



北京大学国家发展研究院
National School of Development

第十部分 城市与环境





路线图

- 空气污染的影响是什么？
 - 健康
 - 认知能力，例如分数
 - 行为，例如犯罪
- 为什么空气脏？
- 做了些什么？
 - 中国的“抗污染战争”
- 人们的反应是什么？
- 结果如何？

今天我们来聊一聊城市中的空气污染问题。大家知道，中国的空气质量并不是特别好，而且这已经是我们多年来努力的目标之一——提高国家的空气质量。特别是大家身处在北京，这里的空气质量问题更为突出，影响也更加深刻，大家的体会应该更加明显。

那么，空气污染究竟对我们有哪些影响？为什么它对我们不好？此外，我们国家在治理空气污染方面采取了哪些措施？人们对此有怎样的反应？我们又取得了哪些治理成效？今天我们主要会探讨这些内容。

空气污染的影响是什么？

- 健康
 - 死亡率
 - 短期与长期
 - 发病率
- 认知能力，例如分数
- 行为，例如犯罪

首先，空气污染对大家的影响主要表现在哪些方面呢？大家觉得有哪些？或者你们之前了解到的空气污染对我们的影响有哪些？比如说，它可能会增加医院中的死亡率，不知道大家是否知道，空气污染可能还会增加发病率，尤其是呼吸系统疾病的发病率。甚至有些文献发现，空气污染可能会影响我们的认知能力，特别是对于一些特定人群来说，可能会影响他们的认知能力。此外，空气污染可能还会对我们的行为产生影响。比如说，研究发现，当空气污染水平较高时，犯罪率也会有所上升。那么，我们先来看一下这个研究，看看它是否真实可靠。研究的作者是如何得出这些结论的？如果我们想做类似的研究，又该如何开展呢？

研究空气污染影响的挑战是什么？

- Y: 结果
 - 健康



- 认知能力
 - 行为
- X: 空气污染水平
 - AQI
 - PM10, PM2.5
 - NO2
- 关联意味着因果关系吗？
 - 影响 Y 的观察因素
 - 空间上人群的排序

首先，研究这样的问题时，你可能会面临的主要挑战之一，就是如何从相关性推断到因果性。比如，我们在做回归分析（**regression analysis**）时，可能会展示一个结构，左边是结果（**outcome**），包括健康（**health**）、认知能力（**cognitive ability**）或者人的行为（**behavior**），而右边是空气污染（**air pollution**）的强度（**intensity**）。例如，我们可以使用 **PM10**、**PM2.5**、**NO₂** 等指标。如果你做了这样的分析，可能会发现空气污染和死亡率（**mortality**）等结果之间存在正相关关系。

但这个时候，如何证明这两者之间存在因果关系，而不是仅仅是相关关系呢？从模型（**model**）角度来看，假设我们的结果是死亡率和空气质量。如果两者存在相关性，除了空气质量可能影响死亡率之外，还可能还有其他因素，如季节变化。例如，冬天空气质量可能变差，而寒冷的天气对老年人的健康影响较大，这可能导致死亡率上升。因此，看到的相关性并不意味着存在因果关系。

那么，如何从相关关系推导到因果关系呢？大家已经在学习因果推理了，对吧？我们之前也讨论过这个问题。最关键的研究设计是什么？控制变量（**control variables**）是其中一部分。比如，在这个例子中，我们可以控制温度，消除冬季天气的影响。这有助于减少偏差，但还有许多其他因素，可能是我们没有考虑到的，或者无法测量的，仍可能影响结果。这时候该怎么办呢？答案是随机分组（**randomized control**）。

这就是过去 20 年经济学研究的一大进步——通过随机分组解决经济变量之间的内生性问题。我举个例子：假设我要测试休息三天对工作效率的影响。假如今天我们安排一个考试，同时让大家填写问卷，记录是否在五一期间休息了三天以上。然后我进行回归分析，假设自变量（**x**）是是否休息三天，因变量（**y**）是考试成绩。假如你发现存在正相关关系，这意味着休息三天可以提高工作效率，但这种结论可能不准确，因为选择休息的人和选择不休息的人可能在其他方面有所不同。

比如，选择休息的同学可能平时听课时间较多，提前完成了作业，因此更容易取得高分；而选择不休息的同学，可能对考试不太在意，成绩反而较差。因此，单纯的相关分析无法揭示因果关系。为了解决这个问题，我们可以通过随机分组。假设我们有 100 个同学，把 50 人分为一组，另外 50 人分为另一组。让一组休息，另一组继续工作。然后比较两组同学的考试成绩，看看休息对工作效率的影响。

为什么随机分组能够帮助我们从相关关系走向因果关系？因为通过随机分组，两组同学的特征会变得相似，除了我们人为干预的因素（即休息与否）。这样，我们就可以通过比较两组的差异，推断休息对工作效率的因果影响。

通过这个方法，我们可以更准确地估计休息对工作效率的影响，避免低估或高估其作用。同理，在研究空气污染时，我们也可以采用类似的随机分组设计，确保能够从相关性推导出



因果关系，从而准确估计空气污染对健康或其他结果的影响。

短期暴露对死亡率的影响（每周、每月或至多每年）

- 死亡率上升
 - 2008 年北京奥运会
 - He 等（2016 年）估计 PM10 浓度减少 10% 会使每月标准化的全因死亡率下降 8%。



首先，我们来看空气污染对死亡率的影响。研究发现，短期暴露于较差空气质量的情况下，死亡率是会增加的。死亡率是指在医院中接受治疗的病人中，因病死亡的人所占的比例，计算公式是：死亡率 = 死亡人数 / 所有病人总数。

那么，如何来看空气污染和死亡率之间的关系呢？这篇文章通过研究 2008 年北京奥运会前后的空气质量变化，采用了一个近似的准随机实验设计来解决这个问题。研究发现，在奥运期间，北京的空气质量明显改善，空气污染水平得到了显著的降低。这个变化在某种程度上是外生的，类似于一个随机分组的实验。通过比较奥运期间与之前的空气质量以及医院中的死亡率数据，研究者能够揭示两者之间的因果关系。

研究发现，当 PM10（空气中的颗粒物）的浓度降低 10 个百分点时，死亡率大约会降低 8 个百分点。也就是说，如果空气质量变好，死亡率就会降低。

短期暴露对死亡率的影响（每周、每月或至多每年）

- 死亡率上升
 - 煤炭冬季供暖系统
 - Fan 等（2020 年）利用各城市冬季供暖系统启动的精确日期差异
 - 冬季供暖导致的 AQI 增加 10 个点会使死亡率增加 2.2%。

这是一项关于短期暴露（short-term exposure）的研究。另一项研究利用了冬季供暖期间，煤电厂燃烧煤炭所产生的污染物，这些污染物会导致空气中污染物浓度的突增。该研究利用了一个城市的煤电厂冬季供热的时间点，并与之前的空气质量数据进行比较。



供热本身是一个外生事件，意味着它不受经济变化等其他因素的影响。通过这种比较，研究者可以在实验框架下分析结果。研究发现，当空气质量指数（AQI）增加 10% 时，比如从 50 增加到 60，死亡率可能会增加 2.2 个百分点，这是短期的影响。

那么，长期影响又是怎样的呢？研究还发现，婴儿对空气污染的耐受能力较差，可能比其他群体更容易受到空气污染的负面影响。

短期暴露（每周、每月或最多每年）的死亡率影响

增加婴儿死亡率：

- Bombardini 和 Li (2020) 发现中国的出口扩张通过污染浓度影响婴儿死亡率。
- 贸易引发的污染，使用出口冲击。
- 污染增加一个标准差，婴儿死亡率增加 4.1 每千活产。

心肺疾病：

- 因心肺疾病过早死亡。
- 农民的秸秆焚烧行为。
- PM2.5 每增加 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，死亡率增加 3.25%。
- He 等 (2020)。

例如，李和他的团队在一篇研究中发现，在中国的城市扩张期间，空气污染的变化与工业化程度有很大关系。他们发现，当一个地区的出口量越大、工业越集中的时候，空气污染水平就会更高。研究表明，空气污染增加一个标准差，会导致婴儿死亡率增加大约 4.1 个每千名婴儿的死亡人数。

此外，空气污染对患有心肺疾病的人群也有显著影响。空气污染会使得本来有心肺疾病的人提前死亡。比如，2020 年一篇研究使用农民烧秸秆的行为作为外生冲击，发现当农民烧秸秆时，风向上游和下游地区的 PM2.5 浓度差异增加。如果 PM2.5 浓度每增加 10 微克每立方米，那么死亡率（mortality rate）会增加 3.256%。

短期暴露对死亡率的影响（每周、每月或至多每年）

- 婴儿死亡率上升
 - Bombardini 和 Li (2020 年) 发现中国的出口扩张通过污染浓度影响婴儿死亡率
 - 贸易引起的污染，使用出口冲击
 - 污染增加一个标准差导致婴儿死亡率每千个活婴增加 4.1 例

	Mean	Std	10 th	25 th	50 th	75 th	90 th
Panel A: IMR (number of deaths per 1000 births)							
IMR, 1982	36.105	24.659	14.648	20.037	28.729	45.096	66.790
IMR, 1990	31.428	23.915	11.420	16.239	24.198	39.084	61.088
SO2, 1992	86.354	76.636	20	39	64	104	173
SO2, 2000	43.445	38.757	12	19	31	55	92

接下来，我们可以进一步解读这篇文章中的一些具体内容。比如，"last deviation"（最后的标准差）是我们在回归分析中常用的一种标准化方法。那么，最后的标准差是多少呢？我们可以对数据进行一些总结，查看数据的均值、标准差，甚至可以进一步分析更细致的分



位数，比如 10 到 90 的分位数。

一旦标准差增加，你就可以将其与其他变量进行对比分析。例如，如果某一变量的标准差增加 24，死亡率就可能会在每千个婴儿中增加 4.1。这个水平其实是相当高的。让我们来看一下具体数据：如果 SO₂（二氧化硫）浓度水平增加 76，从 1992 年的 38 增加到现在的 76，那么在医院中每千个婴儿的死亡人数就可能会增加 4.1。这是一个很大的数字。

我们还可以看一下 SO₂ 的分布。例如，当 SO₂ 浓度处于较低水平时，可能是 20；而在高分位数，比如 90 分位数时，SO₂ 浓度可能达到 173。此时，SO₂ 浓度的增加已经超过了两个标准差，这意味着死亡率会在每千个出生婴儿中增加到 8，这个效应非常显著。

当然，大家可以查看原文研究，验证这些估计是否真实可靠。此外，这些估计值基于一定的假设，假设的不同可能会影响最终的结果。所有的估计都是基于平均值的，不同人群可能有不同的反应。例如，个人的体质、教育程度、行为方式等因素，都会影响他们对空气污染的反应。因此，文章中给出的这些数字只是大致的估计，具体细节可以通过进一步阅读原文进行深入了解。如果你感兴趣，可以去探索这篇文章。

长期暴露对死亡率的影响

- 预期寿命
 - 根据距离淮河的远近
 - Chen 等（2013 年）和 Ebenstein 等（2017 年）研究了长期污染暴露对寿命的影响
 - 两项研究发现，长期暴露于空气污染显著缩短了寿命
 - PM₁₀ 水平上升 46% 导致寿命损失 3.4 年
 - 或者 PM₁₀ 水平增加 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，寿命缩短 0.64 年
 - 淮河以北地区的冬季采暖政策提高了空气污染水平
 - Ebenstein 等（2017 年）

刚才我们讨论的是短期影响，那长期影响如何呢？

其中一个常用的衡量标准是预期寿命。陈和 Absten 等研究人员考虑到一个因素，可以用来作为长期影响的冲击来源——中国的供暖模式。中国的供暖有一个地区性的规定：淮河以北的地区从每年 10 月开始供暖，而淮河以南则没有强制供暖。北方人虽然生活在寒冷的环境中，但因为冬季有暖气，他们较怕冷，而南方人则没有集中供暖，因此冬天更能适应寒冷，抵抗能力相对更强。

作者利用这一地域差异作为研究的识别机制。因为北方的供暖通常依赖煤炭燃烧，而煤燃烧产生的污染物会导致空气质量变差，从而影响健康，特别是影响预期寿命。由于中国的户籍制度使得人口流动性较低，淮河以北的居民长期暴露在这种空气污染中。因此，研究者可以利用这个差异来观察长期空气污染对预期寿命的影响。

研究估计，如果 PM₁₀ 浓度增加 46%，则可能使预期寿命减少 3.4 年。具体来说，如果 PM₁₀ 浓度每增加 10 微克每立方米，那么在一个平均样本中，人的预期寿命将降低 0.64 年。



Fig. 1. The cities shown are the locations of the Disease Surveillance Points. Cities north of the solid line were covered by the home heating policy.

