

# 北京地铁空气PM<sub>2.5</sub>暴露及通勤者应对行为特征调查分析和健康风险评价（讨论稿）



磐石环境与能源研究所  
ROCK ENVIRONMENT AND ENERGY INSTITUTE

**报告撰写：赵昂、熊秀琴、林佳乔**

**研究指导：潘小川**

**排版设计：王会**

**报告校对：姜超**

**发布日期：2017年8月**

**发布方：磐石环境与能源研究所**



## **磐石环境与能源研究所简介**

创立于2012年7月，磐石环境与能源研究所致力于推动基于批判性思维的公共决策机制的建立、追求一个更加包容、公正和可持续的社会。作为一家民间智库，我们以能源转型政策分析为主线，讨论如何在兼顾社会公平、气候变化、环境质量和公共健康的基础上，实现中国能源系统的低碳转型。我们已经发布了众多与碳市场、能源转型、空气污染治理和城市固体废弃物管理等相关的政策分析报告。

我们与众多国内外基金会和非营利机构已展开合作，例如阿拉善SEE基金会、德国伯尔基金会、美国国家地理空气和水保护基金项目、银杏基金会、洛克菲勒兄弟基金会、Bread for the World, 自然之友、国际无害医疗组织、美国社会科学研究理事会、国际河流、印度科学和环境中心和中国政法大学环境资源法研究所等。



此报告是“北京地铁通勤上班族空气污染暴露水平差异及相应健康影响评估”项目的产出。该项目得到阿拉善SEE基金会“卫蓝侠”项目的资金支持，我们在此表示感谢！

# 目录

<b>报告摘要.....</b>	<b>1</b>
<b>1. 项目介绍.....</b>	<b>2</b>
1.1. 调查背景.....	2
1.2. 调查目的.....	3
1.3. 调查内容.....	3
1.4. 调查方法.....	3
1.5. 数据清理和统计分析.....	5
1.6. 质量控制.....	5
<b>2. 北京地铁通勤者的地铁内空气污染暴露的特点.....</b>	<b>6</b>
2.1. 调查人群基本特征.....	6
2.2. 调查人群通勤之间的差异性.....	7
2.3. 探索影响通勤特点的影响因素.....	8
<b>3. 空气质量的分析.....</b>	<b>9</b>
3.1. 比较地铁内和地铁外的环境空气质量分别在采暖季和非采暖季时的差异.....	9
3.2. 地铁内与室外环境空气质量的差异与相关性.....	9
3.3. 各条地铁线路内PM <sub>2.5</sub> 浓度的对比.....	11
<b>4. 北京地铁通勤者对地铁内外空气污染的认知.....</b>	<b>12</b>
4.1. 通勤者对空气污染的认识在不同特点人群中的差异.....	12
4.2. 不同人群对空气污染防护产品的评价.....	13
4.3. 空气污染防护行为和性别的关系.....	14
4.4. 空气污染防护行为和是否有孩子的关系.....	14
4.5. 应对空气污染的行为的频率的影响因素.....	15
<b>5. 对空气污染的知、信、行分析.....</b>	<b>16</b>
5.1. 污染对生活影响程度和是否采取措施进行防护.....	16
5.2. 口罩的效果和是否戴口罩.....	16
5.3. 对口罩防护效果的评价与口罩的支付意愿间的关系.....	17
5.4. 对空气净化器防护效果的评价和空气净化器的支付意愿之间的关系.....	17
5.5. 可再生能源电力支付意愿.....	18
5.6. 关于支付意愿的相关性分析.....	20
<b>6. 地铁通勤者空气污染暴露的健康风险评估.....</b>	<b>22</b>
<b>7. 讨论.....</b>	<b>24</b>
7.1. 本研究主要发现.....	24
7.2. 研究不足.....	25
7.3. 研究优点.....	25
7.4. 建议.....	26
<b>附录.....</b>	<b>27</b>
<b>致谢.....</b>	<b>40</b>

# 摘要

近些年，公众对空气污染的意识有明显提升，尤其是在北京上海等空气污染严重的城市，在严重灰霾天，外出佩戴口罩和在室内使用空气净化器的人显著增多。然而，地铁车厢内，是否需要采取防护措施，地铁内空气质量对乘客带来怎样的健康风险，相应的调查和研究也比较少。为了增进人们对地铁空气质量的认识，促进地铁运营者和清洁空气政策决策者对此问题的重视，磐石环境与能源研究所联合北京大学公共卫生学院潘小川教授课题组在2016年10月14日—2017年1月13日和2017年2月21日—2017年4月14日开展了北京地铁空气PM<sub>2.5</sub>浓度监测和通勤者应对行为特征调查，通过问卷的形式了解地铁通勤人员对PM<sub>2.5</sub>暴露及其健康影响方面的认知、行为和支付意愿。调查结果显示地铁车厢内晚高峰时段的PM<sub>2.5</sub>浓度采暖季比非采暖季高，地铁车厢内晚高峰时段的PM<sub>2.5</sub>浓度比地铁外环境高，且不同地铁线路车厢内的PM<sub>2.5</sub>浓度不同，13号线PM<sub>2.5</sub>浓度最低，8号线PM<sub>2.5</sub>浓度最高。另外，我们发现调查对象的年龄、性别、收入、学历、对空气污染的认识和是否有孩子等因素与其是否采取防护措施和对防护工具及可再生能源的支付意愿都有相关联性。在北京，地铁通勤者平均乘坐时间为两小时/天，我们依据研究空气污染流行病学疾病负担的暴露—反应关系模型，估算出北京地铁通勤者的健康风险，并指出佩戴口罩是简单、有效和成本可负担的防护举措。

# Summary

With the public awareness of air pollution increased significantly in recent years, during the haze days, the percentage of the public go out wearing masks and use air purifiers indoor has been significantly increased. However, the air quality in public places such as the subway, there are relatively limited research on the potential health risk of air pollution in the subway to the passengers. This study examines the public awareness, protection behavior, PM<sub>2.5</sub> exposure and willingness to pay for air pollution mitigation measures through questionnaire-based survey. The results show that the age, sex, income, educational level of the respondents and whether they have children are related to whether they are taking protective measures and whether they are buying protective equipment for air pollution. At the same time, PM<sub>2.5</sub> concentration in subway cars were also monitored while conducting the survey, the results show that during the project period the subway PM<sub>2.5</sub> concentrations were higher than the outdoor, with the average monitoring value of 143  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , and among the monitored subway lines there is obvious difference in terms of the PM<sub>2.5</sub> level. The study estimates the long-term health risk of PM<sub>2.5</sub> exposure in Beijing subway commuters by applying the Exposure-response Functions and Pope's relevant empirical research data.

# 1. 项目介绍

## 1.1. 调查背景

随着交通拥堵问题的加剧，公共交通已经成为越来越多人的出行选择。根据北京地铁总公司的数据，北京市2017年6月23日轨道日客运量达到910万人次。北京市2015年，通勤出行（不含步行）中，公共交通出行比例占50%，其中公共汽（电）车25.0%，轨道交通25.0%；小汽车出行比例31.9%。早高峰时段7:00-8:00，地铁高峰小时出行占比达到20.8%；晚上下班时段18:00-19:00，地铁出行最为集中，高峰小时出行占比达到54.8%。可见地铁交通在城市公共交通中的作用非常重要。在地铁成为越来越多人的交通出行方式的同时，人们乘坐地铁的时间长度也随之增长。然而，地铁内的空气质量却被长期忽视，其内的空气污染物可能对人体产生的不良影响并没有引起公众的足够重视。

地铁轨道交通处于一个相对密闭的环境，只能通过空调送风系统来调节车厢内的气体质量及温度、湿度等指标<sup>1</sup>，不利于空气中的污染物稀释。在早晚高峰期间，由于人群密度大，人流密集等特点，导致车厢内空间极度拥挤。且随着人员密度的增加，车厢内的污染源增多，车厢内部的空气质量相较于其它公共交通工具更差。PM<sub>2.5</sub>作为可直接吸入肺部的细颗粒物，与较粗的大气颗粒物相比，具有粒径小、活性强、面积大、易附带有毒有害物质，而且在大气中停留时间长、输送的距离远的特点，因而对人体健康和大气环境质量的影响更大<sup>2</sup>。因此，对地铁通勤者在乘坐地铁期间的空气污染暴露进行评价有助于帮助人们应对健康风险。基于我们2015年的北京地铁空气质量监测，地铁内空气污染情况令人堪忧，无论室外空气质量是好是坏，地铁内空气质量都差于室外。

韩国、日本和香港等国家和地区已经对公共交通尤其是地铁内的空气质量问题进行了多年的研究并提出了相应的解决方案。然而，国内关于地铁内空气质量的研究还很缺乏，也缺乏公开的监测信息，这就造成了地铁公司没有对这个问题引起足够的重视或者由于动力不足而采取了选择性忽视的方式对待这个问题。

图1-1：北京市地铁线路2020年规划



<sup>1</sup> 李丽, 钱春燕, 张海云, 等. 上海市轨道交通系统车站空气质量状况调查[J]. 环境与职业医学. 2011, 28(5): 277-280.

<sup>2</sup> 刘冰玉. 地铁车厢环境空气质量研究[D]. 北京市市政工程研究院, 2016.

然而，考虑到每天乘坐地铁的乘客人数高达900多万人，而且北京地铁线路还在不断地扩张，截至2015年12月26日，北京地铁共有18条运营线路，334座运营车站、总里程554公里。根据《北京市城市轨道交通二期建设规划（2015-2021年）》，北京将在未来几年再建更多的地铁线路（图1-1）。我们认为非常有必要对北京地铁通勤族在空气污染的认知方面进行一个本底调查，并同时监测地铁线路内的PM<sub>2.5</sub>浓度，这有助于了解公众对于空气污染问题的认识，并为打开与地铁公司的对话提供第一手资料。

此外，阿里健康数据研究中心于2015年12月20日发布北京“雾霾消费”报告，通过对阿里零售平台消费数据的分析，发现红色预警期间，阿里零售平台口罩销售量大幅攀升，是平时的9.3倍<sup>3</sup>。可见雾霾防护工具的消费受到空气污染严重程度的影响，本调查也希望探究影响雾霾防护工具支付意愿的影响因素。

### 1.2. 调查目的

- 测量北京市地铁车厢内的PM<sub>2.5</sub>质量浓度并进行初步评价；
- 了解北京市地铁通勤人员对空气污染及其健康影响方面的认知、行为和支付意愿。

### 1.3. 调查内容

- 北京市地铁车厢内PM<sub>2.5</sub>浓度的测量及比较；
- 北京市地铁通勤人员对空气污染的认知和行为的分析；
- 北京市地铁通勤人员对雾霾防护工具及可再生能源电力的支付意愿。

### 1.4. 调查方法

#### • 调查对象

调查对象为北京市地铁通勤人员，要求是18-65岁之间，每周乘坐地铁上下班的天数大于或等于3天的上班人员（不包括学生）。根据以下公式计算样本量：

$$n = t^2 \times p \times (1 - p) / \Delta^2$$

其中n为估计样本规模；t为与某一置信度对应的概率度（置信度为95%时对应的t值一般取2）；p为估计的总体率或比例，可据经验获得，也可直接按0.5计算，以获得其它条件不变下的最大样本量，本调查直接按0.5计算最大样本量；联合国人口调查咨询专家认为，抽样调查估计值的相对误差控制在10%以内，也就是精确度设为10%，即极限误差设为0.05。

因此N=2^2\*0.5\*(1-0.5)/ (0.05^0.05) =400人。考虑无效问卷情况及经费，最终设定样本量为700人。

#### • 问卷调查方式

抽样方法为非随机抽样中的定额抽样。本调查选择地铁内通勤上班族作为样本，在各条线路调查人数相同。根据客流量选取有代表性的线路（10条），然后在每条线路上随机进入一节车厢，对一排的乘客逐个进行调查，若有不符合条件或者拒答的通勤人员则跳过，问下一个。每次调查每条线路完成2-3调查对象的调查。

每组调查员每次调查6人左右，保证每次调查的对象在各条线路均匀分布，以确保代表性；采用访谈式问卷调查的方法，每个调查员询问问卷内容，调查对象回答问题，调查员填写答案。

---

<sup>3</sup> <http://bigdata.idcquan.com/news/82474.shtml>

- PM<sub>2.5</sub>浓度的测量

招募调查人员11人，经过统一培训，学会使用仪器；调查人员分为5组，每组2人，其中1人为机动人员，进行临时替补，以保证调查顺利进行。

根据各条线路的客流量选择10条客流量较大的线路。根据图1-2显示的各条线路的统计，最终调查线路为1号线、2号线、4号线、5号线、6号线、8号线、9号线、10号线、13号线和14号线。综合考虑线路之间的距离和换乘方便等因素，把10条线路分为5组；每组调查员每次测量2条线路的PM<sub>2.5</sub>，以保证每次调查都可以覆盖10条线路，因此10条线路的PM<sub>2.5</sub>都是在同一天同一时段测量，保证了不同地铁线路间PM<sub>2.5</sub>的可比性。

