

空气质量评估报告

北京城区2010-2014年
PM_{2.5}污染状况研究

为了蓝天
让我们用数据解读污染

北京大学统计科学中心
北京大学光华管理学院

二零一五年三月

引言

2008年4月，位于建国门外的美国驻华大使馆开始在其楼顶上测量 $PM_{2.5}$ 每小时浓度数据，并在之后不久开始对外公布。此举引发了诸多的争议和讨论。这或许是许多中国人第一次听到“ $PM_{2.5}$ ”这个专业名词（悬浮在空气中空气动力学当量直径小于或等于2.5微米的颗粒物，又称细颗粒物）。

2013年1月1日，环保部开始正式将 $PM_{2.5}$ 列入空气监测指标中，而之前在大气污染颗粒物方面的监测对象主要是 PM_{10} 。

2013年1月，北京频繁出现了空气极端污染现象。其中1月12日的小时最高 $PM_{2.5}$ 浓度超过了800微克/立方米。该月有16天的 $PM_{2.5}$ 日平均浓度超过150微克/立方米，达到了严重污染。北京人开始意识到 $PM_{2.5}$ 问题的严重性。

2013年9月10日，国务院印发《大气污染防治行动计划》（简称《大气十条》）。其制定的改善空气质量的具体目标为：到2017年，全国地级及以上城市可吸入颗粒物（ PM_{10} ）浓度比2012年下降10%以上，优良天数逐年提高；京津冀、长三角、珠三角等区域细颗粒物（ $PM_{2.5}$ ）浓度分别下降25%、20%、15%左右，其中北京市 $PM_{2.5}$ 年均浓度控制在60微克/立方米左右。

2014年3月，李克强总理在政府工作报告中提出以雾霾频发的特大城市和区域为重点，以细颗粒物治理为突破口，抓住产业结构、能源效率、尾气排放等关键环节，健全政府、企业、公众共同参与机制，实行区域联防联控的政策方针。

2014年3月，在北京又一个被重度污染空气所笼罩的日子，北京大学统计科学中心和光华管理学院的八位老师同学开始收集和分析北京的 $PM_{2.5}$ 数据。时隔一年之后，谨以这份报告来概括我们一年来的研究结果。目前关于如何治理中国大气污染的讨论正在全国热烈进行着，我们期待这份报告能够提供一个数据的视角和统计学上的分析判断。

目 录

| | |
|--|----|
| 一、背景..... | 1 |
| 二、PM _{2.5} 的标准..... | 1 |
| 三、研究目标..... | 3 |
| 四、数据..... | 4 |
| 五、数据公开..... | 7 |
| 六、北京污染的基本统计..... | 8 |
| 七、风的影响..... | 11 |
| 八、能源消费..... | 16 |
| 九、PM _{2.5} 的公平评价..... | 17 |
| 十、调整的五年 PM _{2.5} 平均浓度..... | 19 |
| 十一、调整的五年 PM _{2.5} 分布的分位数..... | 21 |
| 十二、最近三年的情况..... | 23 |
| 十三、APEC 效应..... | 26 |
| 十四、冬季供暖效应..... | 28 |
| 十五、结果汇总..... | 31 |
| 参考文献..... | 34 |
| 附录..... | 35 |

一、背景

我国雾霾天气的主要成因是悬浮颗粒物(Particulate Matters, 简称 PM), 细颗粒物 ($PM_{2.5}$) 是其重要组成部分 (Zhang XY, et al. 2013)。 $PM_{2.5}$ 悬浮颗粒物有少量来自于自然界, 绝大部分来自人类活动。工业生产、矿物质燃料 (如煤炭、汽油等) 或生物质 (如秸秆等) 的燃烧、道路施工或者房屋建设产生扬尘等行为可直接将其排放到大气中。同时, 其他工业排放物质 (如二氧化硫、氮氧化物等) 在大气中发生化学反应也可生成 $PM_{2.5}$, 形成二次污染。 $PM_{2.5}$ 的危害不仅在于形成雾霾, 影响大气能见度, 更在于其颗粒小并能附着一些重金属颗粒, 通过呼吸进入人体, 对人类健康产生严重的危害。许多国内外流行病学研究发现, 长期生活在高浓度的 $PM_{2.5}$ 空气中, 人类会产生一系列的呼吸系统和心血管疾病, 甚至会提高疾病死亡率 (Pope, et al. 2002; Huang W, et al. 2012)。尽管目前我国证明 $PM_{2.5}$ 污染可引起肺癌等肿瘤高发的流行病学研究还较少, 但这并不表明其与各种癌症的发病率无关。

$PM_{2.5}$ 自身并不是一成不变的颗粒, 它的化学构成和污染来源在我国不同地区呈现出完全不同的特点 (Zhang YH, et al. 2008; Chang, et al. 2013; Li J, et al. 2014)。仅就北京地区来说, 污染物本地排放与区域传输、二次气溶胶污染和气象条件是影响 $PM_{2.5}$ 形成与变化的重要因素 (Guo S, et al. 2014; Zhang XY, et al. 2013; Huang RJ, et al. 2014)。由于这些因素本身具有极高的不确定性, 导致 $PM_{2.5}$ 的时间分布具有复杂的随机机制。量化这些随机机制并深入研究各种因素与 $PM_{2.5}$ 之间的关系可以帮助我们更好地理解 $PM_{2.5}$ 的分布特点, 并揭示 $PM_{2.5}$ 在北京地区的聚集和消散过程背后的规律。

二、 $PM_{2.5}$ 的标准

关于 $PM_{2.5}$ 浓度的分类标准, 中国和世界其他国家有所不同。

中国环保部制定的《环境空气质量标准》(GB 3095—2012) 所给出的 $PM_{2.5}$

浓度的标准有两个等级。一级标准适用于自然保护区、风景名胜区和需要特殊保护的区域（一类区）。二级标准适用于居民区、商业交通居民混合区、文化区、工业区和农村地区（二类区）。

一级标准：

- (1) 一个监测点的 $PM_{2.5}$ 年平均浓度不超过 15 微克/立方米；
- (2) 一个监测点的 $PM_{2.5}$ 日平均浓度不超过 35 微克/立方米。

二级标准：

- (1) 一个监测点的 $PM_{2.5}$ 年平均浓度不超过 35 微克/立方米；
- (2) 一个监测点的日 $PM_{2.5}$ 日平均浓度不超过 75 微克/立方米。

美国环保局（USEPA）于 2012 年 12 月 14 日发布的关于 $PM_{2.5}$ 浓度的新标准也有两个等级。

一级标准：

- (1) 一个监测点的三年平均 $PM_{2.5}$ 年浓度不超过 12 微克/立方米；
- (2) 一个监测点的三年平均 $PM_{2.5}$ 日浓度的 98%分位数不超过 35 微克/立方米。

二级标准：将一级标准（1）中的 12 微克/立方米提高至 15 微克/立方米。

除了浓度以外，我们经常从手机或者网站上看到的是空气质量指数（Air Quality Index，简称 AQI）。空气质量指数是描述空气质量状况的无量纲指数。按照我国《环境空气质量指数（AQI）技术规定（试行）》（HJ 633—2012）的规定，它是六种大气污染物分指数（简称 IAQI）的最大值。这六种大气污染物分别是：细颗粒物（ $PM_{2.5}$ ）、可吸入颗粒物（ PM_{10} ）、二氧化硫（ SO_2 ）、二氧化氮（ NO_2 ）、臭氧（ O_3 ）和一氧化碳（CO）。不同的污染物浓度与其 IAQI 的换算公式不同（见附录表 S1、S2）。

表 1 分别给出了中国和美国的 $PM_{2.5}$ 浓度与其对应的空气质量等级的换算关系。从中国和美国关于 $PM_{2.5}$ 浓度的空气质量标准中可以看出，中国使用以 75 微克/立方米(24 小时平均)作为空气质量“良”的上限，这是世界卫生组织(WHO)

的初期过度标准。WHO 的空气质量为良的二期过度标准是 50 微克/立方米，三期是 37.5 微克/立方米，终极标准是 25 微克/立方米。美国，新加坡是 35 微克/立方米（24 小时平均）。印度和孟加拉国所使用的标准分别是 60 微克/立方米和 65 微克/立方米（24 小时平均）。

本报告将采用 35 微克/立方米设为空气质量“良”的上限。同时，鉴于 AQI 的定义复杂且关系到其他大气污染物，本报告中所涉及的 $PM_{2.5}$ 均指浓度。

表 1：中国和美国的 $PM_{2.5}$ 浓度与空气质量分指数换算

| 空气质量指数类别 | 空气质量分指数 (IAQI) | 24 小时平均 $PM_{2.5}$ 浓度范围 (中国) | 24 小时平均 $PM_{2.5}$ 浓度范围 (美国) |
|----------|----------------|------------------------------|------------------------------|
| 优 | 0-50 | 0-35 | 0.0-12.0 |
| 良 | 51-100 | 35-75 | 12.1-35.4 |
| 轻度污染 | 101-150 | 75-115 | 35.5-55.4 |
| 中度污染 | 151-200 | 115-150 | 55.5-150.4 |
| 重度污染 | 201-300 | 150-250 | 150.5-250.4 |
| 严重污染 | 301-400 | 250-350 | 250.5-350.4 |
| | 401-500 | 350-500 | 350.5-500.0 |

三、研究目标

对于有 2200 万常住人口的北京市，我们如何去评估这一地区 $PM_{2.5}$ 污染的严重程度？如何解读数据，从而公平地评判其空气质量是否改善？如何为政府制定减排政策提供建议？这些是我们这篇报告要回答的主要问题。

本报告的具体目标是：

- (1) 给出 2010 年至 2014 年北京城区 $PM_{2.5}$ 污染程度的几个主要的统计学指标，从而可以比较全面地概括北京城区的空气污染状况；
- (2) 量化风向和风速对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响；
- (3) 衡量北京近年来空气污染的变化趋势。如何公平评判 2013 年以来实施的一系列大气污染防治措施是否有效果？近年来空气质量是否有改善？
- (4) APEC 期间的减排措施对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响有多大？对减排政策有何借鉴

意义？

(5) 北京冬季供暖对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响有多大？对空气污染治理有何启示？

研究方法：运用现代统计学方法，我们分析了北京过去五年的 $PM_{2.5}$ 浓度和气象数据，并给出了描述北京 $PM_{2.5}$ 污染状况的统计学特征。这些特征可以用来检测、评估现在和预测将来的污染状况。

四、数据

由于 $PM_{2.5}$ 浓度和气象条件都具有很高的动态变化性，所以受随机因素的影响很大。要想让数据“说话”，用数据评估 $PM_{2.5}$ 污染的严重程度，量化 $PM_{2.5}$ 的发展趋势与分布模式，发现数据背后的污染规律，我们需要有足够长时间并且较高频率的观测数据。

环保部从 2013 年 1 月开始实时公布全国 74 个主要城市的 $PM_{2.5}$ 数值。并在 2015 年 1 月开始扩展到 338 个地级及以上城市，共有 1436 个监测点。我们从 2014 年 4 月份开始收集环保部在其官网上实时公布的北京地区的数据。鉴于环保部 2014 年 4 月份之前的数据并未公开，我们采用了美国驻华大使馆的数据。

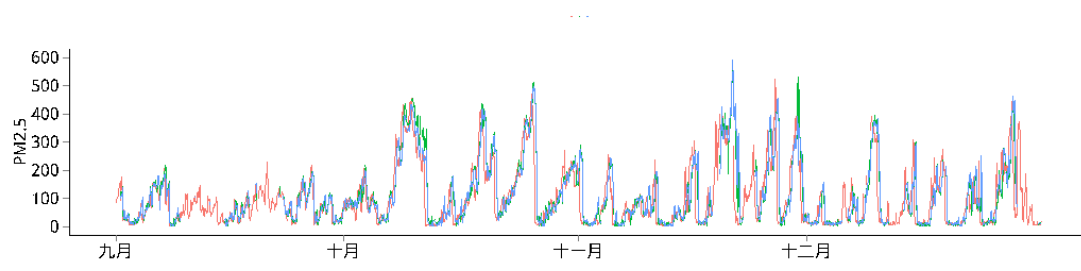
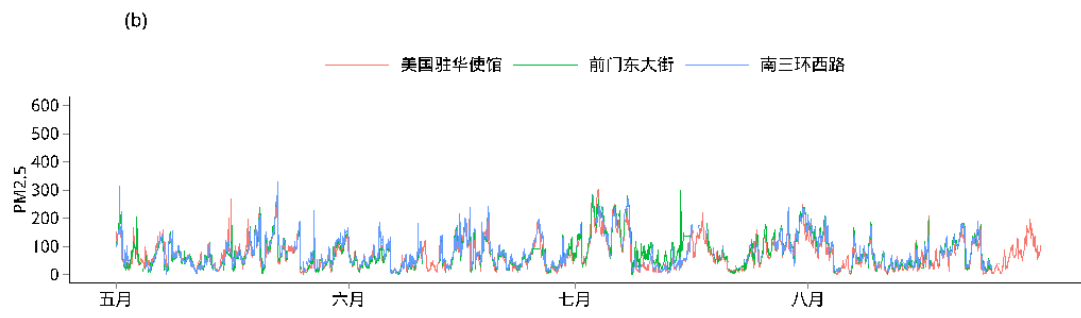
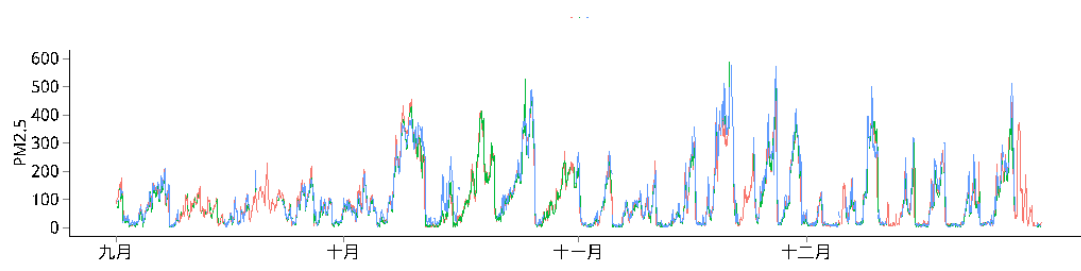
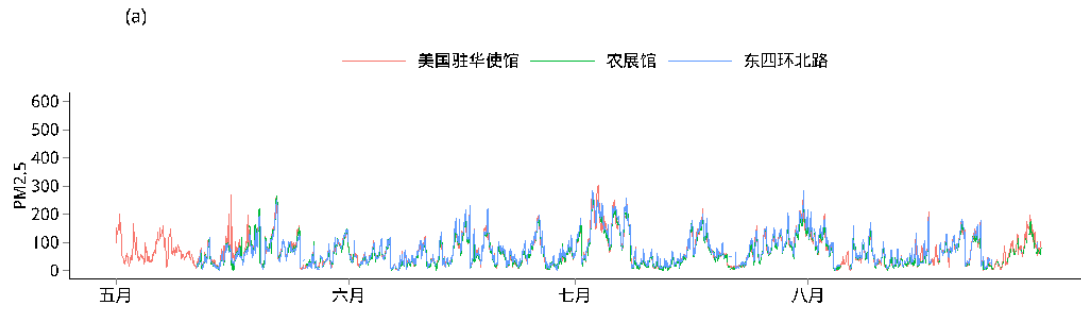
美国驻华大使馆自 2008 年 4 月开始在位于建国门外原址进行 $PM_{2.5}$ 的逐小时监测。它于 2009 年 2 月迁至东直门外安家楼路，并继续在新址上监测和发布数据。我们从美国驻华大使馆获得了自 2008 年 4 月的逐小时 $PM_{2.5}$ 浓度数据。由于 2008 年和 2009 年的 $PM_{2.5}$ 浓度数据缺失较多再加上其间迁馆，故而我们选取自 2010 年 1 月 1 日到 2014 年 12 月 31 日共五年的逐小时浓度数据（共 43824 个观测值），作为我们本报告中使用的 $PM_{2.5}$ 数据。

由于 $PM_{2.5}$ 浓度受气象条件影响很大，我们需要同时研究 $PM_{2.5}$ 所对应的气象数据。我们从网站 weather.nocrew.org 获取到北京首都国际机场（ZBAA）自 2010 年 1 月 1 日至 2014 年 12 月 31 日的逐小时气象数据（与 Zhang JP, et al.