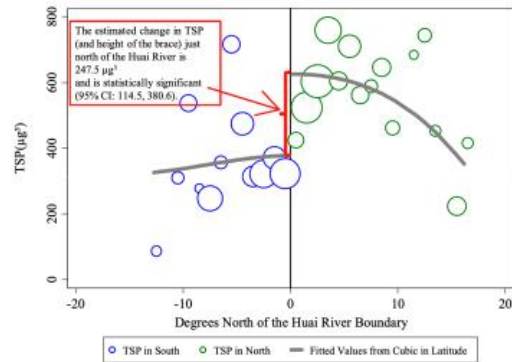


Fig. 2. Each observation (circle) is generated by averaging TSPs across the Disease Surveillance Point locations within a 1° latitude range, weighted by the population at each location. The size of the circle is in proportion to the total population at DSP locations within the 1° latitude range. The plotted line reports the fitted values from a regression of TSPs on a cubic polynomial in latitude using the sample of DSP locations, weighted by the population at each location.

更具体地说，这个研究非常有意思。其实我在读博士时也突然想到做类似的研究，但当我开始收集数据并查阅文献时，发现北大的陈老师（陈英语教授）已经完成了这项工作，研究了淮河的分界线。陈老师将中国分为上下两部分，虽然不能直接比较极端的地区，但在靠近淮河线的城市之间进行对比是可行的。

此外，研究还可以通过更系统的统计方法，比如回归不连续设计（regression discontinuity），来进一步分析。你可以计算每个城市到淮河的具体距离，并将其作为一个连续变量纳入回归模型中，作为趋势项。通过分析淮河线前后的趋势差异，就可以估计由于政策的阶段性变化（如供暖政策的变化）对结果的影响。

在这个模型中，左侧表示中国南方地区，右侧表示北方地区。我们可以看到，在空气污染指数（TSP）中，当越过零点（即淮河线）向北时，污染水平突然增加，这是因为北方地区冬季供暖所引发的空气质量恶化。

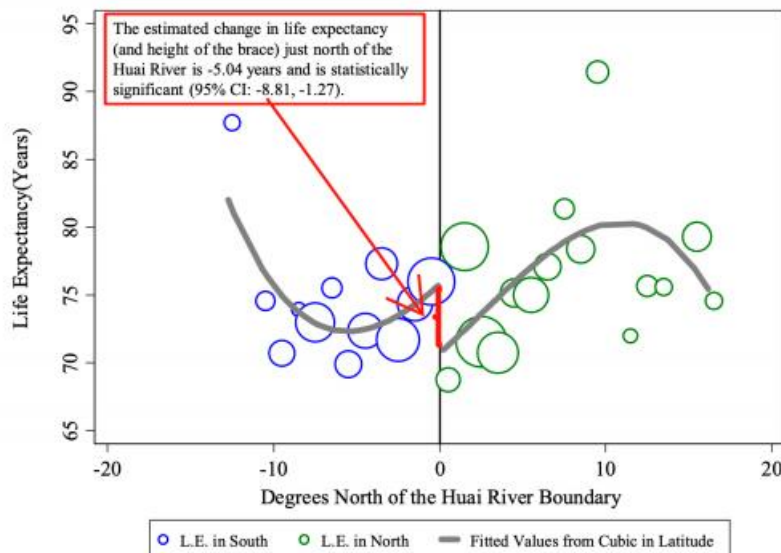


Fig. 3. The plotted line reports the fitted values from a regression of life expectancy on a cubic in latitude using the sample of DSP locations, weighted by the population at each location.

因此，随着从淮河南部到淮河北部的迁移，预期寿命会突然下降。通过比较这两个地区



的数据，我们可以得出结论：由于这个政策带来的空气污染变化，我们可以通过这种政策来识别空气污染的增加与预期寿命之间的关系，从而估算空气污染对预期寿命的影响。

回到我们刚才讨论的内容，这种政策机制为我们提供了一个识别空气污染与健康结果之间因果关系的工具。

发病率影响

- 发病率
- 救护车服务需求
 - 交通导致空气污染加剧，对救护车服务的需求增加
 - 混杂因素：冬季
 - 北京市限行政策影响道路上的车辆数量
 - Zhong et al. (2017)
- 呼吸系统疾病引起的学校出勤率下降
 - 空气污染影响学校出勤率，因呼吸系统疾病的增加
 - 来自 3000 多所学校的出勤记录和疾病记录
 - 以温差倒转作为工具
 - Chen et al. (2018)

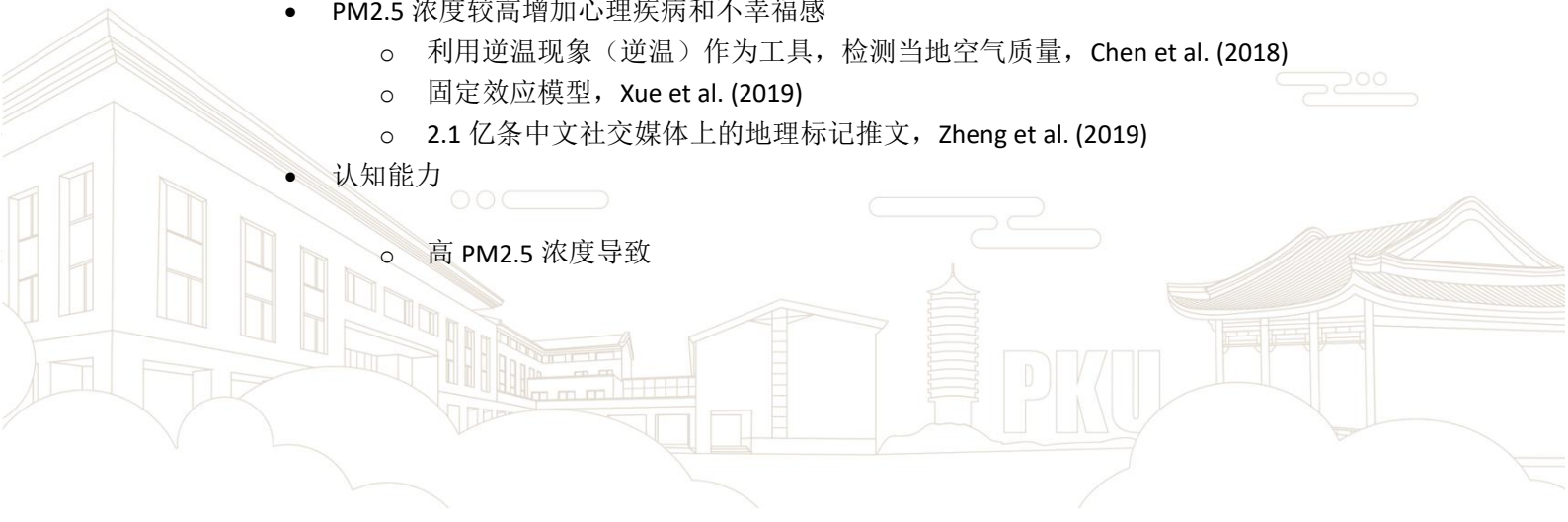
如果 PM10 浓度增加 10 微克每立方米，那么预期寿命大约会减少 0.64 年。这是对较严重空气污染的影响之一，此外，空气污染还会对长期健康状况产生影响，例如对发病率的影响。有两篇研究探讨了空气污染对健康的具体影响。

其中一篇研究关注的是呼叫急救车（ambulance）的数量，特别是在北京地区。研究发现，交通限制措施有时会导致北京交通变得更加拥堵，进而导致空气质量变差，而这种空气质量的恶化会对健康产生负面影响。具体来说，交通引起的空气污染会使得更多人拨打急救电话，这表明发病率有所上升。

另一篇 2018 年的研究则关注了学校的出勤率。研究发现，空气污染加剧时，学生的出勤率会受到影响。因为空气污染可能导致一些学生出现呼吸道疾病，从而无法上学。该研究收集了 3000 所学校的出勤数据，并通过逆温现象（inversion）作为外生冲击的来源，利用这一自然现象的变化来分析空气污染的影响。逆温现象通常是一个短期的气候现象，研究利用其随机性来进行实验性分析。

心理健康、幸福感和认知能力

- PM2.5 浓度较高增加心理疾病和不幸福感
 - 利用逆温现象（逆温）作为工具，检测当地空气质量，Chen et al. (2018)
 - 固定效应模型，Xue et al. (2019)
 - 2.1 亿条中文社交媒体上的地理标记推文，Zheng et al. (2019)
- 认知能力
 - 高 PM2.5 浓度导致





- 增加对收益的风险厌恶，对损失的风险容忍
- 对时间折扣的耐心减弱
- Chew et al. (2019) 的实验室研究
- 阻碍人们的认知表现，尤其是老年人
 - 语言和数学测试
 - Zhang et al. (2018)

关于空气污染对心理健康和幸福感的影响，徐和晨的两篇研究利用逆温现象(inversion)和固定效应(fixed effect)模型，发现较高的PM2.5浓度与心理健康问题相关，可能影响个人的幸福感和情绪。

有一篇2019年的研究非常有意思，研究者从中国的微博平台爬取了2.1亿条微博数据，发现当空气污染较严重时，微博内容趋向更加负面。这表明空气污染不仅影响人的身体健康，还可能影响他们的情绪和心理状态。

另外，空气污染对决策能力也有影响。研究发现，高浓度的PM2.5可能导致人们作出非理性的决策。例如，当面对能带来利益的行为时，人们变得更加规避风险；而在面对可能带来损失的行为时，反而变得更有冒险倾向。空气污染还会让人变得更加不耐烦和不友善。

此外，2018年发表于《PNAS》的研究发现，空气污染还可能导致人的认知表现下降，尤其是在语言考试和数学考试中。研究表明，空气污染对老年人的影响尤为显著，而那些天生较为悲观的人可能更容易受到影响。

空气污染、心理健康、幸福感和认知能力

- 悲观主义
 - 增加投资者的处置效应
 - 处置效应(Disposition Effect)是指投资者倾向于过早卖出盈利股票而长期持有亏损股票的现象(Shefrin 和 Statman, 1985)，是一种典型的投资者行为偏差。
 - 空气污染(通过城市级别的空气质量指数衡量)
 - 原因：情绪调节
 - 与实现的收入相比，较低的收益预期
 - 投资分析师的企业现场访问
 - Rui et al. (2019)

有一项研究通过投资者的投资数据与空气污染的关系进行了分析，发现空气污染会增加投资者的“处置效应”(disposition effect)。那么，什么是处置效应呢？在金融学中，处置效应指的是投资者倾向于过早卖出盈利的股票，而长期持有亏损的股票。这意味着空气污染可能会影响投资者的决策，导致他们作出不理性的投资选择。

另外，空气污染还会影响股票分析师的判断。例如，研究发现，当股票分析师去调研某



家公司时，如果调研当天该公司所在地区的空气污染较严重，分析师对该公司的估值通常会较为悲观。这表明空气污染不仅影响个人的情绪，也可能影响他们的专业判断，甚至导致市场上对企业的评估变得更加悲观。

生产力影响

制造业部门

- 长期暴露于空气污染对产出有适度影响
- 非常小的影响：每增加 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 在 25 天内，减少 1% 的日常产出
- 来自两家中国纺织企业的日常工人级别输出数据
- 空气质量的日常变化
- 空气污染对工人生产力的当前影响几乎可以忽略不计
- He et al. (2019)

服务业部门

- API 增加 10 单位使得工人每天的电话量减少 0.35%
- 来自中国两家呼叫中心的工人日常表现数据
- 机制：工人因打电话之间的休息时间变长导致的
- 不是因为他们花更多时间接听电话
- Chang et al. (2019)

既然空气污染对健康有影响，那么它也可能会影响到我们的工作。第一篇相关研究是 2019 年发布的，研究了空气污染对工业工人的影响。这项研究主要关注长期的空气污染影响，发现对工人的影响相对较小。具体来说，当空气污染物浓度增加 10 微克每立方米时，工人的日常产出大约会减少 1%。这是一个比较小的影响。研究主要收集了中国纺织行业两个企业的数据，分析了工人每天的产出与空气质量数据之间的关系。

