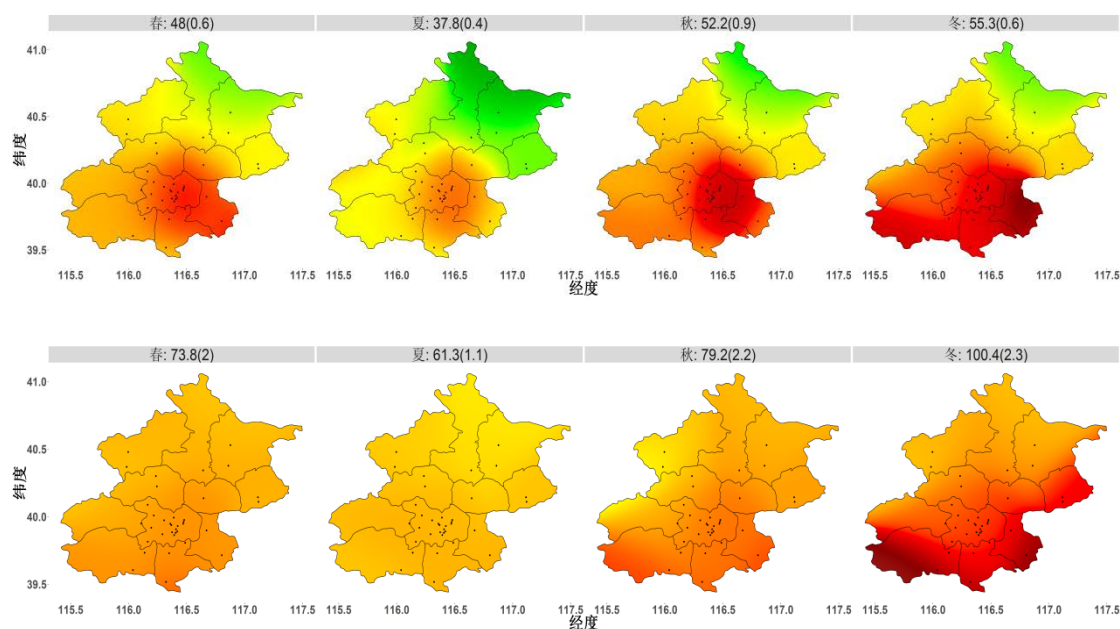


空气质量评估报告(三)

北京地区 2013-2016 年区域污染状况评估

为了蓝天

让我们用数据解读污染



北京大学统计科学中心
www.stat-center.pku.edu.cn

北京大学光华管理学院
www.gsm.pku.edu.cn

二零一七年三月

前言

随着我国经济的不断发展，环境问题也日益凸显。李克强总理在 2017 年两会政府工作报告中，把治霾提到了“蓝天保卫战”的高度。这场大气污染防治战役，需要直面的果敢和必胜的决心，更离不开扎扎实实的基础研究，这也是这几年我们的团队所努力的方向。我们对空气质量数据进行深入研究和分析，真实客观反映我们生活在怎样的天空下，同时也寄望能为我国制定有效的大气治理政策提供基础。

本研究团队在 2015 年 3 月和 2016 年 3 月分别发布了两份空气质量评估报告（详见 [1][2]）。第一份报告采用了北京单站点（美国大使馆）2010 年至 2014 年的 $PM_{2.5}$ 数据，总结分析了北京市五年间 $PM_{2.5}$ 的浓度变化趋势。第二份报告比较了中国五城市（北京、上海、广州、成都和沈阳）美国使领馆和相邻环保部站点 2013 年至 2015 年三年的 $PM_{2.5}$ 数据，对比研究了这两个数据源的数据质量和一致性，也分析了这些城市空气污染的状况和趋势。

本报告将集中研究分析北京市全部空气质量监测站点 2013 年至 2016 年四年间共超过一千万条的污染物浓度数据。同之前的两个报告相比，本报告所使用的监测站点的数量从原来的 4 个增加到 36 个，所研究的污染物从只有 $PM_{2.5}$ 增加到同时包括 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、二氧化硫、二氧化氮、一氧化碳和臭氧在内的六种常规污染物。

本报告的主要目标是：

1. 获得北京市过去四年六种污染物去除气象因素影响后的时间和空间分布特征。
2. 分析污染的变化趋势，用数据验证大气污染治理的效果，科学地回答近期空气质量是否有显著好转这一大众普遍关心的问题。
3. 量化冬季供暖、2014 年 APEC 会议和 2015 年大阅兵期间所采取的临时区域减排措施对北京空气质量的影响。
4. 为今后北京市大气污染治理方针政策的制定提供科学依据，对治理效果的评估提供统计诊断方法。

目录

| | |
|--|----|
| 前言 | 1 |
| 一、背景..... | 3 |
| 二、数据..... | 3 |
| 三、污染物浓度的时-空气象调整 | 4 |
| 四、PM _{2.5} 污染浓度评估..... | 5 |
| 五、同国控站、自然年的 PM _{2.5} 浓度比较 | 10 |
| 六、其它五种污染物浓度综合评估..... | 12 |
| 七、冬季供暖对六种污染物的影响..... | 36 |
| 八、APEC 对六种污染物的影响..... | 39 |
| 九、大阅兵对六种污染物的影响..... | 41 |
| 十、数据质量..... | 44 |
| 十一、能源分析..... | 47 |
| 十二、结论..... | 49 |
| 参考文献..... | 53 |
| 附录 | 54 |
| 致谢 | 60 |

版权说明：本报告版权属于北京大学统计科学中心和光华管理学院环境统计课题组，受法律保护。任何转载、摘编或使用本报告中的文字和图表，均应注明“来源于北京大学统计科学中心和光华管理学院环境统计课题组”。

一、背景

作为国家大气污染监测网的一部分，北京市从 2013 年 1 月开始实时发布 $PM_{2.5}$ 和另外五种污染物的浓度数值。北京市共有 36 个空气质量监测站点，其中 12 个为国控站，23 个为市控站点，1 个为美国驻华使馆站点。图 1 给出了站点的空间位置和所用的 15 个气象站点的地理位置。

我们将北京的 36 个空气质量监测站点划分为三个区域：中心区域、南部区域和北部区域。中心和南部区域位于北京的平原地区。中心区域含有 25 个站点，它包括六环路所环绕的区域并外加北六环外的昌平和顺义城区的两个站点。南部区域是指同河北交界的区域，它有 3 个检测站点。北部区域包括延庆、密云、平谷和怀柔，共有 8 个检测站点（详见附表 1）。

本报告关于北京市空气质量的讨论主要按以上所定义的中心、北部和南部三个区域进行。中心区域是北京市的主要人口（80%）居住区，也是全国的政治和经济中心。同河北接壤的南部区域的空气质量状况将提供与河北省之间污染物传输的信息。北部区域将作为背景对照区域与位于平原上的中心和南部区域进行比较。

二、数据

2013 年 1 月 1 日，环保部开始将 $PM_{2.5}$ 和另外五种污染物列入空气质量实时监测范围。但是由于 2013 年 1 月和 2 月的污染物数据在相当多的站点有较高比例的缺失，数据质量不高，所以我们的研究选择了从 2013 年 3 月开始到 2017 年 2 月截止共四年时间的数据。因此，本报告使用的年将不是自然年，而是类似于传统农历年的从一年的 3 月到次年的 2 月、包含一轮四个季节的“季节年”。我们的研究以季节为时间单元，其中春季是 3 月到 5 月，夏季是 6 月到 8 月，秋季是 9 到 11 月，冬季是 12 月到来年 2 月。以季节作为基本时间单元的优点是具有更好的时间稳定性和更大的数据量。这有别于我们之前的两个报告，它们均以月为基本单元。本研究报告所分析的污染数据包括六种常规污染物，即 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、二氧化硫（ SO_2 ）、二氧化氮（ NO_2 ）、一氧化碳（CO）和臭氧（ O_3 ）。

由于空气污染与气象条件密切相关，在本研究报告中我们采集了朝阳、海淀、丰台、昌平、石景山、通州、门头沟、房山、顺义、大兴、南郊观象台、延庆、怀柔、密云和平谷的 15 个气象站点的逐小时气象数据，包括风速、风向、温度、相对湿度、露点温度、气压和降水量，并将这些站点与相应的污染物监测站点进行了匹配（详见附表 1）。结合两者的数据进行空气质量的分析与评估。

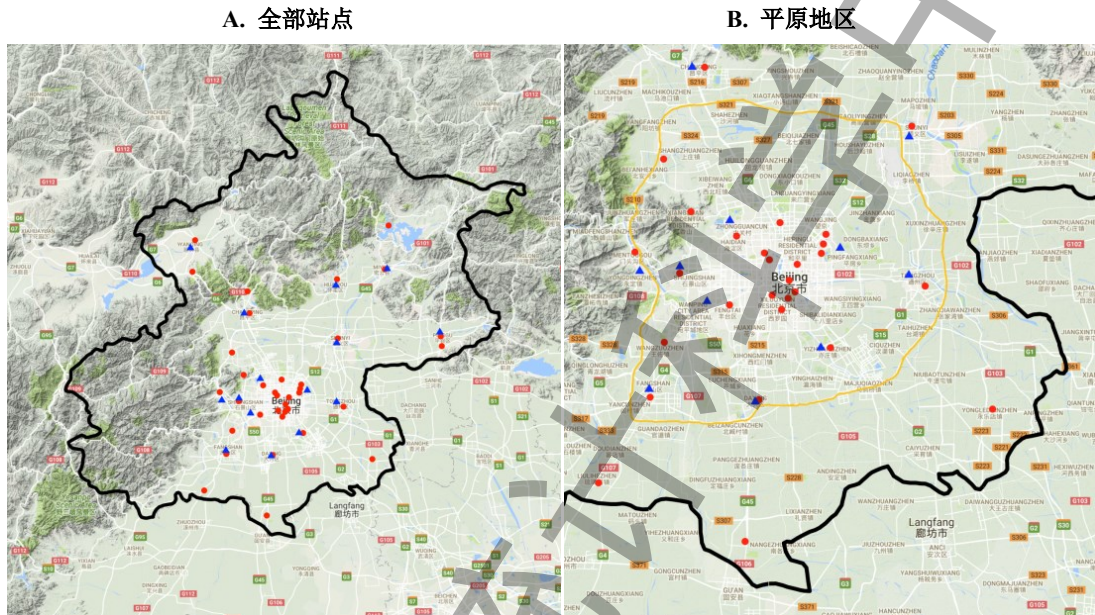


图 1：北京市全部站点（A）及平原地区站点（B）分布。红色圆点代表污染物监测站点，蓝色三角形代表气象站点，右图中橙色曲线代表六环路。

三、污染物浓度的时-空气象调整

我们观测到的污染物浓度主要受以下因素影响：(i) 污染物本地排放；(ii) 气象因素；(iii) 以上两者的交互作用[4]。其中 (iii) 包括气溶胶的二次生成。我们之前的研究[3]发现，北京市 $PM_{2.5}$ 浓度近 80% 的变异 (variation) 可以由气象条件的变化所解释。这也是人们往往将雾霾的产生归咎于气象条件的原因。北京市甚至要将空气污染列为自然灾害。然而导致大气污染的根本原因是污染物的过量排放。由于气象条件是不可控的，而且在不同年份有较大的变异，所以不同的气象条件在大气污染的可比性研究中是一个干扰因素。这就造成观测到的污染物浓度在不同年份的同一个季节差异很大，即使实际排放量是一样的。因此要客观和公平地评价污染物的排放是否减少或增加，就必须去除气象因素的影响。对污染物浓度的原始数据进行时间-空间维度上的气象调整是本报告所使用的关键技术。

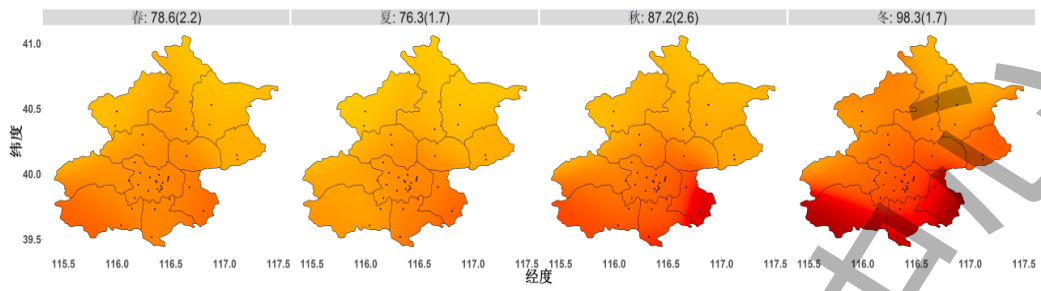
我们在 2015 年发布的《北京城区空气质量评估报告》[1]中提出了对气象因素进行时间维度调整的方法，这一方法使得经气象调整后的 $PM_{2.5}$ 浓度指标在不同年但同月或季节具有可比性。譬如今年春季的调整值与其它年份春季的调整值是可比的，因为它们是在历年春季的气象数据构造出的基准气象条件下计算得到的。在随后的《中国五城市空气质量评估报告》[2]中我们将此方法应用到了北京、上海、广州、沈阳和成都五城市的空气质量评估中。关于此方法的详细阐述，可以参见我们在英国《皇家学会会刊》和《地球物理研究》上发表的英文论文[3] [4]。