图1-2：2015年北京市各地铁线路运行指标

线路	走行公里 (万车公里)	正点率 (%)	平日最小 发车间隔 (分'秒")	日均客运 强度 (万人次/公 里)	日均客运 量 (万人次)	平均运距 (公里)	百公里牵 引能耗 (度/百车 公里)
1号线	4789.69	99.90	2'	3.47	107.48	7.82	193.48
2号线	2914.41	99.92	2'	4.38	100.78	5.23	185.34
4-大兴线	5889.21	99.96	2'	2.35	117.65	9.09	279.89
5号线	3302.63	99.59	2'	3.05	85.38	8.25	214.06
6号线	5400.56	99.96	2'45"	1.69	72.78	9.66	194.65
7号线	2723.43	99.98	4'	1.19	28.67	6.58	176.81
8号线	2372.14	99.90	3'15"	1.18	34.23	8.77	188.95
9号线	1539.96	99.99	3'20"	2.56	43.48	6.1	152.06
10号线	6977.03	99.89	2'	2.53	144.44	8.15	160.87
13号线	3919.9	99.93	2'40"	1.63	66.72	10.4	134.38
14号线东 段	1108.46	99.98	5'	0.83	12.46	6.75	327.60
14号线西 段	650.96	99.99	8'	0.39	4.71	5.53	332.42
15号线	2974.89	99.98	5'	0.5	21.37	14.32	169.96
八通线	1742.39	99.93	2'50"	1.36	25.9	10.3	162.32
昌平线	1253.63	99.99	4'	0.76	16.01	11.31	151.82
房山线	1426.7	99.96	5'35"	0.42	9.57	14.49	177.69
机场线	869.66	99.96	8'	0.11	3.03	24.41	148.98
亦庄线	1261.66	99.99	5'	0.69	15.96	11.06	164.27

来源：2016年北京交通发展年报

测量地点选取人们实际停留时间最长的地铁车厢内，测量时避开车厢内通风道、空调风口、车门等，并尽量距离车厢壁1米左右。采样在人群呼吸高度进行。(距地面1.2-1.5米)。

测量时间为2016年10月14日—2017年1月13日和2017年2月21日—2017年4月14日，共计22周（春节假期除外），时间固定为每个周五的下午4:30-8:30（晚高峰）。

测量仪器是AirBeam V3 (FCC ID:OC38M1842)。AirBeam 是一个只有手掌大小的便携式检测器，常被美国政府和科研机构用来评价PM<sub>2.5</sub>的个体暴露水平。AirBeam通过一种基于光散射原理的检测方式，空气在通过产品内置的感应室时，LED 灯发出的光会呈现出空气流中的散射粒子，并通过光散射检测仪记录下这些粒子，通过估计空气粒子的数量来测量PM<sub>2.5</sub>值。通过蓝牙，能将所获取的数据实时传送到 AirCasting 安卓应用上。AirBeam测量值与Thermo Scientific的pDR-1500（采用PM<sub>2.5</sub>颗粒物切割点入口）空气颗粒物浓度监测仪的测量结果有很强的相关性<sup>4</sup>。

调查员记录每条线路测量期间（大于等于20分钟）的PM<sub>2.5</sub>平均浓度。地铁外环境的PM<sub>2.5</sub>浓度选取北京市环境保护检测中心网站对应实际测量时间的PM<sub>2.5</sub>的小时值（该小时北京市各监测点的PM<sub>2.5</sub>均值）。

## 1.5. 数据清理和统计分析

使用Epidata 3.1软件进行问卷录入，录入后人工核查数据是否有异常值，若有则与原始问卷核对，了解是填错还是确实存在异常值，若是填错则删除。

采用SPSS 20.0统计软件进行分析。对不同类型数据的统计分别采用卡方检验和秩和检验，多因素分析分别采用多重线性回归和Logistic回归分析。

## 1.6. 质量控制

- 问卷调查
  - 在开始调查前，首先对调查员进行招募和培训，选择责任心强且培训合格的调查员；
  - 进行一次预调查，以进一步完善调查方式与实施计划；
  - 在调查过程中，尽量调查者询问，调查者自己填写答案；若被调查对象要求自己填写，调查员应对填写的内容进行全面的检查（如检查填写是否完整、字迹是否被辨认、问卷填写是否有逻辑错误），如有疑问要重新调查核实，有错误及时更正，有遗漏及时补填；
  - 每周回收问卷，发现漏答或不符合逻辑的问卷予以剔除，以保证数据的可靠性。
- PM<sub>2.5</sub>浓度的测量
  - 1) 不要挡住进气口和出气口，同时不要站在车厢的风口和门口；
  - 2) 仪器位置应保持在人群的呼吸高度附近。

---

<sup>4</sup> AirBeam Technical Specifications, Operation & Performance by Michael H and Alex Besser. Link: <http://www.takingspace.org/airbeam-technical-specifications-operation-performance/>

## 2. 北京地铁通勤者的地铁内空气污染暴露的特点

### 2.1. 调查人群基本特征

本次调查的北京市地铁通勤人群的男女比例基本相当。男性325人，女性293人。**表2-1**简明显示出受访人群的基本特征，根据表格所反映的信息，地铁通勤族呈现出年轻、收入水平中等偏上、受教育水平高、吸烟比例低的特点。例如，从年龄分布来看，地铁通勤族的57.8%来自26-35岁年龄段，36-60岁的人群仅占13.1%；从收入水平来看，地铁通勤族的54.2%处于5000-10000元/月的水平；从受教育程度来看，大学及以上占到93.1%。从地铁通勤行为的时间分布来看，每天上下班通勤时间约两小时，每周乘坐的次数超过10次，累计乘坐时间超过五年半。

表2-1：调查人群基本特征

基本信息	男性 (N=325)	女性 (N=293)	合计 (%)
<b>年龄, n (%)</b>			
18-25岁	65 (20.0)	96 (32.8)	161 (26.1)
26-35岁	212 (65.2)	145 (49.5)	357 (57.8)
36-45岁	40 (12.3)	41 (14.0)	81 (13.1)
46-60岁	7 (2.2)	10 (3.4)	17 (2.8)
60岁以上	1 (0.3)	1(0.3)	2(0.3)
<b>收入, n(%)</b>			
<3000元	6 (1.8)	16 (5.5)	22 (3.6)
3000-5000元	36 (11.1)	55 (18.8)	91 (14.7)
5001-10000元	162 (49.8)	173 (59.0)	335 (54.2)
10001-20000元	107 (32.9)	43 (14.7)	150 (24.3)
>20000元	14 (4.3)	6 (2.0)	20 (3.2)
<b>学历, n (%)</b>			
初中及以下	6 (1.8)	2 (0.7)	8 (1.3)
高中	19 (5.8)	16 (5.5)	35 (5.7)
大学	222 (68.3)	213 (72.7)	435 (70.4)
硕士及以上	78 (24.0)	62 (21.2)	140 (22.7)
<b>职业, n(%)</b>			
教师	11 (3.4)	21 (7.2)	32 (5.2)
医务工作者	17 (5.2)	21 (7.2)	38 (6.1)
政府机关	41 (12.6)	31 (10.6)	72 (11.7)

商业企业	223 (68.6)	195 (66.6)	418 (67.7)
公益机构	2 (0.6)	6 (2.0)	8 (1.3)
其他	31 (9.5)	19 (6.5)	50 (8.1)
<b>有无孩子, n(%)</b>			
有	102 (31.4)	92 (31.4)	194 (31.4)
没有	223 (68.6)	201 (68.6)	424 (68.6)
<b>吸烟, n (%)</b>			
是	68 (20.9)	10 (3.4)	78 (12.6)
否	211 (64.9)	274 (93.5)	485 (78.5)
偶尔	46 (14.2)	9 (3.1)	55 (8.9)
<b>基本信息</b>	<b>男性 (N=325)</b>	<b>女性 (N=293)</b>	<b>平均值</b>
乘地铁时间 (年)	5.74	5.59	5.67
每周乘地铁次数	10.80	10.24	10.53
单程时间, h	1.00	0.89	0.95

## 2.2. 调查人群通勤之间的差异性

我们对所调查人群的通勤特点进行了统计分析，包括显著性检验以及相关分析。结果表明，男性和女性在每周乘坐地铁次数以及单程时间两个通勤指标方面都存在着显著差异。有孩子与没有孩子的被访者在乘坐地铁年限上有极显著差异。不同收入的地铁通勤人员在乘坐地铁年限上有显著差异。如表2-2显示，不同教育程度在地铁单程乘坐时间上是有显著差异的 ( $P<0.05$ )，而在每周乘坐地铁次数和乘坐地铁年限来看并没有显著差异。

表2-2：不同教育水平通勤人员的通勤特点比较

	教育水平	均值	方差	N	F	P
<b>单程时间 (小时)</b>	初中及以下	1.3712	1.24707	8	2.659	0.047
	高中	0.9529	0.49973	35		
	大学本科	0.9517	0.46174	435		
	硕士及以上	0.8999	0.41184	140		
<b>每周乘坐地铁次数</b>	初中及以下	9.63	2.134	8	0.968	0.407
	高中	10.83	2.176	35		
	大学本科	10.63	3.361	435		
	硕士及以上	10.22	2.146	140		
<b>乘坐地铁时间 (年)</b>	初中及以下	4.38	2.326	8	0.844	0.470

高中	6.74	5.863	35
大学本科	5.64	4.938	435
硕士及以上	5.54	3.665	140

### 2.3. 探索影响通勤特点的影响因素

我们使用多重线性回归方法来分析影响通勤特征的因素。分别把乘坐地铁单程时间、在北京乘坐地铁年份、每周乘坐地铁次数作为因变量，把性别、年龄、收入、教育水平、是否有孩子作为自变量，构建线性回归方程，进行多重线性回归。采用后退法筛选变量。对因变量无影响的变量都已经剔除，留下的是对因变量有影响的变量。

表2-3：影响乘坐地铁单程时间的因素

乘坐地铁地 铁单程时间	未标准化系数		标准化系 数	t	P值	95.0% CI for B	
	B	SE				Lower Bound	Upper Bound
性别	-0.095	0.038	-0.101	-2.527	0.012	-0.169	-0.021
教育水平	-0.069	0.034	-0.083	-2.064	0.039	-0.135	-0.003

以上表格显示，性别和教育水平与乘坐地铁单程时间有关。和男性相比，女性乘坐地铁时间更短。教育水平越高的人乘坐地铁单程时间越短。

此外，年龄与乘坐地铁的时间有关，且是正相关，年龄越大，乘坐地铁年份越长，但是每周乘坐地铁的次数也会更少。和男性相比，女性乘坐地铁次数较少。

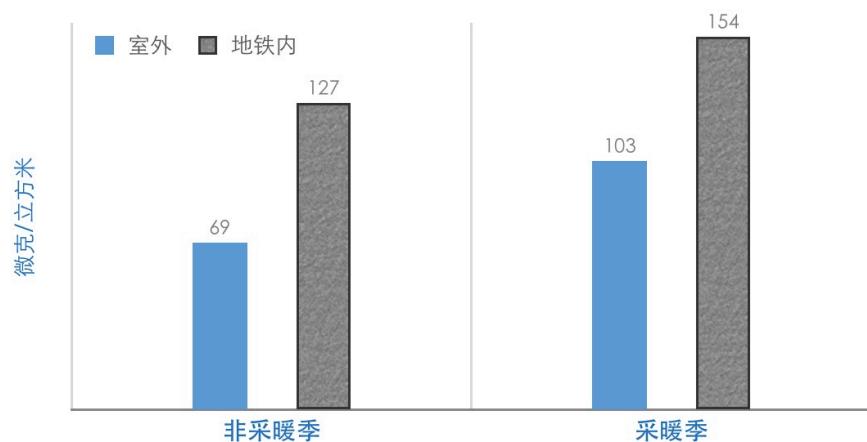
### 3. 空气质量的分析

#### 3.1. 比较地铁内和地铁外的环境空气质量分别在采暖季和非采暖季时的差异

将所有测量值分为采暖季和非采暖季两组进行分析比较，我们发现采暖季地铁空气质量和非采暖季地铁空气质量有差别，具有极显著的统计学意义（ $P<0.01$ ）。采暖季和非采暖季地铁内PM<sub>2.5</sub>浓度分别为154 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ （微克/立方米）和127 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

无论在采暖季还是非采暖季，与同时段室外空气相比较，地铁内的PM<sub>2.5</sub>浓度更高，空气质量更差，如图3-1所示；非采暖季地铁内的PM<sub>2.5</sub>浓度要比室外高84%，采暖季要高50%。这与调查中市民对空气污染的认知是不符的，也是需要公众额外加强意识的一个方面。

图3-1：室外与地铁内空气PM<sub>2.5</sub>浓度在非采暖季和采暖季的差异



注：该监测属于公众自测活动，结果仅供在具体场景下活动的人群参考，与官方公布的空气污染指数数据不具直接可比性。如想了解北京市实时空气质量监测数据，请查询北京市环境保护监测中心数据 <http://zx.bjmemc.com.cn>

监测时段所对应的室外空气质量在采暖季的PM<sub>2.5</sub>的均值为103 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，非采暖季为69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，采暖季的空气质量要比非采暖季糟糕，这也是符合公众认知的。

#### 3.2. 地铁内与室外环境空气质量的差异与相关性

经统计检验，地铁内的空气质量和地铁外的空气质量是极显著差异（表3-1， $P<0.01$ ），也就是说地铁内的PM<sub>2.5</sub>浓度更高，空气质量明显更差。

表3-1 北京地铁线路内、外的PM<sub>2.5</sub>浓度差异

分组	样本量	均值 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	中位数 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	P值
地铁内	198	143.65	132.50	<0.001
地铁外	198	89.82	61.00	

如果将空气质量最好的13号线与最差的8号线同室外空气质量做对比，可以发现，13号线的PM<sub>2.5</sub>浓度水平在这6个月的监测期内与室外接近，尤其是在非采暖季，这可能与其线路室外部分较长、通风较好、车速相对较慢有关；而8号线内PM<sub>2.5</sub>浓度则一直高于室外，无论是采暖季还是非采暖季，在2017年1月中旬和2月下旬有两次室外PM<sub>2.5</sub>浓度处于30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之下，但是8号线内浓度仍然在150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之上。同样，空气质量较差的6号线也表现出与室外空气质量差异更大的情况。各条地铁线路与同期北京市同时