对于服务行业而言，空气污染的影响可能稍微大一些。2019 年另一篇研究发现，如果空气污染指数（API）增加 10 个点，那么呼叫中心的工作人员当天的电话接听数量大约会减少 0.35 次，这也是一个相对较小但统计上显著的影响。更有趣的一点是，研究发现，空气污染并没有使工人在打电话时的时间变短，而是他们在打电话之间需要更长的休息时间。

生产力影响

• 高技能工作

法官

- PM2.5 的增加延长了法官“决策时间”以判决案件
- 例如，法官在接到案件后花费的时间
- Kahn 和 Li, 2020

考试的学生

- 稻草焚烧导致考试成绩恶化
- 在考试期间，逆风和顺风稻草焚烧差异增加一个标准差，导致总成绩降低 1.42% 的标准差（即 0.6 分）
- 由稻草焚烧引起的污染变化
全国高考（2005-2011）



另外，空气污染对高技能劳动力的影响也值得关注。一项研究分析了法官的工作表现，发现 PM2.5 浓度的增加会影响法官的共情能力，进而使他们在做出判决时花费更多时间。

还有一些研究关注了学生的表现，尤其是当学生在考试期间暴露于空气污染时。比如，当学生受到周围地区农民烧秸秆的影响时，他们的考试成绩可能会有所下降。这篇文章主要使用了空气污染数据以及 2005 年至 2011 年期间的高考数据进行分析。

生产力影响

- 整体生产力

Fu et al. (2019)

- PM2.5 减少 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 可以提高生产力 8.2%
- 研究对象为 1998-2007 年期间中国的制造业公司
- 工具变量：热反转

Ebenstein 和 Greenstone (2020)

- 儿童期暴露于空气污染会导致成人教育水平降低和工资水平较低
- 使用淮河冬季采暖回归不连续性设计

另外，还有一些研究探讨了空气污染对总体生产力的影响。例如，2019 年发布的一项研究发现，PM2.5 浓度每减少 10 微克每立方米，生产力大约可以提高 8.2%。该研究主要使用了 1998 到 2007 年间中国工业企业的数据，并采用了软实验方法，通过工具变量（IV）技术和零需求现象来进行分析。

另一篇由 Abston 和 Grace 于 2020 年发布的研究发现，如果一个人在童年时期暴露于较高的空气污染水平，可能会导致其受教育程度降低，进而影响到成人后的工作能力。这项研究使用了淮河流域作为划分地区的标准，探讨了空气污染对教育水平的长期影响。

当然，这些研究的结果是否准确，估计是否存在偏差，都是值得探讨的问题。如果大家感兴趣，可以进一步研究这些论文，了解其潜在的误差或假设问题。

案例研究：空气污染对人类活动的影响²²

好的，接下来我将通过一个案例研究来说明，这么多研究究竟是如何进行的？我将引用一篇文章作为示例。因此，让我们来看一个具体的例子。这篇文章是由三位作者共同发表的。

他们发现了什么？

- 空气污染影响口语测试，且随着人们年龄的增长，影响更为显著，尤其是对于教育程度较低的男性。

²² Zhang, X., Chen, X., & Zhang, X. (2018). The impact of exposure to air pollution on cognitive performance. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(37), 9193 – 9197. <https://doi.org/10.1073/pnas.1809474115>



- 定量结果：
 - 将 PM 10 减少到 (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 将使得人群处于中位数水平：
 - 使口语测试得分达到第 63 百分位
 - 使数学测试得分达到第 58 百分位

这为什么重要？

- 大多数发展中国家的居民生活在空气不安全的地区。
- 大脑损伤的代价巨大：
 - 尤其是对作出重大决策的老年人来说。

好的，那么我先讲一个例子，来说明这些研究究竟是怎么做的。我选了一篇文章作为例子。这篇文章是由三位作者发表在《美国国家科学院院刊》(Proceedings of the National Academy of Sciences, PNAS) 上的，研究的主题是评估空气污染暴露对公司表现的影响。

数据 - 中国家庭追踪调查 (CFPS)

- 2010 年和 2014 年波次
- 24 道标准化数学问题和 34 道词汇认知问题
- 所有受访者的地理位置和面试日期
- 匹配测试成绩与当地空气质量数据

空气污染数据

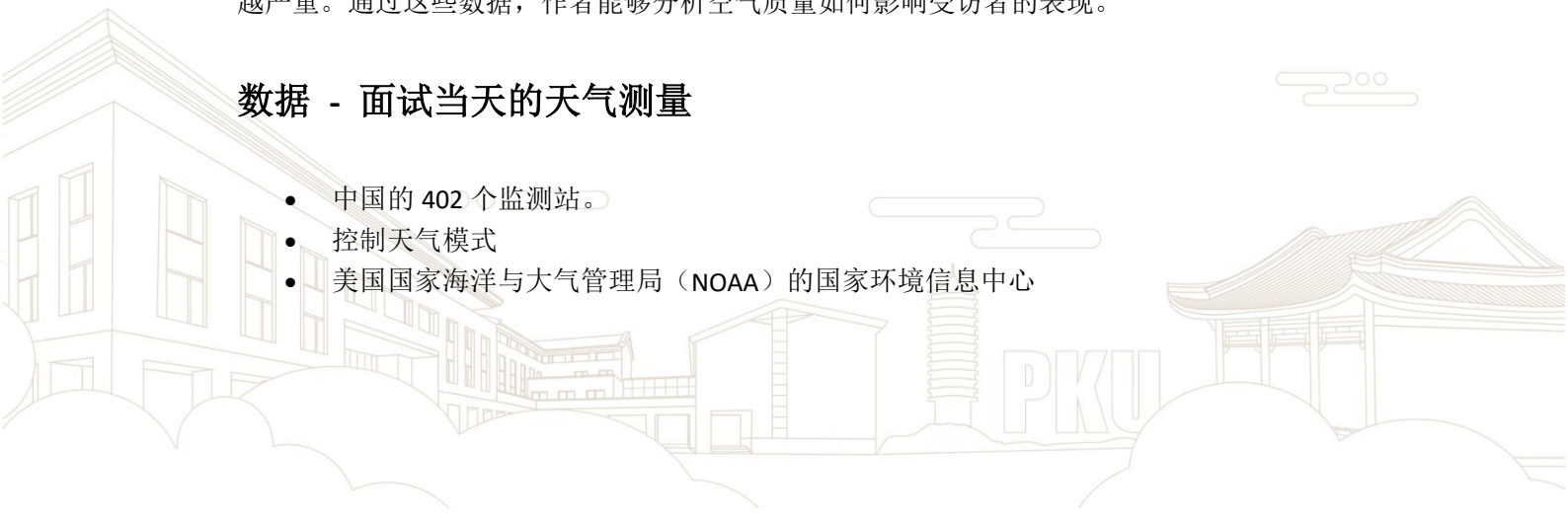
- 空气污染指数 (API)，SO₂，NO₂，PM₁₀。
- API 的范围从 0 到 500，值越大表示空气质量越差。
- 每日 API 观测值来自中国环境保护部发布的城市级空气质量报告。

这篇文章使用的数据主要来自 TS 调研 (Tracking Survey)，数据包含了 2010 年和 2014 年的两个模块。研究中问了 24 道标准的数学题和 34 道不相关的问题。数据记录了受访者的位置和时间，这些数据可以与当天的空气质量进行链接。作者主要关注了空气质量指数 (API) 和二氧化氮 (NO₂) 等指标。

API 是一个衡量多种污染物加权平均值的指数，范围从 0 到 500，数值越大，空气污染越严重。通过这些数据，作者能够分析空气质量如何影响受访者的表现。

数据 - 面试当天的天气测量

- 中国的 402 个监测站。
- 控制天气模式
- 美国国家海洋与大气管理局 (NOAA) 的国家环境信息中心

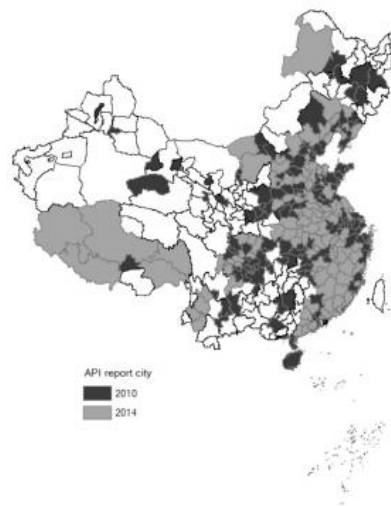




此外，作者还收集了许多与监测站（monitoring stations）相关的数据。这些监测站的数据有助于分析空气污染如何影响人们的认知表现（cognitive performance）。

Figure S3: The distribution of API reporting cities

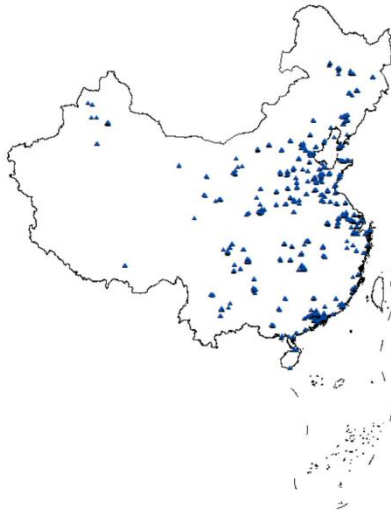
- Black: 86 API reporting cities in 2010
- Grey: newly added in 2014



Source: The Ministry of Environmental Protection of China.

Note: The legend 2010 represents all 86 API reporting cities in 2010, and the legend 2014 indicates newly added API reporting cities in 2014, which cover most of the cities in China by 2014. This figure is plotted using ArcMap 10.3.1. API = air pollution index.

Figure S4: The distribution of monitoring stations



Source: The Ministry of Environmental Protection of China.

Note: This figure is plotted using ArcMap 10.3.1.

这篇研究还使用了 API 报告的城市数据。2010 年时，86 个城市提供了 API 报告。而到了 2014 年，这些城市的数量大幅增加，新增的城市大约是原来的两倍。

研究还标出了监测站（monitoring stations）的位置。通过这些数据，研究人员可以将其与受试者所在县（county）的信息相匹配，并采用空间连接（spatial join）的方法，例如使用 JS（可能是指空间分析工具）进行空间数据合并。通过这种方式，可以识别出每个受访者所处地区的空气质量水平。

数据 - 一些数据处理问题

- 匹配城市级 API 与 CFPS
 - 如果 CFPS 县位于 API 报告城市内，使用该城市的 API 读数作为该县的读数。
 - 如果 CFPS 县不位于任何有 API 读数的城市内，则匹配到 40 公里范围内最近的 API 报告城市。



在处理这些数据时，作者遇到了一些数据匹配的问题。相信大家在处理数据时也会遇到类似的挑战。例如，CFPS 测试中的一些城市并没有对应的 API 值。为了解决这个问题，作者在这些城市所在的县（county）附近 40 公里范围内搜索最近的 API 监测站，并将该监测站的 API 值赋给对应县的数据。

方法

$$\text{score}_{ijt} = \alpha_1 P_{jt} + \alpha_2 \cdot \frac{1}{k} \sum_{n=0}^{k-1} P_{j,t-n} + X'_{ijt} \beta + W'_{jt} \phi + T'_{jt} \gamma + \lambda_i + \delta_j + \eta_t + f(t) + \varepsilon_{ijt}.$$

- Score_{ijt} : 受访者 i 在县 j 于时间 t 的认知测试分数。
- P_{jt} : 时间 t 的当期空气质量测量值。
- $\frac{1}{k} \sum_{n=0}^{k-1} P_{j,t-n}$: 最近 k 天的平均 API 值。
- $X'_{ijt} \beta$: 可观察到的人口学相关变量。
- $W'_{jt} \phi$: 控制天气条件。
- $T'_{jt} \gamma$: 县级特征向量。
- λ_i : 个人固定效应。
- δ_j : 县级固定效应。
- η_t : 月份、星期几和晚间固定效应。
- $f(t)$: 二次月份时间趋势。
- ε_{ijt} : 误差项。

这篇文章的研究方法是通过回归分析来检验空气污染对测试成绩的影响。首先，作者将测试分数（test score）放在等式的左边，将空气污染暴露（air pollution exposure）放在右边。回归模型的基本含义是，左边是测试分数，右边是受访者在特定日期的空气质量（air quality measure at date T ）。

此外，作者还考虑了不同时间段的空气污染暴露。例如，除了当天的空气质量外，作者还考虑了前 k 天、前一个月、甚至前一年、前三年的空气污染暴露。这样，回归模型可以揭示不同时间段内空气污染对测试成绩的影响。