在本报告中，由于要利用北京 36 个站点的数据进行区域性空气质量评估，我们希望获得的经过气象调整的污染物浓度指标不仅在时间上可比，在空间上也可以比较。为此，我们提出了一个在时间和空间上对污染浓度进行气象调整的方法。这一方法的主要思路是：通过利用在北京平原地区上 11 个气象站点的逐小时数据，构造时间和空间上的基准气象分布，并以此分布为标准对不同站点不同季节的 $PM_{2.5}$ 均值浓度进行调整，具体方法将在[5]中给出。在第六节，我们将此方法进一步推广到其他五种污染物的时-空气象调整，并据此得出了北京市区域性多污染物空气污染状况的综合评估。由于北京平原地区的气象条件相比北部区域具有更强的相容性，我们的时-空气象调整方法先只针对北京平原地区的 28 个站点。北部山区的 8 个站点还是使用之前两个报告[1][2]的时间调整方法。

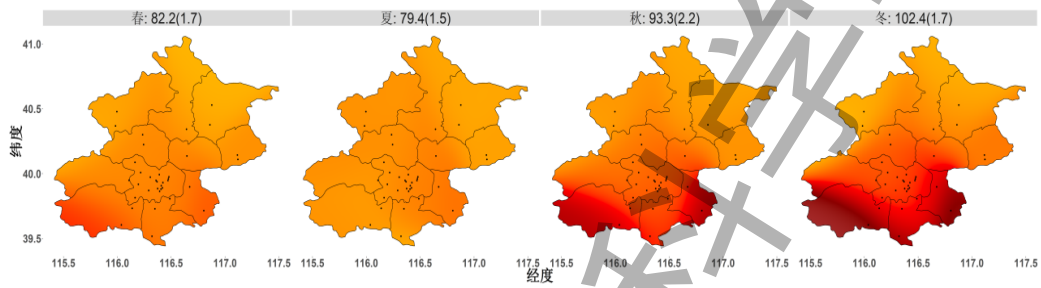
四、 $PM_{2.5}$ 污染浓度评估

图 2 给出了北京市 2013-2016 年 $PM_{2.5}$ 经过时-空气象调整后的以季节为单位的均值浓度的区域分布地图。该图的绘制有两个步骤。首先我们计算每个站点经过气象调整的均值浓度，之后在给定区域内进行空间核平滑 (spatial kernel smoothing)，从而得到图 2 所展示的北京市 $PM_{2.5}$ 均值浓度地图。图 2 中没有站点的地区（如房山和门头沟西部）的浓度是通过算法进行空间插值延拓而得到的。本文中所有关于三个区域的污染物浓度计算均是建立在 36 个站点的基础上对站点浓度进行算数平均而得到的，没有使用以上提到的空间插值算法。

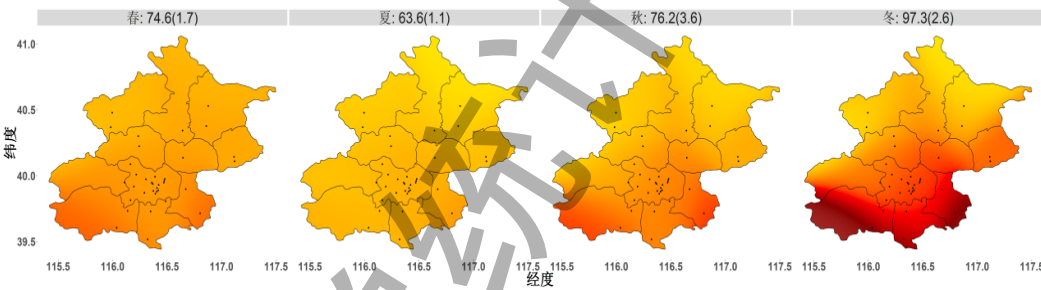
A. 2013年



B. 2014年



C. 2015年



D. 2016年

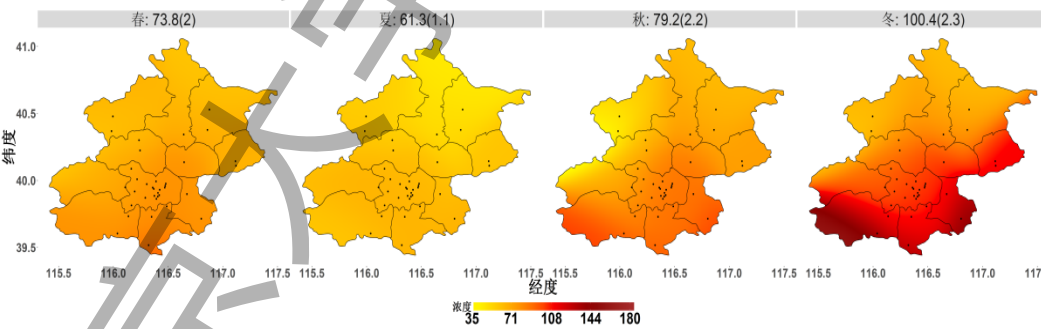


图 2: 北京市 PM_{2.5} 季均值浓度 (微克/立方米) 在不同年份的空间分布地图。图中数字代表平均浓度 (标准差)。

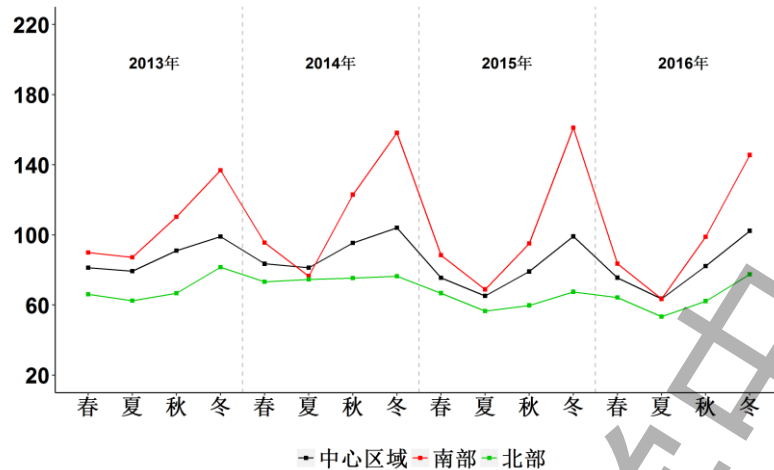


图 3：北京市三个区域 PM_{2.5} 浓度（微克/立方米）的季节平均值变化曲线。

图 3 和图 4 分别展示了 PM_{2.5} 不同区域季均值浓度的年度变化和季均值浓度的年度变化空间分布地图。通过图 2、3、4 对比某年某季某区域的 PM_{2.5} 污染与上一年的变化，我们得到以下主要结论：

- 北京的 PM_{2.5} 均值浓度有很强的季节性：冬季最严重，其次是秋季、春季，夏季最轻。中心区域在 2015 年和 2016 年的夏季浓度是冬季的三分之二左右，南部区域 2014 年至 2016 年夏季只有冬季的一半。在 2015 年和 2016 年夏季，北京的整个区域 PM_{2.5} 浓度接近 60 微克/立方米（分别为 63.6 和 61.3 微克/立方米）。60 微克/立方米是《大气十条》[6]为北京提出的在 2017 年应该达到的年均值目标。然而，北京近两年春秋冬三个季节的平均浓度仍远高于夏季。这说明北京要达到年均 60 微克/立方米的目標确实还要下大力气。
- 从年度变化的角度来看，不论是中心区域、北部区域还是南部区域，每个季节的 PM_{2.5} 浓度在 2015 年和 2016 年均比 2013 年和 2014 年低了很多。这四年中空气质量的显著改善发生在 2015 年。与 2014 年相比，中心城区的年均值浓度从 2014 年的 91.1 微克/立方米下降到 2015 年的 79.8 微克/立方米，降幅高达 12.4%，其中夏季下降 20%，秋季 17%，春季 10%，冬季 5%（但冬季在统计学意义下不显著）；南部区域的改善要少一些，2015 全年只比 2014 年下降 9%。
- 从区域差异的角度来看，南部区域比中心区域的 PM_{2.5} 污染严重许多。在夏季，中心区域和南部区域的差别非常小，但在秋冬两季，这一差距加大。在 2015 年，南部比中心区域的 PM_{2.5} 平均浓度高出 30%（23.6 微克/立方米），秋季的这一差异为 20%（16.0 微克/立方米）。

克/立方米)，冬季的差异最为悬殊，上升到 63%，差值高达 62.5 微克/立方米。

- 对于我们最关心的 2016 年的空气质量改善情况，图 4 的结果表明 2016 年比 2015 年没有显著改善。在这三个区域中，南部区域在 2016 年夏季和冬季比 2015 年同期分别有 5.4 微克/立方米和 15.6 微克/立方米的显著减少。对于中心和北部区域而言，2016 年秋冬两季比 2015 年同期均有增加，其中北部地区在冬季的增加最为显著。这导致中心和北部区域 2016 年全年浓度水平比 2015 年没有改善。具体来说，中心区域 2016 年全年均值浓度为 80.9 微克/立方米，比 2015 年的 79.8 微克/立方米增加了 1.4%，其中春夏两季持平，但秋冬两季分别增加了 3.9%和 3.1%。这说明 2016 年的 PM_{2.5} 浓度与 2015 年相比实际有所回升。

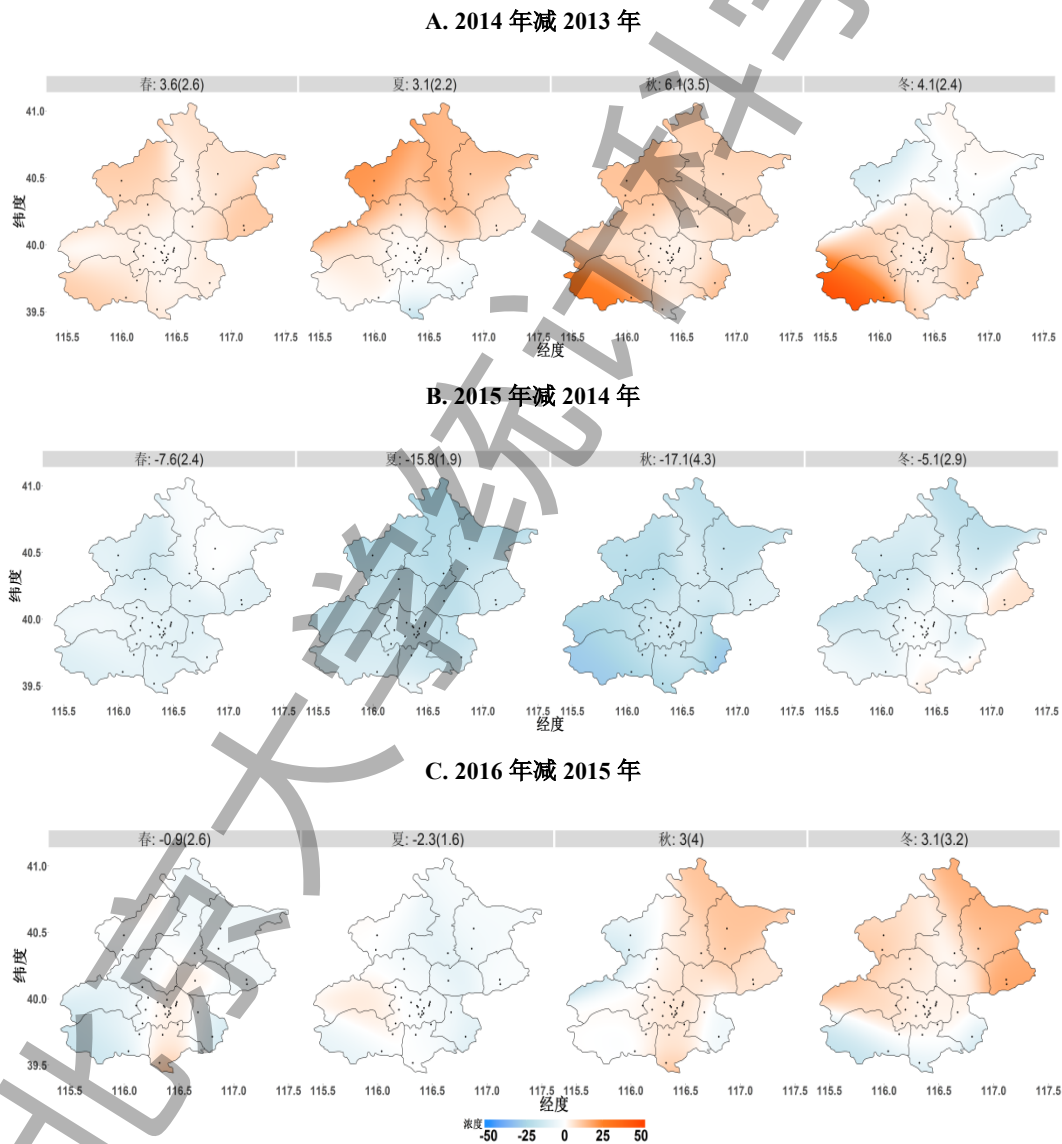
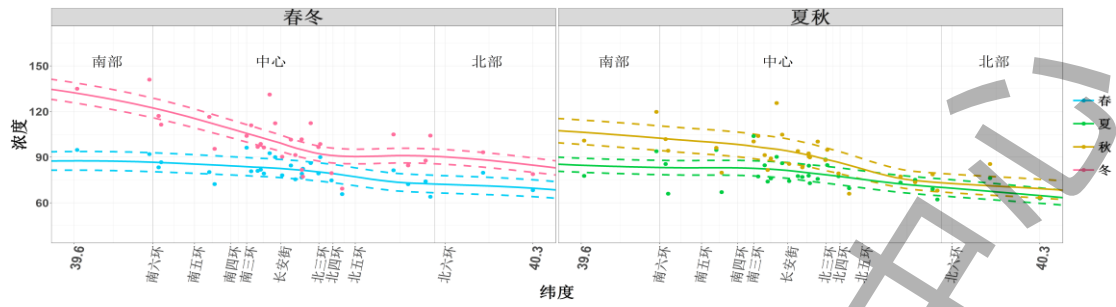
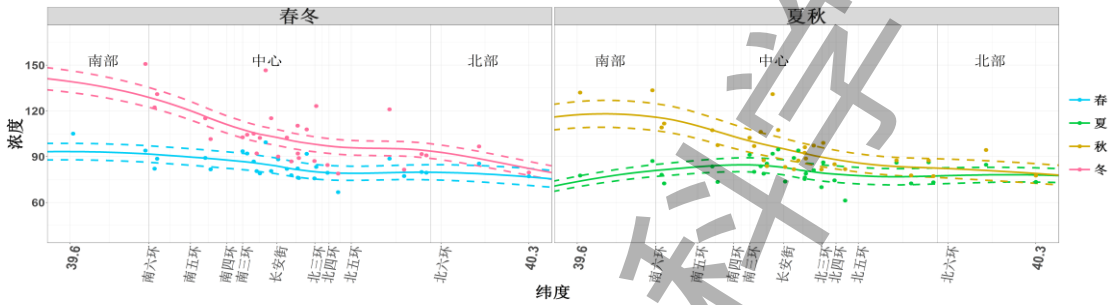


