是
Day FE	是	是	是	是		
N	56 906	19 412	5 718	23 725	66 174	16 436
R-squared	0.062	0.023	0.071	0.036	0.066	0.058
Cluster	two-way	two-way	two-way	two-way	two-way	two-way
K-P rk F 统计量	265.167	41.046	72.000	90.808	303.684	87.483

注：*、**和***分别表示 10%、5%和 1%的显著性水平。所有回归的工作日、周末和节假日均已做调休处理，即调休后需要上班的周末被定义为工作日。

为了进一步检验“空气污染会导致家庭居民产生规避行为”这一假说，我们使用上海电信 2018 年 10 月至 12 月 92 天的手机信令数据生成了个体户外时长以检验空气污染对于居民户外时长的影响。附录 III 报告了相应结果。我们发现，AQI 每提高 100 会导致居民的户外活动时长减少约 20 分钟。这个效应非常小，可能的原因是样本期内上海市的空气质量比较好（样本期内上海市 AQI 均值为 43，远低于全国平均水平——AQI 均值 81.6），从而平均意义上无法观测到较大的反应。

(六) 清洁空气支付意愿与额外成本

最后我们计算了基于城市家庭平均电力消费角度衡量的清洁空气支付意愿。样本中 AQI 均值为 81.58，如果空气质量达到 WHO 规定的标准（AQI 不高于 20）的上限，则城市活跃用户每日平均电力消费将会减少 0.074 kW·h，年均电力消费会减少 26.97 kW·h。

中国居民电价一般为每度电 0.542 元,空气质量的改善将使得城市活跃用户家庭每年节省约 14.6 元电费。根据第六次全国人口普查主要数据公报,中国约有 4.94 亿家庭户,如果空气质量达到 WHO 标准,则全国每年电力消费将会减少 125.1 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$,这也意味着全国家庭户每年总共可以减少近 72.12 亿元的电费开支。

最后,我们计算了空气污染导致的电力消费增长带来的碳排放。我们参考何迎等(2020),使用国家温室气体清单指南的方法计算了 2018—2019 年中国电力碳排放强度,即 $616.71\text{ g}/\text{kW}\cdot\text{h}$ 。如果空气质量达到 WHO 标准,则全国电力消费将会减少 125.1 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$,这意味着会减少 776 万吨电力碳排放,占中国 2019 年碳排放总量(98 亿吨)的 0.08%。

五、结论和政策意义

本文以风向作为空气污染的工具变量,利用国家电网中国电力科学研究院(CEPRI)提供的电力消费数据估计了空气污染对居民家庭用电的影响。我们的研究表明,AQI 每增加 1 个标准差会导致城市活跃用户每天的平均电力消费增加 $0.05\text{kW}\cdot\text{h}$ (或 0.06%)。即使我们估计的电力消费衡量的防御性支出是上限(upper bound),但这个上限代表的防御性行为依然远远低于发达国家。这也意味着事后较高的医疗支出成本。我们还发现人们的规避行为会随着空气污染程度的加剧而加强。异质性分析表明,AQI 增加会显著提高城镇居民的电力消费,但对农村居民的影响则不显著。同时,AQI 增加会显著提高高收入居民的电力消费,但对低收入居民的影响不显著。机制分析表明,AQI 对居民电力消费的影响是通过减少居民户外活动时间实现的。

最后,我们计算了清洁空气的支付意愿和空气污染带来的额外损失。我们发现,家庭用户每年愿意为清洁空气多支付 14.6 元电费。如果空气质量达到 WHO 标准,全国每年平均电力消费则会减少 125.1 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$,这意味着全国居民家庭每年可以少支付 72.12 亿元电费,这也意味着会减少 776 万吨电力碳排放。

我们的研究具有较强的政策意义。第一,由于空气污染和电力消费之间存在强烈的正反馈机制,即“空气污染提高—电力需求增加—电力供给增加—电力生产导致的空气污染增加”。政府应该加强对空气污染的治理,通过上述反馈机制使均衡电力消费移动至更低水平,为实现“碳中和”目标提供重要助力。第二,虽然中国自 2013 年以来已经建立了较为完善的空气污染监测和播报体系,但我们发现整体上居民的污染规避意识依然非常弱(远小于发达国家)。政府应该进一步加大空气污染对健康危害的宣传工作,提高人们的污染规避意识,以尽量避免空气污染对健康的损害,这对我国长期人力资本积累也具有非常重要的意义。