在回归分析中，除了空气污染暴露和测试分数，还需要控制一些变量（control variables）。这些变量可能包括人口统计特征，如教育程度，因为教育程度显然会影响测试成绩。同时，作者还控制了个体固定效应（individual fixed effects），这样可以消除每个人个体差异的影响，更侧重于时间变化对测试成绩的影响。此外，县级固定效应（county fixed effects）也被考虑在内，以消除县与县之间的差异。

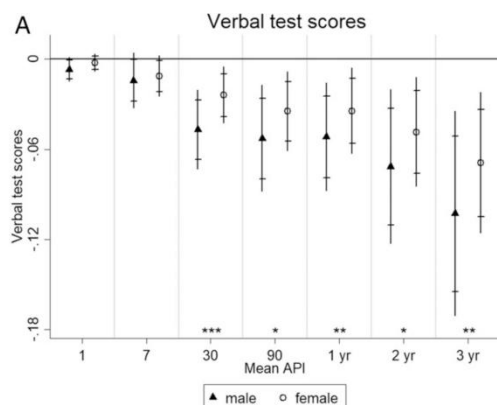
为了消除时间上的差异，作者还控制了时间固定效应（time fixed effects），例如早晨的空气质量可能比中午的差。通过控制这些时间上的差异，可以更精确地估计空气污染对测试成绩



的影响。

此外，作者还控制了月度趋势（monthly trends），因为空气污染可能具有一定的时间模式（例如季节性变化）。通过这些控制，研究更准确地估计了空气污染对测试分数的影响。

实证结果



- 负面效应
- 使用更长时间窗口时，效果更大
- 异质性

首先，我们可以看到每个柱状图代表了估计值。在这里， α 值为负表示空气污染变差时，测试分数会下降。作者进行了多次回归分析，不仅关注当天的空气质量对测试成绩的影响，还考虑了更长时间段的影响。当

天的影响较小，接近于零，统计上显著但不完全显著。然而，随着时间的推移，尤其是回顾过去三年，空气污染的影响变得更加明显，表明较长时间内的空气污染暴露会对今天的测试成绩产生负面影响。因此，研究发现，随着时间窗口从 1 天、7 天、30 天、90 天、1 年、2 年、3 年的延伸，空气污染的影响逐渐增强。

此外，研究还发现，空气污染的影响在性别上存在异质性（gender heterogeneity）。有趣的是，男性的影响大于女性，这可能与男性的生理结构更易受到空气污染的影响有关。后续的研究可能会进一步探索性别在空气污染影响中的作用。

如果 API 增加 100，会有什么效果？

- 7 天平均 API 增加 1 个标准差，导致口语测试分数下降 0.278 分（0.026 标准差）。
- 面试前 3 年内平均 API 增加 1 个标准差，与口语测试分数下降 1.132 分（0.108 标准差）相关。

Table S6: Summary statistics

Variable	All		Male		Female	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
verbal test scores	18.115	10.489	19.729	9.430	16.629	11.172
math test scores	10.438	6.403	11.496	5.924	9.464	6.667
API	73.516	32.684	73.197	31.714	73.810	33.549
7-day mean API	72.885	21.360	72.619	21.108	73.130	21.587
30-day mean API	72.992	17.118	72.801	17.078	73.168	17.153
90-day mean API	75.516	16.184	75.342	16.133	75.676	16.231
1-year mean API	84.002	20.806	83.822	20.863	84.167	20.753
2-year mean API	77.738	15.706	77.572	15.782	77.891	15.634
3-year mean API	74.882	13.166	74.705	13.227	75.044	13.108
log form of household per capita income (Chinese yuan)	8.874	1.154	8.891	1.153	8.858	1.155
age	44.742	17.892	44.925	18.158	44.573	17.642
years of education	7.475	4.451	8.220	4.058	6.789	4.681

Source: Authors' estimations using CFPS survey 2010 and 2014.
Note: API = air pollution index; SD = standard deviation.

那么，如何解读我们刚才的结果呢？这个是非常重要的，因为一旦我们发现空气污染对我们的影响是负面的，但这个影响较小，那么我们可能就不需要过多担忧，也不需要投入大量的社会资源或者个人资源来解决这个问题。如果这个影响较大，那么我们可能就需要花更



多的资源来应对这个问题。

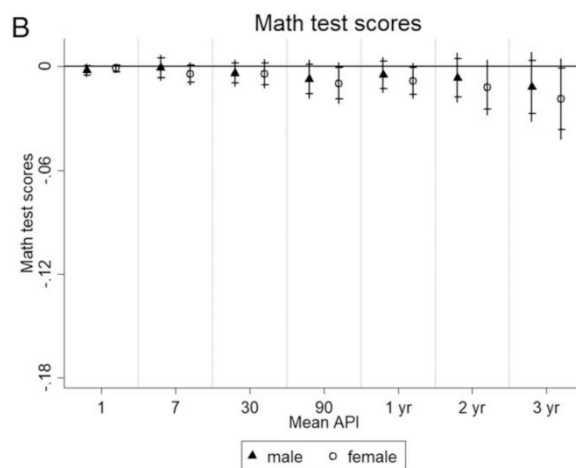
以 7 天 API 效应为例，如果 7 天的 API 增加一个标准差（standard deviation），在计量时我们通常会标准化数据来方便进行比较和估算。研究发现，当 API 增加一个标准差时，人的语言考试成绩会下降 0.278 分，大约相当于错 1/3 道题，这并不是一个非常大的效果。

然而，我们还需要了解标准差究竟有多大。根据总结统计，7 天的 API 标准差大约是 21。因此，如果当天的 API 从 50 增加到 70，语言测试成绩大约会下降 0.27 分，错 1/3 道题。假设 API 从 72 增加到 93，成绩也会下降 0.27 分。对于三年的空气污染暴露，标准差大约为 13，因此如果 API 从 74 上升到 87 或 88，可能会错 1 道题。

实证结果

- 对数学能力减少较少

刚才我们讨论的是空气污染对语言考试成绩的影响。有趣的是，空气污染对数学成绩的影响相对较小。如果我们看一天甚至三年的影响，很多情况下这些影响在统计上并不显著。相比之下空气污染对语言测试成绩的影响更为显著。这可能与人类大脑的结构有关，尽管这篇文章并没有深入探讨这个问题。



另外，我们可以进行一致性分析，看看样本中的不同群体如何回应空气污染。例如，年龄、教育水平等因素可能会影响个人对空气污染的反应。我们将样本按年龄分为不同组别：25-34 岁、35-44 岁、45-54 岁、55-64 岁以及 60 岁以上。

Effects on verbal score by age

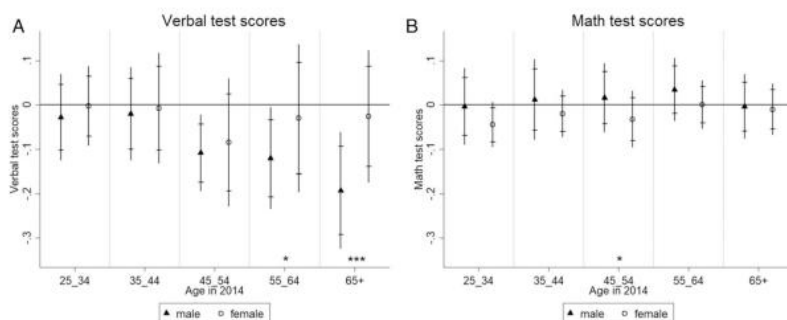


Fig. 2. The age cohort effects of air pollution on cognitive test scores include interaction terms between 3-y-mean API and age cohort dummies 25-34, 35-44, 45-54, 55-64, and 65+ in 2014. The age band 10-24 is the reference category. The figures plot the estimated coefficients on the interaction terms for the male and female subsamples with 95% and 99% confidence intervals based on the estimates in *SI Appendix, Table S3*. A and B refer to verbal and math test scores, respectively. Air pollution data are matched between each CFPS county centroid and its nearest API reporting city boundary within a radius of 40 km (i.e., 25 miles). The asterisks in the figure indicate the significance of the male-female difference denoting the results of Wald tests: *10% significance level; **5% significance level; ***1% significance level.

结果显示，对于 45 至 54 岁、55 至 64 岁以及 65 岁以上的男性，空气污染对他们的语言测试成绩有显著影响。而对于女性，虽然某些组别（如 25 至 34 岁）有轻微的负向影响，但统计学上不显著。对于数学成绩，25 至 34 岁的女性表现出一点影响，但其他年龄组的影响不显著。



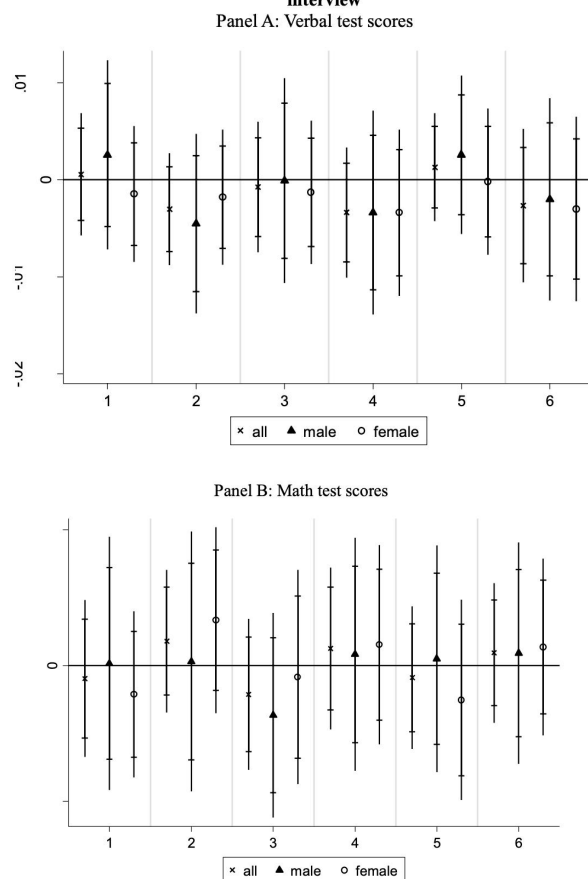
如果按教育水平分析，影响主要集中在小学以下学历的男性。对于女性而言，这种影响相对较小。对于有初中及以上学历的人群，空气污染的影响也不明显。不过，65 岁以上的男性，即使拥有初中或更高学历，也可能受到空气污染的影响。

总体而言，似乎大多数人的影响较小，尤其是我们在座的大部分人，但年长男性可能会面临更显著的影响。

足够令人信服吗？

- 虚假检验，检查认知测试后的 API 读数是否影响测试分数。
 - 如果 API 读数的时间序列包含与结果变量相关的未观察到的因素。
 - 在回归中使用测试后的 API 读数来替代当前和过去的 API 读数，将得到类似的结果。

Figure S10: Falsification tests - Effects of air pollution on test scores in the days after the interview



Source: Authors' estimations using CFPS survey 2010 and 2014.

Note: The figure plots the coefficients with 95% and 99% confidence intervals from a regression of test scores on air pollution index (API) readings in the days after the interview. Other controls and fixed effects are the same as those presented in Table S1.

在得出研究结果后，我们需要反复验证，确保所观察到的模式确实反映了真实的情况，而不是其他因素造成的偏差。为了验证这一点，我们可以使用一种简单的方法——虚假检验（Falsification Test）。例如，在回归分析中，我们可以将 X 替换成与 X 没有关系的变量，或者是与 X 相似但并不直接相关的变量。

类似的例子在医学研究中很常见。例如，当检验一种疫苗是否有效时，研究人员会给一



组病人真正的疫苗，给另一组病人的是生理盐水。尽管他们被告知自己接种的是疫苗，但其实他们得的是生理盐水。通过比较这两组病人的反应，研究人员可以排除心理因素的干扰，确保观察到的效果是真正由疫苗引起的。如果生理盐水组也出现了反应，那可能意味着实验设计本身有问题。

在这篇文章中，作者使用了类似的方法进行检验。作者进行了一个后置检验（Post-testing），即将考试前或考试当天的 API 数据替换为考试后某段时间的 API 数据。因为考试后空气污染应该不会影响当时的考试成绩。如果在这种情况下仍然发现影响，那么可能是实验设计存在问题，或者是其他与空气污染相关的因素在时间上高度相关，影响了结果。

结果显示，当作者用考试后的 API 替换考试前的 API 时，影响消失了，这进一步验证了空气污染在考试前的水平确实对测试成绩有影响。

机制：能力效应还是行为效应

- 这是否可能是由于人们在暴露于更多污染空气时可能变得更不耐烦或不合作？
 - 行为变化而不是认知受损？
 - 使用受访者的不耐烦和合作情况来评估行为变化的可能性。

Table S13: Mechanism tests – interviewees' impatience and cooperation							
	1-day	7-day	30-day	90-day	1-year	2-year	3-year
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
A. Interviewees' impatience on a scale from 1 (low) to 7 (high)							
API_t	0.005 (0.091)	-0.015 (0.074)	0.023 (0.076)	-0.004 (0.091)	-0.003 (0.090)	0.004 (0.090)	0.005 (0.090)
$\frac{1}{k} \sum_{i=0}^{k-1} API_{t-i}$		0.093 (0.253)	-0.351 (0.622)	1.070 (0.879)	1.554 (1.594)	0.739 (4.276)	0.982 (7.657)
Observations	17,903	17,903	17,903	17,903	17,903	17,903	17,903
Overall R-squared	0.249	0.249	0.249	0.250	0.249	0.249	0.249
B. Interviewees' cooperation on a scale from 1 (low) to 7 (high)							
API_t	-0.117 (0.146)	-0.113 (0.160)	-0.106 (0.151)	-0.098 (0.141)	-0.101 (0.137)	-0.114 (0.140)	-0.121 (0.142)
$\frac{1}{k} \sum_{i=0}^{k-1} API_{t-i}$		-0.014 (0.166)	-0.092 (0.321)	-0.310 (0.457)	-0.322 (0.399)	-0.092 (0.608)	0.197 (0.854)
Observations	33,285	33,285	33,285	33,285	33,285	33,285	33,285
Overall R-squared	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001

Source: Authors' estimations using CFPS survey 2010 and 2014.