图 4：北京市 PM_{2.5} 季均值浓度（微克/立方米）的年度变化及区域分布地图。图中数字代表浓度差值的平均值（标准差）。红色代表增加，蓝色代表减少。

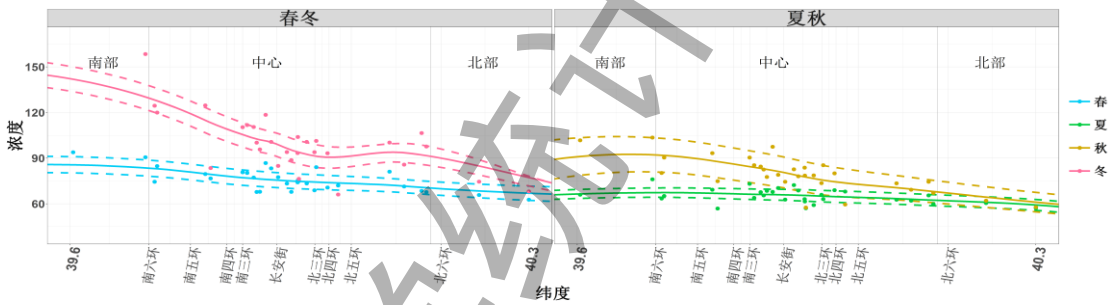
A. 2013 年



B. 2014 年



C. 2015 年



D. 2016 年

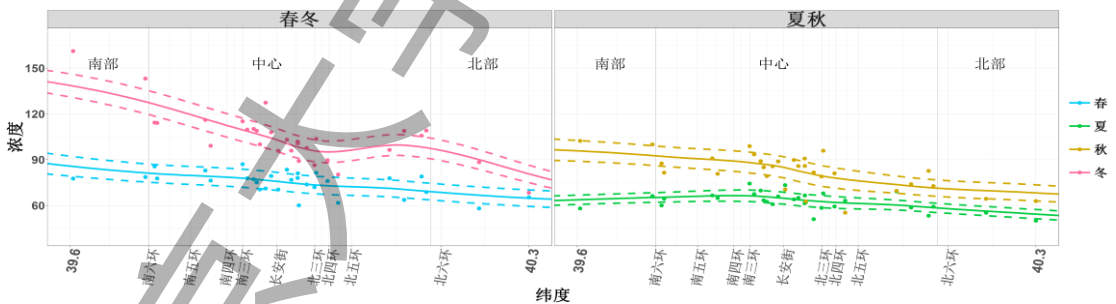


图 5: 北京市 PM_{2.5} 季均值浓度 (微克/立方米) 沿纬度 (南北方向) 的变化曲线图。实线为调整季均值浓度, 虚线为 95% 置信区间, 点表示 36 个站点的调整季均值浓度。

为了展示 PM_{2.5} 浓度在区域上的不同分布, 图 5 给出了基于 36 个站点的沿纬度 (南北方向) 的 PM_{2.5} 季调整均值浓度的平滑曲线。它清楚地展现出 PM_{2.5} 浓度南高北低的区域差异特征。这一区域差异在春夏两季并不大, 其中夏季差异最小。但在污染严重的秋冬两季南

高北低的表现是非常明显的。在冬季，市中心（长安街附近）的 $PM_{2.5}$ 在 100 微克/立方米左右，而南部已在 150 微克/立方米上下；从长安街往北，浓度基本呈下降趋势；北部比中心区域低大约 18%到 32%。这一空间分布特征反映了南部的污染物排放高和污染物从南边传输的路径，也表明秋冬两季南部区域的环保减排还需加强。

五、同国控站、自然年的 $PM_{2.5}$ 浓度比较

如第二节所述，本报告使用的“年”是涵盖一个完整四季的“季节年”（从每年 3 月到次年 2 月），有别于自然年，更接近传统的农历年。这样做主要是考虑到一个季节具有一个稳定的气象特征，以季节为单元更有利于我们的气象调整方法。

各级环保部门的空气质量统计是以自然年为口径，并且是基于国控站点的。国控站是地方环保部门必须向环保部监测总站实时提交污染数值的空气质量监测站点。北京市有 12 个，其中有 11 个（除定陵以外）记入北京市的空气质量评估统计中。北京市根据 11 个国控站点原始浓度计算得到的 2016 自然年度的 $PM_{2.5}$ 比 2015 年下降了 9.9%。而我们上一节给出的基于“季节年”的计算发现，2016 年比 2015 年经过气象调整后的 $PM_{2.5}$ 浓度没有改善，其中在中心区域增加了 1.4%（中心区域有 25 个站点，其中 10 个是国控站）。

为了理清由于时间口径和站点选取的不同所造成的结果差异，表 1 给出了使用 11 个国控站点的自然年和“季节年”的原始 $PM_{2.5}$ 均值浓度和经过气象调整后的季节均值浓度。同时，表 1 还给出了各年相比上一年均值浓度变化的百分比。图 6 给出了中心区域过去 16 个季节的原始和调整后的均值浓度，及其相应的 11 个国控站点的平均浓度。

表 1 中关于原始值的结果说明，对于 11 个国控站，若按照自然年来看，2016 年相比 2015 年 $PM_{2.5}$ 原始浓度下降了 10.3%。这与北京市环保局公布的 9.9%的结果基本一致（我们的数据经过了多源匹配和异常值处理）。但若按照“季节年”来看，2016 年则比 2015 年 $PM_{2.5}$ 浓度增加了 6.7%。究其原因，一方面是由于 2016 年 1 月和 2 月的浓度非常的低（见图 6），拉低了 2016 自然年的数值。但按照“季节年”计算，这两个月属于 2015 年的冬季，而不计入在 2016 年之内。另一个方面，2017 年 1 月和 2 月（含在 2016 年冬季） $PM_{2.5}$ 浓度

的强力反弹（如图 6 所示）导致 2016 “季节年”的原始浓度增加。这也说明北京 2016 年的空气质量改善是非常脆弱的，因为一个简单的时间上两个月的平移，会得到完全不同的结果。

表 1：北京市 11 个国控站和中心区域 PM_{2.5} 自然年和季节年的 PM_{2.5} 原始年均值浓度（微克/立方米）和气象调整后的年均值浓度（微克/立方米）及其年度变化。

| 区域 | 计算方式 | 统计口径 | 均值浓度 | | | | 变化百分比 | | |
|-------------|------|------|--------|--------|--------|--------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | | 2013 年 | 2014 年 | 2015 年 | 2016 年 | 2014 年减 2013 年 | 2015 年减 2014 年 | 2016 年减 2015 年 |
| 11 个 国控站 | 原始值 | 自然年 | 81.3 | 87.1 | 80.9 | 72.6 | 7.1% | -7.1% | -10.3% |
| | | 季节年 | 88.2 | 82.3 | 74.4 | 79.4 | -6.7% | -9.6% | 6.7% |
| | 调整值 | 季节年 | 82.7 | 85.1 | 75.5 | 77.2 | 2.9% | -11.3% | 2.3% |
| 中心 区域 | 原始值 | 自然年 | 86.5 | 93.5 | 84.9 | 76.4 | 8.1% | -9.2% | -10.0% |
| | | 季节年 | 94.2 | 89.1 | 78.0 | 83.1 | -5.4% | -12.5% | 6.5% |
| | 调整值 | 季节年 | 87.7 | 91.1 | 79.8 | 80.9 | 3.9% | -12.4% | 1.4% |

如果我们看表 1 中气象调整后的浓度，我们发现利用 11 个国控站数据计算的 2016 季节年均浓度比 2015 年提高了 2.3%，与此同时中心区域（基于 25 个站点）提高了 1.4%，二者还是很接近的。我们也发现气象调整和非气象调整的差别很大。具体来说，2016 季节年原始浓度与 2015 年相比，在国控站增加了 6.7%，在中心区域增加了 6.5%；但经过气象调整后，以上增加比例分别变成 2.3%和 1.4%。气象调整大大调低了 2016 年的增加比例，这是因为它是在基准气象条件下计算得到的，在数值上更加平稳。气象调整减轻了极端气象条件的影响，这也是使用气象调整计算污染浓度的优势所在。

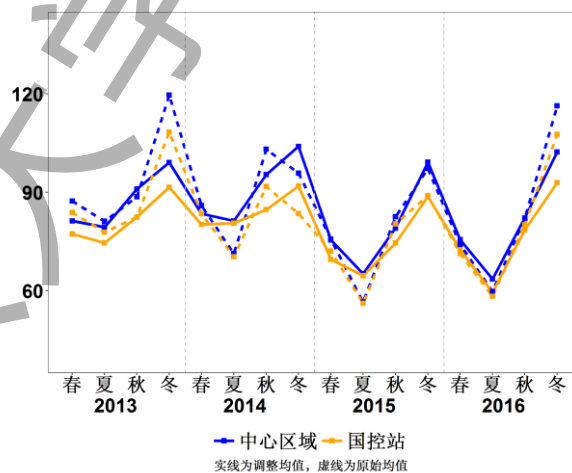


图 6：北京市 PM_{2.5} 浓度（微克/立方米）季节调整均值和原始均值随时间变化的对比图。图中实线表示调整均值，虚线表示原始均值。蓝色代表中心区域（25 个站点），橘黄色代表 11 个国控站点。

从图 6 中我们发现 11 个国控站点的原始均值明显小于中心区域站点的平均浓度，这是由于国控站点全部设南二环所处纬度以北，而北京的 PM_{2.5} 浓度又是南高北低（如图 5 所示）。在第十节中我们将给出关于站点布局的讨论。