2012 使用的数据相同)。我们考虑的气象变量有气压、温度、相对湿度、露点温度、风向、风速和降水。尽管机场与大使馆相距约 17 公里，但气象数据相对一致，尤其是气压、温度、相对湿度、露点温度和降水。虽然风向和风速会有些不同，但当风速高时，风向和风速也是高度一致的。

为了验证美国大使馆和环保部下属的环境监测站的 $PM_{2.5}$ 数据的一致性，我们在图 1 给出了从 2014 年 5 月 1 日到 2014 年 12 月 31 日美国驻华大使馆、北京农展馆、东四环北路、前门东大街、南三环西路、奥体中心和海淀万柳的每小时观测值的比较。由图 1 我们可以看出这几个监测站点的 $PM_{2.5}$ 数据非常一致，且大使馆与其它几个观测点的 $PM_{2.5}$ 浓度的相关系数分别为：0.96，0.95，0.80，0.79，0.80，0.77，且全部显著。其中农展馆和东四环北路是与大使馆地理位置最接近的两个环保部监测站点，前者在大使馆以南 1 公里内，后者在东南方向 1.5 公里内。所以它们同使馆数据的相关系数也是最高的(分别为 0.96 和 0.95)，万柳相距使馆最远，但相关系数也有 0.77。

图 1 验证了环保部站点与美国大使馆的数据可靠性，这也消除了公众对于“环保部数据比使馆 $PM_{2.5}$ 数据系统性偏低”的质疑。这种高度的一致性让我们可以将基于使馆的数据分析方法扩展到它所在的东部城区，乃至北京城区。



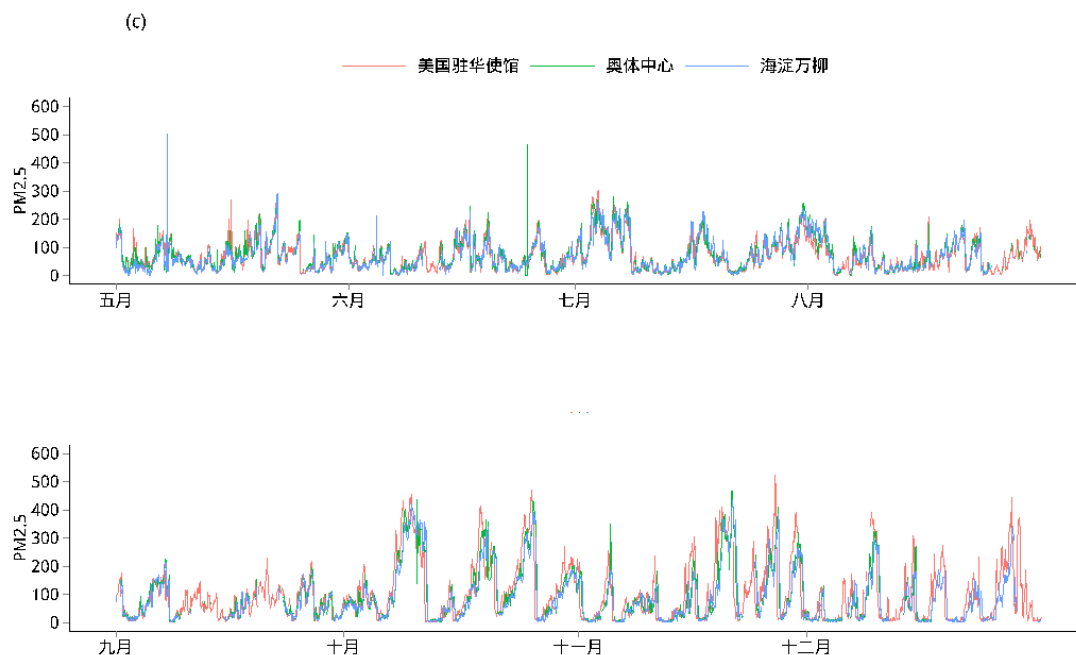


图 1：美国驻华大使馆监测点与环保部其他 6 个监测点逐小时 $PM_{2.5}$ 浓度的比较。观测时间从 2014 年 5 月 1 日至 2014 年 12 月 31 日。如果在一时间点上某个颜色缺失，表示该颜色代表的数据缺失。大使馆和六个监测点的数据有较强的一致性，相关系数分别为：0.96，0.95，0.80，0.79，0.80，0.77。

五、数据公开

我们非常想分析北京市的各个环保监测站点的数据，因为这样可以综合更多的信息得到更稳健、精确的结果。但是由于无法得到北京市监测站点的历史数据，我们最终使用了美国驻华使馆的数据。虽然美国驻华使馆这个单一观测点的数据不能充分代表全北京市 $PM_{2.5}$ 的污染状况，但由于北京城区 $PM_{2.5}$ 的长期变化趋势相对一致，我们还是可以从中看到北京城区空气污染的统计学规律。

如何让研究者获取历史数据，让数据对社会公开，是中国环境保护亟需解决的一件大事。目前许多中国学者研究中国问题的数据是从国外获得的。见陈松蹊（2014）关于这方面的讨论。最近环保部陈吉宁部长在 2015 年两会上说将要开放环境数据，这将是一件大好事。

数据开放将为中国大范围的雾霾监测和空气质量评估提供必要的基础，将把

中国的大气环境保护推进到数据时代。为以数据、统计分析和环境科学技术相结合的中国空气污染监测和评估体系的建立提供必要的条件。

六、北京污染的基本统计

为了便于分析，根据 $PM_{2.5}$ 小时浓度我们对空气质量进行如下分级：

- 优良状态： $PM_{2.5}$ 不超过 35 微克/立方米；
- 污染状态： $PM_{2.5}$ 大于 35 微克/立方米；
- 严重污染状态： $PM_{2.5}$ 大于 150 微克/立方米。

这三个状态从整体上描述了一个城市空气质量的三种状态。假如一个城市空气质量的优良状态发生的次数很多，而且每次优良状态持续的时间都很长，而污染状态几乎没有出现过，那么它的空气质量一定非常好。反之，如果一个城市经常处在严重污染的状态下，而且每次污染持续的时间都很长，那么这个城市的空气质量一定是非常差的。我们用图 2 的盒形图来描述这一直观的想法。

图 2 给出了北京从 2010 年到 2014 年五年间 $PM_{2.5}$ 的三种空气质量状态持续时间的盒形图。从该图我们可以得到如下结论：

- 五年间北京经历了 437 次污染过程，平均每周 1.7 次。每次污染状态的持续时间平均值约为 70 小时，将近三天。换言之，平均每周有 119 小时，几乎五天的时间处于污染状态。
- 五年间北京优良空气状态平均每次的持续时间为 21 小时。
- 437 次污染过程中有 370 次（占 85%）达到了严重污染水平，每次严重污染的持续时间平均为 25 小时，比优良空气的平均持续时间长 4 小时。

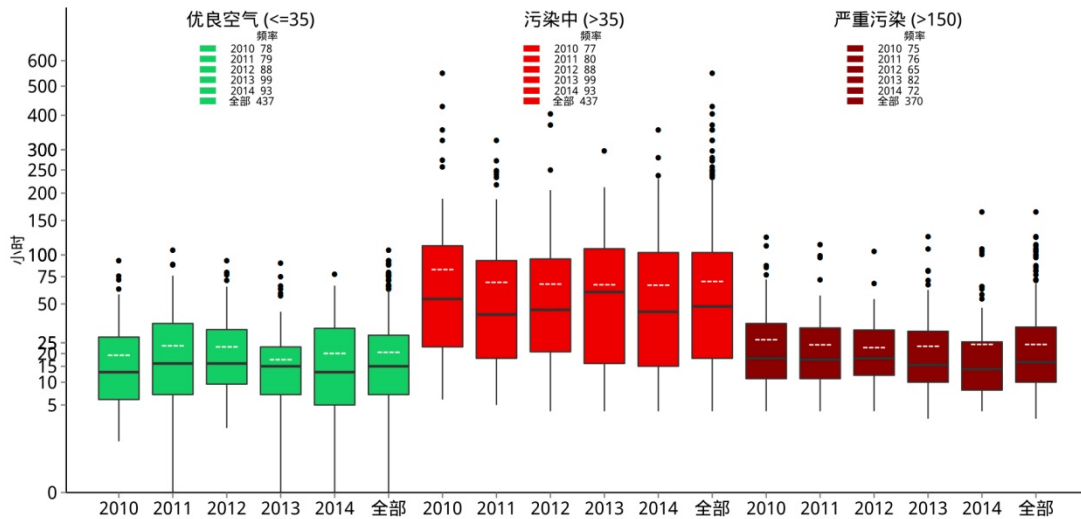


图 2: 优良空气 (左)、污染状态 (中) 和严重污染 (右) 状态持续时间, 白色虚线为平均值, 黑色实线为中位数。北京平均每周经历 1.7 个污染过程, 每次持续时间平均为 70 小时, 严重污染平均每次持续时间为 25 小时, 优良空气平均每次持续时间为 21 小时。

为了能更细致地描述北京地区空气污染的情况, 我们将污染状态又进一步分为一般污染 (PM_{2.5} 小时浓度介于 35 微克/立方米和 150 微克/立方米之间) 和严重污染状态 (大于 150 微克/立方米)。图 3 给出了这三种空气质量状态 (优良、一般污染和严重污染) 的总持续时间在不同年份及不同季节所占比例。

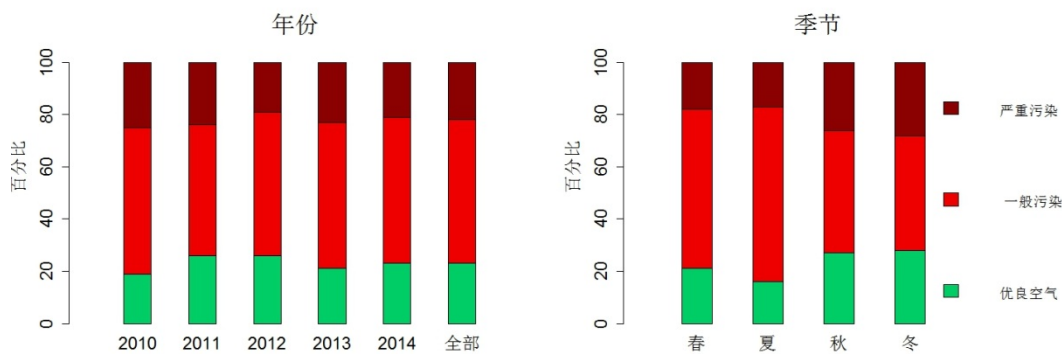


图 3: 优良空气、一般污染、严重污染过程在不同年份及不同季节所占比例。过去五年北京优良空气, 一般污染和严重污染所占的时间分别为 23%, 55%, 22%。春季和夏季一般污染的比例较大, 而秋季和冬季, 优良空气和严重污染的比例都比较高。

图 3 说明在这五年期间：

- 北京优良空气持续的时间约占 23%；超过一半的时间（约占 55%）是处于一般污染状态中的；而有约 22%的时间处于严重污染的状况。一般污染和严重污染共占 77%。
- 不管是从频数看还是从百分比看，三种空气质量状态的比例从 2010 年到 2014 年变化不大。
- 秋、冬二季相比于春、夏会有更多的优良天气与严重污染天气。前者是由于北京秋、冬多北风，利于空气扩散，使得优良空气占比提高。后者很可能是由于冬季取暖和秋季秸秆燃烧使得重度污染频繁发生，所以严重污染占的比例也比较高。
- 北京夏季严重污染的比例不足 17%，但是夏季优良空气的比例也是在四个季节中最低的，只有不到 16%。虽然夏季（没有采暖烧煤）的排放比冬季低，北京夏季的温度、湿度较高，同时夏季北风减少而且风速低，这些因素有利于二次气溶胶的生成，从而使得 $PM_{2.5}$ 的浓度升高。

我们已经在表 1 说明在用 $PM_{2.5}$ 浓度划分空气质量时，中国的标准同其它国家不同。我们分别以美国和中国空气质量为优和良的标准（美国：12 微克/立方米和 35 微克/立方米；中国：35 微克/立方米和 75 微克/立方米），对 $PM_{2.5}$ 的日平均浓度进行统计，其结果显示在表 2 中。