段室外PM<sub>2.5</sub>浓度均值对比可以参见附录2。

图3-2：两条北京地铁线路内与室外PM<sub>2.5</sub>浓度动态对比

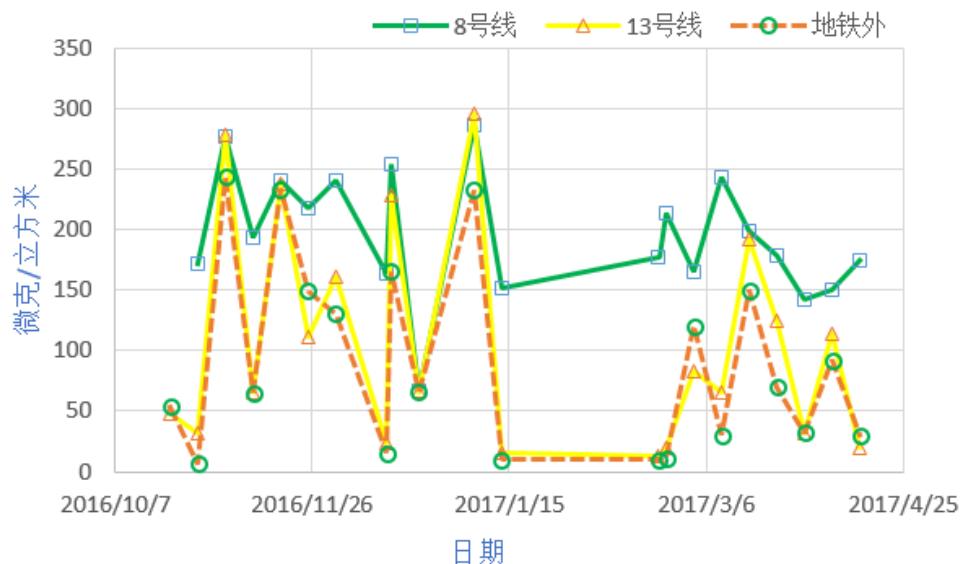


表3-2 是各条线路地铁车厢内和地铁外环境的PM<sub>2.5</sub>浓度的Spearman相关分析的结果表明：不论是所有线路还是每条线路，地铁车厢内的PM<sub>2.5</sub>浓度和地铁外环境的PM<sub>2.5</sub>浓度呈正相关，有统计学意义 ( $P<0.05$ ) 。

表3-2：地铁内与室外空气中PM<sub>2.5</sub>浓度的相关性分析

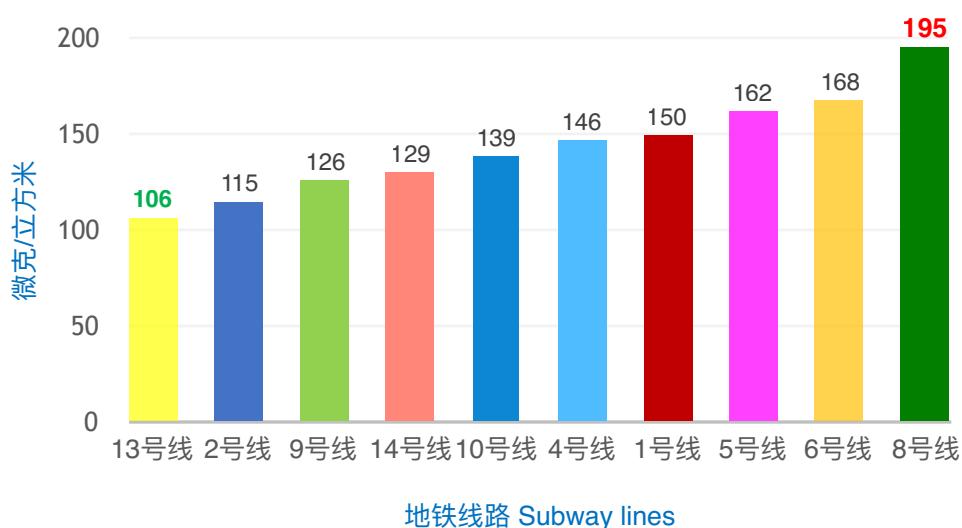
线路	Spearman相关系数	P值
1	0.854	<0.001
2	0.864	<0.001
4	0.804	<0.001
5	0.713	<0.001
6	0.763	<0.001
8	0.601	0.004
9	0.704	<0.001
10	0.863	<0.001
13	0.933	<0.001
14	0.585	0.003
所有线路	0.694	<0.001

### 3.3. 各条地铁线路内PM<sub>2.5</sub>浓度的对比

不仅地铁内空气普遍要比室外糟糕，而且线路之间的差异也很明显。通过对不同线路地铁内PM<sub>2.5</sub>浓度均值进行横向比较，我们发现在项目监测的半年时间内，虽然13号线的PM<sub>2.5</sub>浓度是最低的，为106  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，也远高于国家环境空气质量二级标准（年均35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）浓度水平<sup>5</sup>；8号线空气质量最差，监测其内的均值高达195  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ （如图3-3）。这次的监测结果与2015年我们的“犄角旮旯测空气”项目中地铁空气监测结果类似，当时的13号线和2号线也是PM<sub>2.5</sub>浓度最低的两条线，而8号线和6号线是最高两条线路<sup>6</sup>。

根据统计分析，2号线和13号线作为PM<sub>2.5</sub>浓度最低的两条线路，它们都与8号线的PM<sub>2.5</sub>浓度有显著差异。

图3-3：北京不同地铁线路内PM<sub>2.5</sub>浓度6个月平均值 (2016.10-2017.04)



<sup>5</sup>《环境空气质量标准》GB 3095—2012，环保部科技标准司。链接：[http://kjs.mep.gov.cn/hjbhbz/bzwb/dqhjzbz/dqhjzbz/201203/t20120302\\_224165.htm](http://kjs.mep.gov.cn/hjbhbz/bzwb/dqhjzbz/dqhjzbz/201203/t20120302_224165.htm)

<sup>6</sup>犄角旮旯测空气-抬头“阅兵蓝”，低头“地铁霾”链接：<http://mp.weixin.qq.com/s/DX2lgftb5Y7hWSy5VnLdeg>。2015年“犄角旮旯”测空气项目共计测量了12条线路，除本次地铁调研项目包含的北京人流量较大的十条地铁线路外，还包含亦庄线和7号线。15年监测结果，PM<sub>2.5</sub>浓度最低的三条线路依次为：13号线、亦庄线、2号线。因“北京地铁通勤上班族空气污染暴露水平差异及相应健康影响评估”项目调查未涉及到亦庄线，得出的结论PM<sub>2.5</sub>浓度最低的两条地铁线路分别为13号线与2号线，与15年的监测结果相符。

## 4. 北京地铁通勤者对地铁内外空气污染的认知

### 4.1. 通勤者对空气污染的认识在不同特点人群中的差异

从表4-1可以看出，对于消费者是否应该承担责任，与男性被访者相比，女性被访者表现出更加积极的态度，有更大比例的女性认为消费者应该承担责任。在是否听说过AQI这个问题上，男女并无统计学差异。男性和女性都有超过95%以上的人认为空气污染对生活有影响。在可再生电力对缓解北京污染是否有帮助这个问题上，与男性相比，女性有更大比例认为有帮助，差异有统计学意义。

表4-1：对空气污染的看法在性别中的分布

项目	性别		合计	卡方	P
	男 (n=325)	女 (n=293)			
消费者应承担责任	220 (67.7%)	220 (75.1%)	440 (71.2%)	4.107	0.043
听说过AQI	231 (71.1%)	205 (70.0%)	436 (70.6%)	0.092	0.762
空气污染对生活有影响	309 (95.1%)	288 (98.3%)	597 (96.6%)	4.857	0.028
可再生电力对缓解北京空气污染有帮助	278 (85.5%)	267 (91.1%)	545 (88.2%)	4.619	0.032

如果以认为消费者是否应该承担责任进行变量分组进行相关性分析，在认为消费者更应该承担责任的受访者中，收入水平越低，年龄越小，吸烟频率低，对口罩和空气净化器的防护效果评价越高，每月愿意多支付的金额也越高。

表4-2：消费者是否应该承担责任

	消费者承担责任	N	Mean Rank	P值
查看空气质量频率递增	是	314	218.30	0.955
	否	122	219.02	
使用口罩频率递增	是	329	230.42	0.100
	否	120	210.13	
收入水平	是	440	297.66	0.004
	否	178	338.76	
年龄分组	是	440	295.86	0.001
	否	178	343.22	
教育水平	是	440	312.64	0.390
	否	178	301.74	
吸烟程度	是	440	303.02	0.048
	否	178	325.52	

空气污染影响评价	是	440	313.43	0.270
	否	178	299.79	
口罩防护效果评价	是	440	318.74	0.019
	否	178	286.67	
空气净化器防护效果评价	是	440	317.86	0.038
	否	178	288.83	
一个口罩的支付意愿	是	440	314.19	0.269
	否	178	297.91	
净化器的支付意愿	是	440	312.27	0.519
	否	178	302.66	
每月愿意多支付的金额	是	438	322.64	0.001
	否	176	269.83	

对于空气污染，消费者是否应该承担责任和收入的关系，收入水平越高，认为应该承担责任的比例越低，收入水平越低，认为消费者应该承担责任的比例反而越高，趋势明显。而且P值小于0.05，有统计学显著意义。

表4-3：收入水平与消费者是否应该承担责任的关系

	收入水平				
	小于3000元	3000-5000元	5001-10000元	10001-20000元	20000元以上
消费者应该承担责任	17 (77.3)	68 (74.7)	250 (74.6)	94 (62.7)	11 (55.0)

#### 4.2. 不同人群对空气污染防护产品的评价

两组有序变量的差异比较使用秩和检验（Mann-Whitney U检验）：指标均为递增编排，平均秩次（mean rank）越高，代表的频率越高或者支付意愿更高，评价越高，影响越大。由表4-4可以看出，在空气污染对生活的综合影响上，与男性被访者相比，女性认为影响更大，并且二者之间存在着显著差异（P<0.05）；在对口罩的防护效果和空气净化器的防护效果上，女性都是认为影响更大，但是男女之间没有统计学意义的差异。

表4-4：性别与对空气污染防护产品的评价的关系（Mann-Whitney U检验）

	性别	N	Mean Rank	P值
空气污染的综合影响	男	325	296.08	0.012
	女	293	324.38	
口罩防护效果评价	男	325	303.56	0.310
	女	293	316.09	

<b>空气净化器防护效果评价</b>	男	325	303.81	0.344
	女	293	315.81	

不同职业对口罩和空气净化器的评价没有差异，但是教师、医务工作者和公益机构工作人士对于口罩的的防护效果，都认为作用更大。

表4-5：职业和通勤者对空气污染防治工具评价的关系（Mann-Whitney U检验）

	职业	N	Mean Rank	P值
口罩的防护效果打分	教师	32	307.59	0.712
	医务工作者	38	307.88	
	政府机关	72	291.02	
	商业企业	418	279.13	
	公益机构	8	303.13	
	教师	32	311.23	0.738
	医务工作者	38	287.07	
	政府机关	72	288.53	
空气净化器防护效果打分	商业企业	418	282.62	
	公益机构	8	227.06	

#### 4.3. 空气污染防护行为和性别的关系

从表4-6可以看出，与男性被访者相比，女性有更大的比例采取措施进行防护，并且有极显著差异 ( $P<0.01$ )；女性也有更大的比例使用口罩进行防护，差异具有统计学意义；男性和女性使用空气净化器的比例并无明显差异。

表4-6：应对空气污染的行为和性别的关系

项目	性别		合计	卡方	P值
	男 (n=325)	女 (n=293)			
采取措施进行防护	258 (79.4%)	274 (93.5%)	532 (86.1%)	25.684	<0.001
使用口罩	203 (78.7%)	246 (89.8%)	449 (84.4%)	12.431	<0.001
使用空气净化器	148 (57.4%)	153 (55.8%)	301 (56.6%)	0.126	0.723

#### 4.4. 空气污染防护行为和是否有孩子的关

从表4-7可以看出，北京地铁通勤者中，有孩子的被访者使用空气净化器的比例为70.5%，没有孩子的使用空气净化器的比例为50.3%，差异非常明显，在统计学上属于极显著差异 ( $P<0.01$ )。可能是因为孩子比较敏感，有孩子的人为了保护孩子，更多的人会选择使用空气净化器。

表4-7 应对空气污染的行为和是否有孩子的关系

项目	是否有孩子		合计	卡方	P值
	有 (n=194)	没有 (n=424)			
采取措施进行防护	166 (85.6%)	366 (86.3%)	532 (86.1%)	0.063	0.802
使用口罩	136 (81.9%)	313 (85.5%)	449 (84.4%)	1.119	0.290
使用空气净化器	117 (70.5%)	184 (50.3%)	301 (56.6%)	18.985	<0.001

#### 4.5. 应对空气污染的行为的频率的影响因素

从表4-8可见，和男性相比，女性使用口罩的频率要更高，差异极显著 ( $P<0.01$ )。查看空气质量的频率和使用空气净化器的频率没有统计学显著差异。

表4-8：性别与应对空气污染的防护行为的关系 (Mann-Whitney U检验)

	性别	N	Mean Rank	P值
查看空气质量频率递增	男	231	211.55	0.195
	女	205	226.33	
使用口罩频率	男	203	201.07	<0.001
	女	246	244.75	
使用空气净化器的天数	男	148	154.38	0.469
	女	153	147.73	

从表4-9可以看出，查看空气质量、使用口罩、使用空气净化器的频率在有孩子和没孩子的人群（均为有这些行为的通勤者）之间没有统计学显著差异。

表4-9：是否有孩子与应对空气污染的防护行为的关系 (Mann-Whitney U检验)