Note: Interviewees' impatience rated by interviewers is only available in the CFPS2014 wave. In Panel A, other covariates and fixed effects are the same as those in column (2) of Table S11. In Panel B, other covariates and fixed effects are the same as those in column (3) of Table S11. All the coefficients are scaled by 100 to make them more readable. Robust standard errors, clustered at the county level, are presented in parentheses. Air pollution data are matched between each CFPS county centroid and its nearest API reporting city boundary within a radius of 40km (i.e. 25miles). *10% significance level.

另外，我们也可以考虑，研究结果是否真的是由于竞争能力的影响，还是可能与情绪或行为有关。例如，空气污染可能会让人感到不耐烦，这可能影响他们的回答质量。有些受试者可能会草率地回答问题，因为他们不想继续回答，或者觉得不想合作。

在问卷中，有一些变量可以衡量受试者的不耐烦程度，比如不耐烦程度（impatience）和受访者是否配合访问人员（interviewer's cooperation）。这些变量与 API 数据之间没有明显的关系，因此，作者认为这种影响可能更多的是由个人的合作态度（cooperation）引起的，而非直接的能力问题。

然而，这篇文章存在一个局限，就是它只使用了 2014 年的数据，而没有使用 2010 年的数据。2010 年数据中并没有涉及到一些关键问题，因此作者无法通过差异分析（difference-in-differences）来解决时间变化的问题。尽管结果不显著，但这并不意味着没有影响，可能只是因为模型设定存在问题。这也表明，研究中可能存在行为问题，而非仅仅是能力问题。这是文章中试图解决的问题，但未完全解决。

总结



他们发现了什么？

- 空气污染影响语言测试，而且随着年龄增长，尤其是对教育程度较低的男性，影响变得更强。
- 定量结果
 - 将 PM10 降低到($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$)会使人群的中位数移动
 - 使语言测试分数达到第 63 百分位
 - 使数学测试分数达到第 58 百分位

为什么这很重要？

- 发展中国家的大多数人口生活在空气不安全的地方
- 大脑损伤的代价是昂贵的
 - 尤其是老年人在做重大决策时的影响

总结一下这篇文章的研究结果，发现空气污染确实会影响我们的能力，特别是对语言相关的测试（VERBAL test）会产生显著影响。

案例研究 对行为的影响²³

接下来，我们来看另一个关于行为影响的研究。这篇文章的标题非常有吸引力，叫做《Briefly in the Air》，它研究了空气污染与犯罪之间的关系，采用了价格控制等方法进行分析。

总结

研究发现：

- 空气污染损害口语测试，且随着年龄增长，特别是在低学历男性中，影响加剧。

定量结果

- 将 PM 10 降低到 ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 将使得人群达到中位数
 - 口语测试得分升至第 63 百分位
 - 数学测试得分升至第 58 百分位

为什么这很重要？

- 发展中国家大多数人生活在空气污染严重的地方
- 大脑损伤的代价很高
 - 特别是那些做出重大决策的老年人

这篇研究的问题是，短期内空气污染水平的上升是否会导致更多的犯罪行为。之所以能够进行这样的研究，是因为伦敦这个城市非常富裕，拥有许多空气监测点，能够实时监测空气质量。同时，伦敦在数据收集和公开方面做得非常好，研究者可以获取到某一条街道上每天的犯罪数据，而这种精细的数据在中国是很难获得的。

例如，我曾尝试进行与交通事故相关的研究，但在中国，交管部门的数据很难获取，信

²³ Bondy, M., Roth, S., & Sager, L. (2020). Crime is in the air: The contemporaneous relationship between air pollution and crime. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 7(3), 555-585. <https://doi.org/10.1086/707127>



息的公开程度也不高。相比之下，伦敦的这些数据可以通过网上下载获取。

为了识别空气污染的影响，研究者利用了一些外生冲击（**exogenous shock**）来从相关性推导到因果性。这里使用的外生冲击包括风速的突然变化和其他气候现象的变化，这些因素可以作为自然实验的条件，帮助研究者分析空气污染对犯罪的因果影响。

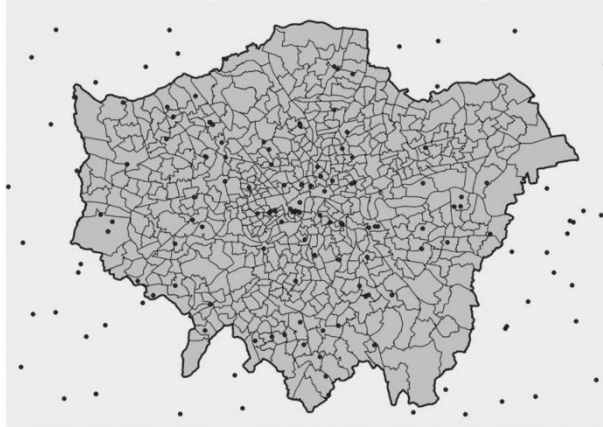


Figure 1. Geographic coverage: London wards, AURN/MIDAS stations. Geographic coverage of greater London, divided into 624 wards (excluding the City of London) and 96 AURN/MIDAS monitoring stations. Color version available as an online enhancement.

首先，我们来看一下数据。图中展示了许多细小的街道，这些街道被称为“**Wolf**”（英国人通常用这个词）。这些点代表的是空气质量监测站（**evolution monitoring stations**）。北京可能只有不到 10 个这样的监测站，虽然我不太确定，但伦敦的空气污染监测网络确实比较密集。

Method

$$\text{Crime}_{it} = \exp\{\beta \text{AQI}_{it} + f(\text{Temp}_{it}, \text{RH}_{it}) + \tau \text{Wind}_{it} + \omega \text{Rain}_{it} + \mathbf{C}_{it}\boldsymbol{\Pi} + \mu_t + \gamma_i\} + \varepsilon_{it}.$$

- **Crime_{it}**: Number of crimes in ward *i* on day *t*.
- **AQI_{it}**: Air Quality Index corresponding to ward *i* on day *t*.
- ***f*(Temp_{it}, RH_{it})**: Flexible function of mean temperature and relative humidity, controlling for weather conditions.
- **Wind_{it}**: Local wind speed measure.
- **Rain_{it}**: Total precipitation measure.
- **C_{it}**: Vector of local area controls for time-varying conditions related to pollution and crime.
- **μ_t**: Time fixed effects.
- **γ_i**: Ward fixed effects.
- **ε_{it}**: Idiosyncratic error term.

在这个研究中，作者使用了回归分析方法，等式的左边是犯罪数据，右边则是空气质量指数（**AQI**）的水平。作者还考虑了多个因素，例如当天城市的拥挤程度。他们有准确的地铁客流量数据，可以用来衡量城市的拥挤情况。研究的假设是，如果城市较为拥挤，人们之间的碰撞可能会增多，这可能会导致犯罪行为的增加，而这种情况可能也与空气污染有关。



为了控制这些可能影响犯罪和空气污染的共同因素，作者加入了时间固定效应（time fixed effects），从估计中去除了因时间变化带来的差异。通过这样的方法，研究可以更准确地分析空气污染对犯罪的影响。

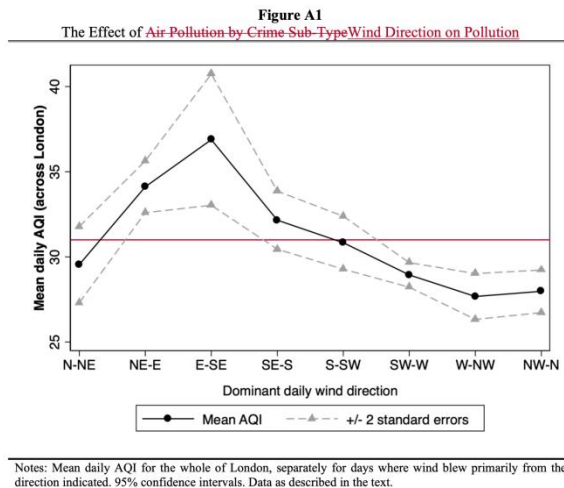
工具变量

$$AQI_{it} = \rho_i \text{WindDir}_{it} + \delta(\text{Temp}_{it}, \text{RH}_{it}) + \phi \text{Wind}_{it} + \varphi \text{Rain}_{it} + C_{it}K + \eta_t + \theta_i + v_{it}.$$

$$\text{Crime}_{it} = \exp\{\alpha \widehat{AQI}_{it} + f(\text{Temp}_{it}, \text{RH}_{it}) + \tau \text{Wind}_{it} + \omega \text{Rain}_{it} + C_{it}\Pi + \mu_t + \gamma_i\} + \varepsilon_{it}.$$

IV: WindDirectionWindDir_{it}

作者还使用了工具变量（IV）估计方法。大家不需要太过关注这个公式，毕竟我们不会考试，也不需要为此感到困扰。工具变量的作用在于，它可以使某些变量的值随机变高或变低，类似于进行实验的效果。那这里用到的是什么因素，能够实现这种效果呢？



风是如何随机影响污染的

作者发现，当风从某些特定方向吹时，空气污染水平会增加。例如，图表显示，当风从东北到东侧吹，或者从东到东南吹时，空气污染水平较高；而当风从西向西北吹，或者从西北到北吹时，空气污染水平较低。

如果风的方向是随机的，那么可以通过比较东南风和西北风的情况，来识别空气污染对犯罪的因果关系。这样，

研究就可以通过风向来分析空气污染与犯罪之间的联系。

研究发现

• 固定效应模型

- 每增加 10 个空气质量指数（AQI）点，犯罪率增加 1.2%

首先，我们不需要使用特别复杂的模型，只需要像刚才提到的简单回归模型（当然它也可以很复杂）。在这个回归模型中，X 代表犯罪率，Y 代表空气污染指数（AQI），同时我们还加入一些控制变量（Z）。通过这样的回归分析，我们就能看到空气污染和犯罪率之间存在较强的相关性。

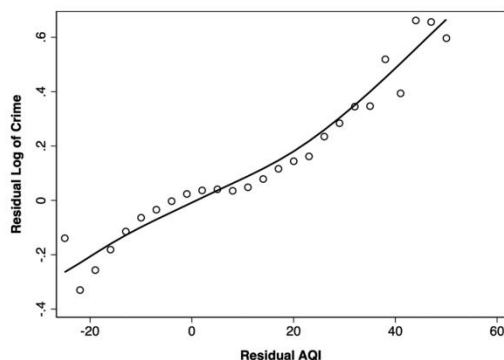


Figure 3. Residual AQI and crime: Binned scatter plot. Plot of residual air quality index (AQI) and residual (log of) crime count. Residuals from a regression on ward fixed effects and weather controls. Data as described in the text.