表 2：北京 $PM_{2.5}$ 日均值浓度情况

| 年份 | 有效天数 | 空气为优天数（日均值小于等于 12 微克/立方米） | 空气为良天数（日均值在 12 和 35 微克/立方米之间） | 日均值大于 35 微克/立方米的天数 | 日均值大于 75 微克/立方米的天数 |
|------|------|---------------------------|-------------------------------|--------------------|--------------------|
| 2010 | 351 | 3 | 51 | 297 | 204 |
| 2011 | 354 | 3 | 83 | 268 | 186 |
| 2012 | 355 | 6 | 83 | 266 | 183 |
| 2013 | 365 | 6 | 55 | 304 | 187 |
| 2014 | 365 | 14 | 66 | 285 | 188 |

* 有效天数是指每天至少有一个小时的 $PM_{2.5}$ 观测值的天数总和。

表 2 说明，无论依照哪个标准，在 2010 年到 2014 年这五年中，北京空气质量为优良的天数没有大的变化。如果以中国的标准来划分，有一半以上的天数，

北京的空气质量比良要差。而如果以美国的标准来看，北京空气质量不达标天数每年将增加 80 到 100 天。

七、风的影响

许多北京市民意识到北风会吹走雾霾。因此人们希冀北风的到来，尤其是在深度雾霾的时候，尽管它有时伴有风沙，会导致尘土飞扬。到底风对北京城区雾霾有多大影响呢？让我们从过去五年的数据中寻找答案。

由于风与 $PM_{2.5}$ 颗粒物的聚集和传输都有很高的相关性，不同风向和风速都会使 $PM_{2.5}$ 的浓度发生变化 (Wang L, et al, 2014; Tai, et al. 2012)。我们根据对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响，把气象学中定义的 16 个风向、静风和无持续风向做合并，将风分成以下五大类：

- 西北 (NW)：包含正西，西北偏西，西北，西北偏北和正北；
- 东北 (NE)：包含东北偏北，东北和东北偏东；
- 东南 (SE)：包含正东，东南偏东，东南，东南偏南，正南；
- 西南 (SW)：包含西南偏南，西南和西南偏西；
- 静风 (CV)：包含静风（风速小于 0.5 米/秒）和无持续风向。

图 4 给出了北京不同季节下风向的基准状态和风速。北京的主导风向是西北风和东南风。其中秋、冬两季多西北风，所占比例分别达到了 36%和 47%，而东南风的比例则分别为 22%和 17%。春、夏季的主导风是东南风，所占比例达到了 35%和 46%，而西北风的比例分别为 30%和 18%。就风速而言，在春季和冬季北京都有强劲的西北风，夏季各个风向的风速都偏小。虽然秋季的西北风比例较高，但是其风速相对并不高，而秋季的静风比例是四季中最高的（占 26%）。

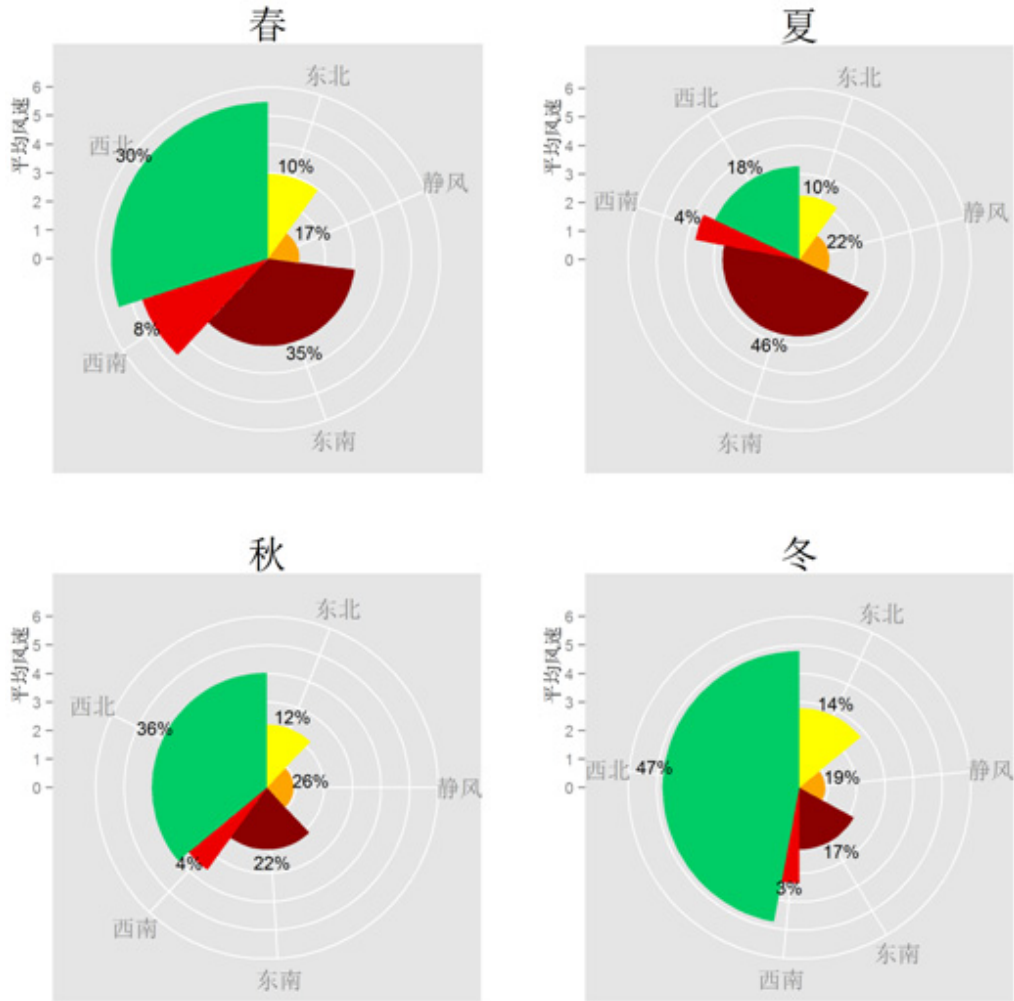


图 4: 北京四季风向的基准状态和风速。北京春季和夏季多东南风 (比例分别为 35%和 46%), 秋季和冬季多西北风 (比例分别为 36%和 47%); 春季和冬季西北风风速大, 夏季的风速普遍偏小。

为了探明风对 $PM_{2.5}$ 的影响, 我们计算了在不同污染状况下风向、风速的分布。图 5 的第一行从左到右依次为: 污染开始、污染中 ($PM_{2.5}$ 大于 35 微克/立方米)、严重污染 ($PM_{2.5}$ 大于 150 微克/立方米); 图 5 的第二行从左到右依次为: 污染结束、优良空气 ($PM_{2.5}$ 小于等于 35 微克/立方米)、基准水平。其中基准水平描述了这五年风的基本情况, 是图 4 的汇总。污染开始和污染结束状态分别是指 $PM_{2.5}$ 浓度第一次超过或低于 35 微克/立方米的时刻加上前后各 2 小时的观测区间 (总共 5 小时)。

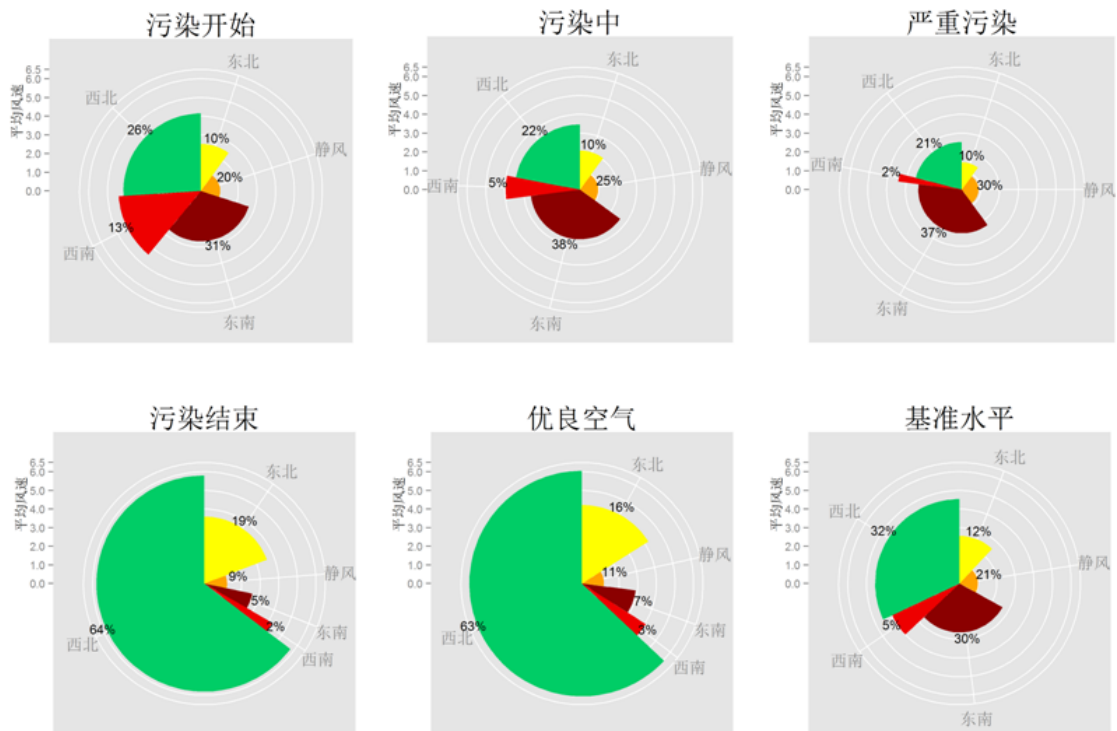


图 5: 污染过程从污染开始、污染中、严重污染、污染结束到优良空气状态下的风向分布及各风向下的平均风速。污染开始时, 西南风比例显著上升, 污染中和严重污染时, 东南风和静风比例增加, 而在污染结束和优良空气时, 北风(西北风和东北风)成为主导风向。

从图 5 我们可以看到:

- 在污染开始状态, 西南风有显著增加, 从基准水平的 5% 上升到 13%。
- 在污染中和严重污染状态, 东南风所占比例比基准水平的 30% 增加了 8% 和 7%, 静风所占比例比基准水平的 21% 增加了 4% 和 9%。
- 在污染结束状态和优良空气时段, 北风占比 (79%–83%) 远远高于基准水平 (44%), 且这两个状态的西北风和东北风的平均风速范围为 3.6 米/秒–6.1 米/秒, 远远大于基准水平的风速 2.6 米/秒–4.5 米/秒。而南风 (7%–10%) 和静风 (9%–11%) 所占比例远低于基准水平的 35% 和 21%, 并且风速要比基准风速低许多。

我们的研究发现累积风速 (Cumulative wind speed) 比即时风速能更好地解释 $PM_{2.5}$ 的变化。某一时刻的累积风速是此时刻之前同一风向下持续风速之和, 若风向改变了则累积风速会归为零, 并在新的风向下重新开始累积。累积风速比

即时风速对 $PM_{2.5}$ 的影响更加明显。

图6展示了在四个不同季节下, $PM_{2.5}$ 分别与北风和南风的累积风速的关系。红色曲线是拟合二者的回归函数。第一行的四个图是关于北风(西北风和东北风)的, 第二行是关于南风(西南风和东南风)的。图中从左到右依次为春、夏、秋、冬四季。

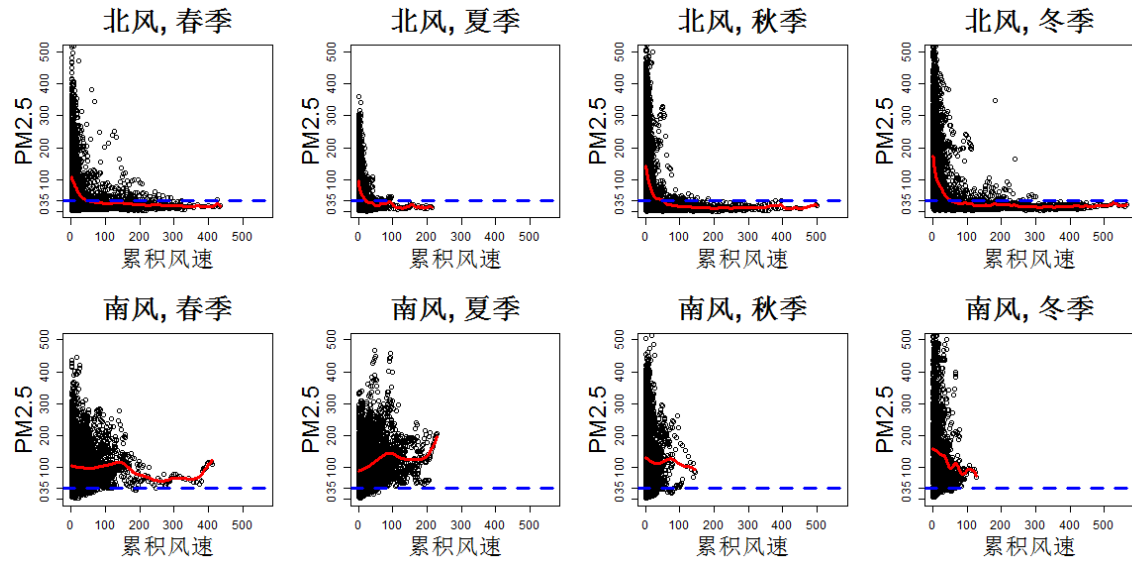


图6: 四个季节在北风与南风条件下, $PM_{2.5}$ 和累积风速的关系。蓝线表示 35 微克/立方米的 $PM_{2.5}$ 浓度(空气质量为良的上限)。在不同的季节, 持续的北风都会使 $PM_{2.5}$ 的浓度下降, 但是南风却没有这样的效果。

从图中我们可以明显看到:

- 持续的北风都会使 $PM_{2.5}$ 浓度有下降趋势。对春、夏、秋、冬依次来说, 通过计算图6中拟合回归曲线(红色)和 $PM_{2.5}$ 浓度等于 35 微克/立方米的水平线(蓝线)的交点, 我们得到当北风的累积风速分别达到 44、21、49 和 52 时, 拟合回归曲线对应的 $PM_{2.5}$ 浓度可以降至 35 微克/立方米以下的优良空气水平。
- 持续的南风并不会使 $PM_{2.5}$ 减少至 35 微克/立方米以下。拟合曲线对应的 $PM_{2.5}$ 浓度基本维持在 100 微克/立方米附近, 尽管在较大的累积风速下, $PM_{2.5}$ 在春、秋、冬三个季节都有稍许减少, 但并不明显。而在夏天, 南风对 $PM_{2.5}$ 的增加有显著影响。由此可见南风会把北京以南的污染物传送到北京, 加重了北京的污染。