参考文献

- [1] Agarwal, S., Y. Qin., L. Shi, G. Wei, and H. Zhu, “Impact of Temperature on Morbidity: New Evidence from China”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 2021, 109 (5), 102495.
- [2] Akil, Y. S., and H. Miyauchi, “Elasticity Coefficient of Climatic Conditions for Electricity Consumption Analy-

- sis”, 2010 *International Conference on Power System Technology*, 2010, 1-6.
- [3] Arceo, E., R. Hanna, and P. Oliva, “Does the Effect of Pollution on Infant Mortality Differ Between Developing and Developed Countries? Evidence from Mexico City”, *Economic Journal*, 2016, 126 (591), 257-280.
- [4] Barwick, P. J., S. Li, D. Rao, and N. B. Zahur, “The Morbidity Cost of Air Pollution: Evidence from Consumer Spending in China”, *NBER Working Paper*, 2021, No. 24688.
- [5] Bessec, M., and J. Fouquau, “The Non-linear Link between Electricity Consumption and Temperature in Europe: A Threshold Panel Approach”, *Energy Economics*, 2008, 30, 2705-2721.
- [6] Brauer, M., G. Freedman, J. Frostad et al., “Ambient Air Pollution Exposure Estimation for the Global Burden of Disease 2013”, *Environmental Science Technology*, 2016, 50 (1), 79-88.
- [7] Chen, S., P. Oliva, and P. Zhang, “The Effect of Air Pollution on Migration: Evidence from China”, *Journal of Development Economics*, 2022, 102833.
- [8] Chen, S., P. Oliva, and P. Zhang, “Air Pollution and Mental Health: Evidence from China”, *NBER Working Paper*, 2018, No. 24686.
- [9] 陈帅、张丹丹, “空气污染与劳动生产率——基于监狱工厂数据的实证分析”, 《经济学》(季刊), 2020 年第 4 期, 第 1315—1334 页。
- [10] Chen, X., C. M. Tan, X. Zhang, and X. Zhang, “The Effects of Prenatal Exposure to Temperature Extremes on Birth Outcomes: The Case of China”, *Journal of Population Economics*, 2020, 33, 1263-1302.
- [11] Chen, Y., A. Ebenstein, M. Greenstone, and H. Li, “Evidence on the Impact of Sustained Exposure to Air Pollution on Life Expectancy from China’s Huai River Policy”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110 (32), 12936-12941.
- [12] 陈永伟、陈立中, “为清洁空气定价: 来自中国青岛的经验证据”, 《世界经济》, 2012 年第 4 期, 第 140—160 页。
- [13] Deryugina, T., G. Heutel, N. H. Miller, and D. Molitor, “The Mortality and Medical Costs of Air Pollution: Evidence from Changes in Wind Direction”, *American Economic Review*, 2019, 109 (12), 4178-4219.
- [14] Ebenstein, A., M. Fan, M. Greenstone, G. He, and M. Zhou, “New Evidence on the Impact of Sustained Exposure to Air Pollution on Life Expectancy from China’s Huai River Policy”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114 (39), 10384-10389.
- [15] Ebenstein, A., M. Fan, M. Greenstone, G. He, P. Yin, and M. Zhou, “Growth, Pollution, and Life Expectancy: China from 1991—2012”, *American Economic Review*, 2015, 105 (5), 226-231.
- [16] Eom, J., M. Hyun, J. Lee, and H. Lee, “Increase in Household Energy Consumption due to Ambient Air Pollution”, *Nature Energy*, 2020, 5, 976-984.
- [17] Eom, Y. S., J. O. Kim, and S. E. Ahn, “Measuring Willingness to Pay for PM₁₀ Risk Reductions: Evidence from Averting Expenditures for Anti-PM₁₀ Masks and Air Purifiers”, *Environmental and Resource Economics Review*, 2019, 28 (3), 355-383. (in Korean)
- [18] Fu, S., V. B. Viard, and P. Zhang, “Trans-boundary Air Pollution Spillovers: Physical Transport and Economic Costs by Distance”, *Journal of Development Economics*, 2022, 155, 102808.
- [19] Graff Zivin, J., and M. Neidell, “Days of Haze: Environmental Information Disclosure and Intertemporal Avoidance Behavior”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 2009, 58 (2), 119-128.
- [20] Graff Zivin, J., and M. Neidell, “The Impact of Pollution on Worker Productivity”, *American Economic Review*, 2012, 102 (7), 3652-3673.
- [21] Greenstone, M., and R. Hanna, “Environmental Regulations, Air and Water Pollution, and Infant Mortality in India”, *American Economic Review*, 2014, 104 (10), 3038-3072.
- [22] Hanna, R., and P. Oliva, “The Effect of Pollution on Labor Supply: Evidence from a Natural Experiment in Mexico City”, *Journal of Public Economics*, 2015, 122, 68-79.
- [23] 韩璇、赵波, “‘奢侈’的蓝天——房价中的优质空气溢价估计及其异质性”, 《经济学》(季刊), 2021 年第 3