具体来说，如果 AQI 增加 10 个单位，犯罪率大约会增加 1.2%。这意味着，如果 AQI 增加 1 个单位，犯罪率会增加 0.012。通过这样的估计，研究揭示了空气污染对犯罪率的潜在影响。

研究发现

- 固定效应模型

- 平均效应
- 每增加 10 个空气质量指数 (AQI) 点，犯罪率增加 1.2%
- 可视化

我们可以通过可视化来展示这个效果。最近有一篇文章批评了这种方法，但如果我们利用可视化的方式，依然可以清楚地看到，AQI 的增加会导致犯罪率的增加。

研究发现

- 固定效应模型

- 非线性效应
- AQI 超过 35 时，犯罪率增加 3.7%
- 类似于警力减少 10% 所估算的影响

另外，我们更感兴趣的可能是不同空气污染暴露水平下的影响差异。伦敦的 PM_{2.5} 和 AQI 的平均水平大约在 20 左右，而北京可能在 70 到 80 之间。研究的问题是，AQI 的增加是

Table 2. Pooled and Fixed Effect Models of Air Pollution's Impact on Crime

	Pooled PPML		Fixed Effects PPML/OLS			
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
AQI (10 units)	.105*** (.0308)	.036* (.0191)	.024*** (.0038)	.012*** (.0028)	.012*** (.0032)	.457*** (.1134)
Controls	N	Y	Y	Y	Y	Y
Ward fixed effects	N	N	Y	Y	Y	Y
DOW fixed effects	N	N	N	Y	Y	Y
Year-month fixed effects	N	N	N	N	Y	Y
(Pseudo) R ²	.024	.075	.259	.265	.266	.688
Observations	455,520	433,277	433,277	433,277	433,277	433,277

Note. Each column in the table represents a separate regression. In cols. 1–5, the dependent variable is the number of criminal offences per day and ward. The model is estimated using a Poisson pseudo maximum likelihood (PPML) specification with ward population as the offset. In col. 6, the dependent variable is the crime rate per 100,000 people, and the model is estimated using a linear ordinary least squares (OLS) specification. AQI is based on air pollution readings from the three closest AURN monitoring stations (weighted by inverse squared distance). Control variables include weather characteristics (temperature, relative humidity, and wind speed), ward-level police deployment, tube activity, and unemployment levels. Standard errors are cluster-robust in two dimensions, over wards and 24 year-months. DOW = day of the week.



导致犯罪率增加，还是会有某种程度的减少？如果是增加的话，对北京的影响就更为重要。如果在某个浓度下，空气污染的增加对犯罪的影响变小，那么我们可能就不需要过于担心高浓度的空气污染。

为了解决这个问题，作者将 AQI 分成了几个区间：小于 20、大于 20 小于 25、大于 25 小于 30、大于 30 小于 35，以及大于 35，并分别在回归模型中进行分析。结果发现，当 AQI 大于 35 时，空气污染对犯罪的影响明显增强。之前影响是 0.012，而当 AQI 大于 35 时，影响增大到 0.037，几乎是之前的三倍。

研究发现

- 通过风向工具化污染
 - 当通过风向工具化污染时，AQI 增加 10 点将导致犯罪率增加 2.6%

Table 3. Air Pollution's Impact on Crime: Nonlinear Models

	Without Fixed Effects		With Fixed Effects	
	No Controls (1)	Controls (2)	No Controls (3)	Controls (4)
Dummy for AQI >20 and <= 25	.087*** (.0154)	.041*** (.0136)	.046*** (.0118)	.017*** (.0065)
Dummy for AQI >25 and <= 30	.134*** (.0223)	.053*** (.0199)	.069*** (.0149)	.024*** (.0071)
Dummy for AQI >30 and <= 35	.191*** (.0325)	.078*** (.0243)	.085*** (.0182)	.029*** (.0089)
Dummy for AQI >35	.275*** (.0660)	.105*** (.0355)	.102*** (.0204)	.037*** (.0091)
Observations	455,520	433,277	455,520	433,277

Note. See table 2. Each column in the table represents a separate regression, all using PPML specifications.

Table 4. Air Pollution's Impact on Crime: Instrumental Variable Models Using Wind Direction

	Without Instruments		With Instruments			
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
AQI (instrumented)	.012*** (.0032)	.012*** (.0032)	.087*** (.0398)	.024*** (.0075)	.026*** (.0079)	.945*** (.2652)
Controls	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Ward fixed effects	Y	Y	N	Y	Y	Y
DOW fixed effects	Y	Y	N	Y	Y	Y
Year-month fixed effects	Y	Y	N	N	Y	Y
First stage (F-test)			19.67	13.52	14.37	14.37
Observations	433,277	431,026	431,026	431,026	431,026	431,026

Note. See table 2 for description of full specification. Column 1 is identical to table 2, col. 5. Column 2 is the same, but for the subset of observations for which the wind instrument exists. Columns 3–6 are instrumental variable estimates, equivalent to cols. 2, 4–6 of table 2. DOW = day of the week.

如果我们采用作者的方法，利用风向作为工具变量，进行更严谨的随机实验设计来识别因果关系，我们会发现，当 AQI 增加 10 个点时，犯罪率增加 2.6%。这个结果比之前的估计稍微高一些。

机制

污染影响个人犯罪计算

- 改变感知的回报
- 改变风险认知
- 改变风险偏好

降低认知表现（Kampa 和 Castanas 2008）

提高压力荷尔蒙水平，如皮质醇（Li et al. 2017）和血清素（Murphy et al. 2013）

- 皮质醇，通过影响身体脂肪，帮助调整蛋白质的合成和碳水化合物与水的转化为可用能量。
- 血清素，血液循环，情绪调节和幸福感。
- 低水平的血清素与抑郁和压力相关。

表现出不耐烦

- 暂时提高适用于时间折衷的贴现率。



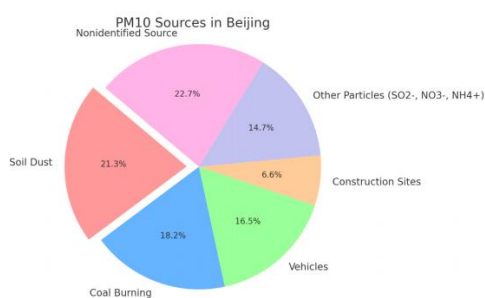
那为什么空气污染会影响犯罪呢？这可能让人感到疑惑。作者提出了几种假设，虽然文章并没有详细解释。第一种假设是，空气污染可能会影响我们对犯罪收益的感知，夸大犯罪可能带来的好处。第二种假设是，空气污染可能会降低我们对犯罪后被抓到的风险的感知。第三种假设是，空气污染可能增加我们对风险的感知和偏好，使得我们更倾向于进行冒险行为。

这让我想起电影《奥本海默》中的一个场景：男主角因为非常讨厌他的导师，在苹果里注入了化学物质，差点毒死导师。如果他理性地思考，应该不会做出这样的选择，但在极端情况下，他可能会做出这样的冲动决定。也许这就是在空气污染的影响下，我们的理性程度降低，做出不理智的行为。

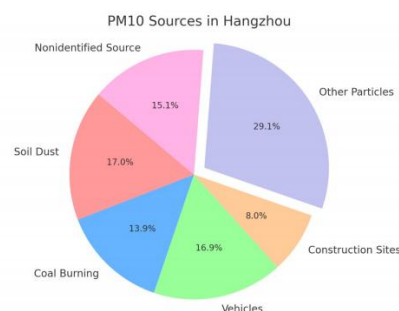
另外，有一些医学研究发现，空气污染可能改变我们体内与压力和焦虑相关的激素水平。比如，皮质醇和血清素。皮质醇调节身体如何转化脂肪、蛋白质和碳水化合物，血清素则影响情绪、焦虑和幸福感，低水平通常与抑郁症相关。在空气污染较高的情况下，这些激素的变化可能会导致我们做出更加冲动或不理智的行为。

什么让空气更脏？

- 空气污染源



Chen, Tian, et al. 2006. "Research on PM10 Source Apportionment in Beijing" (In Chinese). *Environmental Monitoring in China* 22 (6): 59–63.



Bao, Zhen, Yinchang Feng, Li Jiao, Shengmao Hong, and Wengao Liu. 2010. "Characterization and Source Apportionment of PM2.5 and PM10 in Hangzhou." (In Chinese). *Environmental Monitoring in China* 2: 44–48.

这些是一些可能的机制，但目前的研究还不够严谨。如果涉及到人体生理的影响，进行医学基础研究和大规模实验非常困难，不能随便对人进行实验。而这种定量研究通常成本较高，样本量较小，估计结果的可靠性也较低。

接下来，我们简要讨论一下为什么空气污染问题如此严重。大家应该能够理解，空气污染与工业化进程密切相关，工业生产会产生大量污染物。随着城市化进程加速，很多工业设施的位置靠近城市中心，导致空气污染问题加剧。例如，北京的主要污染物来源之一是土壤尘土（PM10）。研究表明，土壤尘土对 PM10 的贡献最大，其次是燃煤，贡献占 18.2%，然后是汽车排放，贡献占 16.5%。此外，建筑工地也贡献了 6.6% 的污染，其他颗粒物的贡献占 14.7%。这些污染来源是我们在城市环境研究中必须考虑的关键因素。

这些数据在不同城市会有所不同。例如，杭州的污染来源可能与北京不同，但大致上我们可以通过这些数据了解污染的主要来源。大部分城市的污染来自燃煤、汽车排放等传统能源使用，未来随着新能源汽车的普及，污染情况可能会有所改善。



已采取的措施

- 不再优先考虑经济增长，而是关注环境问题。
- 2014 年 3 月，李克强总理在全国人民代表大会年会上宣布开展“治污战争”
- 将雾霾视为“自然对低效盲目发展的警告”。

这些变化包括：

- 将 PM2.5 作为主要污染物并首次制定了 PM2.5 的国家最高标准；
- 将污染减少作为政府官员评估和晋升的硬性目标；
- 启动全国范围内的实时空气质量监测和披露计划；
- 推行一系列环保政策，包括试点七个地区的二氧化碳限额与交易项目，以及推动公共交通系统的电气化。

如果我们能够更多地利用帮助和功能，或许我们能解决当前的污染问题。这是一个非常重要的问题，因为每个人都受到其影响。那么政府做了哪些努力呢？中国正在逐步从一个只注重经济增长的模式，转向兼顾经济增长与环境保护的模式。

例如，现在官员的晋升机制中，虽然 GDP 是考核的重要标准，但如果没有达到环保要求，也会影响晋升。一些官员可能因为未能达到环保标准而受到影响。这种政策平衡对于官员来说非常重要。

2014 年 3 月，李克强总理宣布了对污染的“战争”，并做出了三项重要改革。首先，PM2.5 被确立为主要的污染物，并制定了全国性的 PM2.5 标准，超过一定标准会受到处罚。其次，空气污染的治理被纳入地方官员的政绩考核中。第三，建立了全国性的空气质量监测和预警系统。这些措施为后续的环保政策奠定了基础。

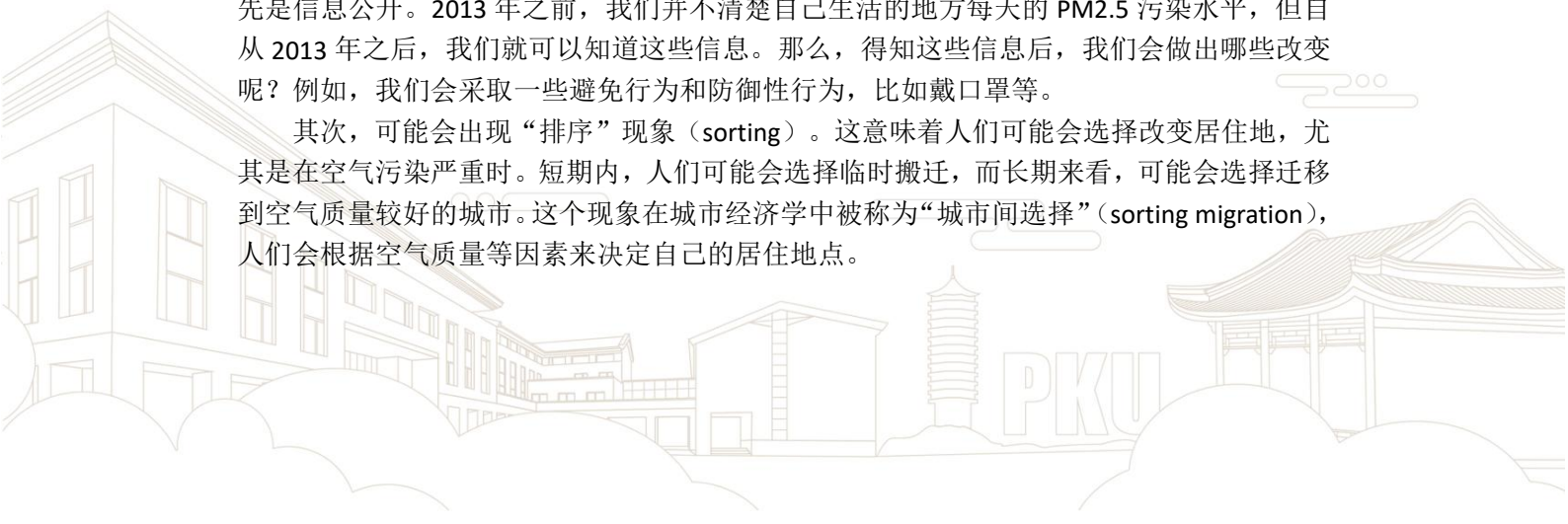
此外，还出台了一些配套政策，如碳排放交易市场和新能源汽车推广政策。例如，推动电气化的交通系统，鼓励使用新能源汽车，以减少污染和碳排放。