以上的结论与北京的地理位置和华北的能源消耗结构是密不可分的。北京位于华北平原的西北角，其西边是太行山脉，北边是燕山山脉。北京以北的污染工业较少，所以北风带来的是相对洁净的空气。然而，北京从正东方向顺时针到西南方向，广泛地分布着消耗大量煤炭和化石燃料的重工业企业。东南风与西南风带来的污染物会在太行山和燕山的山脚下聚集。北京以东 152 公里的唐山市，以钢铁工业著称，2012 年大约消耗 1 亿吨煤炭。北京以南的石家庄市和保定市的煤炭消耗量同样巨大。2012 年华北平原的总煤炭消耗量为 10 亿吨，约占全国消耗量的四分之一，与之形成鲜明对比的是，华北平原只占全国土地面积的 5.6%。下一节我们给出具体的能源统计。

以上分析的一个结论是：北风是北京城驱散雾霾的重要军。人们不禁会问，万一没有了北风，北京的优良空气时间能维持多久？为了回答这一问题，我们在优良空气情况下扣除一级以上北风（风速大于每秒 1.5 米/秒）的时段，重新计算空气属于优良的时间。图 7 给出了 2010-2014 年扣除和不扣除一级以上北风的优良空气时间分布图。

图 7 说明，去除掉大于 1.5 米/秒的北风后，优良空气的时间显著减少。具体来说，北京的 $PM_{2.5}$ 浓度在优良水平的平均时间从 20 小时大幅下降到只有 4.7 小时。也就是说，在北风停止后，北京只能保持好空气不到 5 小时，之后污染将卷土重来。这说明北京污染物的本地排放不可忽视。

在没有一级以上北风下北京能保持空气优良的时间可以作为评估北京空气污染的一个指标。

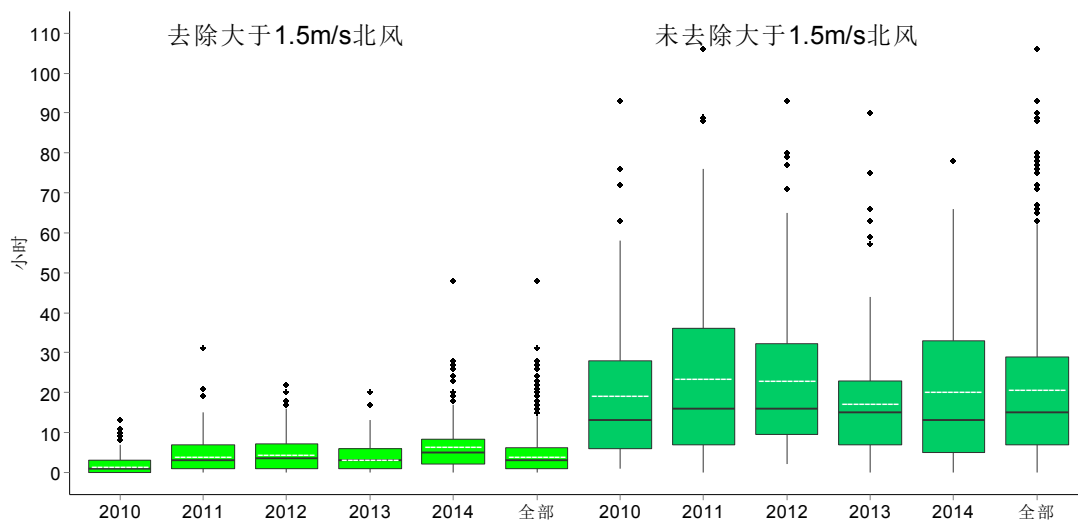


图 7：去除大于 1.5 米/秒的北风和未去除大于 1.5 米/秒的北风情况下，优良空气持续时间，白色虚线为平均值，黑色实线为中位数。北京如果没有了大于一级的北风，空气质量是优良水平的平均时间将只有不到 5 小时。

总之，不论从不同状态下风向分布、风速分布，还是单独分析优良空气状态及污染状态，我们都可以得到一个结论：持续较大风速的北风可以显著地降低北京城的雾霾，而南风 and 静风会使北京城内的污染物不断累加，加剧污染；其中，我们认为南风的作用是将其他地区的污染物带到北京，而静风的作用是使得北京已有的污染物进行累积，从而加重污染。

八、能源消费

附录中的表 S3-S5 给出北京、天津、河北、山东和河南（三省二市）从 2001 年到 2012 年的能源消费统计（数据来源为国家统计局）。

煤炭：北京的煤炭消费量略有下降，由 2001 年的 2700 万吨降到 2012 年的 2300 万吨。但是其他三省一市的煤炭消费量都呈现快速增加：其中天津和河北 2012 年的消费量分别为 2001 年的 2 倍和 2.5 倍，除北京之外的四省市是 3.9 倍。

汽油：北京的汽油消费量大幅增加，2012 年的消费量（420 万吨）是 2001

年（140 万吨）的 3 倍。其他三省一市同样消费量大增，其中天津和河北的增幅均为 1.2 倍，除北京之外的四省市消费是 2.2 倍。北京现在有 520 多万辆汽车。北京的年汽油消费量是河北的 1.3 倍，天津的 1.6 倍。

柴油：2012 年北京、天津的柴油消费量是 2001 年的 2 倍，河北是 4.9 倍，除北京之外的四省市消费总量是 4.5 倍。

北京的汽油消耗量数据表明北京的污染有相当是自身排放的，不能将空气污染问题全归责于河北及其它省市。

三省二市 2012 年的煤炭和汽油消费是 2001 年的三倍，柴油消耗是 4 倍。煤炭消耗占全球年消耗量的 14%，其中的四成是在一个两面被山挡住的平原地带消耗、排放，形成一个巨大的烟雾化学反应箱。这一巨大的排放量远远超过了环境的承载能力。

九、PM_{2.5} 的公平评价

大家最关心的是今年的污染情况是不是比去年好了，排放是不是降低了。这就需要我们有一套科学的统计方法来公平地比较不同年份的 PM_{2.5} 浓度。

在第七节我们讨论了风会导致污染物的输入或输出（图 6）。但是 PM_{2.5} 的浓度不只是受风的影响，它还受相对湿度、气温、气压等其它气象因素的影响。这些因素和风一起共同影响 PM_{2.5} 的浓度。换句话说，在一个城市的排放总量和组成一定的情况下，天气因素对 PM_{2.5} 有很大的影响。比如，在北京夏天，高温、高湿会促进大气化学反应，产生大量的二次气溶胶，从而增加 PM_{2.5} 的浓度。

那在空气质量评估中，如何比较去年 1 月份和今年 1 月份的 PM_{2.5} 浓度？

如果去年 1 月和今年 1 月刮完全一样的风，且风速也完全一样，都是 59%的

北风，30%的南风 and 11%的静风，并且气温、湿度和气压在这两月中的任一时刻也完全一样，那将提高 $PM_{2.5}$ 的可比性。只需分别计算去年 1 月份和今年 1 月份的简单平均浓度，看今年的比去年大还是小。这是目前广泛使用的方法：即对每小时的 $PM_{2.5}$ 浓度数据求简单平均值。但这种方法没有考虑气象的差异，是不科学的、不公平的。

为什么说不考虑天气因素而只简单平均 $PM_{2.5}$ 的浓度的做法不公平？打个比方，河北省有两个市，都在华北大平原上，但地理条件不同。一个城市靠海边，而另一个城市在内陆。靠近海边的城市排放量要比内陆的城市高，但是靠近海边的城市每天刮不小的海风，将相当多的 $PM_{2.5}$ 吹走。而内陆的城市没有海风，就在太行山脚下，易于污染物的累积，即使花了很多努力进行减排，但一年下来 $PM_{2.5}$ 浓度仍比靠海城市的浓度高很多。只是因为它的地理、气候不适于污染扩散，尽管它的污染物的排放要少一些。因此如果我们只是用简单平均数来比较，没有考虑两个地方的地理、天气差别，就不公平了。

所以我们要对 $PM_{2.5}$ 浓度根据所处的天气条件进行调整。换句话说，我们在做环境污染评估比较的时候，要扣除天气的影响，从而使得我们能估算到排放量的实际变化，这样才公平。

那我们如何调整？

现代统计学的观察研究 (Observational Study) 为我们提供了调整的方法。这一方法的宗旨是在计算 2010 年到 2014 年中任何一个 1 月份（比如 2013 年 1 月份）的平均浓度时，我们将 2010 年到 2014 年五年的 1 月份的天气情况都考虑进来，也就是以五年的天气为计算比较的基础。这样做可以去除掉某一年的异常天气对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响，具体算法见我们的技术报告 (Liang X, et al, 2015)。

但不同于科学家们能控制实验室中的条件和参数，人类还不知道如何控制天气。所以去年 1 月的北京的天气和今年 1 月相比可能很不一样。相应的， $PM_{2.5}$

所受的影响也会不同。例如，2010年和2011年1月份北京分别有75%和81%的北风，相比其他年所占比例偏高很多，也远远高于冬季北风占60%的基准水平，所以2010年和2011年1月份原始月均值会比其他年份的1月份偏低一些。同样是1月份，2012年约有57%的北风，接近正常水平，但2013年和2014年只有51%的北风，低于正常水平。不仅有风的影响，其它气象因素也会起到很大作用。2013年的1月份平均相对湿度是63%，而五年同期水平为46%，而2012年和2014年的平均湿度却为47%和38%。总体来看，2012年的1月份的气象状况接近于1月份的正常水平，2014年1月份低湿度弥补了少北风的影响，所以相比较于2013年的1月份污染也不是很严重。但2013年1月观测到的 $PM_{2.5}$ 浓度就比2012年和2014年高了许多，这或许是受到少北风和高湿度的气象条件的影响。而其实这三年中的1月份的污染排放水平的差别可能并不大。运用统计学方法，我们得到的调整前和调整后的2013年1月份 $PM_{2.5}$ 浓度的平均值分别为193.3微克/立方米和121.2微克/立方米，相差了72微克/立方米。也就是说，如果2013年1月份的天气是过去五年的正常天气，实际的 $PM_{2.5}$ 的平均浓度应该是121.2微克/立方米，而不是现在观测到的193.3微克/立方米。

所以在环保评估中我们要将天气影响去除。去除天气影响后的 $PM_{2.5}$ 浓度才反映了污染排放，我们才能得到由于排放所造成的污染的严重程度。

十、调整的五年的 $PM_{2.5}$ 平均浓度

我们用上节提到的对天气因素调整的方法，对北京过去五年60个月的 $PM_{2.5}$ 数据和天气数据进行了分析和计算。

图8是对五年中每个月做出调整后的平均浓度，并给出调整后均值的95%置信区间。95%置信区间表示真实的 $PM_{2.5}$ 平均值将以95%的概率被该区间所包含。

调整前的平均值若没有落在该区间内，则认为调整前后二者的数值在统计学意义下有显著差异。

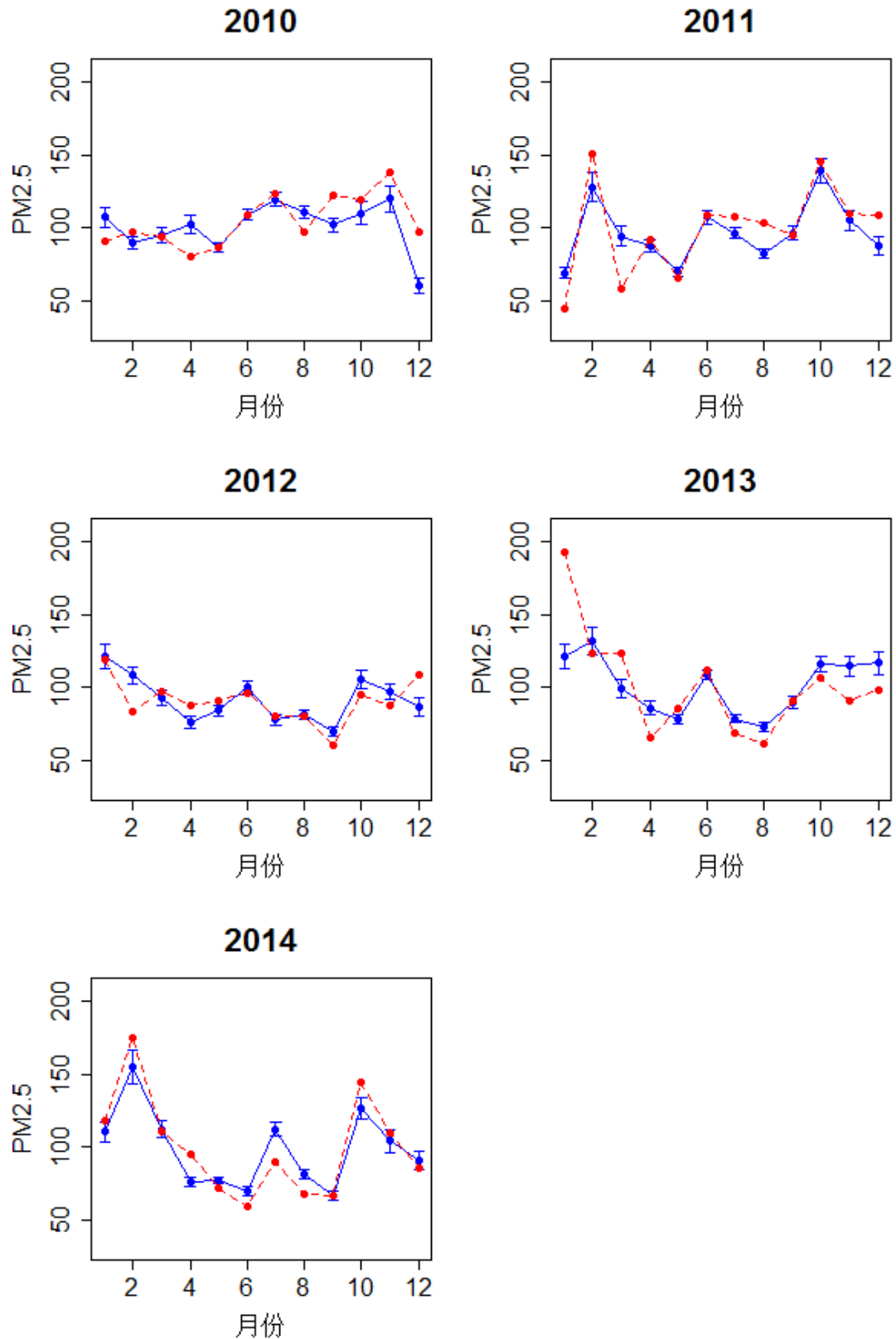


图 8: 经过气象调整后的 PM_{2.5} 月均值浓度 (蓝色实线) 及原始月均值浓度 (红色虚线)。过去 60 个月中, 39 个月原始均值都落在调整区间外, 这说明气象因素的影响是不可忽略的, 验证了对原始 PM_{2.5} 浓度均值进行调整的必要性。