六、其它五种污染物浓度综合评估

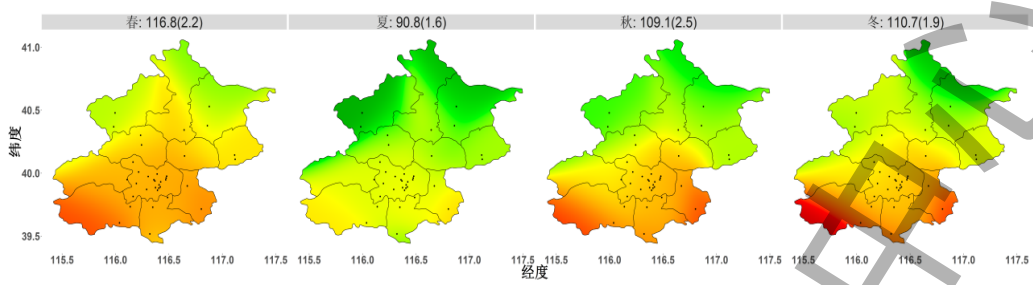
PM_{2.5} 只是衡量空气污染的一个指标，中国的大气质量常规监测还包含另外五种污染物：PM₁₀、二氧化硫、二氧化氮、一氧化碳和臭氧。五种污染物除可吸入颗粒物 PM₁₀ 外，其余四种皆为气体。由于大气污染是一个复杂的过程，研究这五种污染物的动态变化趋势能从不同侧面描述大气污染的状况，为理解与治理北京地区的大气污染提供一个更加全面的视角。

在本节，我们将研究 PM_{2.5} 的时-空气象调整方法用于计算 PM₁₀、二氧化硫、二氧化氮、一氧化碳和臭氧这五种常规污染物的季节平均浓度。通过计算不同区域、不同年份的季调整均值浓度和年调整均值浓度，刻画北京这五种污染物的年度变化规律和区域差异情况。下面，我们将依次给出这五种污染物的统计分析结果。

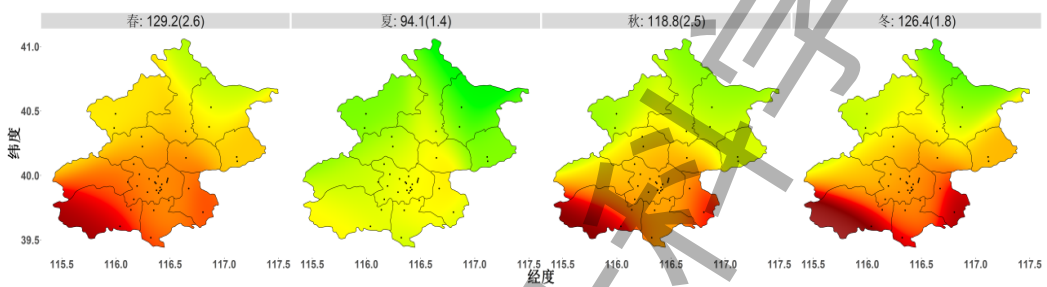
（一）PM₁₀

PM₁₀ 是指悬浮在空气中空气动力学当量直径小于或等于 10 微米的颗粒物，又称可吸入颗粒物，它包含 PM_{2.5}。在 2013 年之前，PM₁₀ 是我国使用的主要空气质量指标，用于计算城市的蓝天天数，也是当时官员考核的指标。2013 年 PM₁₀ 被 PM_{2.5} 取代。2013 年后的 PM₁₀ 数据中有相当的缺失，如附表 2 所示，有至少 25 个污染监测站点的缺失比例在 30% 以上。导致缺失比例较高的原因有两个。一个原因是它不再是官员的考核指标，数据采集上的重视程度势必低于 PM_{2.5}；另一个原因是 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 数值会发生倒挂现象。因为 PM_{2.5} 是 PM₁₀ 的重要组成部分，PM₁₀ 的浓度在理论上应该大于等于 PM_{2.5}。但是观测数据中会出现 PM₁₀ 小于 PM_{2.5} 的数值倒挂现象，这在一些公布的数据源中被显示为缺失。一种处理数据倒挂的方法是用 PM_{2.5} 的观测浓度对 PM₁₀ 的缺失进行替代。这样做仍然会低估 PM₁₀ 的浓度，但比将倒挂数据视为缺失的计算误差要小。本报告将使用这一种方法。

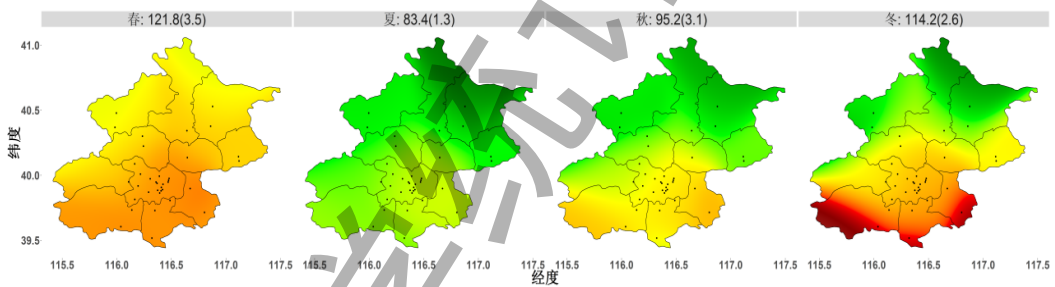
A. 2013 年



B. 2014 年



C. 2015 年



D. 2016 年

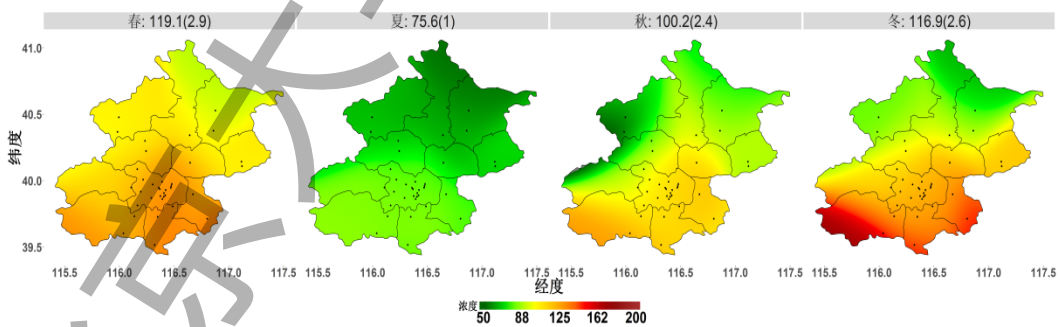


图 7: 北京市 PM_{10} 季均值浓度 (微克/立方米) 在不同年份的空间分布地图。数字代表平均浓度 (标准差)。

我国目前 PM_{10} 年平均浓度的标准为: 一级 40 微克/立方米, 二级 70 微克/立方米; 24 小时平均浓度的标准为: 一级 50 微克/立方米, 二级 150 微克/立方米。美国环保署的关于

PM₁₀ 的标准只是基于 24 小时平均浓度，一级和二级标准均为 150 微克/立方米，但其明确规定 3 年平均每年不达标的次数不能超过一次。这实际上是非常严格的标准。

上一页的图 7 给出了北京市四年间 PM₁₀ 的季均值浓度的空间分布地图。

通过汇总三个区域内各站点的气象调整后的 PM₁₀ 均值浓度，我们得到了图 8，其展示了三个区域的季均值浓度的变化趋势。

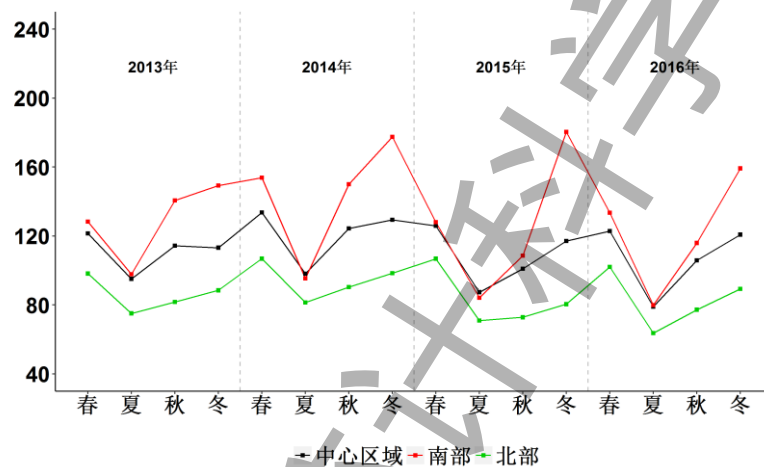


图 8：北京市三个区域 PM₁₀ 浓度（微克/立方米）的季节平均值变化曲线。

图 7 和图 8 揭示了北京市可吸入颗粒物 PM₁₀ 污染的如下主要特征：

- 从季节差异的角度看，在中心和北部区域，PM₁₀ 在春季最高，其次才是冬、秋两季，夏季最低。这不同于 PM_{2.5}（冬季最高）。春季 PM₁₀ 高主要受沙尘的影响，冬季高是由于供暖排放。在南部区域，PM₁₀ 是冬季最高，春、秋随后，夏季最低。这一结果反映了污染输入和冬季燃煤的影响。南部不同季节间的浓度变化也高于中心和北部区域。
- 从区域差异的角度看，中心区域在每个季节都比北部区域高 17% 以上。南部的均值浓度又普遍高于中心区域。这突出表现在冬季，特别是在 2015 年冬季，南部高出中心区域 54%（63.2 微克/立方米）。这点同 PM_{2.5} 相似。

上述的 PM₁₀ 的特征同 PM_{2.5} 有诸多相似之处，这是由于 PM₁₀ 中包含 PM_{2.5}，因而 PM₁₀ 的季节和空间分布状况有相当多是由 PM_{2.5} 所驱动的。为了进一步探究北京市 PM₁₀ 成分中

PM_{2.5} 所占比例随季节和年份的变化，我们在表 2 中列出了 PM_{2.5} 在 PM₁₀ 中所占浓度的百分比，即用 PM_{2.5} 浓度除以相应季节的 PM₁₀ 浓度而得到。

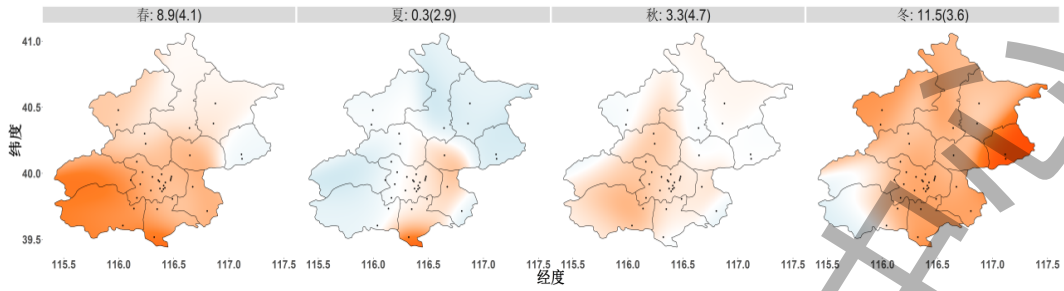
我们发现 PM_{2.5} 占 PM₁₀ 的百分比在春季最小，但也在 60%至 70%之间。秋季在 75%至 85%之间，夏冬一般在 80%到 92%之间。春季 PM_{2.5} 占比低是由于春季沙尘导致当量直径大的颗粒物多的缘故。令人惊讶的是，在污染最严重的冬季和最轻的夏季，PM_{2.5} 的占比一般都在 80%之上。这意味着北京 PM₁₀ 的污染问题主要是由细颗粒物 PM_{2.5} 造成的。

表 2：北京市不同季节及年度 PM_{2.5} 浓度占 PM₁₀ 浓度的百分比 (%)

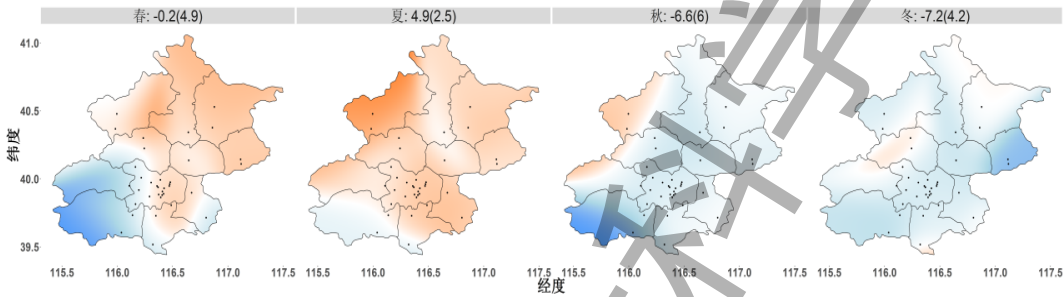
| 区域 | 季节 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 |
|------|-----|------|------|------|------|
| 中心区域 | 春 | 66.9 | 62.5 | 59.9 | 61.5 |
| | 夏 | 83.4 | 82.8 | 74.6 | 80.5 |
| | 秋 | 79.6 | 76.7 | 78.3 | 77.7 |
| | 冬 | 87.5 | 80.4 | 84.7 | 84.7 |
| | 年平均 | 78.9 | 75.0 | 74.0 | 75.5 |
| 北部 | 春 | 67.3 | 68.6 | 62.5 | 63.0 |
| | 夏 | 83.2 | 91.6 | 79.7 | 84.0 |
| | 秋 | 81.5 | 83.4 | 82.0 | 80.7 |
| | 冬 | 92.2 | 77.7 | 84.0 | 86.8 |
| | 年平均 | 80.6 | 79.4 | 75.7 | 77.5 |
| 南部 | 春 | 70.1 | 62.2 | 69.1 | 62.7 |
| | 夏 | 89.3 | 80.2 | 81.8 | 79.4 |
| | 秋 | 78.4 | 81.9 | 87.6 | 85.3 |
| | 冬 | 91.7 | 89.1 | 89.4 | 91.5 |
| | 年平均 | 82.2 | 78.6 | 82.5 | 80.2 |