- 期, 第755—774页。
- [24] He, J., H. Liu, and A. Salvo, "Severe Air Pollution and Labor Productivity: Evidence from Industrial Towns in China", *American Economic Journal: Applied Economics*, 2019, 11 (1), 173—201.
- [25] He, P., J. Liang, Y. L. Qiu, Q. Li, and B. Xing, "Increase in Domestic Electricity Consumption from Particulate Air Pollution", *Nature Energy*, 2020, 5, 985-995.
- [26] 何迎、邢园通、汲奕君、张磊, "我国电力行业碳排放影响因素及区域差异研究", 《安全与环境学报》, 2020年第20卷第6期, 第2343-2350页。
- [27] Ito, K., and Zhang, S., "Willingness to Pay for Clean Air, Evidence from Air Purifier Markets in China", *Journal of Political Economy*, 2020, 128 (5), 1627-1672.
- [28] Jia, R., and H. Ku, "Is China's Pollution the Culprit for the Choking of South Korea? Evidence from the Asian Dust", *Economic Journal*, 2019, 129 (624), 3154-3188.
- [29] Lai, W., H. Song, C. Wang, and H. Wang, "Air Pollution and Brain Drain: Evidence from College Graduates in China", *China Economic Review*, 2021, 68, 101624.
- [30] Levinson, A., "Valuing Public Goods Using Happiness Data: The Case of Air Quality", *Journal of Public Economics*, 2012, 96 (9-10), 869-880.
- [31] Li, X., F. Wagner, W. Peng, J. Yang, and D. L. Mauzerall, "Reduction of Solar Photovoltaic Resources due to Air Pollution in China", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114 (45), 11867-11872.
- [32] 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*, 2018, 116 (2), 472-477.
- [33] 李明、张亦然, "空气污染的移民效应——基于来华留学生高校—城市选择的研究", 《经济研究》, 2019年第6期, 第168—182页。
- [34] Liu, T., G. He, and A. Lau, "Avoidance Behavior against Air Pollution: Evidence from Online Search Indices for Anti-PM_{2.5} Masks and Air Filters in Chinese Cities", *Environmental Economics and Policy Studies*, 2018, 20 (2), 325-363.
- [35] 刘欢、席鹏辉, "中国存在环境移民吗? ——来自空气质量指数测算改革的自然实验", 《经济学动态》, 2019年第12期, 第38—54页。
- [36] Noonan, D. S., "Information, Avoidance Behavior, and Health: The Effect of Ozone on Asthma Hospitalizations", *Policy Studies Journal*, 2014, 42 (1), 122-145.
- [37] 祁毓、卢洪友, "污染、健康与不平等——跨越‘环境健康贫困’陷阱", 《管理世界》, 2015年第9期, 第32—51页。
- [38] Qin, Y., and H. Zhu, "Run Away? Air pollution and Emigration Interests in China", *Journal of Population Economics*, 2018, 31 (1), 235-266.
- [39] Saberian, S., A. Heyes, and N. Rivers, "Alerts Work! Air Quality Warnings and Cycling", *Resource and Energy Economics*, 2017, 49, 165-185.
- [40] Salvo, A., "Local Pollution as a Determinant of Residential Electricity Demand", *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 2020, 7 (5), 837-872.
- [41] Schlenker, W., and W. R. Walker, "Airports, Air Pollution, and Contemporaneous Health", *Review of Economic Studies*, 2016, 83 (2), 768-809.
- [42] Sweerts, B., S. Pfenninger, S. Yang, D. Folini, B. van der Zwaan, and M. Wild, "Estimation of Losses in Solar Energy Production from Air Pollution in China since 1960 using Surface Radiation Data", *Nature Energy*, 2019, 4, 657-663.
- [43] Tong, Z., Y. Chen, A. Malkawi, Z. Liu, and R. B. Freeman, "Energy Saving Potential of Natural Ventilation in China: The Impact of Ambient Air Pollution" *Applied Energy*, 2016, 179, 660-668.
- [44] 王玉泽、罗能生, "空气污染、健康折旧与医疗成本——基于生理、心理及社会适应能力三重视角的研究", 《经济研究》, 2020年第12期, 第80—97页。