从图 8 中可以看出，过去五年 60 个月中，有 39 个月原始均值都落在调整区间之外，这说明气象因素的影响是不可忽略的，验证了对原始 $PM_{2.5}$ 浓度均值进行调整的必要性。

在图 8 中，60 个月调整后的均值都大于 60 微克/立方米，其中有 36 个月调整后平均浓度大于 90 微克/立方米。可见扣除掉气象因素，北京空气污染依旧严重。将调整后的月平均浓度加总平均，我们得到调整后五年年均值浓度分别为：

- 2010 年：101.15 (0.79) 微克/立方米；
- 2011 年：97.02 (0.84) 微克/立方米；
- 2012 年：91.79 (0.76) 微克/立方米；
- 2013 年：101.31 (0.84) 微克/立方米；
- 2014 年：98.57 (0.86) 微克/立方米。

其中括号内数字为标准误差 (Standard deviation)。

由此可见 2013 年和 2014 年均比 2012 年的 $PM_{2.5}$ 污染显著地加重了，相比 2012 年分别增加了 10.4% 和 7.4%。参见第十二节“最近三年的情况”中具体的统计检验结果。

十一、调整的五年的 $PM_{2.5}$ 分布的分位数

分位数是除平均值之外另一组描述 $PM_{2.5}$ 分布的度量指标。相比于平均值，它们提供了更加细化的 $PM_{2.5}$ 的分布特征。最常见的是 50% 分位数，也称为中位数。 $PM_{2.5}$ 的 90% 分位数浓度是指有 90% 的数值小于该浓度，它度量了污染最严重的 10% 的情况。同理，10% 分位数浓度是指有 10% 的数值小于该浓度，所以它给出了 $PM_{2.5}$ 浓度最低的 10% 的水平。

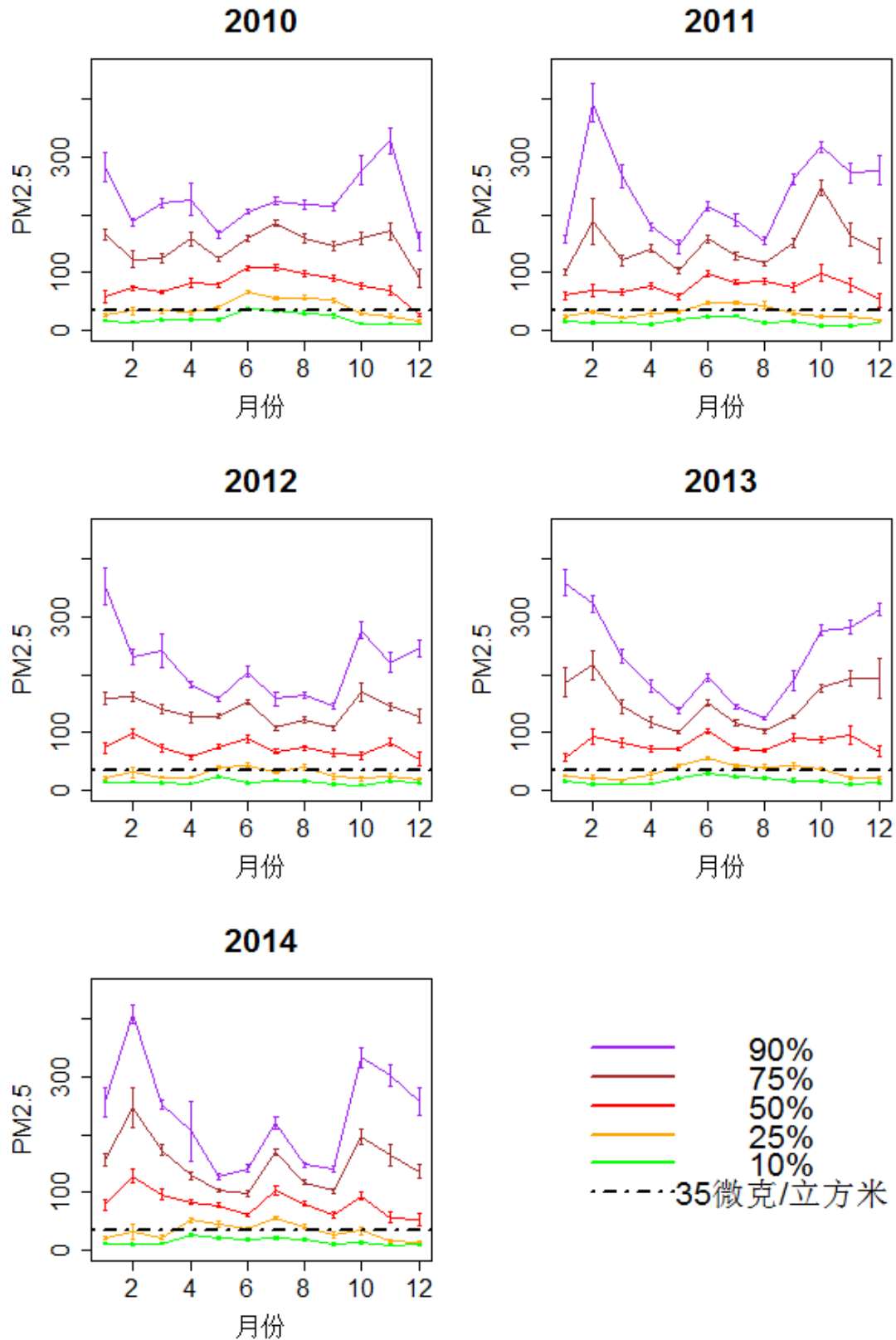


图 9: 经过气象调整后的各月 $PM_{2.5}$ 浓度的 90% (紫色)、75% (棕色)、50% (中位数、红色)、25% (黄色) 和 10% (绿色) 分位数。90% 的分位数意味着有 90% 的 $PM_{2.5}$ 的浓度小于这个数; 50% 的分位数意味着当月有一半的 $PM_{2.5}$ 的浓度超过了这个数。

使用类似上节中对平均值的调整方法，我们对分位数做类似的调整，得到调整后的 $PM_{2.5}$ 的每个月的五个分位数。图 9 给出了从 2010 年 1 月至 2014 年 12 月每个月调整之后的 10%（绿色）、25%（黄色）、50%（红色）、75%（棕色）、90% 分位数（紫色），以及各自的 95% 置信区间。从图 9 中我们发现：

- 北京过去五年的 60 个月中除了 2010 年 6 月外，其它所有月的 10% 分位数（最好的 10% 情况）均小于 35 微克/立方米（美国 EPA 标准是 98% 分位数不超过 35 微克/立方米）。
- 60 个月中有 22 个月（主要在夏天）的 25% 分位数超过了 35 微克/立方米，这说明在这 22 个月里，每个月至少有 75% 的时间， $PM_{2.5}$ 的浓度超过 35 微克/立方米。由于夏天温度、湿度高且风速较小，所以一般污染比例较高，这与我们前面发现夏天在四个季节中一般污染比例最高的结果一致。
- 60 个月里有 59 个月的 50% 分位数（中位数）大于 35 微克/立方米，主要集中在 70-100 微克/立方米之间。这说明北京地区有 50% 的时间处在一般和重度污染状态下。
- 60 个月的 75% 分位数均大于 90 微克/立方米。
- 60 个月的 75% 分位数和 90% 分位数从 10 月到次年 3 月相比其他月份会有大幅度增加。这与冬季取暖和秋季秸秆燃烧有关。

我们今后评估北京市大气污染状况是否有好转，可以先看两个指标：

- （1）春、夏季月份的 25% 分位数是不是全部不超过 35 微克/立方米；
- （2）90% 分位数在冬季月份的是否低于在 250 微克/立方米；在夏季月份是否低于 150 微克/立方米。

十二、最近三年的情况

为了衡量 2013 年和 2014 年相比 2012 年空气质量的变化情况，从而评判《大气污染防治行动计划》是否对改善北京的 $PM_{2.5}$ 污染产生效果，我们比较了这两

年与 2012 年 $PM_{2.5}$ 浓度在均值、中位数和 90%分位数这三个度量上的差异。

从图 10 中我们发现：

- **平均值：**

2013 年相比 2012 年，12 个月里只有两个月（五月和八月）的平均值有显著减少；而另外 10 个月均有增加，其中 7 个月显著增加。

2014 年相比 2012 年，6 个月有减少，但只有两个月（五月和六月）的减少在统计学上是显著的（其差值的波动区间不包含 0）；另外增加的 6 个月里却有 4 个月是显著的。

2013 和 2014 相比于 2012 年，增加值比减少值高很多。

- **中位数：**

中位数给出 $PM_{2.5}$ 的中间水平使得一半的污染情况比它轻，另一半比它严重。中位数相对于平均值而言更加稳健。

相比 2012 年，2013 年中位数有 8 个月增加了，其中 5 个月显著增加，另外浓度减少的 4 个月中只有两个月（一月和八月）是显著的。

2014 年中位数有两个月（六月和十一月）显著小于 2012 年，但 6 个月有显著增加。

- **90%分位数（极端污染情况）：**

2013 年相比 2012 年有 4 个月显著增加，3 个月（五月、七月和八月）显著减少。

相对于 2012 年，2014 年各有 4 个月的显著增加和显著减少。

同时，我们发现减少的月份在 2013 年和 2014 年大都集中在夏季，且显著增加的浓度远比有显著减少的浓度值大很多。

小结：剔除气象因素后，同 2012 年相比，2013 年和 2014 年北京空气质量并没有改善，冬天的污染比 2012 年明显加重了，这一结论同我们之前第十节的结论是一致的。

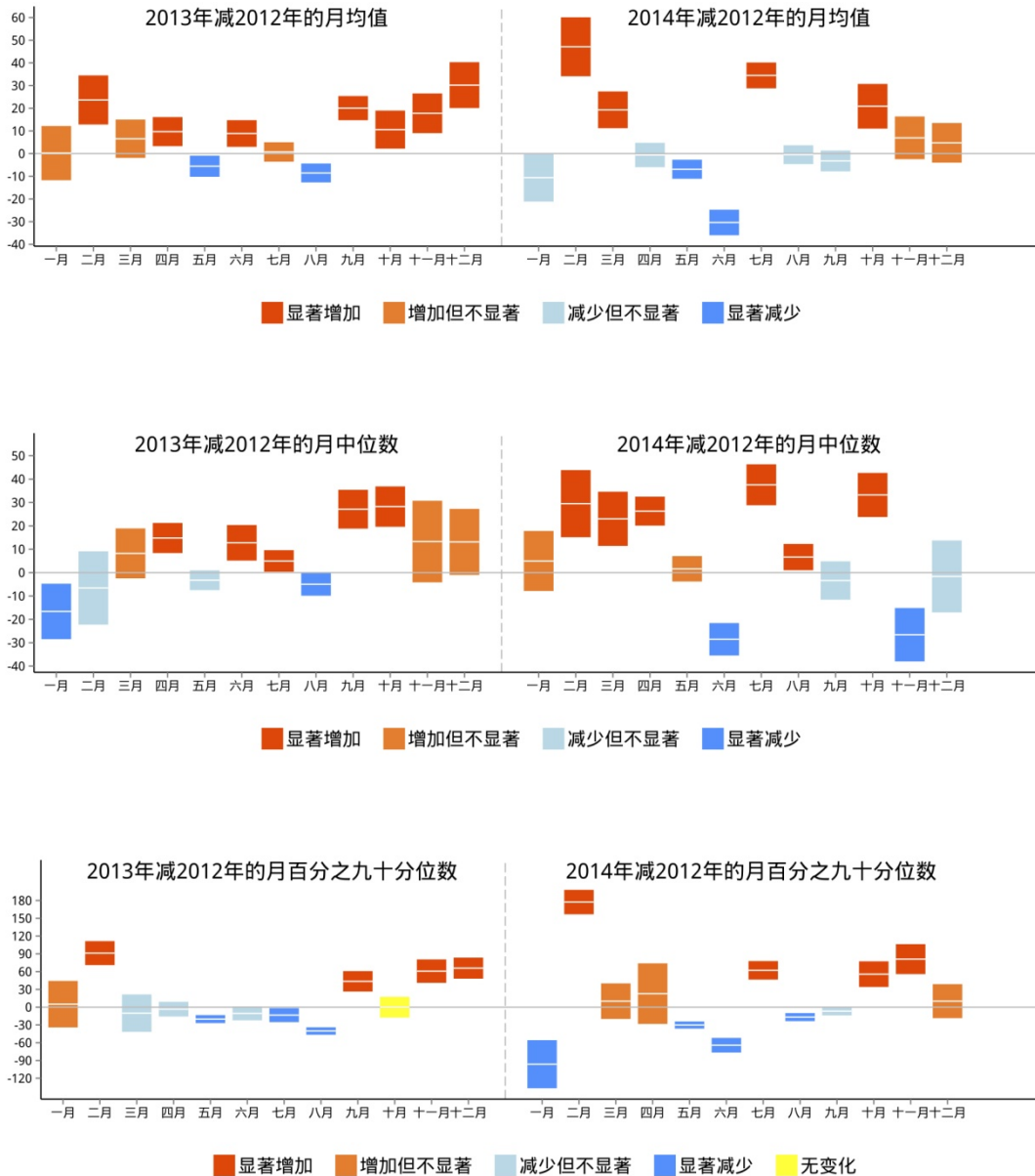


图 10: 调整后 2013/2014 相比于 2012 年 $PM_{2.5}$ 的差异。深黄代表有显著增加, 浅黄代表增加但不显著, 深蓝色代表有显著减少, 浅蓝代表减少但不显著。2013 年与 2012 年相比, $PM_{2.5}$ 的月均值浓度只有五月和八月有显著减少, 中位数浓度只有一月和八月有显著减少, 90%分位数只有五月、七月和八月显著减少; 2014 年与 2012 年相比, $PM_{2.5}$ 的月均值浓度只有五月和六月有显著减少, 中位数浓度只有六月和十一月有显著减少, 90%分位数只有一月、五月、六月和八月显著减少。