	是否有孩子	N	Mean Rank	P
查看空气质量频率递增	有	143	224.99	0.426
	没有	293	215.33	
使用口罩频率	有	136	219.35	0.494
	没有	313	227.46	
使用空气净化器的天数	有	117	151.41	0.943
	没有	184	150.74	

此外，查看空气质量的频率和使用口罩的频率和使用空气净化器的频率也均与职业没有关系。

## 5. 通勤者对空气PM<sub>2.5</sub>暴露的知、信、行分析

知行关系是决策科学和行为科学研究的主要问题之一。我们的调研数据显示了受访者在空气污染认知和应对行为之间的不一致性。相关性分析也揭示出众多因素对知行关系发挥着影响。本章详细讨论了通勤者在空气污染问题上的知、信、行特点。

### 5.1. 空气污染对生活影响程度和是否采取措施进行防护

根据表5-1，认为空气污染对自己有明显影响的受访者采取防护措施的比例最高，达到90.1%。认为空气污染对自己的影响越大，采取措施的比例越高，P值小于0.01，差异具有显著的统计学意义。认为空气污染对生活有影响并采取防护措施的有527人，而这里所谓的采取防护措施是范围广泛的，如果仅指乘地铁戴口罩这一具体防护措施，我们却看到不同的结果。

表5-1:空气污染对生活的影响程度和是否采取措施的关系

对空气污染带来的影响评价	采取防护措施		卡方	P
	是,n(%)	否,n(%)		
没影响	5 (45.5%)	6 (54.5%)	30.516	<0.001
	有一些影响	126 (77.8%)		
	有明显影响	401 (90.1%)		

### 5.2. 口罩的效果和是否戴口罩

乘坐地铁时佩戴口罩的比例在受访者中并不算高。乘坐地铁时从来不佩戴口罩的占比高达36%，总是佩戴的仅有7%（在618位受访者中，有449位受访者选择当自己受到空气污染影响时会采取佩戴口罩防护，36%和7%的比例都指在采取佩戴口罩的方式进行防护的人群中间的比例）。

造成这种情况，很大程度上与人们不了解地铁内空气质量比室外更差的现实有关。如表5-2A所示，340位受访者认为地铁外空气质量更严重。并且，认为地铁内空气质量更严重的人在地铁内带口罩的频率的平均秩次最高，也就是佩戴口罩频率越高，且P小于0.05，差异有统计学意义。

另一方面，也与人们对佩戴口罩的污染防治效果判断有关（见表5-2B）。在关于口罩防护效果的问题上，有超过三分之二的受访者的评分都在5分之下，也就是并不认为口罩有明显的防护效果。而认为口罩有明显防护效果的人戴口罩的比例最高，达到89.7%；对口罩防护效果评价越高，戴口罩进行防护的比例也越大，P值小于0.05，差异具有统计学意义。

表5-2A: 对地铁内空气污染看法和地铁内是否带口罩的关系

地铁内戴口罩递增	您认为空气质量哪里更严重	N	Mean Rank	卡方	P
递增	地铁内	94	260.74	10.850	0.013
	地铁外	340	215.94		
	差不多	11	222.45		
	视情况而定	4	162.50		
	Total	449			

表5-2B：对口罩防护效果的评价和是否戴口罩进行防护

对口罩防护效果的评价	是否戴口罩进行防护		卡方	P
	是, n (%)	否,n (%)		
没有效果	18 (78.3%)	5 (21.7%)	6.155	0.046
	有一些效果	266 (81.8%)	59 (18.2%)	
	有明显效果	165 (89.7%)	19 (10.3%)	

### 5.3. 对口罩防护效果的评价与口罩的支付意愿间的关系

根据表5-3的信息，在不愿意支付的人群中，认为口罩的防护效果没有效果的比例最高；同时，在愿意支付100元以上的人群中，认为口罩有明显效果的比例最大。

表5-3：对口罩的评价和对口罩的支付意愿的比例分布

		0元	<20元	20-50元	50-100元	>100元
口罩防护效果评价	没有效果	15(36.6%)	18(43.9%)	5(12.2%)	2(4.9%)	1(2.4%)
	有一些效果	29(7.7%)	156(41.3%)	153(40.5%)	31(8.2%)	9(2.4%)
	有明显效果	8(4.0%)	97(48.7%)	75(37.7%)	10(5.0%)	9(4.5%)
	合计	52(8.4%)	271(43.9%)	233(37.7%)	43(7.0%)	19(3.1%)

表5-4显示了两者的相关性。由Kruskal-Wallis检验可知，认为口罩没效果的人的支付意愿最低；认为口罩有效果的人支付意愿更高，平均秩次远大于认为口罩没效果的人；p小于0.001，有统计学意义。

表5-4：对口罩的评价和对口罩的支付意愿的Kruskal-Wallis 检验

	口罩打分	N	Mean Rank	卡方	P
一个口罩的支付意愿	没有效果	41	188.94	23.347	<0.001
	有一些效果	378	319.62		
	有明显效果	199	315.12		

### 5.4. 对空气净化器防护效果的评价和空气净化器的支付意愿之间的关系

类似的，我们来看受访者对空气净化器防护效果的评价和空气净化器的支付意愿之间的关系。表5-5显示了二者的关系，由Kruskal-Wallis检验可知，对空气净化器的防护效果的评价越高，支付意愿的平均秩次也越高，说明支付意愿越高，且P小于0.001，具有统计学意义。

表5-5 对空气净化器防护效果的评价和对空气净化器的支付意愿

	对空气净化器的评价	N	Mean Rank	卡方	P
净化器的支付意愿	没有效果	23	175.28	61.584	<0.001
	有一些效果	298	268.03		
	有明显效果	297	361.51		

空气净化器是人们在非移动状态下防护灰霾的主要手段，而通勤者一天的大部分时间呆在室内环境（办公室或家中）。人们使用空气净化器的行为特征值得关注，因为这可以帮助我们评价人们使用空气净化器的健康收益。从访谈数据来看，618位受访者中，有301位平常使用空气净化器，大约占受访总人数的一半；接近一半的受访者一年中对于空气净化的使用都在100天以下。受访者所使用的空气净化器的价格在1000-3000元这个区间的最多，占到总人数的43.2%；使用3000-5000元这个价格区间空气净化器的占到三分之一。

下面我们根据收集到的数据来分析哪些因素会影响是否使用空气净化器的行为。我们特别关注了“年龄”和“是否有孩子”这两个因素。没有孩子是0，有孩子是1；年龄的参照是18-25岁的年轻人。如表5-6显示，相对于年轻人，年龄为26-35岁和36-45岁的人更多在使用空气净化器，且36-45岁的人使用空气净化器的可能性更高；相对于没有孩子的人，有孩子的人使用空气净化器的更多。

表5-6：是否使用空气净化器的影响因素 - 年龄和是否有孩子

使用空气净化器的影响因素	B	S.E.	Sig.	OR	OR 95% C.I.	
					Lower	Upper
年龄26-35岁	0.747	0.228	0.001	2.110	1.349	3.300
年龄36-45岁	1.246	0.383	0.001	3.475	1.639	7.368
是否有孩子	0.587	0.246	0.017	1.799	1.111	2.911

## 5.5. 可再生能源电力支付意愿

公众的电力消费支付意愿是围绕电价改革和决策的一个重要因素，我们的调查显示，大多数受访者有意愿通过提高电力消费支出水平支持更高比例的可再生能源电力系统的实现。我们假设北京每户家庭愿意多支出50元/月来支持可再生能源电力消费，根据北京市2016年国民经济和社会发展统计公报，北京有燃气家庭用户907万户，我们以此数算为北京常住居民的家庭总数，那么北京一年在增加可再生能源电力消费的支付意愿总计约54.4亿元。这对于促进更多的可再生能源电力消费有积极的作用。这或许可以为决策者加大在可再生能源电力发展上的投入提供有意义的参考。

从表5-7可知，认为可再生电力对缓解北京的空气污染有帮助的人群，每月愿意多支付电费的比例为87.7%；而认为没帮助的里面，愿意支付的比例仅为53.6%。认为可再生电力对缓解北京空气污染有帮助的人群愿意多支付的比例更高。P值小于0.01，差异具有显著的统计学意义。不过有趣的是，就算认为没帮助，也会有53.6%的人愿意支付。

表5-7：可再生能源是否有帮助和是否愿意多支付

		是否愿意多支付		卡方	P
		不愿意多支付	愿意多支付		
可再生能源对缓解北京的空气污染是否有帮助吗	有	67 (12.3%)	478 (87.7%)	52.608	<0.001
	没有	32 (46.4%)	37 (53.6%)		
	合计	99 (16.1%)	515 (53.9%)		

接下来，我们讨论一下愿意支付的金额与“认为可再生能源对缓解北京空气污染是否有帮助”之间的关系。从表5-8可见各支付意愿在两组人群中的比例分布，认为可再生电力对缓解北京空气污染有帮助的人每月愿意支付的金额比例最高的是50元 / 月；认为没帮助的人不愿意支付的比例最高，25元、50元、100元和200元档也都比认为有帮助的人的比例低。

表5-8：可再生能源是否有帮助和愿意支付的金额的比例

		每月愿意多支付的金额				
		0元	25元每月	50元每月	100元每月	200元每月
可再生能源对缓解北京的空气污染是否有帮助吗	有	67 (12.3%)	144 (26.4%)	171 (31.4%)	138 (25.3%)	25 (4.6%)
	没有	32 (46.4%)	17 (24.6%)	9 (13.0%)	11 (15.9%)	0 (0.0%)
	合计	99 (16.1%)	161 (26.2%)	180 (29.3%)	149 (24.3%)	25 (4.1%)

从表5-9可见，和认为没有帮助的组相比，认为有帮助的组里的支付金额的平均秩次更高，也就是每月愿意支付的金额更多，P小于0.001，差异具有统计学意义。

表5-9：对可再生能源电力的看法和支付意愿的Mann-Whitney检验

每月愿意多支付的金额	可再生能源对缓解北京的空气污染是否有帮助	N	Mean	卡方	P
			Rank		
有		545	321.70	33.114	<0.001
没有		69	195.36		

下面，我们来看是否愿意为可再生能源电力多支付的影响因素。因变量为“是否愿意多支付”，自变量为“认为可再生能源是否有帮助”，“性别”，“年龄”，“收入”，“受教育程度”，“是否有孩子”。采用后退法进行筛选变量。不愿意多支付为0，愿意多支付为1；年龄参照组为18-25岁。

表5-11：是否愿意为可再生能源电力多支付的影响因素 - 性别、年龄和对可再生能源的认知

愿意多支付的 影响因素	B	S.E.	Sig.	OR	OR 95% C.I.	
					Lower	Upper
性别	1.115	0.265	<0.001	3.050	1.814	5.128
年龄46-60岁	-2.367	0.634	<0.001	0.094	0.027	0.325
认为有帮助	1.816	0.291	<0.001	6.148	3.474	10.882

相对于男性，女性更愿意多支付；相对于年轻人，46-60岁的人更不愿意多支付；相对于认为可再生能源没帮助的人，认为可再生能源对缓解空气污染有帮助的人更愿意多支付。

## 5.6. 关于支付意愿的相关性分析

支付意愿很难直接解释最终的实际购买行为，但它是理解现实购买行为的重要切入口。当我们把其它变量 / 因素与支付意愿放在一起进行相关性分析时，一方面可以说明支付意愿是否与这些变量存在相关性，另一方面，也可以帮助我们理解这些变量 / 因素是否对“知行一致性”产生影响。

借助本次调研当中所搜集的受访者的性别、是否有孩子、收入、教育等基本社会经济数据，我们简要分析了这些因素对受访者支付意愿的影响。

两组有序变量的差异的比较应使用秩和检验，指标均为递增编排，平均秩次（mean rank）越高，代表的频率越高或者支付意愿更高，评价越高，影响越大。男性为1，女性为2。

从表5-12可见，和男性相比，女性对净化器、口罩和的支付意愿的平均秩次更高，也就是支付意愿更高；且P值均小于0.05，差异具有统计学意义。但是实际使用的净化器的价格水平在男女间却没有显著差异，P为0.098，大于0.05，这可能是因为实际使用空气净化器的价格水平和支付意愿之间还有一定差距，或者是家里使用的空气净化器的价格水平还受到家里其他人的影响。

表5-12：性别与通勤者支付意愿的Mann-Whitney U检验

	性别	N	Mean Rank	P
净化器的支付意愿	男	325	294.11	0.016
	女	293	326.58	
一个口罩的支付意愿	男	325	285.82	<0.001
	女	293	335.77	
使用空气净化器价格水 平	男	148	143.10	0.098
	女	153	158.64	
对可再生电力每月愿意 多支付的金额	男	322	292.52	0.023
	女	292	324.02	

从表5-13可见，和没有孩子的人群相比，有孩子的人群对空气净化器的支付意愿和实际使用的空气净化器的水平都更高。而口罩和对可再生电力对孩子的健康影响较小，因此差距不明显，也没有统计学意义。

表5-13 是否有孩子与通勤者支付意愿的Mann-Whitney U检验

	是否有孩子	N	Mean Rank	P
净化器的支付意愿	有	194	344.19	0.001
	没有	424	293.63	
一个口罩的支付意愿	有	194	297.86	0.237
	没有	424	314.83	
使用空气净化器价格水平	有	117	164.59	0.021
	没有	184	142.36	
对可再生电力每月愿意多支付的金额	有	193	301.74	0.574
	没有	421	310.14	

收入和支付意愿的Spearman相关性检验显示，收入和对可再生能源电力、空气净化器的支付意愿成正相关，且P值小于0.05，具有统计学意义；也就是收入水平越高，对可再生能源电力和空气净化器的支付意愿也越高。