- [45] 王兆华、马俊华、张斌、王博, “空气污染与城镇人口迁移: 来自家庭智能电表大数据的证据”, 《管理世界》, 2021 年第 3 期, 第 19—33 页。
- [46] Ward, A. L. S., and T. K. M. Beatty, “Who Responds to Air Quality Alerts?”, *Environmental and Resource Economics*, 2016, 65 (2), 487-511.
- [47] Wilkening, K. E., L. A. Barrie, and M. Engle, “Trans-Pacific Air Pollution”, *Science*, 2000, 290 (5489), 65-67.
- [48] World Health Organization, “Ambient Air Pollution: A Global Assessment of Exposure and Burden of Disease”, 2016.
- [49] 杨继东、章逸然, “空气污染的定价: 基于幸福感数据的分析”, 《世界经济》, 2014 年第 12 期, 第 162—188 页。
- [50] Yi, F., H. Ye, X. Wu, Y. Y. Zhang, and F. Jiang, “Self-aggravation Effect of Air Pollution: Evidence from Residential Electricity Consumption in China”, *Energy Economics*, 2020, 86, 104684.
- [51] Zhang, J., and Q. Mu, “Air Pollution and Defensive Expenditures: Evidence from Particulate-Filtering Face-masks”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 2018, 92, 517-536.
- [52] Zhang, X., X. Chen, and X. Zhang, “The Impact of Exposure to Air Pollution on Cognitive Performance”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115 (37), 9193-9197.
- [53] Zheng, S., X. Zhang, W. Sun, and C. Lin, “Air Pollution and Elite College Graduates’ Job Location Choice: Evidence from China”, *Annals of Regional Science*, 2019, 63, 295-316.
- [54] Zhu, Y., Y. P. Li, G. H. Huang, and C. Chen, “Electric Power Systems Planning in Association with Air Pollution Control and Uncertainty Analysis”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014, 61, 563-575.

Air Pollution, Avoidance Behavior and Household Electricity Consumption —Evidence from Prefecture-Level Cities of China

CHEN Hanyi

(Dongbei University of Finance and Economics)

SHI Tie

(Jiaying University)

WANG Linfeng*

(Nanjing University of Finance and Economics)

ZHENG Angang

(China Electric Power Research Institute)

Abstract: Using the daily power consumption data of Chinese households from 2018 to 2019, we find one more standard deviation of Air Quality Index (AQI) will increase the daily residential electricity con-

* Corresponding Author: Wang Linfeng, School of Public Finance and Taxation, Nanjing University of Finance and Economics, No. 3 Wenyuan Road, Qixia District, Nanjing, Jiangsu 210023, China; Tel: 86-18150367092; E-mail: wanglirl@163.com.

sumption by 0.05kW·h. Thus the willingness to pay for clean air and the additional losses caused by air pollution are estimated; the households are willing to pay 14.6 CNY annually for clean air; if the air quality reach the WHO's standards, the country's annual power consumption would decrease by 12.51billion kW·h, which means the residents would pay 7.212 billion CNY less annually, what's more, 7.76 million tons of carbon emissions generated by electricity sector will be saved.

Keywords: electricity consumption; air pollution; avoidance behavior

JEL Classification: L94, Q51, Q53