由此可见, 我们不得不说北京的 $PM_{2.5}$ 污染情况很严峻, 完成污染防治计划, 减少污染物的排放, 需要下更大的力量和决心。下面两节关于 APEC 会议和冬季取暖的分析, 对如何改善北京的 $PM_{2.5}$ 污染提供很好的借鉴作用。

十三、APEC 效应

2014 年 11 月 APEC 会议在北京举行。APEC 北京会议不仅留下了各项成果，更有蓝天白云。热点词汇“APEC 蓝”应运而生。美好的景象让人们留恋感叹，人们不禁要问“APEC 蓝”到底是“人为的减排”还是纯属偶然？

为了保证 APEC 会议期间的空气质量，政府自 11 月 3 日起采取一系列的控制措施，关闭了北京周边及河北省的廊坊、保定、石家庄、邢台等沿着太行山山脉的一线城市的工厂，实施最高一级重污染应急减排措施。从 11 月 6 日开始，这一应急减排措施进入第二阶段，扩展到更多的河北城市，以及部分山东、山西和内蒙古的城市和地区。不少地方实施机动车单、双号限行，并尽可能采取限、停产措施。北京市学校、公共机构单位也放假，直到 APEC 会议结束。在 APEC 会议期间，尽管天气状况并不是很好，但一系列的减排措施使得北京的雾霾水平并不严重，“APEC 蓝”时有出现。

APEC 会议期间政府采取的这些减排措施对北京的空气到底有多大贡献呢？

从 2010 年到 2013 年，同时期内北京市及周边城市并未采取同样的减排措施，仅有 2014 年短期内采取了该举措，所以这给我们提供了一个对比实验的机会。我们考虑两个时间段：11 月 3 日到 12 日，11 月 6 日到 12 日。它们分别对应了 APEC 减排措施的两个阶段。我们首先去除天气的影响，然后比较 2014 年与前四年同时期的 $PM_{2.5}$ 浓度水平。同月均值调整一样，我们用五年的天气情况进行调整。调整后如果 2014 年 $PM_{2.5}$ 浓度显著比前几年减少，就说明 APEC 会议期间实施的减排措施有显著成效。反之，则可以认为“APEC 蓝”是偶然的天气所为。

图 11 给出了两个不同时间段的每年调整后的平均浓度。左边是从减排措施第一阶段开始到 APEC 会议结束，右边则是从第二阶段开始实施到会议结束。

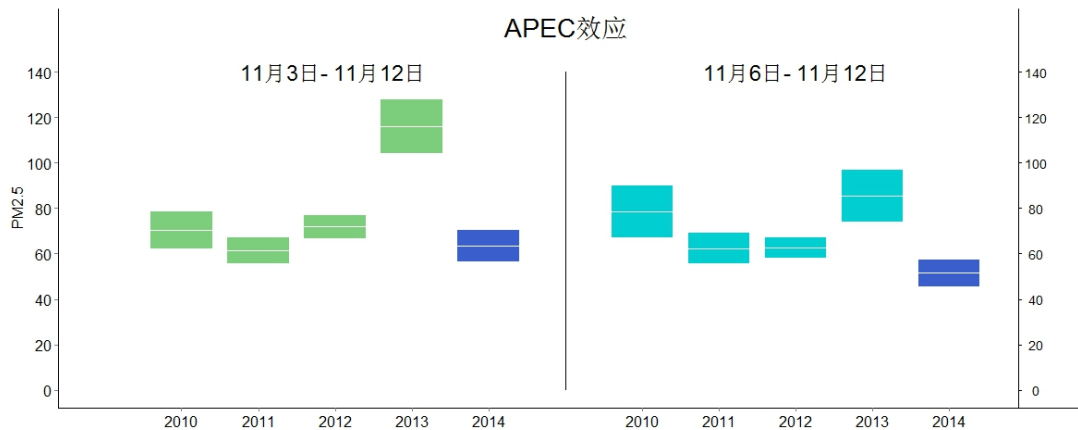


图 11: APEC 对比实验。2014 年 APEC 期间与 2010 年至 2013 年同期的两个控制阶段的 $PM_{2.5}$ 的平均浓度（白色实线）及其 95%置信区间。第一阶段，2014 年 $PM_{2.5}$ 的平均浓度与 2010, 2012 和 2013 年相比，有不同程度的降低。第二阶段，2014 年比其他几年都要低很多，说明第二阶段的减排效果更明显。

从图 11 中可以看出：

- 在整个 APEC 会议期间 11 月 3 日-12 日，2014 年 $PM_{2.5}$ 的平均浓度与 2010, 2012 和 2013 年相比，有不同程度的降低。经过统计学 5%水平的 t-检验，在 11 月 3 日-12 日期间，2014 年显著比 2012、2013 年同期要低，但同 2010 年和 2011 没有显著差别。
- 在第二个阶段 11 月 6 日到 12 日，2014 年比其他几年都要低，且全部显著。降幅在 17.5%-40%之间，平均降幅为 27%。

对以上结果可做如下解释：当第一阶段措施实施开始，减排的效果并不是十分明显。当政府扩大了减排区域后，空气质量相比前四年的同时期水平有了明显改善。可见北京 $PM_{2.5}$ 的浓度水平受到周边城市污染物传输的影响很大。

但是我们应该看到，即使在实施了一周的大范围减排，第二阶段的 $PM_{2.5}$ 平均浓度是 51.5 (2.9) 微克/立方米，仍然高于达标水平（良）的 35 微克/立方米。应该指出，悬浮物可以在空气中停留相当长的时间，有可能第二阶段的污染源有相当一部分来自第一阶段或更早。一个星期可能太短了，减排的效果可能没有完全体现出来。但是这一个星期华北地区的经济活动几乎停止。环境保护不能

靠这样临时的行政干预，而是需要长期系统的减排措施和严格的监管。

十四、冬季供暖效应

从前面的分析我们知道，北京冬天严重污染状态占比 28%，是四个季节中最高的。图 9 里 75%分位数和 90%分位数在冬季也普遍升高，这都一致地反映了冬天空气污染的严重程度。每年 11 月份，北京城市开始进入供暖期。不少研究表明煤的燃烧是 $PM_{2.5}$ 的一项重要来源，尤其是在冬季供暖时期。目前整个北方地区的供暖主要依靠燃煤，而且不少地方使用劣质煤。

$PM_{2.5}$ 浓度在冬季供暖时期会比非供暖时期高出多少？

为了解释这一问题并度量供暖对 $PM_{2.5}$ 的影响，我们对过去五年中的每一年分别选取 11 月开始供暖前两周和供暖后两周的两个时段的数据进行对比分析。在分析每一时段数据时，我们用过去五年中这四周的所有天气数据作为基准，从而得到公平比较。同样的，我们也选取了每年 3 月份结束供暖前两个星期和结束供暖后两个星期进行对比。通过比较供暖时期和非供暖时期 $PM_{2.5}$ 的平均浓度，我们可以估算出供暖对 $PM_{2.5}$ 浓度增加的影响。

北京每年冬季供暖一般是从 11 月 15 日至来年 3 月 15 日，但每年可能会根据当年天气情况决定是否提前开始供暖或者延迟结束供暖。例如，2012 年提前在 11 月 3 日开始供暖，而 2010、2012、2013 分别于 3 月 22、18、17 日才停止供暖。

图 12 分别给出了 11 月份和 3 月份，每年供暖开始之前两周和供暖之后两周的 $PM_{2.5}$ 的平均值。它给出如下结论：

- 无论是 3 月还是 11 月， $PM_{2.5}$ 在供暖时期（红色）的平均水平都要比非供暖时期（蓝色）显著增高（在统计学意义上）。
- 11 月份从非供暖时期到供暖时期 $PM_{2.5}$ 平均浓度增长了 23%至 179%不等，

其中 2010 年增加了 179%，2014 年增加了 169%。2014 年的大幅度增加主要是由于供暖前 APEC 期间的减排措施。

- 3 月份，在供暖时期的 $PM_{2.5}$ 平均浓度要比非供暖时期的浓度增加 33%-66%。

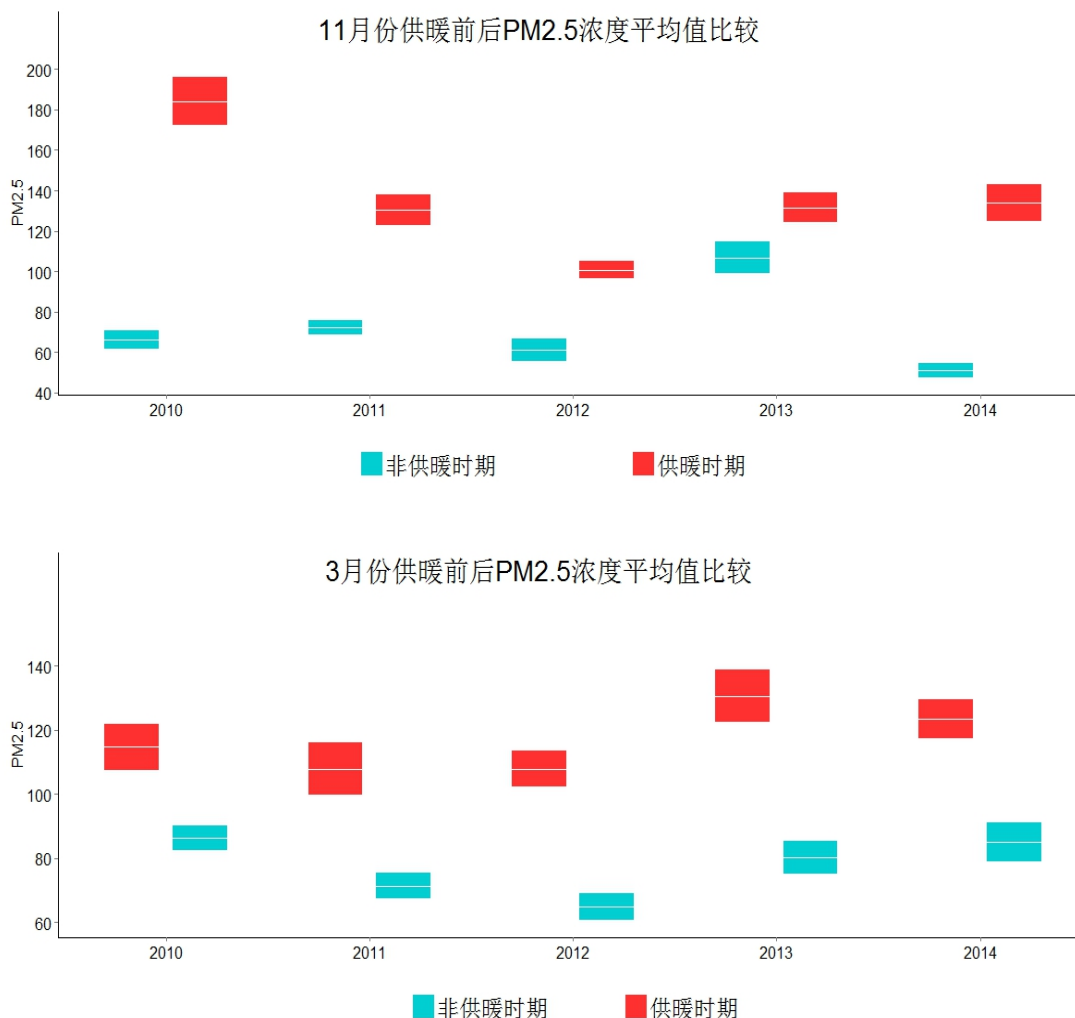


图 12：2010 年到 2014 年北京冬季供暖效应： $PM_{2.5}$ 平均浓度及其 95%置信区间。无论是 11 月份还是 3 月份，过去五年期间供暖时期的 $PM_{2.5}$ 平均浓度都要比非供暖时期的平均浓度高很多。

通过计算，11 月和 3 月冬季供暖时期的 $PM_{2.5}$ 浓度相比非供暖时期的浓度的增长比例的五年平均值为 53.5%（11 月为 56.3%，3 月为 51.8%）。在计算以上平均增长率时我们去除了 2010 年和 2014 年 11 月份的增长比率，因为这两年的供暖时期的 $PM_{2.5}$ 浓度增长比例超常的高，分别为 179%和 169%。2014 年是由于 APEC 会议（APEC 正好在非供暖期）。而 2010 年的原因需要进一步探讨。

如果去除掉由于供暖所产生的全部或部分 $PM_{2.5}$ 颗粒物，北京 $PM_{2.5}$ 的年平均浓度会是什么水平？我们不妨在如下两个假想情景下估算。

情景 1:

北京及其邻近地区冬季取暖使用一种特殊的零排放的能源（这里只是假设，这种能源还没有被发明），这使得冬季供暖对 $PM_{2.5}$ 的效应为零。这是最理想的情形，是现实中达不到的，但它提供了 $PM_{2.5}$ 浓度可能的最大降幅。

我们上面的分析表明供暖时期的 $PM_{2.5}$ 浓度比非供暖时期增加了至少 50%，即供暖时期的 $PM_{2.5}$ 浓度是非供暖时期浓度的至少 1.5 倍。我们不妨使用 1.5 倍为基准做如下计算。由于冬季里 12 月、1 月、2 月全月都在供暖，所以我们可以目前的平均浓度（调整了天气因素）基础上除以 1.5 以去除掉供暖影响。而 11 月和 3 月并不是全月供暖，所以我们以 11 月、3 月在非供暖时期的平均值来代替原有的平均浓度。由于其它七个月份不供暖，所以保留其它月份的平均浓度不变。这样对每一年，我们都有一组去除掉冬季供暖影响后的月平均浓度，从而得到重新计算的年平均浓度。

重新计算后的 2013 年和 2014 年年均值将分别为 88.8 微克/立方米和 81.9 微克/立方米。这两个值相比 2012 年原有年均值 91.8 微克/立方米分别下降了 3.3% 和 10.8%。当然上面提到的“特殊能源”并不存在，所以上面的推算只是给出了 2013 年和 2014 年最理想情况下能减少的 $PM_{2.5}$ 比例。

情景 2:

北京及其邻近地区冬季取暖都使用天然气（这仍然比较理想），假设这将使得由于北京冬季取暖所产生的 $PM_{2.5}$ 浓度减少 3/4（这也只是一个假设）。这相当于在情景 1 理想状况下 $PM_{2.5}$ 浓度在取暖的月份会有 1/4 的增加。所以对 12 月、1 月、2 月的平均浓度（调整了天气因素）除以 1.5 的基础上再乘以 5/4，对 11 月、3 月非供暖期的平均浓度乘以 5/4，其他月份平均浓度保持不变。