学历和支付意愿的分析结果显示，学历和空气净化器的支付意愿成正相关，且P值小于0.05，具有统计学意义；也就是学历水平越高，对空气净化器的支付意愿就更高。

表5-14：收入和学历对支付意愿的影响

指标	关系	Spearman相关系数	P值	结果
收入	对可再生电力的支付意愿	0.085	0.035	正相关
	口罩支付意愿	0.037	0.363	不相关
	空气净化器支付意愿	0.209	<0.001	正相关
学历	对可再生电力的支付意愿	0.024	0.559	不相关
	口罩支付意愿	0.040	0.319	不相关
	空气净化器支付意愿	0.184	<0.001	正相关

## 6. 地铁通勤者空气PM<sub>2.5</sub>暴露的健康风险评估

根据国内外空气PM<sub>2.5</sub>暴露对健康影响的研究，PM<sub>2.5</sub>暴露与人群全死因死亡率之间存在线性暴露-反应关系，而且这种关系在PM<sub>2.5</sub>浓度低于2μg/m<sup>3</sup>的时候仍然存在<sup>7</sup>。这就意味着，空气PM<sub>2.5</sub>暴露对人群的健康影响没有一个安全阈值。从减少健康影响的角度来讲，PM<sub>2.5</sub>浓度长期控制目标越低越好。

中国近年也在空气PM<sub>2.5</sub>浓度对健康影响方面做了很多研究，一项关于颗粒物污染对呼吸系统疾病死亡率短期影响的研究显示，PM<sub>2.5</sub>浓度升高10μg/m<sup>3</sup>，所有年龄人群呼吸系统疾病死亡率上升0.51%、心血管系统疾病死亡率上升0.44%<sup>8</sup>。

根据美国一项500,000人随访16年的队列研究，PM<sub>2.5</sub>浓度每升高10μg/m<sup>3</sup>，全死因、心肺功能和肺癌的死亡风险将分别增加4%，6%，8%。<sup>9</sup>

依据2016年10月至2017年4月所进行的22次跨越取暖季、覆盖北京地铁10条线路的监测结果，地铁内的PM<sub>2.5</sub>浓度在冬季采暖季期间（2016年11月中旬到2017年三月中旬）和部分非采暖季期间（分别包括采暖季前的约一个月和采暖季结束后的一个月）分别为154μg/m<sup>3</sup>和127μg/m<sup>3</sup>。根据第一章关于调查方法的解释，这里的数据更大程度上反映了地铁内下班高峰时段的PM<sub>2.5</sub>暴露水平，全天平均水平应当较低，因为非高峰时段PM<sub>2.5</sub>浓度较低。地铁内PM<sub>2.5</sub>全年平均浓度应在154μg/m<sup>3</sup>和127μg/m<sup>3</sup>之间。本报告设定地铁内年均PM<sub>2.5</sub>浓度值为127 μg/m<sup>3</sup>。这比北京市环境保护监测中心公布的2016年北京全年日均值73μg/m<sup>3</sup>高出54μg/m<sup>3</sup>。地铁内相对较高的空气污染究竟会给通勤上班族带来多大的健康风险呢？

根据调查结果，调查对象每周乘坐地铁次数为10次左右（调查结果为10.53次），1天上下班2次乘坐地铁，一周5天工作日；单程乘坐地铁时间1小时（调查结果为0.95小时）。也就是每天暴露2小时，每周暴露5天，中国一年法定节假日为11天，根据以上换算为每天因乘坐地铁上下班实际多暴露的PM<sub>2.5</sub>浓度。

$$54*(2/24)*(5/7)*(354/365) = 3.12\mu\text{g}/\text{m}^3$$

也就是调查对象因每天乘坐地铁上下班而导致多暴露的PM<sub>2.5</sub>浓度为每天3.12μg/m<sup>3</sup>。

$$3.12/10=0.31$$

$$\text{RR总}^{10}=1.04^{0.31}=1.0123 \quad \text{RR心肺}=1.06^{0.31}=1.0183 \quad \text{RR肺癌}=1.08^{0.31}=1.0242$$

因此，调查对象乘坐地铁上下班16年将导致全死因死亡、因心肺疾病死亡、因肺癌死亡的风险分别增加1.23%，1.83%，2.42%。

我们的调查结果显示，乘坐地铁时佩戴口罩的人仍然是少数，没有认识到佩戴口罩带来的健康收益可能是重要原因之一。我们假设乘坐地铁时佩戴的防雾霾口罩在现实中可以阻挡50%–90%的PM<sub>2.5</sub>吸入量，根据上文关于乘坐地铁会面临增加PM<sub>2.5</sub>日均暴露3.12μg/m<sup>3</sup>的计算，如果佩戴口罩，就可以减少1.56μg/m<sup>3</sup>-2.81μg/m<sup>3</sup>的PM<sub>2.5</sub>暴露，结合上述相对危险度计算的方法，我们可以得到佩戴口罩所减少的健康风险，计算如下：

<sup>7</sup> 郭新彪、杨旭主编《空气污染与健康》p27-28. 湖北科学技术出版社. 2015年

<sup>8</sup> 郭新彪 杨旭主编《空气污染与健康》p19 and p22. 湖北科学技术出版社. 2015年

<sup>9</sup> CA Pope III, RT Burnett, MJ Thun etc, Lung Cancer, Cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution, The Journal of the American Medical Association, 2002.

<sup>10</sup> RR(Relative Risk) 指相对危险度，即某水平的大气污染相对于清洁水平（即阈值）的健康风险。

RR<sub>总</sub>=1.04<sup>0.156</sup>=1.0061；RR<sub>心肺</sub>=1.06<sup>0.156</sup>=1.0091；RR<sub>肺癌</sub>=1.08<sup>0.156</sup>=1.0120

RR<sub>总</sub>=1.04<sup>0.281</sup>=1.0111；RR<sub>心肺</sub>=1.06<sup>0.281</sup>=1.0165；RR<sub>肺癌</sub>=1.08<sup>0.281</sup>=1.0218

因此，调查对象乘坐地铁上下班如果全程佩戴口罩会降低全死因死亡、因心肺疾病死亡、因肺癌死亡的风险分别为0.61%-1.11%、0.91%-1.65%、1.20%-2.18%。

越来越多的研究已证实空气PM<sub>2.5</sub>对人群健康的严重负面影响。在空气质量持续改善的过程中，每一个公民也有责任采取防护措施降低自己的健康风险。在现实中，人们的空气污染暴露特征变化很多，时空分布复杂，因为人们处于不同的时空环境当中。但无论怎样，人们可以选择各种方式减少暴露，有效降低空气污染的健康风险。

而从成本收益分析的角度来看，采取防护行为获得的健康收益远远超过成本投入。从常常佩戴口罩可能带来的一年几百元的花费，到在室内使用空气净化器所导致的一年几千元的支出，再到投入更大的家庭阻挡PM<sub>2.5</sub>的新风系统<sup>11</sup>，与降低罹患心肺系统严重疾病的风险相比，都是值得的。

---

<sup>11</sup> 这里假设每周更换一个价值10元的口罩，一年下来更换40-50个；净化器投入包括购买仪器和滤网更换。

## 7. 讨论

### 7.1. 本研究主要发现

- PM<sub>2.5</sub>浓度比较

地铁车厢内晚高峰时段的PM<sub>2.5</sub>浓度采暖季比非采暖季高。地铁车厢内晚高峰时段的PM<sub>2.5</sub>浓度比地铁外环境高。不同地铁线路车厢内的PM<sub>2.5</sub>浓度不同，13号线PM<sub>2.5</sub>浓度最低，8号线PM<sub>2.5</sub>浓度最高。

在北京的一项研究发现，地铁车厢内空气污染物普遍存在早晚高峰时期较高，中午时段浓度较低的特点，在早晚高峰时段各种污染物浓度超标现象较为严重；通过对地铁车厢内污染物进行分析，发现地铁内污染物浓度与地铁内拥挤程度存在正相关关系<sup>12</sup>。在天津开展的一项研究发现，高峰时期地铁车厢内的PM<sub>2.5</sub>浓度为151.43μg/m<sup>3</sup>，车厢内的PM<sub>2.5</sub>浓度比地铁外环境要高<sup>13</sup>。

本研究测量时段为晚高峰，车厢内浓度平均值为143μg/m<sup>3</sup>，比地铁外环境高，与已有文献研究结论一致。我国《环境空气质量标准》（GB3095-2012）中规定，PM<sub>2.5</sub>二级浓度限值为75μg/m<sup>3</sup>（日均）和35μg/m<sup>3</sup>（年均），而从本调查测得的数据中可以发现，北京地铁车厢内的PM<sub>2.5</sub>含量平均值远远大于这一限值。通风不良，人多拥挤和轨道摩擦等是地铁车厢内PM<sub>2.5</sub>浓度高于室外的原因。

- 通勤特点

调查对象乘坐地铁单程时间平均为0.95小时，即57分钟；单程时间与性别和教育水平有关，女性乘坐地铁时间更短，每周乘坐地铁次数更少；教育水平越高的人乘坐地铁单程时间越短。

北京交通发展年报统计发现轨道交通早高峰平均出行时耗为62.3分钟，晚高峰平均出行时耗为56.8分钟，与本调查的结果一致<sup>14</sup>。在北京的一项调查发现，北京市4个样本区地铁平均单程时间为53.3分钟<sup>15</sup>。本研究发现晚高峰平均出行时间为57分钟，与以上研究的统计结果基本一致。

- 空气污染相关认知

关于空气污染，女性和年轻人更倾向于认为消费者应该承担责任。女性有更大的可能认为发展可再生能源对减少空气污染有帮助。女性有更大的可能认为空气污染对自己有影响。吸烟的人有更大的可能认为口罩对防护空气污染没有效果。

2013年在北京的一个1000人左右的调查发现，关于解决大气污染问题的责任在谁，人们一致认为责任在于政府（89.6%），一半的人提到了工厂（50.1%），样本中36.5%的参与者认为老百姓要承担缓解污染的责任<sup>16</sup>。本次在地铁通勤族中调查发现，71.2%的调查对象认为消费者应该为空气污染承担一定责任。与以往研究不一致可能是因为调查人群不一样，或者调查时间不一样，人们的观念在变化等原因造成的。

- 应对空气污染的防护行为特点

女性更倾向于采取措施进行防护，吸烟的人更倾向于不采取措施。女性有更大可能戴口罩。年龄越大、有孩子、学历越高，使用空气净化器的可能性越大。行为与观念一致，认为空气污染对自己的影

---

<sup>12</sup>杨伟超.运营地铁内污染物浓度的计算方法及应用研究[D].长沙.中南大学.2009.

<sup>13</sup>Wang B Q, Liu J F, Ren Z H, et al. Concentrations, properties, and health risk of PM<sub>2.5</sub> in the Tianjin City subway system[J]. Environmental Science & Pollution Research International, 2016, 23(22):1-11.

<sup>14</sup>2016北京交通发展年报

<sup>15</sup>文婧,王星,连欣.北京市居民通勤特征研究——基于千余份问卷调查的分析[J].人文地理,2012(5):62-68.

<sup>16</sup>朱可珺.公众对大气污染的应对行为及其影响因素研究——以北京市为例[D].北京大学,2014.

响越大，采取措施进行防护的比例越高。对口罩防护效果评价越高，戴口罩进行防护的比例也越大，对口罩的支付意愿也越高。对空气净化器效果的评价越高，使用空气净化器的可能性越大。

在北京的1000人左右的调查还发现<sup>17</sup>，在防护行为方面，女性戴口罩的频率更高，不吸烟的人相对于吸烟的人戴口罩的频率更高，与本研究结论一致。认为污染程度越高、防护行为有效的人，戴口罩防护大气污染的可能性越高，与本研究的结论也一致。在北京市晨练人群中的一个调查中也发现，女性中有更大的比例会根据PM<sub>2.5</sub>污染情况决定应对污染的行为，与本研究结果一致，可能女性更注重对空气污染的防护。该调查还发现对空气污染危害的感知与是否根据PM<sub>2.5</sub>的浓度决定晨练行为有关。说明对空气污染的认知会影响空气污染的防护行为<sup>18</sup>，与本研究发现一致。

- 支付意愿

女性更愿意为口罩和空气净化器支付；收入高的人更愿意为口罩和空气净化器支付。女性、年轻人和认为可再生能源有帮助的人更愿意为可再生能源电力多支付。调查对象中43.9%的人对口罩的支付意愿为小于20元，47.2%的人对空气净化器的支付意愿为1000-3000元之间。

另外，一项报道显示中国消费者愿意付出超过2000元人民币的价钱来购买一台空气净化器<sup>19</sup>。

- 健康风险评估

本报告依据暴露-反应关系模型，并结合流行病学研究文献，初步估算出调查对象乘坐地铁上下班16年面临的健康风险：导致全死因死亡、因心肺疾病死亡、因肺癌死亡的风险分别增加1.23%，1.83%，2.42%。我们也将佩戴口罩这一简单有效的防护措施考虑在内，估算出乘坐地铁佩戴口罩所能避免的健康风险：调查对象乘坐地铁上下班如果全程佩戴口罩会降低全死因死亡、因心肺疾病死亡、因肺癌死亡的风险分别为0.61%-1.11%、0.91%-1.65%、1.20%-2.18%。

## 7.2. 研究不足

地铁车厢内最具有代表性的四种污染物为气体二氧化碳（CO<sub>2</sub>）、挥发性有机物（VOC）、可入肺颗粒物（PM<sub>2.5</sub>）和一氧化碳（CO）<sup>20</sup>。而本研究只测量了地铁车厢内的PM<sub>2.5</sub>，只能评价地铁内空气质量的一部分，不能进行综合评价。

此外，在地铁内的问卷调查没有进行完全随机，对北京地铁通勤上班族的代表性有一定局限。且调查时间段在4:30PM到8:30PM之间，跨度较大，可能各条线路的拥挤程度不完全一样，也可能会影响车厢内的空气质量。

## 7.3. 研究优点

本研究实地测量了10条北京市地铁线路的空气质量，且每次各线路都是在同一时段测量，因此各线路具有可比性。

本调查的样本量较大，虽然不是完全随机抽样，但是由于地铁通勤族的流动性和晚高峰时高度拥挤等特点，完全随机调查不现实。调查的人群是均匀分布在10条线路上的，对北京市地铁通勤族有较大代表性。

本研究采用访谈式调查，由调查员填写答案，且每周的调查都会审核问卷的有效性，对于关键题目答案缺漏或者有逻辑错误都会剔除，因此数据的质量比较可靠。

<sup>17</sup>朱可珺.公众对大气污染的应对行为及其影响因素研究——以北京市为例[D].北京大学,2014.