人们如何回应？

- 对污染信息的反应
- 避免行为和防御性投资
- 排序（用脚投票）

在这样的政策框架下，我们可以观察到一些反应。我将从三个方面来讲解这些反应。首先是信息公开。2013 年之前，我们并不清楚自己生活的地方每天的 PM2.5 污染水平，但自从 2013 年之后，我们就可以知道这些信息。那么，得知这些信息后，我们会做出哪些改变呢？例如，我们会采取一些避免行为和防御性行为，比如戴口罩等。

其次，可能会出现“排序”现象（sorting）。这意味着人们可能会选择改变居住地，尤其是在空气污染严重时。短期内，人们可能会选择临时搬迁，而长期来看，可能会选择迁移到空气质量较好的城市。这个现象在城市经济学中被称为“城市间选择”（sorting migration），人们会根据空气质量等因素来决定自己的居住地点。





污染信息

- 在 2013 年之前，大多数中国城市没有向公众提供实时污染数据。
 - 环保部（MEE）于 2000 年开始为主要城市编制空气污染指数（API），并逐渐扩展网络。
 - 环保部最初并未控制监测站。
 - 相反，当地的环保局，由地方政府任命的领导负责收集和报告数据。
- 研究发现，许多城市的 API 数据存在操控的证据（例如，Andrews, 2008; Ghanem 和 Zhang, 2014; Greenstone 等，2020）。

好，来看这个关键的信息。在 2013 年，大众对这种实时解决方案（real-time solution）是否有效并不清楚。当时，环保部（Ministry of Environmental Protection）在 2000 年提供了空气污染指数（air pollution index），这是针对主要城市的数据，后来逐渐扩展到更多的地区。然而，这些数据并没有由环保部直接控制，而是由地方政府（local governments）上报的结果。

由于地方政府上报的数据，存在一些潜在的篡改问题，研究人员在分析数据时发现，这些空气污染指数（API）数据中存在一些异常特征。特别是，如果将这些数据与卫星数据（satellite data）进行对比，就会发现明显的差异。例如，API 在 100 前后时，低于 100 的数据异常多，高于 100 的数据则明显较少，这种情况显然是存在数据造假（data manipulation）的可能。

污染信息

- 实时污染监测与披露计划于 2013 年启动。
 - 这是污染信息访问和意识的转折点。
 - 中央政府安装了超过 1600 个符合美国环保局标准的监测站，每个监测站配备自动化的实时监测设备，跟踪六种标准污染物的浓度。
 - 在大约两年内，监测网络成功覆盖了全国。
 - 中央政府还建立了一个平行的数据流系统，实时将现场监测结果流向市级、省级和中央级政府。

在 2013 年之前，大众并不知道实时空气污染水平的具体情况。当时，环保部在 2000 年提供了部分城市的空气污染指数（API），并开始扩展监测网络。然而，这些数据并未由环保部直接管理，而是由地方政府上报。地方政府可能会因为缺乏监督或意愿，篡改这些数据。

研究人员发现，当将这些 API 数据与卫星数据对比时，存在一些异常现象。例如，API 值在 100 以下的数据异常多，而高于 100 的数据则较少，明显存在数据造假或不一致的情况。





污染信息

- 该项目能否解决环境监测中的委托-代理问题？
 - 中央政府是委托人，要求准确的信息和减少污染。
 - 地方官员是代理人，他们倾向于隐瞒这些信息，因为他们更重视经济增长。

那么，这些信息是否能够解决我们之前提到的地方政府瞒报谎报的问题呢？答案是肯定的。

污染信息

- Greenstone 等人（2020）发现：
 - 自动化监测显著提高了中国空气污染数据的质量。
 - 来自实时监测数据的自动化后趋势与卫星衍生的污染测量结果接近。
 - 准确污染信息的可用性促使了更多的回避行为。
 - 通过在线搜索空气过滤器和口罩来衡量。

比 Crystal 在 2020 年的研究中发现，自从实时监测系统启用后，中国的汽车空气污染监测数据与微信监测的数据更加一致。由于这些信息的公开，研究还发现公众开始采取更多的应对行为。例如，公众会在网上搜索空气净化器，购买口罩，以在空气污染较严重时保护自己。

污染信息

- Barwick 等人（2019）发现该项目：
 - 增加了与污染相关话题的在线搜索。
 - 在日常消费模式上进行调整，以避免污染暴露。
 - 在较少污染地区的住房支付意愿较高。
- Ito 和 Zhang（2020）发现：
 - 2013 年后，基于空气净化器销售的支付意愿（WTP）大幅增加，当时信息程序开始推出。
- Tu 等人（2020）发现：
 - 在观看了纪录片《穹顶之下》的人群中，家庭对清洁空气的支付意愿有所增加。

Barriq 在 2019 年的研究中发现，2013 年全国实时监测系统的启用增加了人们对空气污染和股市相关话题的搜索量，公众开始更多地关注这一问题。

此外，研究还发现，空气污染较低的地区房价会上升。人们通过“脚投票”选择搬到空气质量更好的地方，购房或购买第二套房产。2020 年的另一篇文章发现，自 2014 年以来，



公众对于购买空气净化器的支付意愿增加了。

另外，2020 年还有一项研究发现，当时有一部非常流行的纪录片《穹顶之下》引起了广泛关注。很多人看完纪录片后，对清洁空气的支付意愿大大提高。

回避行为和防御性投资

- 消费变化对污染的反应

- Sun 等人（2017）

- 在淘宝上销售口罩和空气净化器。
 - 当污染水平超过关键警报阈值时，人们会购买。
 - 高收入群体的反应显著更大。

- Zhang 和 Mu（2018）

- 购买口罩的货币价值。
 - 来自淘宝的在线销售数据。
 - 各城市的日常空气质量变化。
 - 他们估计，AQI 增加 10 点时，所有口罩的消费增加了 5.5%。
 - 如果中国能够减少 10% 的重污染天数，总节省的口罩费用将约为 1.87 亿美元。

有了这些信息后，公众开始采取各种行为。例如，2017 年的一项研究发现，当空气污染达到一定阈值时，空气净化器和面罩的销量显著增加。高收入人群对空气污染的反应更为敏感，而低收入人群的反应则较为迟缓。

朱和睦在 2018 年的研究中评估了面罩的购买情况。他通过淘宝的面罩销售数据，将其与空气质量的每日变化相联系，发现如果 AQI 增加 10 个点，面罩的购买量会增加 5.5%。此外，如果中国能够减少 10% 的重污染天数，公众就不需要购买那么多面罩，从而节省了约 1.87 亿美元的开支。

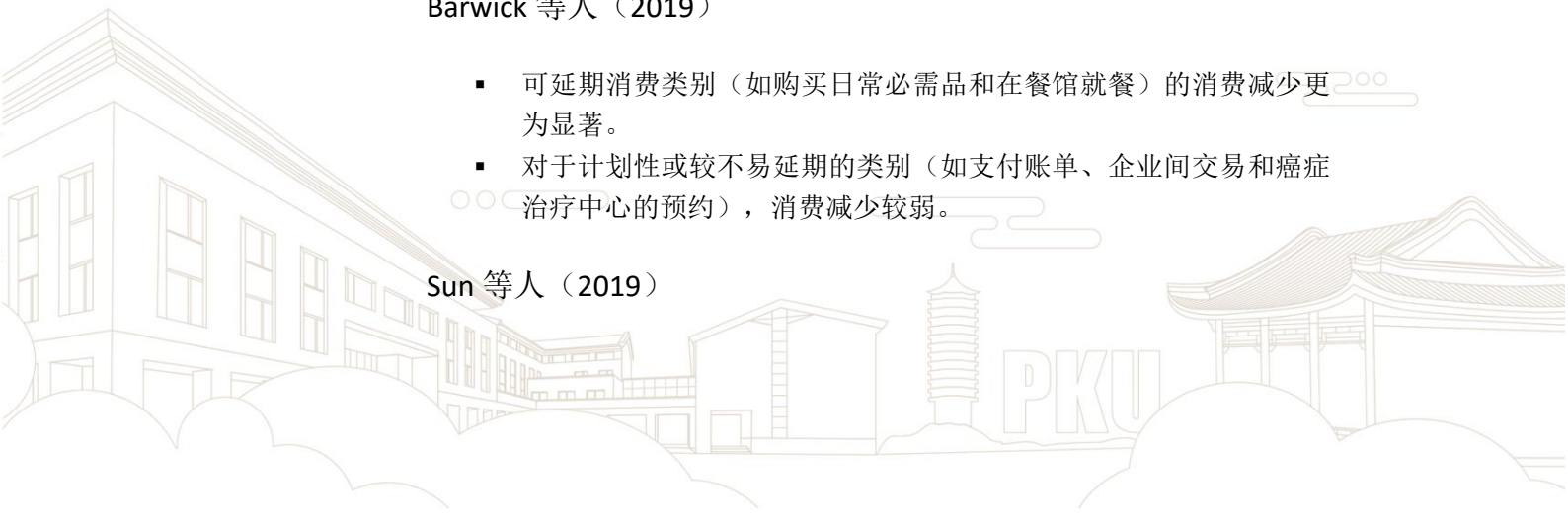
回避行为和防御性投资

- 消费变化对污染的反应

- Barwick 等人（2019）

- 可延期消费类别（如购买日常必需品和在餐馆就餐）的消费减少更为显著。
 - 对于计划性或较不易延期的类别（如支付账单、企业间交易和癌症治疗中心的预约），消费减少较弱。

- Sun 等人（2019）





- 空气质量与餐馆和购物中心的日常消费活动之间存在正相关关系。
- 餐馆的消费者评价平台；北京的手机定位数据。

Eric 在 2019 年的研究发现，消费者在空气污染较高时，会选择延迟一些外出消费活动。例如，大家可能会推迟外出就餐或购物等非必要的消费行为。然而，对于一些必须要做的事，比如上班、去医院看病或参加重要的约会，空气污染的影响就会变得非常显著。

孙海涛在 2019 年的研究也发现了类似的模式。他发现，人们在空气污染较低时更愿意去餐馆就餐或购物。他的研究得益于餐馆的评论平台数据和每个人的 GPS 数据，这些数据帮助他分析了消费者的行为模式。

家庭排序

短途旅行：

- Chen 等人(2018)使用手机数据追踪消费者在城市间的流动，Cui 等人(2019)使用基于智能手机的定位数据，表明消费者从污染严重的城市前往较为清洁的城市以避免污染。
- Barwick 等人(2020)通过追踪基于信用卡和借记卡交易的消费者位置发现，改善如高速铁路和航空连接等交通基础设施有助于通过城市间旅行避免污染。

长期迁移：

- Chen 等人(2017)使用热逆温作为工具，发现空气污染显著影响中国的迁移，且这一影响主要由受过良好教育的人群和年轻专业人员驱动。
- Freeman 等人(2019)表明，中国家庭在选择居住地时会考虑空气质量，且平均来说，他们愿意支付约 22 美元来减少 1 单位的年度 PM2.5 浓度。
- Qin 和 Zhu(2018)提供了中国空气污染与公民移民兴趣之间的相关性分析。基于城市每日的在线搜索指数作为衡量人们移民情绪的指标，他们发现，如果某天的 AQI 增加 100 点，“移民”一词的搜索量会在第二天增长 2%到 5%。这一效应在高污染水平下更为显著。

此外，还有一些关于家庭迁移（household sorting）的问题。例如，艾特在 2018 年使用 GPS 数据研究了消费者在不同城市之间的流动。他发现，当某个城市的空气质量较差时，更多的人会迁移到空气质量较好的城市。