表 3 给出在情景 2 下，2013 年和 2014 年的年平均浓度将分别为 97.8 微克/立方米和 89.7 微克/立方米，2013 相比 2012 年的年均值 91.8 微克/立方米未下降，而 2014 年相比 2012 年只降低了 2.3%。

表 3：两情景下 2013 年和 2014 年平均浓度情况。2012 年均浓度是 91.8 微克/立方米。

| 年份 | 原始 年平均浓度 | 情景 1 | | 情景 2 | |
|------|-------------|-------|---------------|-------|---------------|
| | | 年平均浓度 | 相比 2012 年下降比例 | 年平均浓度 | 相比 2012 年下降比例 |
| 2013 | 101.3 | 88.8 | 3.3% | 97.8 | 未下降 |
| 2014 | 98.6 | 81.9 | 10.8% | 89.7 | 2.3% |

以上分析说明，即使在这两种理想的情景下，只靠减低冬季供暖的排放来降低 $PM_{2.5}$ ，不能使北京的年均污染达到《大气污染防治行动计划》中 25% 的减少及年平均浓度不超过 60 微克/立方米的目標。所以还需要采取其他大力度的减排措施，降低其它月份的 $PM_{2.5}$ 浓度从而降低年平均浓度。

十五、结果汇总

为了揭示北京地区 $PM_{2.5}$ 的污染规律，我们分析了自 2010 年初至 2014 年底五年的逐小时 $PM_{2.5}$ 浓度和气象数据。利用现代统计学方法将气象因素的影响排除，从而为公平合理地比较不同时期不同年份的 $PM_{2.5}$ 的浓度提供了一个科学的方法。这一方法不仅适用于北京及周边地区，还可以运用到其它地区的大气质量的检测和评估中。

我们的分析的主要结果如下：

(1) 北京过去五年里的空气状况是：约有 23% 为优良天气，55% 为一般污染天气，22% 为严重污染天气。这三个百分比在过去五年中的变化并不显著。

(2) 我们的分析验证了北风对北京城区的污染有很强的清洗作用，而南风会把污染物从北京南部传输过来，从而加剧北京城区的空气污染。

(3) 在没有北风的支持和南风的影响的情况下，北京城区优良的空气平均每次只能维持不到 5 小时。这说明北京的污染有相当一部分是本地排放。

(4) 2013 年和 2014 年北京城区的 $PM_{2.5}$ 污染水平与 2012 年相比没有改善。在去除气象因素的影响后，2013 年和 2014 年的 $PM_{2.5}$ 年平均浓度比 2012 年分别增加了 10.4% 和 7.4%。中位数浓度和 90% 分位数浓度也显著地高于 2012 年。虽然 2014 年与 2013 年相比 $PM_{2.5}$ 的年平均浓度下降了 2.7%，但仍然高于 2012 年的水平。这说明北京要达到《大气十条》所订下的 2017 年减少 25% 和年平均浓度不高于 60 微克/立方米的目標，需要有更大的举措。在现有的减排力度和模式下，这两个目标将很难实现。

(5) “APEC 蓝”是北京及周边地区采取了极端的减排措施的结果。即便如此，APEC 会议期间的 $PM_{2.5}$ 平均浓度依旧高达 51.5 微克/立方米，仍然高于 35 微克/立方米的水平。这说明在华北南部、河南、山东现有的能源消耗模式下，北京地区获得持续性达标空气的可能性很低。

(6) 冬季供暖会使得 $PM_{2.5}$ 浓度增加 50% 以上，显著地加重了冬季空气污染。我们所做的两个情景分析说明，只通过减少冬季供暖的污染不能实现使北京的 $PM_{2.5}$ 浓度比 2012 年下降 25% 的目标。我们还需要实施其他的减排措施并且真正利用和执行现有的环保法规，否则 $PM_{2.5}$ 的污染水平很难大幅度降低。

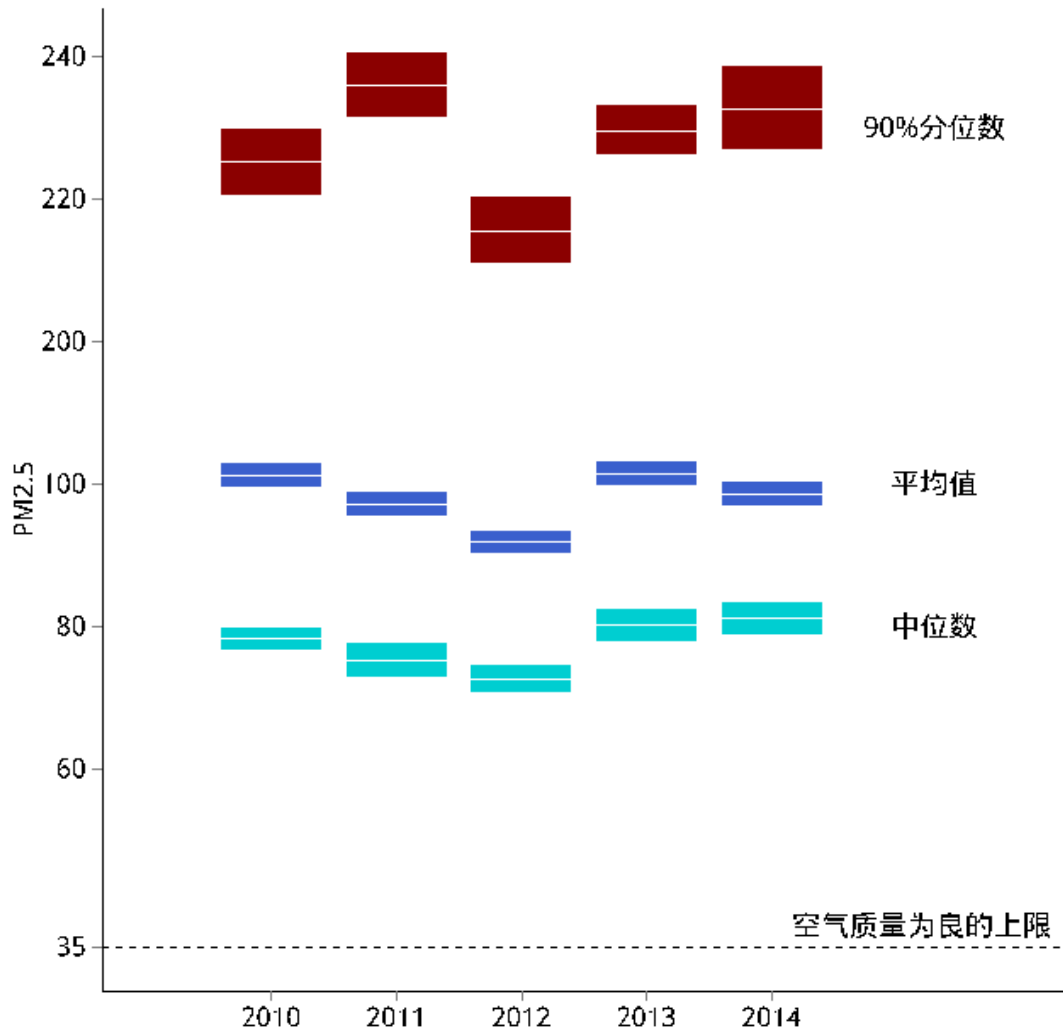


图 13：2010 年到 2014 年的 $PM_{2.5}$ 年平均浓度、中位数浓度、90%分位数浓度及它们各自的 95%置信区间。它们全部大于空气质量为良的 35 微克/立方米的上限。相比 2012 年，2013 年和 2014 年在这三个指标上 $PM_{2.5}$ 浓度都显著增加。

参考文献

1. 国发(2013)37号, 大气污染防治行动计划。
2. 李克强, 2014年国务院政府工作报告。
3. Zhang XY, et al. (2013) Factors contributing to haze and fog in China (in Chinese). *Chin Sci Bull (Chin Ver)* 58(13): 1178–1187.
4. Pope III CA, et al. (2002) Lung cancer, cardiopulmonary mortality and long-term exposure to fine particulate air pollution. *JAMA* 287 (9): 1132–1141.
5. Huang W, et al. (2012) Air pollution and autonomic and vascular dysfunction in patients with cardiovascular disease: interactions of systemic inflammation, overweight, and gender. *Am J Epidemiol*, 176 (2): 117–126.
6. Zhang YH, et al. (2008) Regional integrated experiments on air quality over Pearl River Delta 2004 (PRIDE-PRD2004): overview. *Atmos Environ* 42(25): 6157–6173.
7. Chang SY, Chou CC, Liu S, Zhang Y (2013) The Characteristics of $PM_{2.5}$ and Its Chemical Compositions between Different Prevailing Wind Patterns in Guangzhou. *Aerosol and Air Quality Research* 13(4): 1373–1383.
8. Li J, et al. (2014) Chemical characteristics and source apportionment of $PM_{2.5}$ during the harvest season in eastern China's agricultural regions. *Atmos Environ* 92: 442–448.
9. Guo S, et al. (2014) Elucidating severe urban haze formation in China. *Proc Natl Acad Sci USA* 111(49): 17373–17378.
10. Huang RJ, et al. (2014) High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China. *Nature* 514(7521): 218–222.
11. Wang L, et al. (2014) The influence of climate factors, meteorological conditions, and boundary-layer structure on severe haze pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei region during January 2013. *Advances in Meteorology* 2014, doi: 10.1155/2014/685971.
12. Tai APK, Mickley LJ, Jacob DJ (2012) Correlations between fine particulate matter ($PM_{2.5}$) and meteorological variables in the United States: Implications for the sensitivity of $PM_{2.5}$ to climate change. *Atmos Environ* 44(32): 3976–3984.
13. GB 3095-2012, 环境空气质量标准。
14. HJ 633-2012, 环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)。
15. Zhang JP, et al. (2012) The impact of circulation patterns on regional transport pathways and air quality over Beijing and its surroundings. *Atmos Chem and Phys* 12(11): 5031–5053.
16. 陈松蹊(2014), 公共数据应该开放共享。经济观察报, 2014年6月15日。
17. Department of Energy Statistics, National Bureau of Statistics, People's Republic of China (2013) *China Energy Statistics Yearbook* (in Chinese) (Chinese Statistics Press, Beijing).
18. Liang X, et al. (2015) Measuring Beijing's $PM_{2.5}$ pollution: severity, impacts of weather, APEC and winter heating. Submitted. 北京大学统计科学中心研究报告, 2015-3. 下载地址: <http://www.stat-center.pku.edu.cn>

附录

表 S1: 空气质量分指数及对应的污染物项目浓度限值。引自《环境空气质量指数 (AQI) 技术规定 (试行)》(HJ 633—2012)

| 空气质量分指数 (IAQI) | 污染物项目浓度限值 | | | | | | | | | |
|----------------|---|---|---|---|---|--|--|---|---|--|
| | 二氧化硫 (SO ₂) 24 小时 平均/ (μg/m ³) | 二氧化硫 (SO ₂) 1 小时 平均/ (μg/m ³) ⁽¹⁾ | 二氧化氮 (NO ₂) 24 小时 平均/ (μg/m ³) | 二氧化氮 (NO ₂) 1 小时 平均/ (μg/m ³) ⁽¹⁾ | 颗粒物 (粒径小 于等于 10μm) 24 小时 平均/ (μg/m ³) | 一氧化碳 (CO) 24 小时 平均/ (mg/m ³) | 一氧化碳 (CO) 1 小时 平均/ (mg/m ³) ⁽¹⁾ | 臭氧 (O ₃) 1 小时 平均/ (μg/m ³) | 臭氧 (O ₃) 8 小时滑 动平均/ (μg/m ³) | 颗粒物 (粒径小 于等于 2.5μm) 24 小时 平均/ (μg/m ³) |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 50 | 50 | 150 | 40 | 100 | 50 | 2 | 5 | 160 | 100 | 35 |
| 100 | 150 | 500 | 80 | 200 | 150 | 4 | 10 | 200 | 160 | 75 |
| 150 | 475 | 650 | 180 | 700 | 250 | 14 | 35 | 300 | 215 | 115 |
| 200 | 800 | 800 | 280 | 1 200 | 350 | 24 | 60 | 400 | 265 | 150 |
| 300 | 1 600 | ⁽²⁾ | 565 | 2 340 | 420 | 36 | 90 | 800 | 800 | 250 |
| 400 | 2 100 | ⁽²⁾ | 750 | 3 090 | 500 | 48 | 120 | 1 000 | ⁽³⁾ | 350 |
| 500 | 2 620 | ⁽²⁾ | 940 | 3 840 | 600 | 60 | 150 | 1 200 | ⁽³⁾ | 500 |
| 说明: | ⁽¹⁾ 二氧化硫 (SO ₂)、二氧化氮 (NO ₂) 和一氧化碳 (CO) 的 1 小时平均浓度限值仅用于实时报, 在日报中需使用相应污染物的 24 小时平均浓度限值。 ⁽²⁾ 二氧化硫 (SO ₂) 1 小时平均浓度值高于 800 μg/m ³ 的, 不再进行其空气质量分指数计算, 二氧化硫 (SO ₂) 空气质量分指数按 24 小时平均浓度计算的分指数报告。 ⁽³⁾ 臭氧 (O ₃) 8 小时平均浓度值高于 800 μg/m ³ 的, 不再进行其空气质量分指数计算, 臭氧 (O ₃) 空气质量分指数按 1 小时平均浓度计算的分指数报告。 | | | | | | | | | |

表 S2: 空气质量指数的六个级别。引自《环境空气质量指数 (AQI) 技术规定 (试行)》(HJ 633—2012)

| 空气质量指数 | 空气质量指数级别 | 空气质量指数类别及表示颜色 | | 对健康影响情况 | 建议采取的措施 |
|---------|----------|---------------|-----|-------------------------------------|---|
| 0~50 | 一级 | 优 | 绿色 | 空气质量令人满意, 基本无空气污染 | 各类人群可正常活动 |
| 51~100 | 二级 | 良 | 黄色 | 空气质量可接受, 但某些污染物可能对极少数异常敏感人群健康有较弱影响 | 极少数异常敏感人群应减少户外活动 |
| 101~150 | 三级 | 轻度污染 | 橙色 | 易感人群症状有轻度加剧, 健康人群出现刺激症状 | 儿童、老年人及心脏病、呼吸系统疾病患者应减少长时间、高强度的户外锻炼 |
| 151~200 | 四级 | 中度污染 | 红色 | 进一步加剧易感人群症状, 可能对健康人群心脏、呼吸系统有影响 | 儿童、老年人及心脏病、呼吸系统疾病患者避免长时间、高强度的户外锻炼, 一般人群适量减少户外运动 |
| 201~300 | 五级 | 重度污染 | 紫色 | 心脏病和肺病患者症状显著加剧, 运动耐受力降低, 健康人群普遍出现症状 | 儿童、老年人和心脏病、肺病患者应停留在室内, 停止户外运动, 一般人群减少户外运动 |
| >300 | 六级 | 严重污染 | 褐红色 | 健康人群运动耐受力降低, 有明显强烈症状, 提前出现某些疾病 | 儿童、老年人和病人应当留在室内, 避免体力消耗, 一般人群应避免户外活动 |