<sup>18</sup>黄永,刘勋,施国庆,曾光.北京市公园晨练人群对空气细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)健康危害的认知状况调查[J].中华疾病控制杂志,2014,18(06):541-544. [2017-08-07].

<sup>19</sup>《金融时报》:中国空气净化器销量下滑[J].世界博览,2015(23):14-14.

<sup>20</sup>刘冰玉.地铁车厢环境空气质量研究[D].北京市市政工程研究院, 2016.

#### 7.4. 建议

根据本研究，地铁内PM<sub>2.5</sub>在晚高峰时超过国家空气质量标准，而地铁通勤者恰好在这个时间暴露于地铁内的PM<sub>2.5</sub>，且由于人流量大、人群密集，暴露的人数也众多。因此，地铁内空气污染对地铁通勤族的危害不可忽略。通勤者可以选择错峰出行，避免拥堵，或者在地铁内戴口罩来进行防护。同时地铁公司也应该加强完善地铁内的新风系统，以减少PM<sub>2.5</sub>以及其它污染物，从而更好地保护地铁通勤者的健康。

此外，对空气污染危害感知更强的人们采取措施进行防护的比例更大，政府可加强空气污染危害及正确防护的健康教育，通过改变人们的认知进而改变行为。

## 附录

### 附录1. 调查问卷样本

## 地铁通勤上班族空气污染调查问卷

日期: \_\_\_\_\_ 时间: \_\_\_\_\_ 问卷编号: \_\_\_\_\_

地铁线路: \_\_\_\_\_ 车站: \_\_\_\_\_ 调查员: \_\_\_\_\_

您好! 我们是来自北京大学的学生, 这是北大公共卫生学院与磐石环境与能源研究所合作的一个“调查地铁通勤上班族空气污染暴露水平及其健康评估”的项目。感谢您参加此次的问卷调查活动, 此次调查所收集的数据仅供研究使用, 我们不会向任何第三机构或个人公开您的个人信息, 请放心作答。谢谢您的参与!

请问您上下班的交通工具主要是地铁吗?

#### 1. 关于空气污染, 您怎么看?

1) 关于造成空气污染的原因, 您觉得消费者应该承担一定的责任吗?  是;  否

2) 您知道什么是空气质量指数(AQI)吗?  知道;  不知道

3) 如果知道, 您多长时间会查看一次空气质量指数?

每天;  每周数次;  每个月数次;  从来不查看

4) 您通过什么途径查看空气质量指数?

手机;  电脑;  电视;  报纸;  其它, 请注明: \_\_\_\_\_

5) 您认为一般来讲空气污染在地铁内、还是地铁外更严重?

地铁内;  地铁外

6) 您目前乘坐地铁出行有多少年了? \_\_\_\_\_ 年

7) 您每周乘坐多少次地铁? \_\_\_\_\_ 次

8) 您每天乘坐地铁单程需要花费多长时间? \_\_\_\_\_ 小时

9) 您抽烟吗?  是;  否;  偶尔

10) 您觉得空气污染对您的生活有负面影响吗?  有;  没有

如果有, 是什么影响?  情绪;  工作;  健康;  其它, 请注明:

\_\_\_\_\_

11) 请用 1-10 分来评价室外空气污染对您的综合影响程度。(1=没什么影响; 2=有一点影

响; 4=有一定程度影响; 6=有明显影响; 8=影响非常大; 10=影响最大)

您的打分是: \_\_\_\_\_ 分

12) 如果从 1 到 10 打分, 您觉得口罩对于人们防护空气污染有多大效果? (1=没什么效

果; 2=有一点效果; 4=有一定程度效果; 6=有明显效果; 8=效果非常大; 10=效果最  
大)

您的打分: \_\_\_\_\_ 分

13) 如果您认为您受到了影响, 会通过采取什么措施来进行空气污染防治?

口罩;  空气净化器;  无措施;  其它, 请注明: \_\_\_\_\_

口罩 (如果有该选项)

14) 您使用口罩的频率是?

每天;  每周;  有轻度雾霾佩戴;  有重度雾霾佩戴;  从  
不佩戴

15) 您在乘坐地铁时佩戴口罩?

总是佩戴;  有雾霾时佩戴;  偶尔佩戴;  从不佩戴

16) 您使用的口罩可以阻挡:

PM<sub>2.5</sub>;  细菌;  异味;  以上都可以;  都不是, 请注明: \_\_\_\_\_

**空气净化器（如果有该选项）**

17) 您使用空气净化器大概属于什么水平?

- 小于 1000 元;  1000 -3000 元;  3001 -5000 元;  5000 元以上

18) 您平均一年使用空气净化器的天数是?

- 100 天以内;  100-200 天;  201-300 天;  大约 300 天及以上

**2. 支付意愿**

19) 您觉得增加可再生能源电力消费（如风电和太阳能电力）对缓解北京的空气污染有帮助吗?

- 有;  没有

如果有, 请继续问题 20); 如果没有, 为什么\_\_\_\_\_

20) 为了使用更高比例的可再生能源电力, 作为消费者, 您愿意每月多支付多少钱呢?

- 25 元每月;  50 元每月;  100 元每月;  200 元每月;  不愿多支付

21) 如果要为家里购置空气净化器, 您愿意花多少钱

- 没打算买;  小于 1000 元;  1000 -3000 元;  3001 -5000 元;  5000 元以上

22) 如果从 1 到 10 打分, 您觉得空气净化设备对于人们防护空气污染有多大效果?

(1=没什么效果; 2=有一点效果; 4=有一定程度效果; 6=有明显效果; 8=效果非常大; 10=效果最大)

您的打分: \_\_\_\_\_ 分

23) 您愿意为一个防雾霾 (PM<sub>2.5</sub>) 的口罩花多少钱?

- 小于 20 元;  20-50 元;  51-100 元;  100 元以上;  没打算买

### 3. 个人信息

24) 性别:  男;  女

25) 年龄:  18-25;  26-35;  36-45;  46-60;  60+

26) 您的职业

教师;  医务工作者;  政府机关;  商业企业;  公益机构;  军人;  
 其他

27) 您的每月收入是多少? (单位: 人民币元)

小于 3000;  3000-5000;  5001 -10000;  10001-20000;  20001 以上

28) 学历

初中及以下;  高中;  大学;  硕士及以上

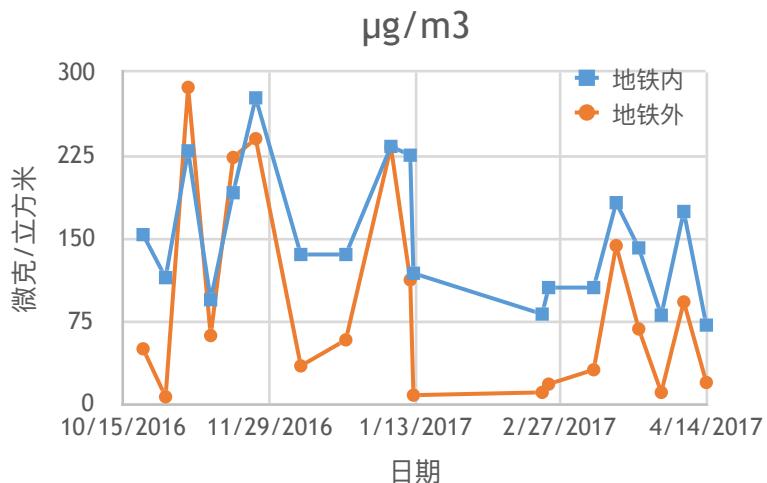
29) 您有孩子吗?  有;  没有;

如果有, 请填写孩子的年龄: \_\_\_\_\_ 岁 和 \_\_\_\_\_ 岁

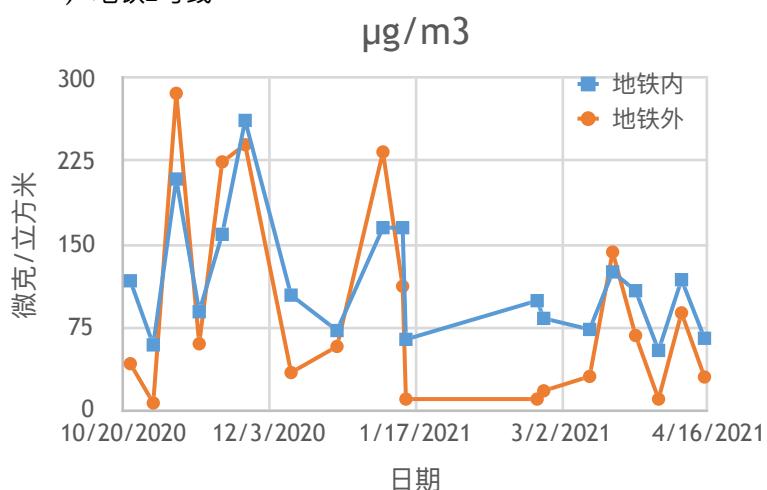
感谢您的参与, 我们愿意提供一个纪念品(防霾口罩)以示感谢!

## 附录2. 北京十条地铁线路内PM<sub>2.5</sub>浓度与同时段室外PM<sub>2.5</sub>浓度均值对比 (单位: $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