PM₁₀ 中不同于 PM_{2.5} 的部分是空气动力学当量直径介于 2.5 微米到 10 微米之间的颗粒物，我们称之为 PM_{10-2.5}。这部分颗粒物主要是由沙尘、道路扬尘和一次性排放所产生的。这部分颗粒物也会对人体健康造成损害，尽管它们的危害要小于 PM_{2.5}。而且它们在一定条件下可以进一步分解为 PM_{2.5}。在北京 PM_{2.5} 的下降空间趋小的情况下，减少这部分颗粒物的浓度将会直接和间接地促成 PM_{2.5} 浓度的下降。

A. 2014 年减 2013 年



B. 2015 年减 2014 年



C. 2016 年减 2015 年

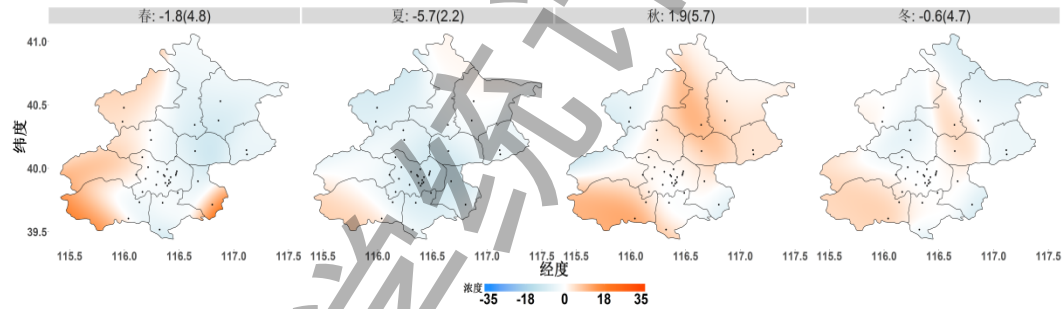


图 9: 北京市 PM_{10-2.5} 季均值浓度 (微克/立方米) 的年度变化及区域分布地图。

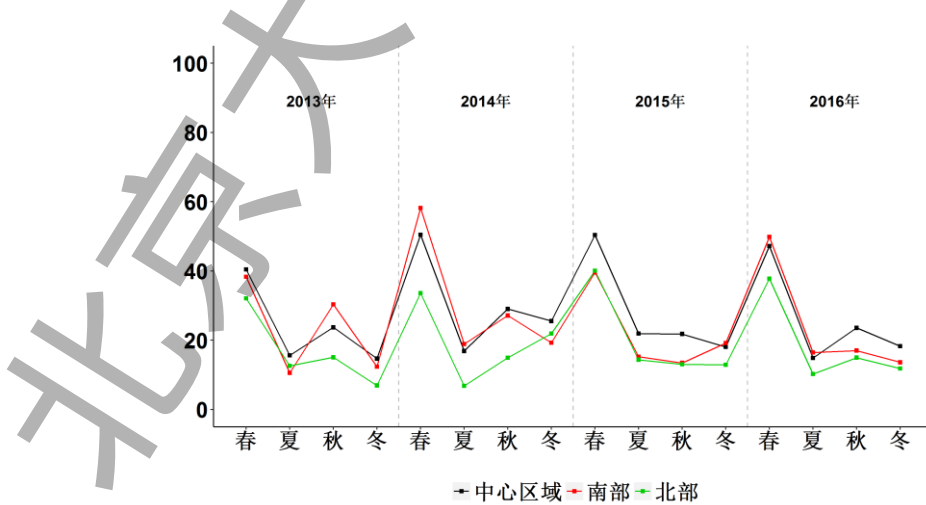


图 10: 北京市三个区域 PM_{10-2.5} 浓度 (微克/立方米) 的季节平均值变化曲线。

为了量化 $PM_{10-2.5}$ 的变化情况，我们用 PM_{10} 的浓度减去 $PM_{2.5}$ 的浓度，得到 $PM_{10-2.5}$ 浓度的季节平均值。图 9 和图 10 分别给出了 $PM_{10-2.5}$ 季均值浓度的年度变化空间分布地图和时间序列图。由此我们归纳出关于北京 $PM_{10-2.5}$ 的如下主要特征：

- 三个区域都是春季最高，秋季次之，夏冬最低，其中夏冬两季浓度很接近。中心区域和南部的 $PM_{10-2.5}$ 浓度大体相同，均高于北部区域。这有悖于一般认为的北部区域直径大一些的颗粒物会更多的主观猜想。
- 从年度变化的角度来看，不论是中心区域还是南部区域，2013 年 $PM_{10-2.5}$ 的浓度在四年中较低，2014 年的浓度比 2013 年有显著增加；**2015 年普遍低于 2014 年，2016 年的秋冬两季比 2015 年有所增加。**
- 总体来讲， $PM_{10-2.5}$ 的浓度在过去几年没有改进。北京市在减少沙尘、道路扬尘方面还有很大的改进空间。

（二）二氧化硫

二氧化硫 (SO_2) 是一个影响人体健康并参与大气氧化还原反应、生成气溶胶的大气污染物。它有刺鼻味道，会直接导致酸雨的形成，是 $PM_{2.5}$ 主要成分中硫酸盐的一种重要前体物。含硫化石燃料的燃烧，尤其是含硫量高的煤、汽油和柴油（中国的煤和石油普遍含硫量高）的使用，是大气中二氧化硫的主要来源。京津冀每年要消耗近 3 亿吨煤，相邻的晋鲁豫每年消耗 10 亿吨，占全国总量的三分之一。这无疑是二氧化硫的最大排放源。在“十一五”规划（2006-2010 年）期间国家已经开始实施了二氧化硫的总量减排措施。2013 年 9 月，国务院发布的《大气污染防治行动计划》（又称《大气十条》）明确提出“加快推进集中供热、‘煤改气’、‘煤改电’工程建设和“加快重点行业脱硫、脱硝、除尘改造工程建设”。北京市从 2013 年开始大力推行“煤改气”，市中心区发电和冬季供暖自 2015 年已经完全改用天然气。这些均是降低大气中二氧化硫浓度的重要举措。

中国二氧化硫年平均浓度的标准限值为：一级 20 微克/立方米，二级 60 微克/立方米；24 小时平均浓度的标准限值为：一级 50 微克/立方米，二级 150 微克/立方米；1 小时平均浓度的标准限值为：一级 150 微克/立方米，二级 500 微克/立方米。美国环保署关于二氧化硫浓度的限值标准为：一级标准 1 小时平均浓度 75ppb（约为 196.5 微克/立方米），其标准实施形式为三年间此小时浓度的 99%分位数的平均值不能超过浓度标准限值，二级

标准是 3 小时平均浓度 500ppm（约为 1310 微克/立方米），每年超过此限值的次数不能多
于一次。

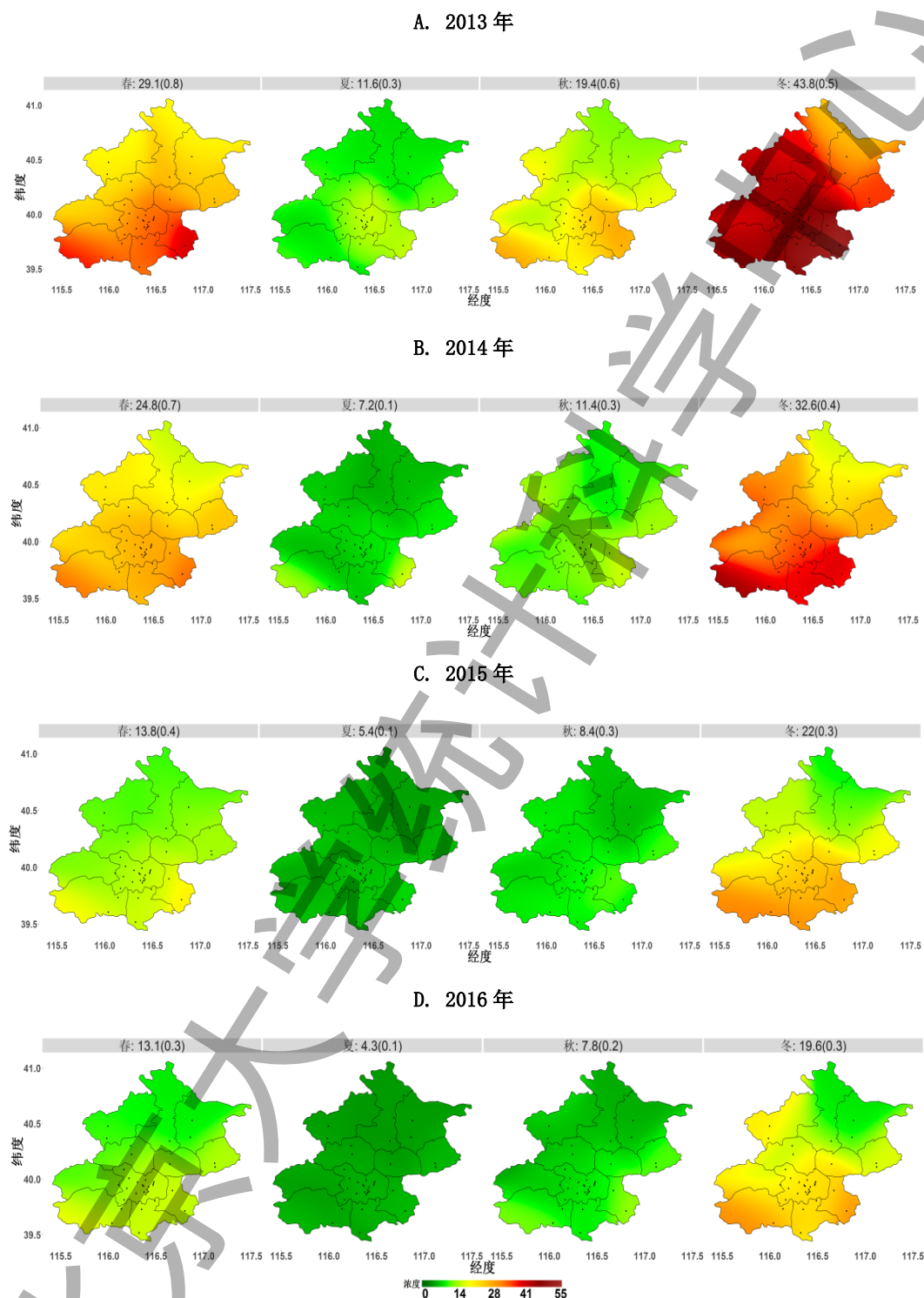


图 11: 北京市二氧化硫 (SO₂) 季均值浓度 (微克/立方米) 在不同年份的空间分布地
图。图中数字代表平均浓度 (标准差)。

图 11 给出了北京不同区域的二氧化硫季均值浓度地图。它显示自 2014 年起每个季节的颜色都随着时间逐渐向好。这表明，从 2014 年开始，北京的二氧化硫浓度在四个季节均逐年显著减少。图 12 给出的三个区域季节浓度的时间序列和图 13 给出的年度变化空间分布也验证了这一点。