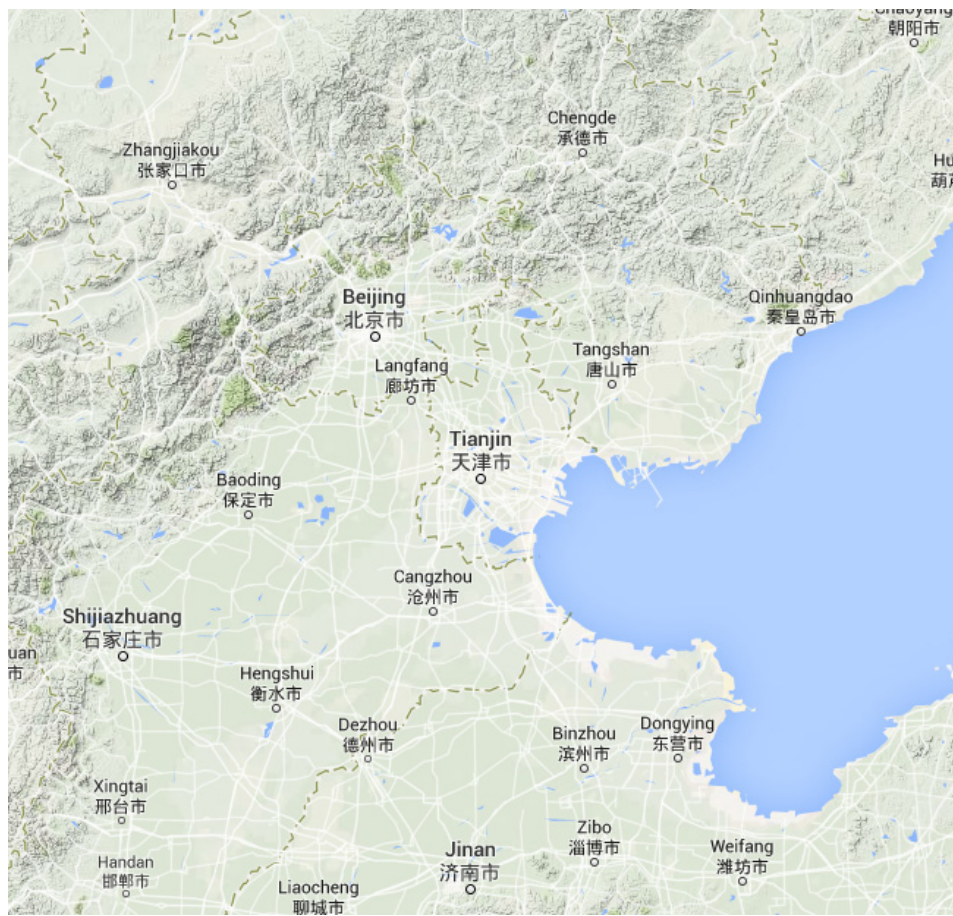


图 S1: 北京及相邻平原和山脉的地图。来源: Google Map

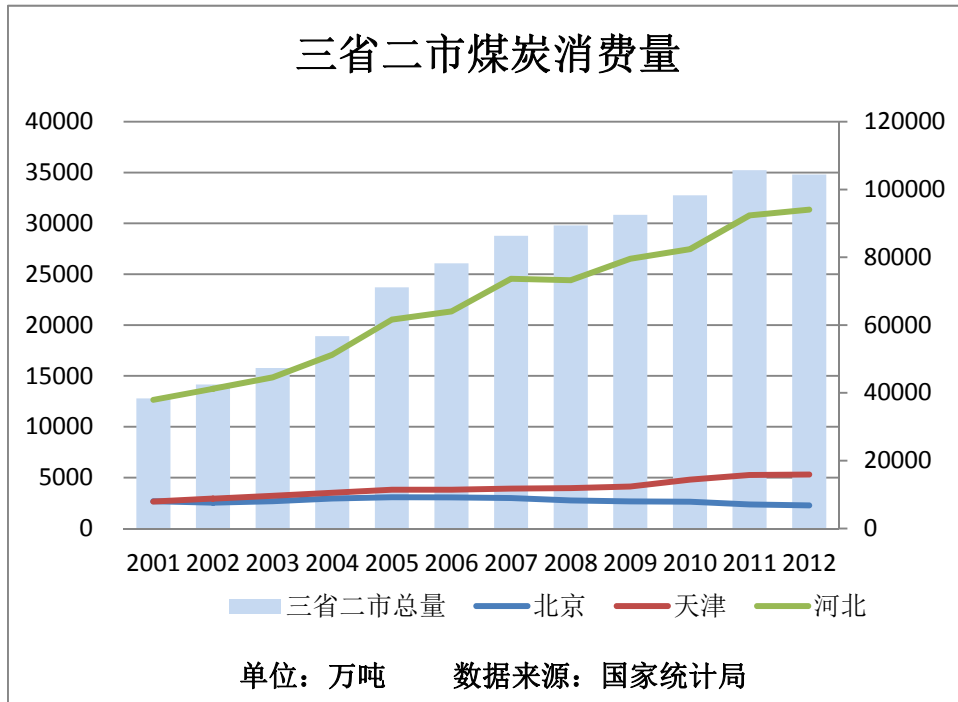


图 S2: 2001-2012 京津冀鲁豫煤炭消费趋势图。

数据网站: <http://data.stats.gov.cn/index>

从图 S2 中可见, 从 2001 年开始到 2012 年, 北京每年的煤炭消费量略有下降, 由 2700 万吨降到 2300 万吨。但是其他省市的煤炭消费量都呈现增加趋势, 其中天津和河北的增幅分别为 100%和 150%, 除北京之外的四省市消费总量增幅为 290%。此外, 下表详细地给出了从 2009 和 2010 年到 2012 年的煤炭消费量的增长比率。

表 S3: 京津冀以及三省二市的煤炭消费量的增长率

| | 北京 | 天津 | 河北 | 三省二市总量 |
|----------------|------|-----|-----|--------|
| 2009 年至 2012 年 | -17% | 22% | 15% | 11% |
| 2010 年至 2012 年 | -16% | 9% | 12% | 6% |

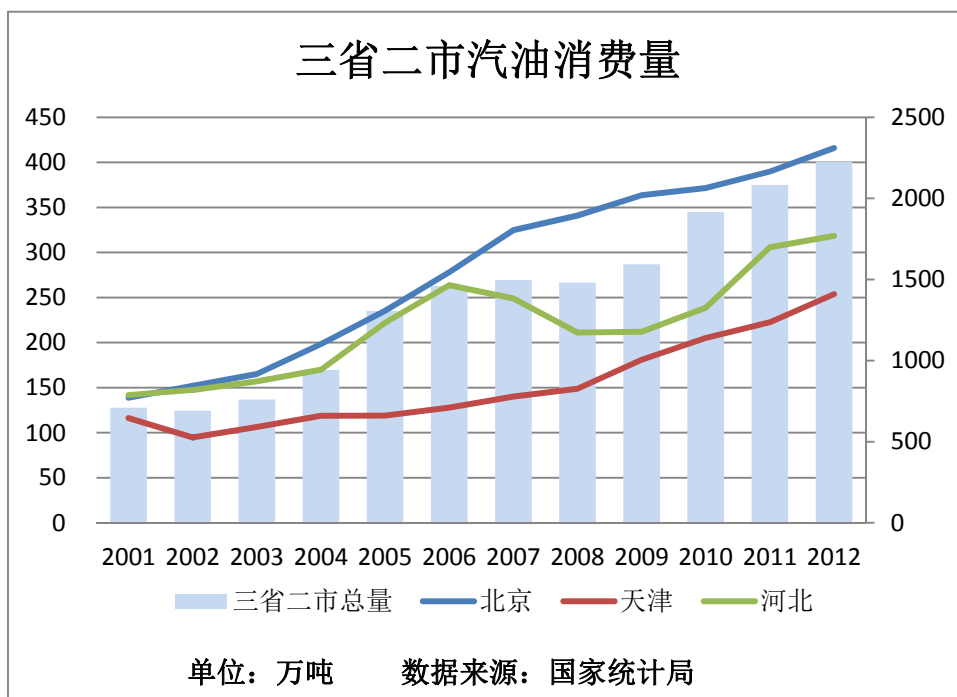


图 S3：2001-2012 京津冀鲁豫汽油消费趋势图。

数据网站：<http://data.stats.gov.cn/index>

从图 S3 中可见，北京的汽油（不包括柴油）消费量大幅增加，从 2001 年的 140 万吨增长到 2012 年的 420 万吨，增幅为 200%。其他省市同样消费量大增，其中天津和河北的增幅均为 120%，除北京之外的四省市消费总量增幅为 220%。此外，下表详细地给出了从 2009 和 2010 年到 2012 年的汽油消费量的增长比率。

表 S4：京津冀以及三省二市的汽油消费量的增长率

| | 北京 | 天津 | 河北 | 三省二市总量 |
|----------------|-----|-----|-----|--------|
| 2009 年至 2012 年 | 14% | 40% | 50% | 40% |
| 2010 年至 2012 年 | 12% | 24% | 33% | 16% |

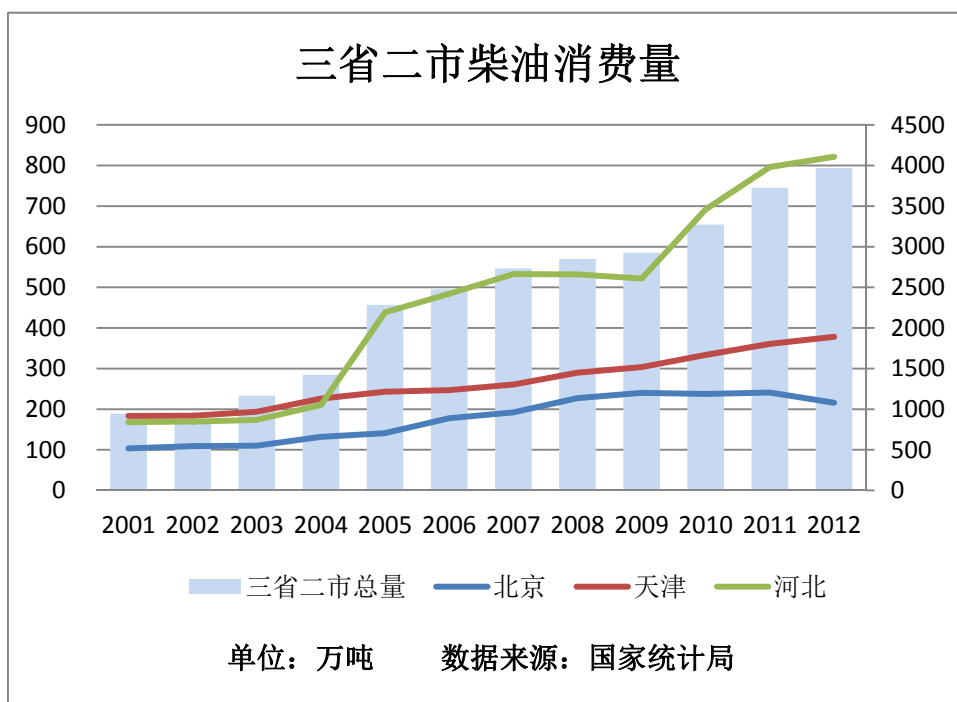


图 S4：2001-2012 京津冀鲁豫柴油消费趋势图。

数据网站：<http://data.stats.gov.cn/index>

从图 S4 中可见，从 2001 年开始到 2012 年，北京的柴油消费量约增加了一倍。同时其他省市的消费量都呈现增加趋势，其中天津和河北的增幅分别为 100% 和 390%，除北京之外的四省市消费总量增幅为 350%。此外，下表详细地给出了从 2009 和 2010 年到 2012 年的柴油消费量的增长比率。

表 S5：京津冀以及三省二市的柴油消费量的增长率

| | 北京 | 天津 | 河北 | 三省二市总量 |
|----------------|------|-----|-----|--------|
| 2009 年至 2012 年 | -10% | 25% | 57% | 36% |
| 2010 年至 2012 年 | -9% | 13% | 19% | 21% |

课题组成员简介



梁莹，北京大学光华管理学院博士研究生



邹韬，北京大学光华管理学院博士研究生



郭斌，北京大学光华管理学院博士研究生



李硕，北京大学光华管理学院博士研究生



张豪哲，Iowa State University 博士研究生



张澍一，北京大学光华管理学院博士研究生



黄辉，北京大学概率统计系，北京大学统计科学中心助理教授



陈松蹊，北京大学光华管理学院，北京大学统计科学中心讲席教授，课题负责人

致谢

感谢北京大学统计科学中心、北京大学光华管理学院的支持。感谢美国驻华使馆、网站 <http://weather.nocrew.org> 和 <http://aqicn.org/city/beijing> 提供数据。感谢中国环境科学研究院副院长柴发合教授和美国芝加哥大学商学院、北京大学荣誉教授刁锦寰先生给予的指导和帮助，感谢北京大学环境科学与工程学院朱彤教授、张远航教授、李颖若博士和刘俊同学在本项目研究过程中提出的建议，感谢北京大学王振中、郭心舟、王梅邴、杨光艺，南开大学黄家盛、梁德才等几位同学在数据采集与分析方面提供的协助。感谢北京大学统计科学中心涂云东老师、宋晓军老师的讨论和秘书张卫香、常珂琪、孟蕾的帮助。感谢梁建邦先生、庞立春女士、邸舒妍同学和姚佳妮同学在本报告撰写过程中提出的建议。

北京大学统计科学中心
<http://www.stat-center.pku.edu.cn>

北京大学光华管理学院
<http://www.gsm.pku.edu.cn>