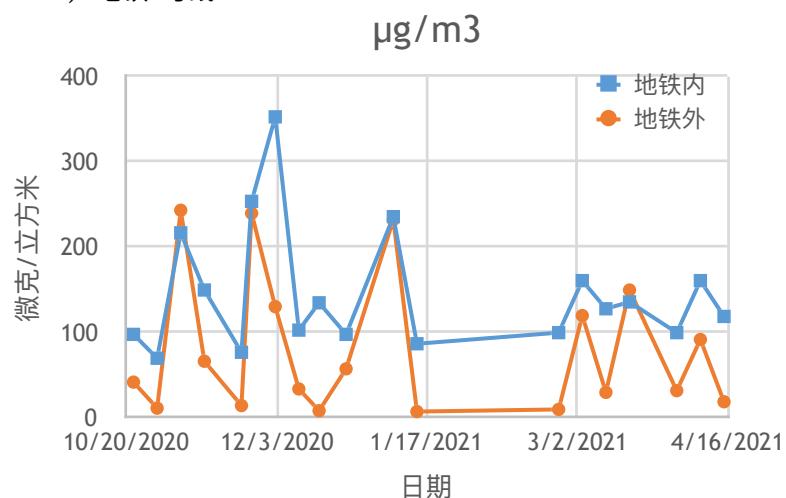
### 1) 地铁1号线



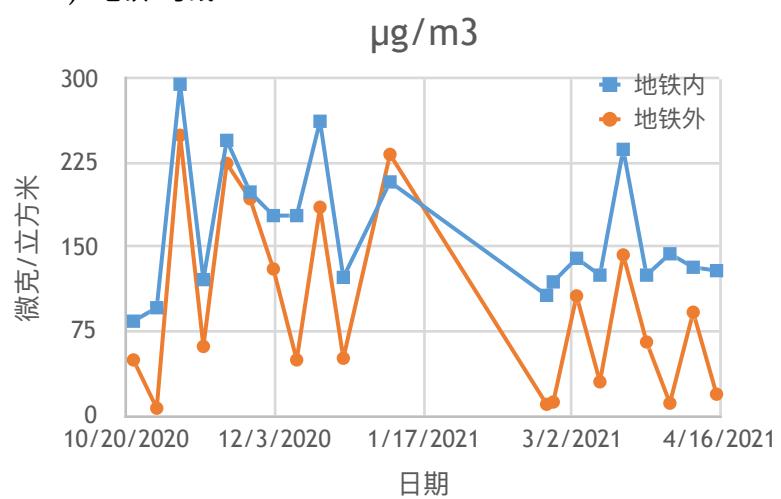
### 2) 地铁2号线



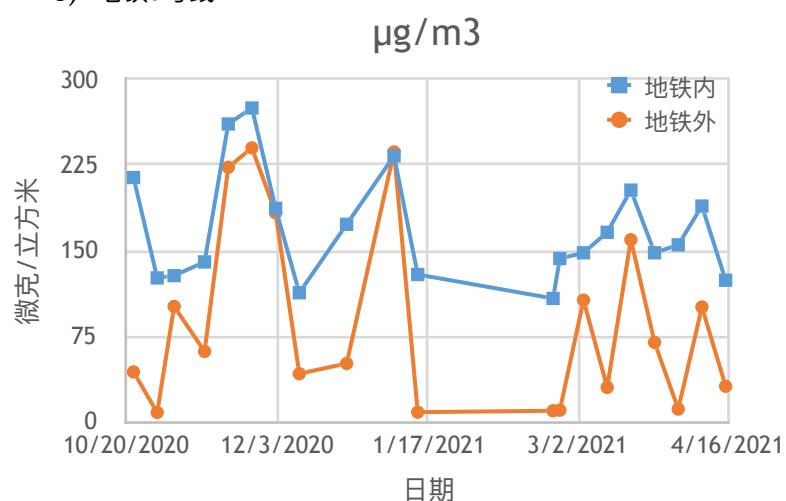
### 3) 地铁4号线



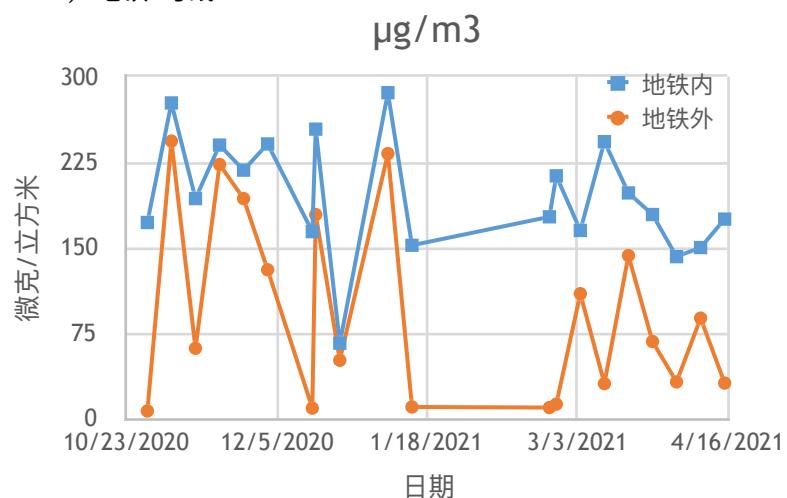
### 4) 地铁5号线



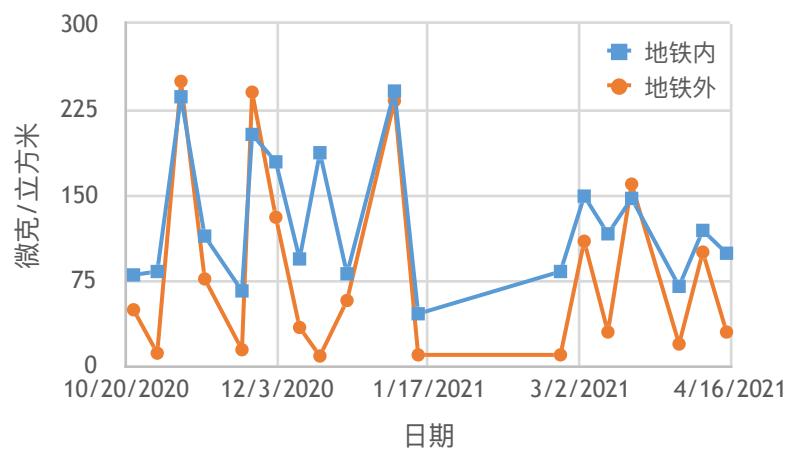
### 5) 地铁6号线



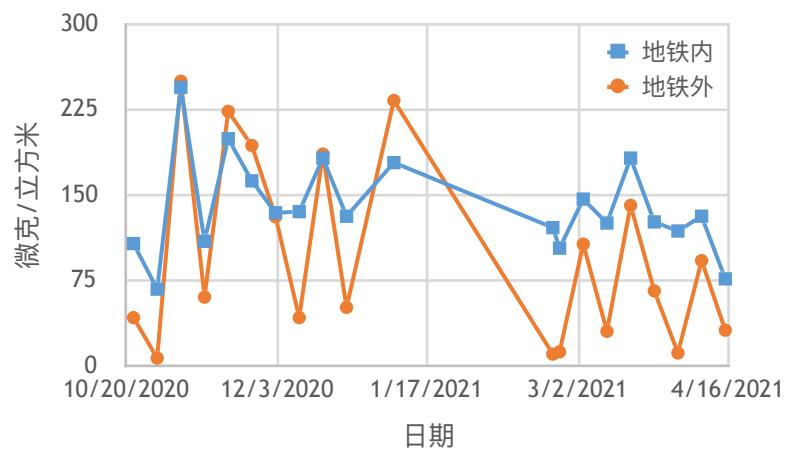
#### 6) 地铁8号线



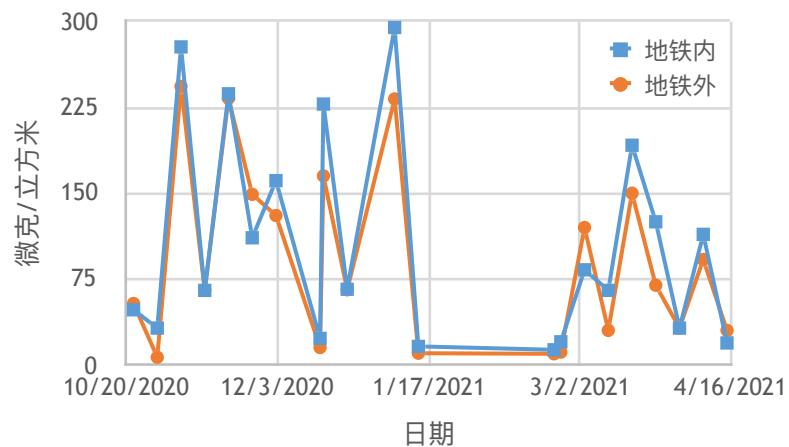
#### 7) 地铁9号线



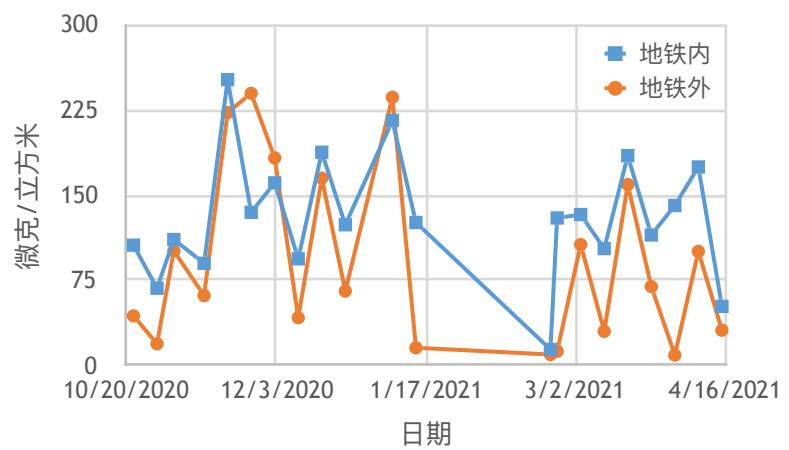
#### 8) 地铁10号线



### 9) 地铁13号线

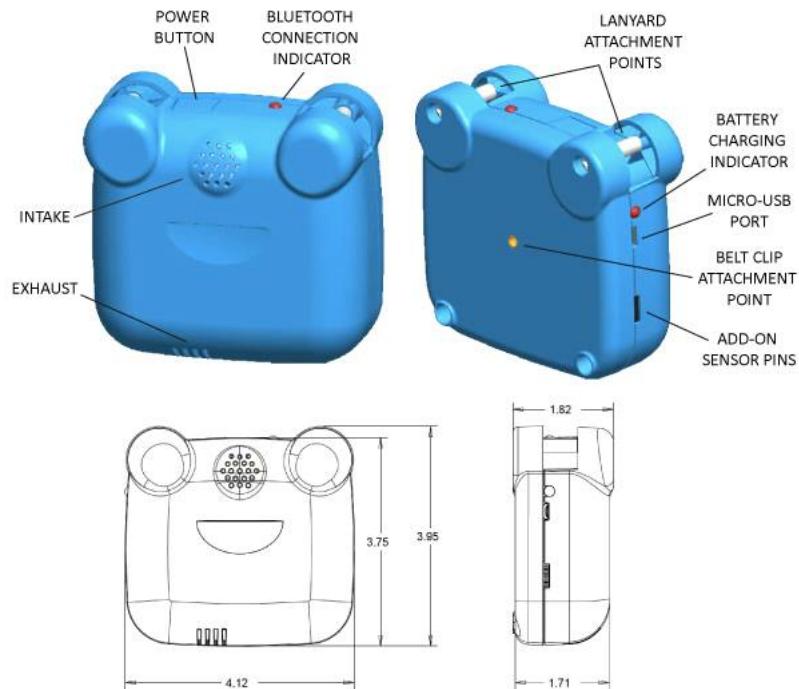


### 10) 地铁14号线



### 附录3. Air Beam简介

AirBeam由HabitatMap与科学家、教师、工程师和其他非营利组织合作开发。AirBeam能够测量细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)、温度和相对湿度。AirBeam使用粒子光散射法 (Light Scattering Method) 测量PM<sub>2.5</sub>。气流经过感应室，其内的LED灯泡发出的光照射在空气颗粒物上，发生散射现象。光散射被传感器捕捉到并转化成一个测量值，以此来估计空气中细颗粒的数目。AirCasting APP内置的算法再将细颗粒物数换算成细颗粒物浓度值。这些测量数据大约每秒钟都会通过蓝牙与AirCasting APP进行传输，并以地图和图表的形式实时地显示在装有APP的智能手机上（安卓系统）。每当结束一个监测时段，AirCasting会将收集到的数据发送到AirCasting网站，并与其他同样使用AirBeam的监测者贡献的数据一起生成热力图，从而显示不同区域的PM<sub>2.5</sub>浓度水平。PM<sub>2.5</sub>浓度低的地方一般显示为绿色，浓度高的地方一般显示为黄色或红色。作为一个开源平台，改变AirBeam的组件去测量其他空气质量参数，或者将从AirBeam获得的数据传输到其他网站或应用(APP)上是比较容易的。我们也鼓励这样的数据分享。开发者更为AirBeam设计了一个接口，使得添加其他传感器更为方便、轻松。



#### 硬件规格

重量：约7盎司 (200克)

粒子传感器：Shinyei PPD60PV

温度和相对湿度传感器：MaxDetect RH03

蓝牙：Nova MDCS42，版本2.1 + EDR

单片机：Atmel ATmega32U4

引导装载程序：Arduino Leonardo

#### 电量

AirBeam内置 2000mAh 3.7v可充电锂电池。当电池充满电时，AirBeam可以维持10小时运作。电池可通过Micro-USB端口进行充电。绿灯亮时表示AirBeam正在充电，当绿灯熄灭时表示充电完成，或未连接电源。

## 电源开/关

按下电源按钮来启动AirBeam。AirBeam在进行蓝牙连接时红色指示灯会闪烁。再次按下电源按钮即可关闭AirBeam。

## 进气和排气

使用AirBeam时，应保证进气口和排气口畅通。

## 连接AirBeam与AirCasting APP（安卓系统）

从谷歌或者豌豆荚应用商店里下载AirCasting APP(仅有英文版)。启动应用程序，然后按以下步骤进行设置：菜单按钮>“Settings”>“External devices”>“Pair with new devices”>“搜索设备”>手机贴近“AirBeam”(请注意，您只需要配对一次)>返回按钮按“AirBeam”>按“Yes”进行连接。AirBeam通过蓝牙与手机进行连接，当设备连接成功时AirBeam红色指示灯常亮，此时监测数据会显示在手机上。

## 通过串口监控器获得AirBeam数据

可以通过Micro-USB端口或蓝牙进行串口监控，从而获得AirBeam数据。

## 编程

AirBeam主板是以Arduino Leonardo为基础的，因此可以使用Arduino IDE重新编写控制AirBeam的程序。

## 添加另一个传感器

可以使用附加传感器端口添加其他传感器。在AirBeam侧面能看到一个5针的接口，从左到右依次为：地面、5V、3.3V、模拟2、模拟1。请注意，必须将一个小螺丝刀插入接口上方的小槽中，以释放接口。

## 开源

AirBeam固件和电子图表可在GitHub上获得。可以从Shapeways下载STL文件用以3D打印AirBeam外壳。

## FCC合规性声明

本设备符合美国联邦通讯委员会（FCC）第15部分的规定。使用时应满足以下两个条件：(1)本设备不会造成有害干扰；(2)本设备必须能接受任何接收到的干扰，包括可能会导致不愿出现的操作的干扰。警告：修改或重组内部组件可以导致故障，将导致使用这些产品的FCC授权失效。

## AirBeam性能表现

以下内容是在比较三种空气颗粒物测量方式及结果的基础上得出的。这三种测量方式分别为：AirBeam简易空气细颗粒物浓度监测仪，Thermo Scientific的pDR-1500(采用PM<sub>2.5</sub>颗粒物切割点入口)空气颗粒物浓度监测仪和使用特氟龙（聚四氟乙烯）滤膜的重量分析法。Thermo Scientific的pDR-1500是一个价格约5000美金、重约2.5磅的空气颗粒物浓度监测仪。它常被政府和科研机构用来评价细颗粒物或PM<sub>2.5</sub>的个体暴露水平。特氟龙滤膜样本在美国纽约大学医学院滤膜称量室获得，由Leland Legacy 10L 泵取样，采用PM<sub>2.5</sub>颗粒物切割点入口。取样过程遵循美国环保署（EPA）关于PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>的过滤条件、存储和称重测量的指南。测量PM<sub>2.5</sub>的“金标准”方法是使用特氟龙滤膜进行重量分析。充分和全面描述AirBeam仪器的性能仍然需要进一步的研究，我们期待与AirCasting社区的伙伴们一起努力去弥补不足。

我们将AirBeam的性能数据展示在下面的几张图中，我们以R2或者R2的值来表示在测量PM<sub>2.5</sub>上AirBeam与其它方法的差异。R2是一个可以反映数据和统计模型之间拟合程度的统计数值。在我们的比较中，我们把Y轴设定为AirBeam的监测数据，X轴设定为pDR-1500的监测数据，采用线性（直线）与非线性（曲线）来分析X轴和Y轴数据的关系。R2值的取值范围介于0.0和1.0之间，越接近1.0说明线性回归性越好。如果R2的数值为1.0，那么说明数据点都落在线（直线或者曲线）上，没有离散，模型的预测能力是完美的。