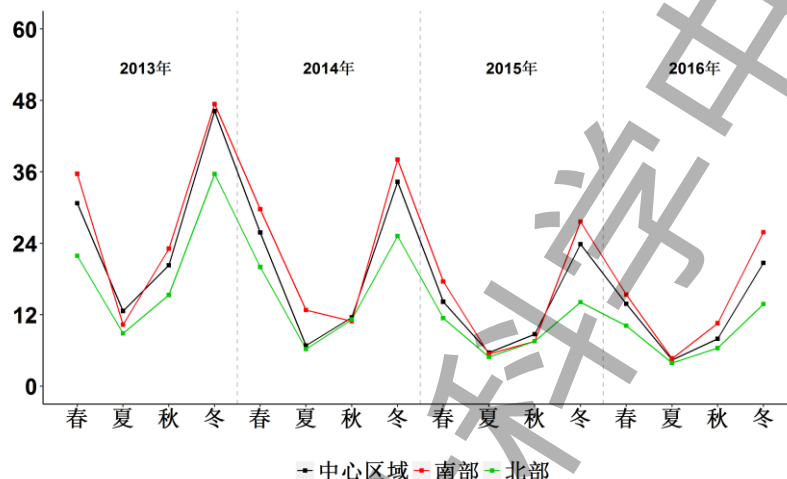


图 12: 北京市三个区域二氧化硫 (SO₂) 浓度 (微克/立方米) 的季节平均值变化曲线。

图 12、13 表明，在 2014 年，除南部区域夏季之外，三个区域二氧化硫的减少幅度在 2014 年夏秋两季都高于 25%，中心区域的夏秋两季和南部区域的秋季降幅更是在 50% 左右；三个区域冬季降幅均不低于 20%。在此基础上，三个区域 2015 年全年又有不低于 30% 的减少。这说明北京市自 2013 年开始的“煤改气”措施的实施对二氧化硫的减排效果是非常显著的。

自 2015 年以来，北京夏秋两季三个区域的二氧化硫浓度都已经进入个位数时代，这是可喜的成绩。目前世界上发达国家主要城市二氧化硫的浓度在四季均为个位数。春冬两季是北京二氧化硫高的季节，这主要是受冬季供暖的影响。图 11 和图 12 也显示，南部区域普遍高于中心区域和北部区域，这其中本地排放的原因，也有从河北输入的影响。后者的原因是根据河北的二氧化硫浓度普遍高于北京的现状而推断出的（详见我们将发布的《京津冀空气质量评估报告》[7]）。

我们也发现，2016 年与 2015 年相比，二氧化硫浓度的下降趋缓，这可能是由于整个京津冀区域二氧化硫和 PM_{2.5} 在 2016 年减少都不多的缘故（详见[7]）。另外，河北省的煤炭消

耗量在 2016 年秋冬季的反弹上涨也是主要原因。我们认为，北京市下一步的“煤改气”、“煤改电”措施应重点针对边缘地区的冬季供暖，因为现阶段冬季的二氧化硫平均浓度在 19.6 微克/立方米左右，仍有相当大的下降空间。

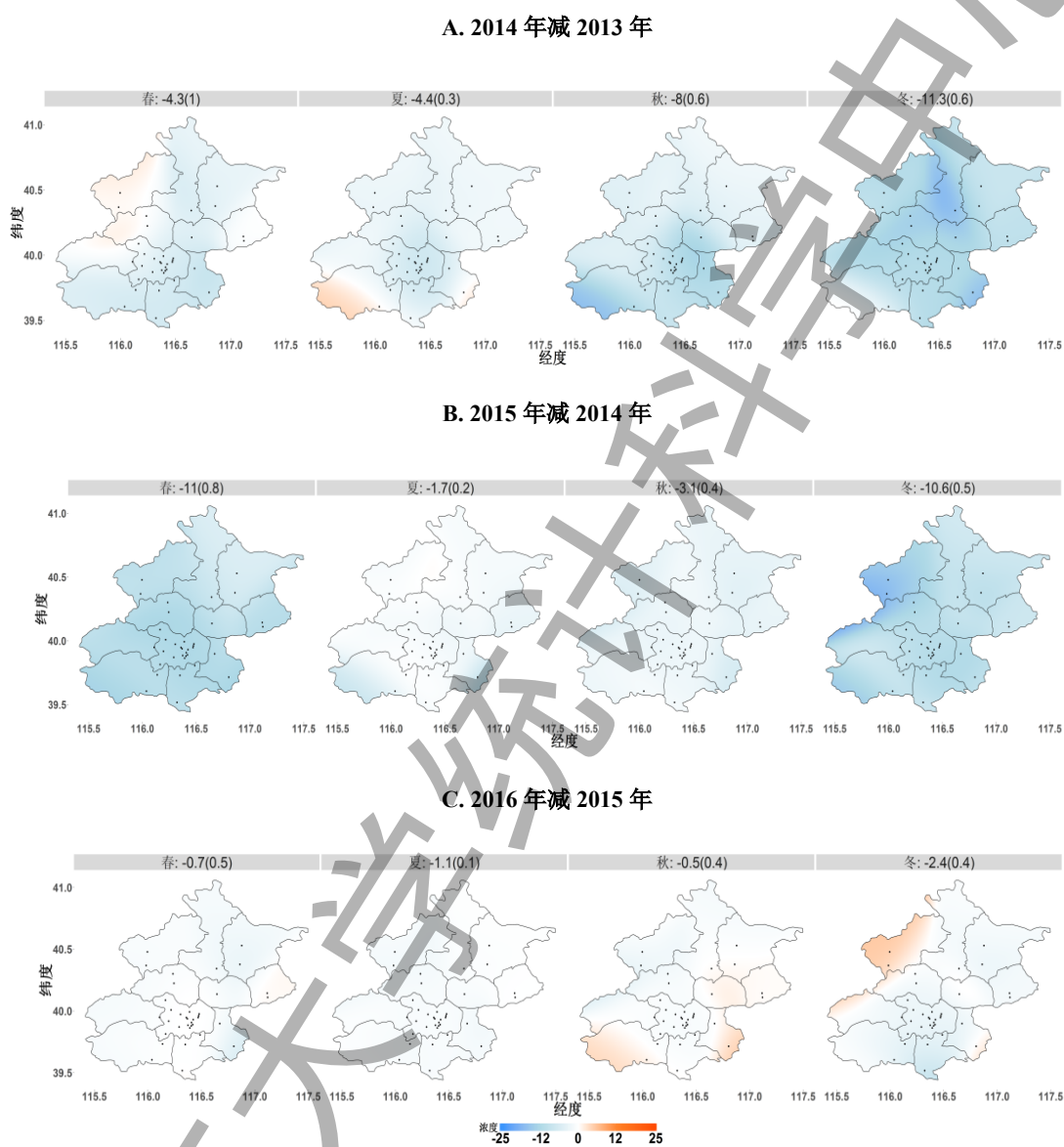


图 13：北京市二氧化硫（SO₂）季均值浓度（微克/立方米）的年度变化及区域分布地图。

图中数字代表浓度差值的平均值（标准差）。红色代表增加，蓝色代表减少。

（三）二氧化氮

二氧化氮（NO₂）作为氮氧化物（NO_x）的一个组成部分，直接参与大气中的氧化还原反应，是 PM_{2.5} 和臭氧的主要成因物质之一。氮氧化物是硝酸盐的前体物，也是形成硫酸盐的氧化剂和形成气溶胶的关键前体物。二氧化氮主要来源于汽车尾气排放。燃煤、炼钢铁、炼焦炭及夏秋季节农村的秸秆燃烧也会生成二氧化氮。中国从“十二五”规划（2011-2015 年）期间开始对氮氧化物实施总量控制，这比对二氧化硫的总量控制晚五年。研究[8]表明机动车不只产生氮氧化物和颗粒物，还产生一氧化碳和挥发性有机（VOC），这几种污染物都是二次生成 PM_{2.5} 的主要推手。

中国目前关于二氧化氮的一级和二级标准都是年平均浓度不高于 40 微克/立方米。美国环境保护署的一级和二级标准限值为年平均浓度 53ppb（约为 100 微克/立方米）。中国的标准是高于美国标准的。

图 14 给出了北京市二氧化氮季度平均浓度的空间分布地图。图中我们可以清楚地看到二氧化氮的分布在四个季节均有一个椭圆型（东西短、南北长）的高浓度区域（峰域），并向外围逐渐减弱。这个峰域以东城、朝阳为中心，向西城、通州西部、大兴北部、昌平和顺义南部渐次减弱。这一椭圆型的峰域在一年四季均很明显，但以夏季最为清晰。这很不同于 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的空间分布。这再次反映了机动车的尾气排放对二氧化氮浓度的影响，因为以上的高浓度区域皆是北京市交通最拥堵的地段。