根据这个逻辑，如果两个城市之间的交通网络更加便捷，那么短期的规避行为就更加常见。Eric 在 2020 年的研究中利用信用卡数据发现，当空气质量较差时，如果城市 A 和 B 之间有高速铁路连接，而 A 和 C 之间没有，那么更多人会选择去 B 城市而非 C 城市。

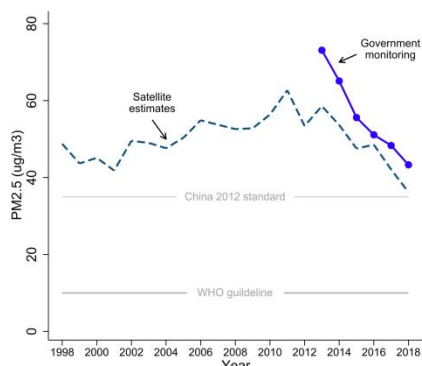
另外，长期迁移的影响也很显著。2017 年的研究发现，当某个地方的空气污染水平较高时，更多的人会从污染严重的城市迁移到空气质量较好的城市。这种行为主要发生在高收入群体和专业人士之间，因为他们有足够的经济能力和资源来迁移。

Freeman 等人也发现，中国的家庭在选择居住地时，会考虑空气污染的因素。他们测算了这种行为的货币价值，发现如果一个地方的空气质量比另一个地方差 1 个单位，家庭在选择居住地时，可能会愿意为空气质量稍好的地方支付每平米 22 元的房价差异。



秦和朱在 2018 年的研究中发现，当空气质量较差时，人们更倾向于在网上搜索移民信息。如果 AQI 增加 100 个点，第二天搜索移民相关词汇的频率会增加 2%到 5%。这表明，空气污染会促使有迁移能力的人考虑移民，这可能会导致“品牌萎缩”现象，影响城市的经济和社会发展。

Figure A.2. Trends in PM_{2.5} from Satellite and Monitoring Stations



结果是什么？

- 最近的空气污染趋势

经过这十年的努力（从 2013 年到 现在），中国的空气质量确实有了很大改善。许多研究确认了这一令人振奋的

成果。从 2014 年以来，综合空气污染水平发生了显著变化，尤其是在 2018 年，主要污染物如二氧化硫（SO₂）、PM_{2.5}、PM₁₀、一氧化碳（CO）、二氧化氮（NO₂）等都在下降。例如，二氧化硫下降了 65%，PM_{2.5} 下降了 40.8%，PM₁₀ 下降了 33.5%。我们在北京也有切身感受，空气质量有所改善，蓝天出现的次数增多了。然而，臭氧（O₃）问题仍然难以解决，目前尚未取得理想的效果。

此外，PM_{2.5} 在不同地区的变化也有所不同。中南部地区的空气质量得到了改善，而西南部的改善较为缓慢。即便如此，各个地区，包括北京，都显示出空气污染下降的趋势，尽管北京的起点较高。

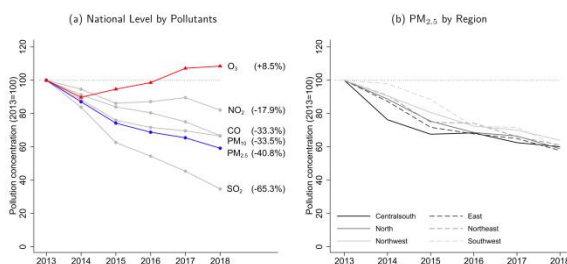
数据正确吗？

- 政府监测数据与卫星数据的读数一致

那么，这些数据是否真实？是否存在数据问题呢？就像我们之前提到的 Crista 的研究，他发现，如果将政府报告的数据与卫星数据进行对比，我们可以看到 2014 年之后，空气质量数据变得更加可靠。比如，下面这张图显示了

1998 年至 2018 年间 PM_{2.5} 水平的变化。虚线表示卫星数据的估计结果，而实线表示政府报告的 PM_{2.5} 数据。从图中可以看出，卫星数据和政府报告的数据变化趋势一致，且两者均显示 PM_{2.5} 水平在下降。

Figure 1. Trends in Air Pollutants

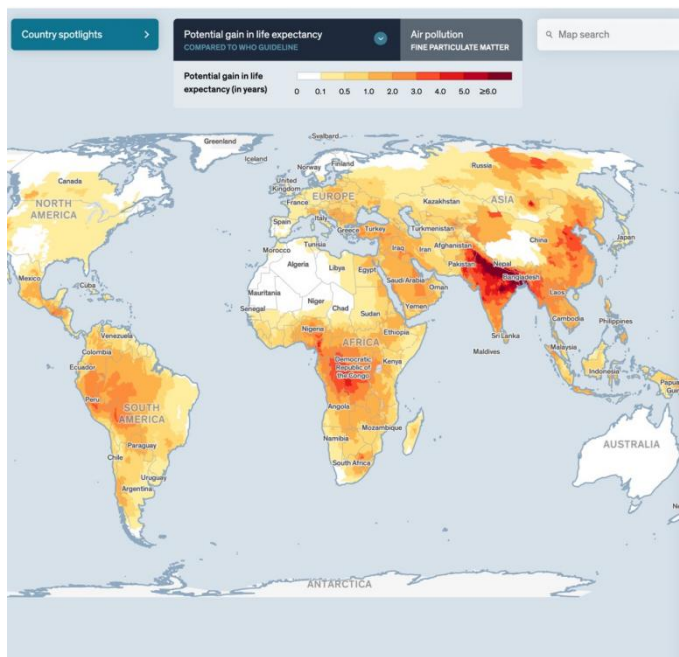


Notes: Panel (a) reports annual concentration of six criteria pollutants. The estimates are obtained from separate OLS regressions of city-daily pollution concentration on calendar year indicators (omitting 2013) and city fixed effects for each pollutant. Annual values are obtained by adding the regression constant back to the coefficients on the year indicators. Values are normalized to 100 in 2013. Panel (b) reports annual PM_{2.5} concentration by region. The estimates are obtained from 6 separate OLS regressions (one for each region) of city-daily PM_{2.5} concentration on calendar year indicators (omitting 2013) and city fixed effects. Annual values are then obtained by adding the regression constant back to the coefficients on the year indicators.



这意味着什么？

- 使用空气质量寿命指数（AQLI）量化观察到的PM2.5浓度减少对死亡率的益处
 - AQLI 衡量污染减少所带来的潜在寿命增加
 - AQLI 官网
- AQLI 预测，若 PM2.5 在 2013 至 2018 年间的水平永久降低，平均寿命将增加 2.7 年/人。



这种空气质量改善的影响有哪些应用呢？之前，普林斯顿的一些研究人员提出了一个“空气质量生活指数”（Air Quality Life Index，简称 AQLI），用来衡量空气质量改善带来的死亡率降低，即死亡率的下降有多少。比如，基于我们过去的的数据，如果 PM2.5 从 2013 年到 2018 年下降了 40%，这一变化预计将使每个人的平均预期寿命提高 2.7 年，这是一项相当显著的变化。

In 2021, the average person in the world would have gained 2 years and 3 months of life expectancy if fine particulate pollution were reduced to meet the WHO guideline.

In 2021, global ranking (Potential gain in life expectancy)



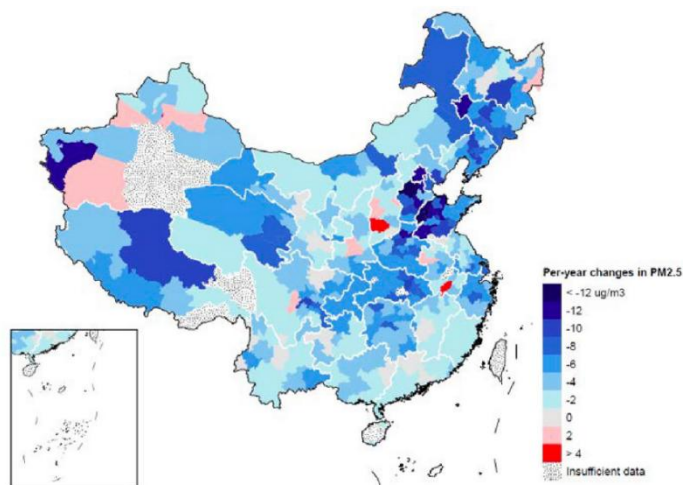
根据这个指数，全球不同地区的空气质量改善程度也有所不同。例如，全球排名最差的地区是孟加拉国、印度和巴基斯坦，而中国则排在全球第 13 位，尽管我们仍面临空气质量挑战，但相比过去，我们的空气质量正在逐步改善。





Figure A.5. Changes in $PM_{2.5}$ by City, 2015-2018

(a) Level Change

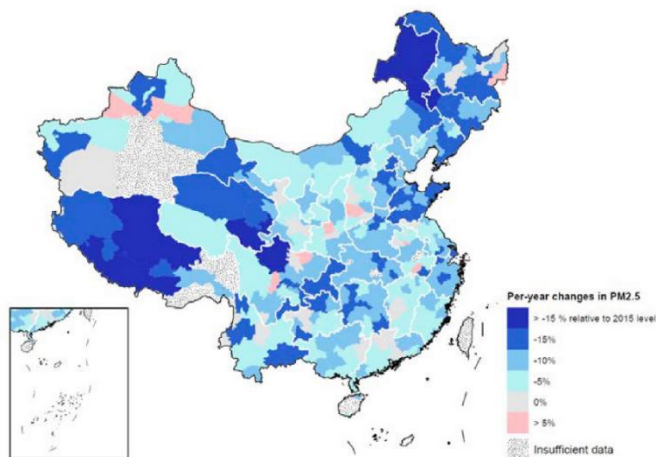


(b) Percentage Change

如果我们比较 2015 到 2018 年间 $PM_{2.5}$ 水平的变化，可以看到一些明显的变化。通过计算 $PM_{2.5}$ 的变化值，我们可以识别出哪些地方空气质量显著改善。在这个图中，蓝色代表 $PM_{2.5}$ 浓度的降低，即空气质量有所改善。比如，北京及其周边地区的 $PM_{2.5}$ 浓度显著下降，很多地方的空气质量改善了 12 微克/立方米以上。

然而，也有一些地区的空气质量变差，这些区域在图中标记为红色。某些地方的 $PM_{2.5}$ 浓度上升了 4 微克/立方米以上，显示这些地区的空气污染有了不利变化。

(b) Percentage Change



另外，如果从百分比变化的角度来看，这可以更好地考虑起点的差异和变化率。根据这种方式，东北地区的空气质量改善排名较前。这个现象可能与东北地区的工业衰退有关，工业减少了，空气质量自然改善。

在中国，如何在保持工业发展的同时提升空气质量，仍然是一个需要解决的重要问题。由于不同地区空气质量变化的情况不同，我们可以通过进一步的研究来分析这些差异。

参考文献



- Greenstone, M., He, G., Li, S., & Zou, E. (2021). China's War on Pollution: Evidence from the First Five Years. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3764874>

本文内容基于《Communication Reference Paper》。主题是中国的污染战争：来自前五年行动的证据。

有什么规律吗？

- 人口
- 收入
- 工业组成

这也表明，中国不同地区空气质量改善的速度不一致。那么为什么有些地区的空气污染下降得更多，而有些地区的变化较小呢？这背后的原因目前在研究中尚未完全明确，但我们可以尝试通过一些简单的分析来探讨。研究中，作者将各地区PM_{2.5}的下降情况与主要经济发展变量进行了相关性分析。

例如，分析显示，人口较多的地方，PM_{2.5}的下降幅度较大。这个结果很有趣，因为通常我们会认为，人口多的地方污染较重，但这里却显示，人口多的地方空气质量改善更明显。这与经济学中的“环境库兹涅茨曲线”相符：在收入较低时，污染较少；当收入稍微提高时，污染可能增加；但当收入继续提高时，污染水平又会开始下降。中国目前正处于这一阶段，从中等收入水平逐渐向高收入国家转型，因此更富裕的地区空气质量改善得更快。

此外，工业结构也与空气质量变化密切相关。例如，一些以石材、玻璃、纺织品、纸张生产为主的地区，其PM_{2.5}水平下降较大。随着中国逐步淘汰或转型这些高污染产业，这些地区的空气质量有了显著改善。另一方面，一些依赖废物焚烧的地区，空气质量变化较慢，因为焚烧产生的污染仍然对空气质量造成负面影响。

然而，煤炭仍然是中国能源结构中的重要组成部分，尽管新能源如风能和太阳能正在增加，煤炭仍占很大比例。如何解决煤炭依赖问题，将是未来中国空气质量改善的关键所在。

Figure A.6. Correlates of City-Level PM_{2.5} Reductions