图1和图2分别反映两种取样条件。图1的空气样本取自纽约下曼哈顿城区，PM<sub>2.5</sub>浓度值都低于100微克/立方米（取样包括11个不同情形，并以12小时为周期取均值）；图2的取样条件是室内燃烧纸板（取样以1小时为周期并且对每分钟的数据取均值），这两种情况（如图1和图2所示）都能够反映出AirBeam和pDR-1500的测量数据有强线性关系。如图1所示，当PM<sub>2.5</sub>浓度小于24微克/立方米时，对于两台AirBeam仪器，测量数据的R<sup>2</sup>值均可达到0.98或更高。

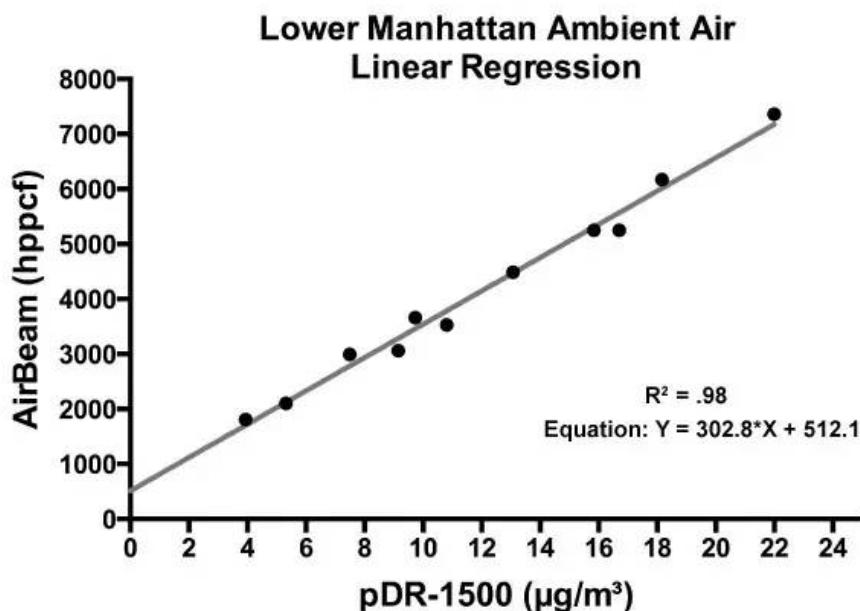


图1：测量下曼哈顿城区空气PM<sub>2.5</sub>浓度时AirBeam与pDR-1500之间的线性回归关系

如图2所示，当PM<sub>2.5</sub>浓度达到100微克/立方米时，四台AirBeam仪器测量数据的R<sup>2</sup>值均可达到0.94或更高。在图2中，当PM<sub>2.5</sub>浓度高于30微克/立方米时，四台原装AirBeam仪器的监测数据之间的差异愈发显著。这意味着面对同一空气样本，不同AirBeam仪器之间测量数据的差异会随着PM<sub>2.5</sub>浓度的上升而变大。通过使用AirCasting APP中的校正功能（仍在测试）和对ShinyeiPPD60PV（AirBeam 内测量颗粒物数量的传感器）侧面的电位器进行调节，上述数据差异可有实质性降低。

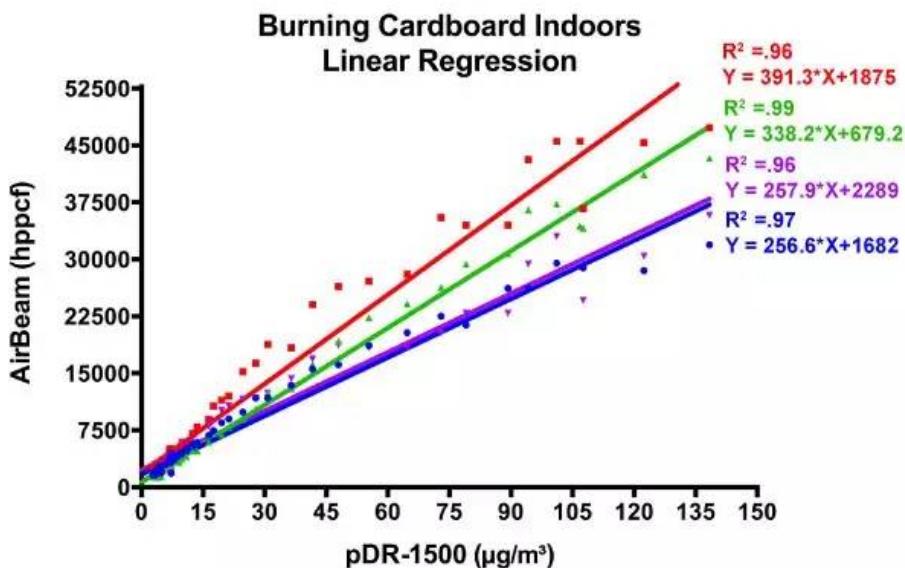


图2：室内燃烧纸板条件下测量PM<sub>2.5</sub>浓度时AirBeam与pDR-1500之间的线性回归关系

由于在浓度超过100微克/立方米的环境中，AirBeam与pDR-1500两种方法测量所得数据间呈现非线性关系，因此在PM<sub>2.5</sub>浓度高的情况下，我们采用非线性回归曲线来表述两者之间的关系。详见图3（样本数据测量值为每分钟均值，总测量时长为1小时）。对独立样本进行数据分析，可得非线性回归曲线的R<sup>2</sup>值在0.60至0.80之间。与上述线性回归结果相比，R<sup>2</sup>值降低，这可能是因为当接近或超过AirBeam最大测量限值时，数据的变异程度增加。我们估测AirBeam的最高测量限值约为400微克/立方米。

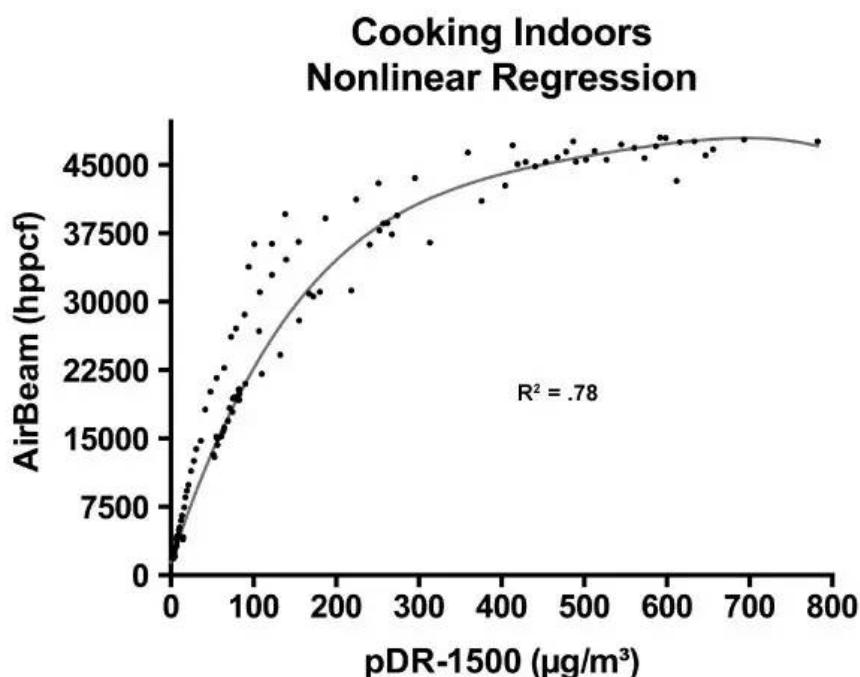


图3：室内烹调条件下测量PM<sub>2.5</sub>浓度时AirBeam与pDR-1500之间的非线性回归关系

我们需要进一步研究空气中气溶胶反射率对最大测量限值的影响问题。气溶胶的相对反射率会对AirBeam的监测性能产生影响。高反射率的气溶胶，如木材燃烧产生的烟尘等，可致AirBeam测量结果产生向上偏倚（即测量结果高估了实际值），而低反射率的气溶胶，如燃烧柴油排放的废气等，可致测量结果向下偏倚（即测量结果低估了实际值）。

夏季，在下曼哈顿地区，使用一台pDR-1500以及两台AirBeam对环境空气进行采样，并将测量结果与特氟龙（聚四氟乙烯）滤膜重量分析结果进行比较，见图4。采样平均每日持续12小时，共采样11天，测量结果取每日均值，对比实时监测数据与重量分析结果。与重量分析数据进行线性回归分析可得，AirBeam的R<sup>2</sup>值为0.70，而pDR-1500为0.76。对重量分析值均值进行时间加权，所得数据均高于pDR-1500测量值。由于二者均运用粒子光散射计数，AirBeam测量时同样存在与pDR-1500类似的向下偏倚，即AirBeam和pDR-1500的测量结果比作为“金标准”方法的滤膜重量分析法测出的值（可认为是实际值）要低。进而，我们假设偏倚的部分原因来自所测空气气溶胶的相对反射率差异。将AirBeam与pDR-1500 的测量值对比，12小时日均测量值线性相关分析的R<sup>2</sup>值为0.98，与图1显示的结果一致。

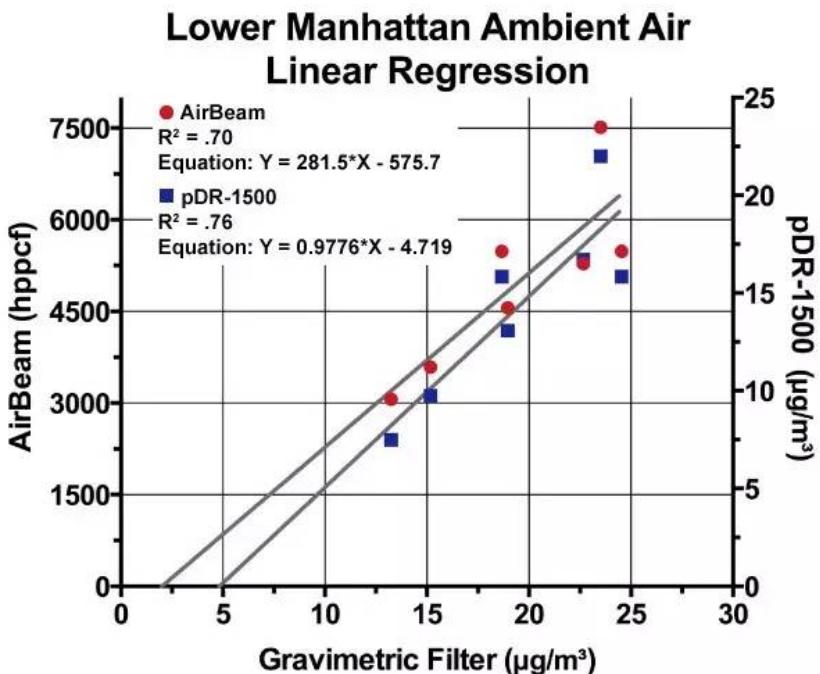


图4：下曼哈顿城区测量PM<sub>2.5</sub>浓度时AirBeam和pDR-1500分别与重量分析法之间的线性回归关系

其他使用粒子光散射计数的相关研究表明，相对湿度高（>80%）可能对AirBeam的准确性产生负面影响。当相对湿度高时，气溶胶吸收水分反射率升高，那么AirBeam测出的PM<sub>2.5</sub>浓度值会比实际值高，即高估了细颗粒物浓度。为更好地理解较高空气湿度对AirBeam监测准确性的影响，我们仍然需要做进一步的研究。

AirBeam性能数据的收集、分析和研究结果是由Alex Besser和Michael Heimbinder完成的。Alex是纽约大学环境毒理学的研究生。Michael是HabitatMap的创始人和执行主任，也是AirBeam首席开发者。George Thurston博士，纽约大学医学院环境医学教授，也是Alex的学术导师，为完成本研究提供了支持和指导。

注：以上说明文字为磐石环境与能源研究所翻译，英文原文请参见：<http://www.takingspace.org/airbeam-technical-specifications-operation-performance/>

## 致谢

本项目由阿拉善SEE基金会“卫蓝侠”项目提供资金支持，由磐石环境与能源研究所负责项目执行，北京大学公共卫生学院潘小川教授课题组提供技术指导。问卷的设计由磐石环境与能源研究所负责完成。具体的调查组织实施主要由潘小川教授课题组的研究生李怡雪和熊秀琴负责，参与调查的调查员为北京大学公共卫生学院研究生和本科生，包括窦妍、高菁、马悦、李怡雪、彭婷婷、吴荣山、熊秀琴、杨玄、张京舒、张圣捷、赵桐。调查数据的录入由熊秀琴和李怡雪负责。调查数据的清理和分析由熊秀琴在完成。报告撰写由熊秀琴和磐石环境与能源研究所的赵昂、林佳乔共同完成。在报告的内容设计、数据分析、撰写和修改过程中，潘小川教授给予了大力支持和悉心的指导，在此特别感谢。磐石环境与能源研究所的王会和姜超在报告的版式设计和文字校对方面付出了辛勤工作，我们也在此表示感谢。再一次感谢以上参与本次调查的工作人员、北大公共卫生学院的老师和同学们的辛勤工作。最后，我们也感谢每一位参与本次调查的受访者，希望他们有机会看到本调查报告的结果。



地址：北京市顺义区后沙峪

电话：+86 (10) 61438032

邮箱：info@reei.org.cn

网站：[www.reei.org.cn](http://www.reei.org.cn)