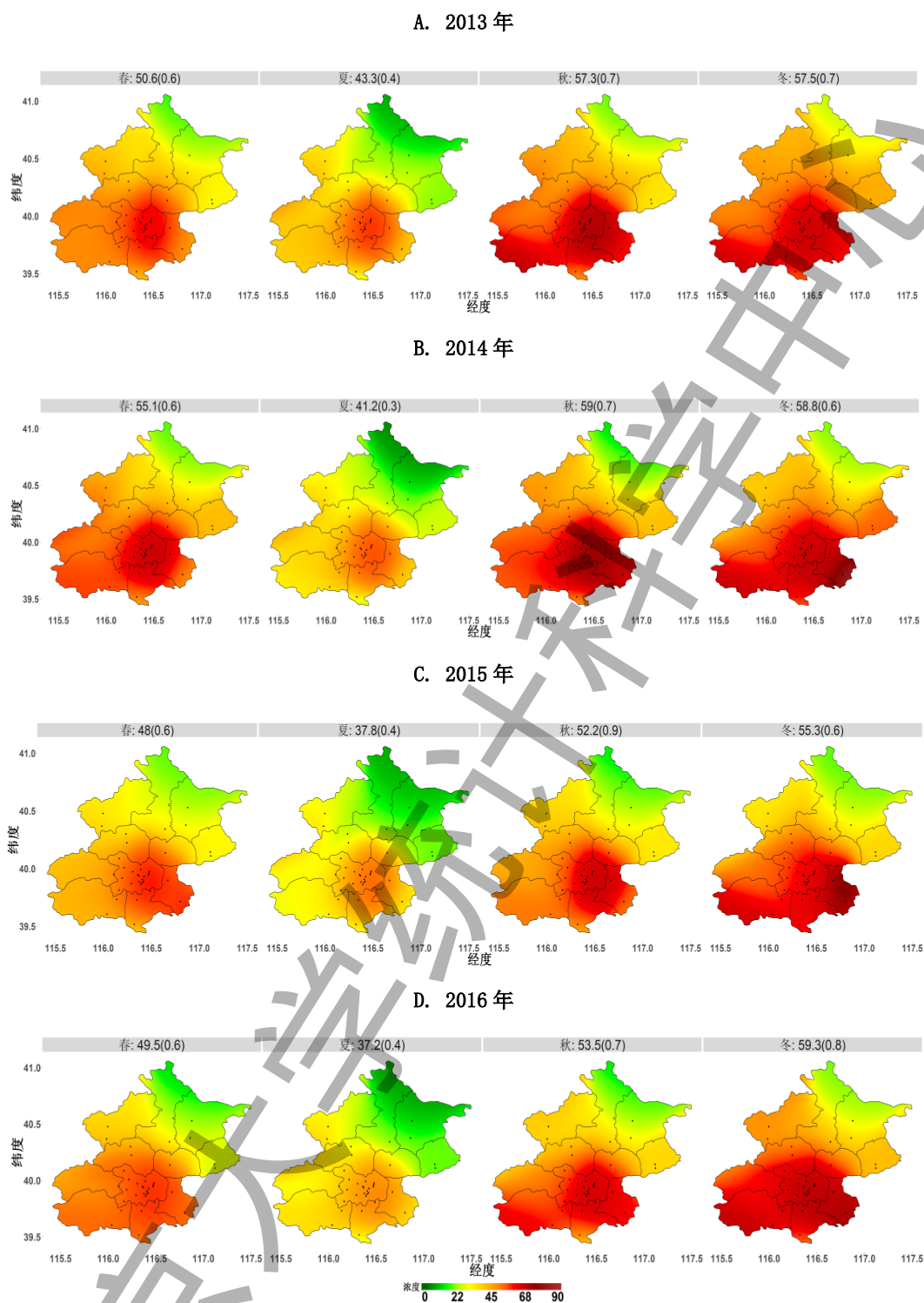


图 14: 北京市二氧化氮 (NO_2) 季均值浓度 (微克/立方米) 在不同年份的空间分布地图。图中数字代表各季节平均浓度 (标准差)。

图 15 中给出了三个区域近四年的二氧化氮季均值浓度的时间序列。图 16 展示了二氧化氮季均值浓度的年度变化。

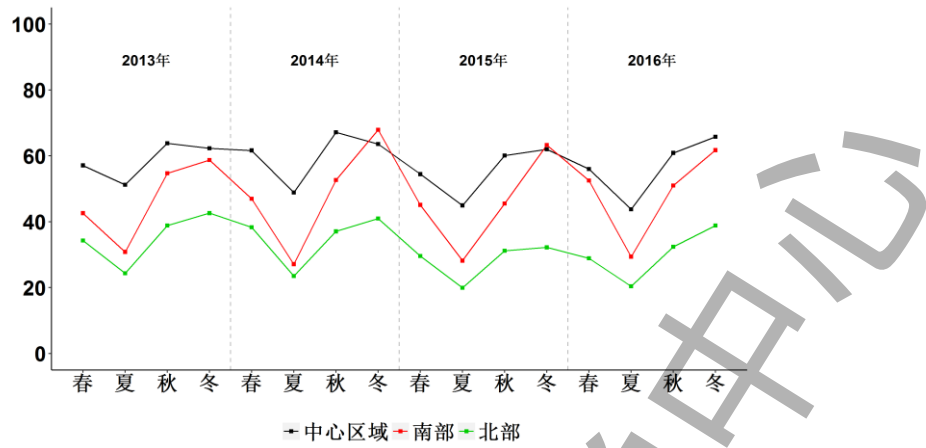
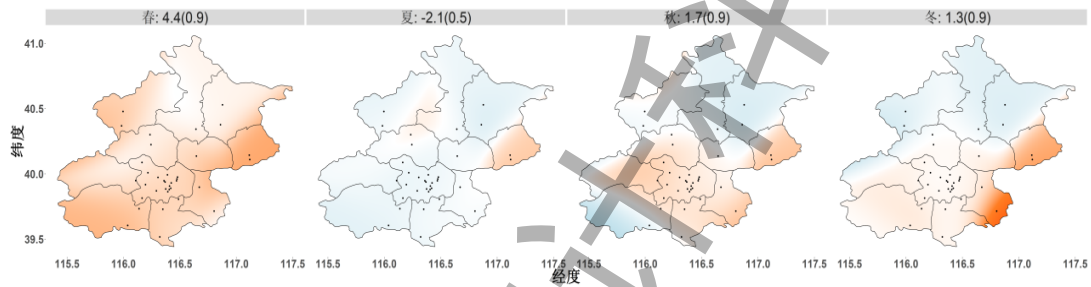
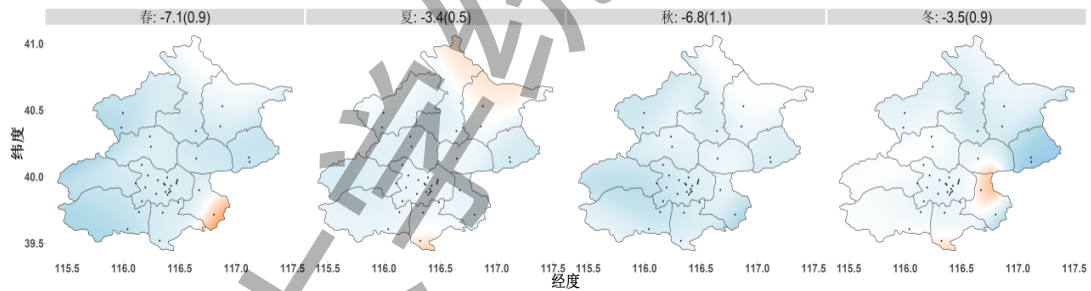


图 15: 北京市三个区域二氧化氮 (NO₂) 浓度 (微克/立方米) 的季节平均值变化曲线。

A. 2014 年减 2013 年



B. 2015 年减 2014 年



C. 2016 年减 2015 年

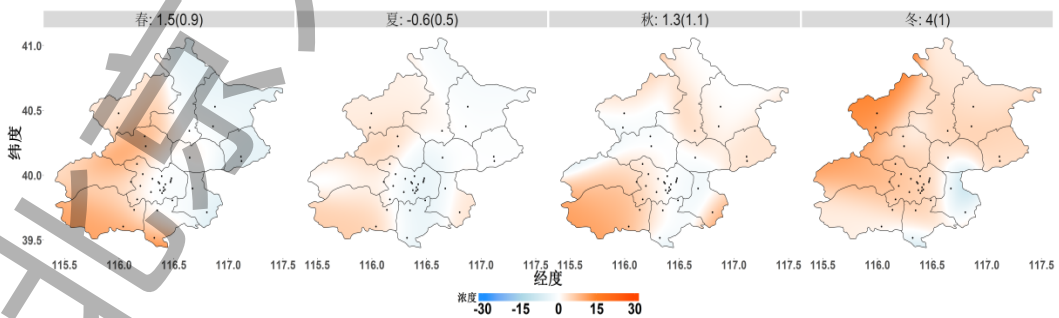


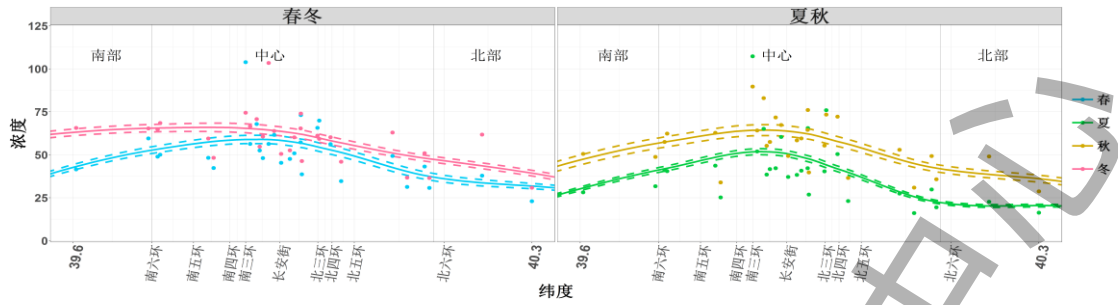
图 16: 北京市 NO₂ 季平均浓度 (微克/立方米) 的年度变化及区域分布地图。图中数字代表浓度差值的平均值 (标准差)。红色代表增加, 蓝色代表减少。

从图 14、15、16 中我们发现北京市的二氧化氮污染具有如下主要特征：

- 二氧化氮也有较强的季节特征：秋冬两季最高，夏天最低。秋季的高浓度，除了机动车排放之外，也有生物质燃烧的原因。北部和中心区域四季的浓度变化不大，北部最大的季节差别只有 18.4 微克/立方米，中心区域的冬夏差异是 11.1 至 22.0 微克/立方米；然而南部地区冬夏两季的差异最大可以达到 40.8 微克/立方米。另外秋冬两季从南和东两个方向来的传输也很明显。
- 从空间分布来看，在春夏两季，中心区域的二氧化氮浓度显著高于北部和南部区域；但在冬季，由于外地传输，南部区域的浓度可以同中心区域的水平接近。**在外地传输最低的夏季，中心区域的二氧化氮浓度比南部和北部区域分别高出 50% 和 100% 以上，这说明了北京自身保有的机动车尾气排放是最大的二氧化氮污染源。**北京目前保有的 550 万辆机动车，再加上日益增多的外埠车辆的尾气排放，是北京市二氧化氮浓度居高不下的主要原因。北京夏季中心区域的二氧化氮浓度值应该作为度量北京市机动车总排放量的一个基准值。同时我们也看到，尽管车辆数量每年都在增加，但中心区域的二氧化氮浓度还是大致基本稳定。这应该是北京市这几年提高了油品排放标准所致。
- 从图 16 中我们还发现，过去四年中二氧化氮最大的改善发生在 2015 年，它和 2014 年浓度相比有相对较大的减少，但全年的改善也只在 6.6% 至 19.1% 之间。2016 年比 2015 年不仅没有改善，反而增加了。**其中北部和中心区域在 2016 年冬季、南部区域在 2016 年春季均有非常显著的增加。**

为了更加清楚地描述二氧化氮的空间分布和中心区域的高浓度水平，我们分别在图 17 和图 18 中给出了 2015 年和 2016 年沿南北方向（纬度）和东西方向（经度）的二氧化氮浓度变化曲线。之前两年的曲线同 2015 年和 2016 年类似，在此省略。这两个图显示出沿南北方向的二氧化氮峰域在南六环到北五环之间，沿东西方向的峰域在中轴线到东四环之 c

A. 2015 年



B. 2016 年

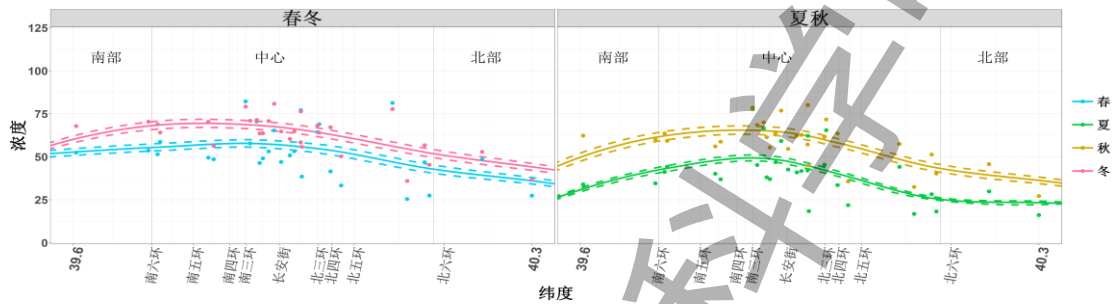
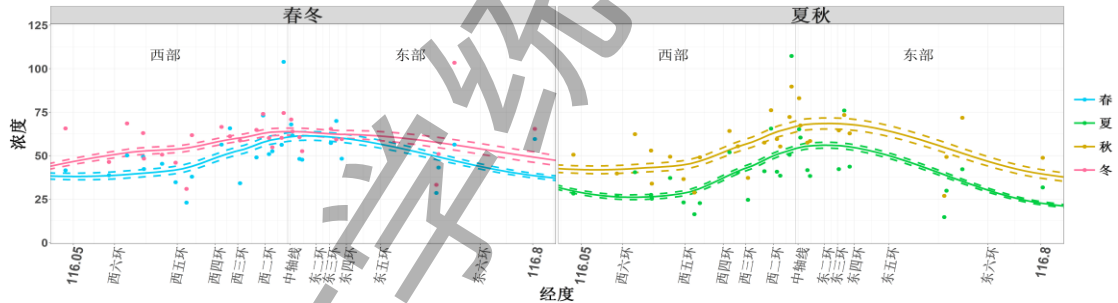


图 17: 北京市二氧化氮 (NO₂) 季均值浓度 (微克/立方米) 沿纬度 (南北方向) 变化曲线图。实线为调整均值浓度, 虚线为 95%置信区间。点表示各个站点经气象调整后的季节平均浓度。

A. 2015 年



B. 2016 年

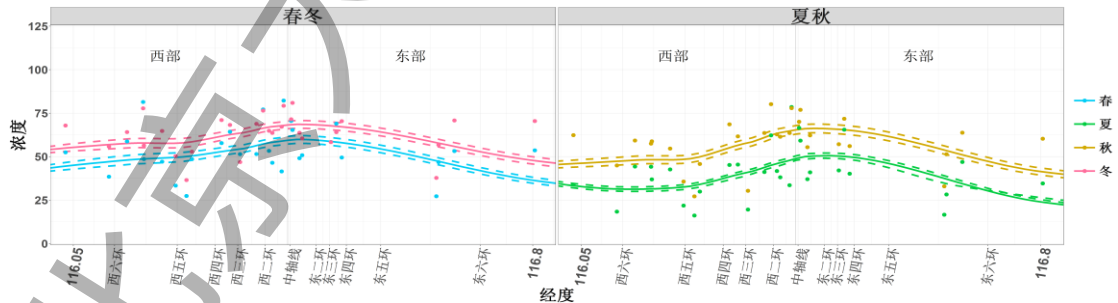


图 18: 北京市二氧化氮 (NO₂) 季均值浓度 (微克/立方米) 沿经度 (东西方向) 变化曲线图。实线为调整均值浓度, 虚线为 95%置信区间。点表示各个站点经气象调整后的季节平均浓度。

（四）一氧化碳

一氧化碳（CO），是由含碳物质的不完全燃烧造成的。它的产生主要有两个来源：一个是燃煤，其中炼焦炭（用于炼铁）会产生大量一氧化碳；另一个是汽车尾气的排放，尤其是机动车低速行驶时的汽油不完全燃烧。此外焚烧秸秆也会产生一氧化碳。一氧化碳是光化学烟雾生成链的一部分，也可以生成臭氧。

中国一氧化碳的一级和二级标准限值分别为：24 小时平均浓度不超过 4 毫克/立方米，1 小时平均浓度不超过 10 毫克/立方米。美国环保署的标准限值为：8 小时平均浓度 9ppm（约 10.3 毫克/立方米），1 小时平均浓度 35ppm（约 40 毫克/立方米），并规定每年超过以上标准限值的次数不能多于一次。

图 19 给出了三个区域的一氧化碳季均值浓度的时间序列。

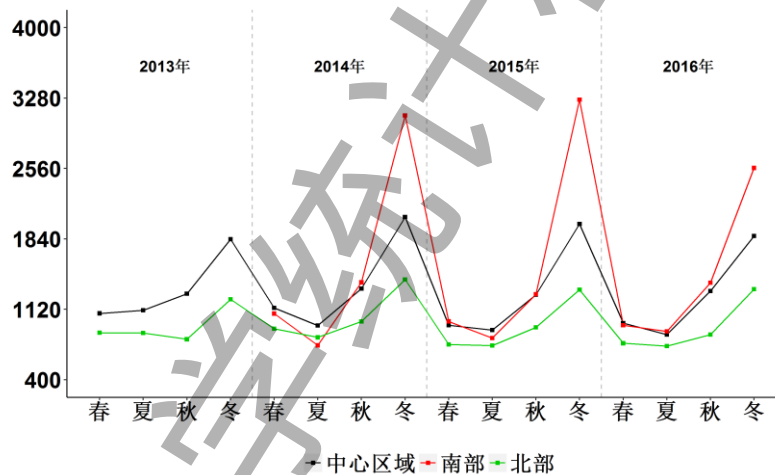
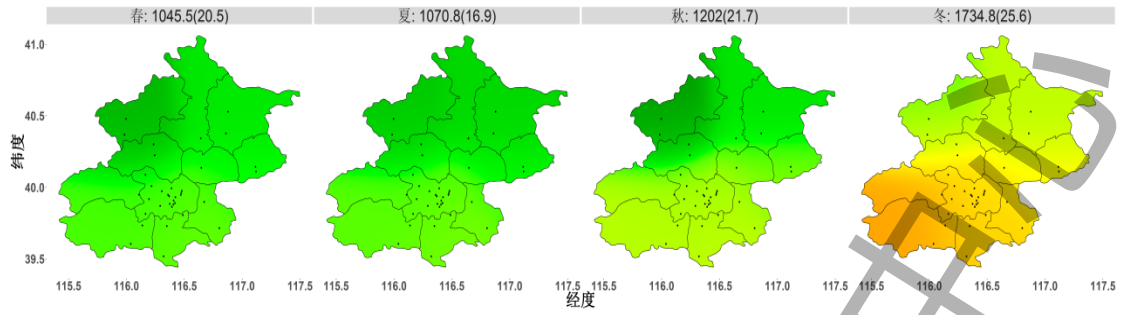


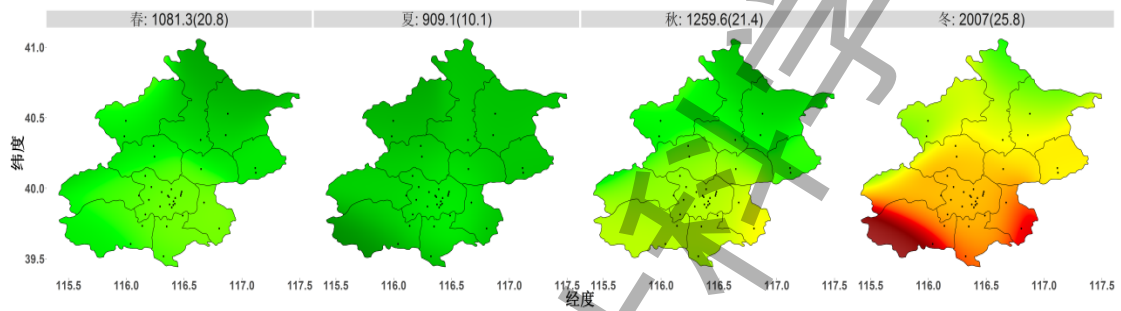
图 19：北京市三个区域一氧化碳（CO）均值浓度（微克/立方米）的季节平均值变化曲线。

图 20 给出了一氧化碳的季均值浓度的空间分布图。必须注意的是：2013 年的一氧化碳数据缺失很高，其中 23 个非国控监测站点的数据全部缺失。尽管我们给出了 2013 年四个季节各自的平均浓度，但由于只是基于 12 个国控站点的数据计算得到的，所以我们需要慎重解读 2013 年的计算结果。

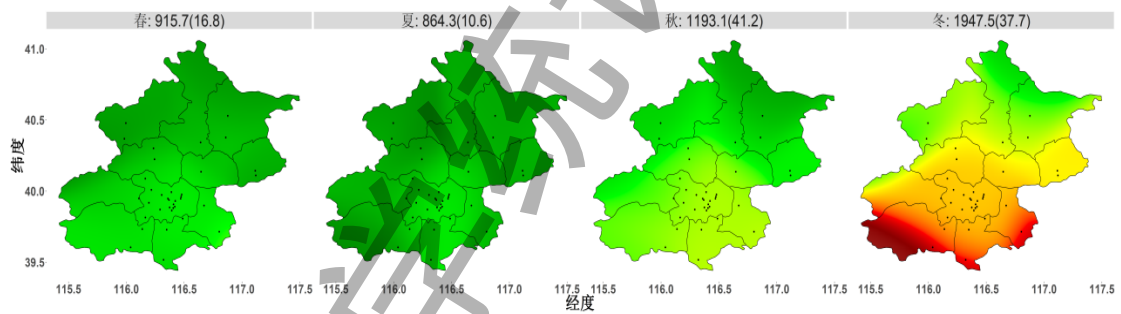
A. 2013 年



B. 2014 年



C. 2015 年



D. 2016 年

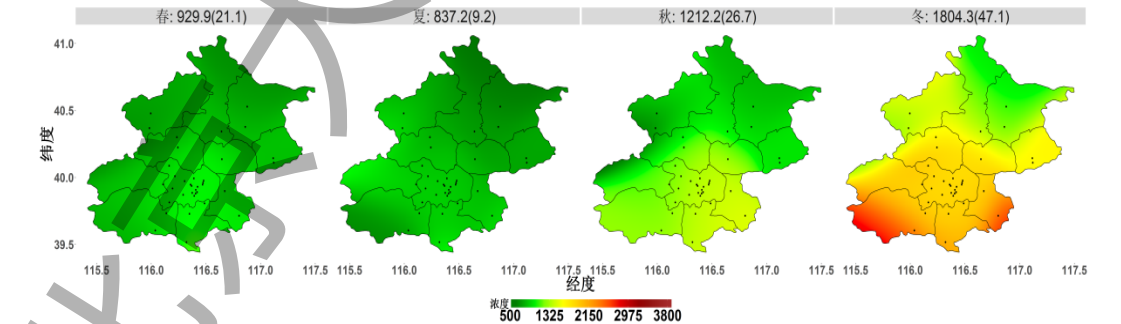


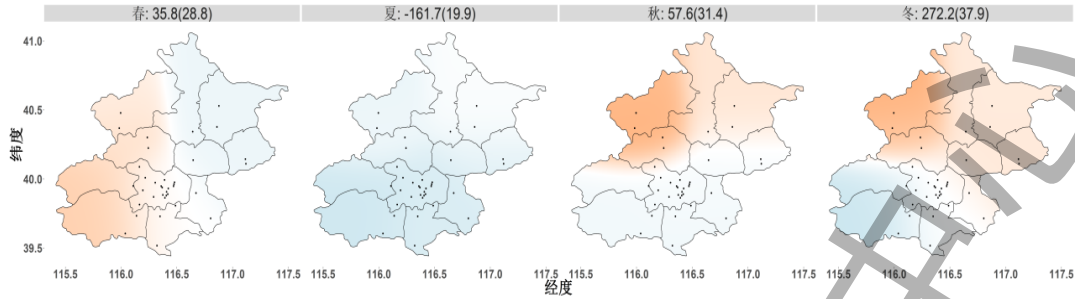
图 20: 北京市一氧化碳 (CO) 季均值浓度 (微克/立方米) 在不同年份的空间分布地图。图中数字代表季节平均浓度 (标准差)。

图 21 给出了一氧化碳的季均值浓度在不同年度间变化的空间分布地图。图 19、20、21 告知我们北京一氧化碳污染的如下主要特征和变化趋势：

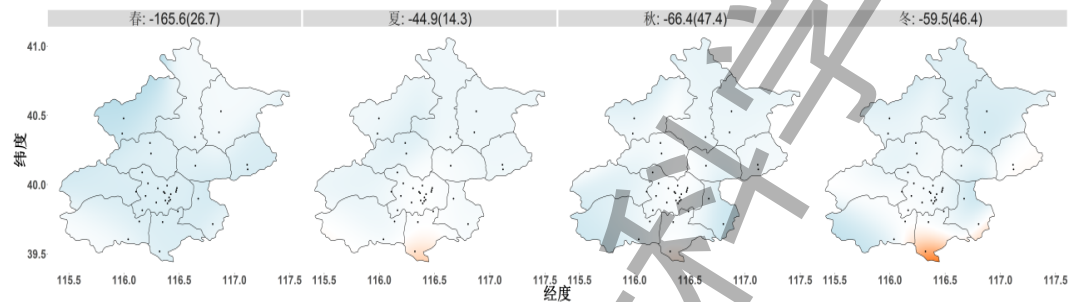
- 北京三个区域的一氧化碳浓度都是在冬季最高，其次是秋季，夏季最低。这一季节特征不同于二氧化硫（春季第二，秋季第三）。在中心和北部区域，冬夏浓度比率不低于 1.4 倍，南部达到 2.9 倍。
- 从空间分布的角度来看，从北到南，浓度呈增长趋势。空间分布差异在秋冬季最明显。在冬季，南部的浓度是中心区域的 1.5 倍左右，是北部区域的接近 2.5 倍。
- 整体来看，近几年中一氧化碳浓度的改善主要发生在 2015 年。2015 年四个季节的浓度比 2014 年同期都有不同程度的显著下降（3.0%-15.3%）。但 2016 年同 2015 年相比，除中心区域夏季、北部区域秋季、南部区域冬季有显著下降之外，在其他季节持平或略有增加。其中，中心区域的秋季均值浓度增加了 3.0%。南部区域在夏秋两季分别有 8.3% 和 9.3% 的显著增加。

以上给出的北京一氧化碳在过去四年的浓度变化趋势和特征同上一小节所述的二氧化氮的特征很相似，因为在北京这二者的排放均主要源于机动车。一氧化碳和二氧化氮这四年改善有限的主要原因是对于机动车减排还没有找到有效的方法。

A. 2014 年减 2013 年



B. 2015 年减 2014 年



C. 2016 年减 2015 年

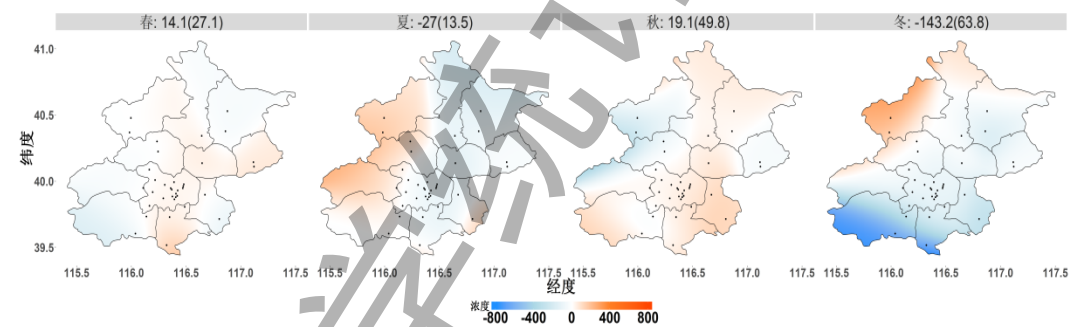


图 21: 北京市一氧化碳 (CO) 季均值浓度 (微克/立方米) 的年度变化及区域分布地图。

图中数字代表浓度差值的平均值 (标准差)。红色代表增加, 蓝色代表减少。

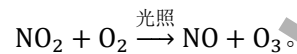
(五) 臭氧

臭氧 (O₃) 是具有强氧化性的气体。低空臭氧是一种大气污染物。人类或动物吸入后对呼吸道、视觉和免疫系统会产生破坏, 长时间暴露会使视觉敏感度和视力降低。它对植物和农作物也会造成损害, 影响农作物产量。臭氧会腐蚀户外的金属制品, 对露天仪器、设备造成损害。臭氧还可以同其它有机污染物和氮氧化物发生化学反应, 造成二次污染。

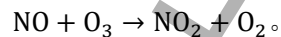
近年来，臭氧污染已经受到我国环保部门的重视。它已经成为除 PM_{2.5} 之外最重要的指标性污染物。

我国关于臭氧浓度的限值标准以最大 8 小时平均浓度为基准：一级标准 100 微克/立方米，二级标准 160 微克/立方米。美国环保署关于臭氧的标准限值为 0.07ppm（约为 140 微克/立方米）并要求一年中第四高的日最大 8 小时平均浓度值的三年平均不超过该限值。

低空臭氧的生成主要来自大气的光化学反应。现在已知的可以生成低空臭氧的一个重要路径是二氧化氮经过光照生成臭氧和一氧化氮的反应。如下所示：



这一反应说明二氧化氮在白天光照下会促进臭氧的大量生成，同时也意味着在光照强度最高的中午和下午时段臭氧的浓度会最高。在通常状态下，还存在以上化学反应的逆反应：



这个反应不需要光照作为条件，在白天和夜晚都会发生。机动车行驶，尤其是低速行驶时燃料的不完全燃烧，会产生氮氧化物（NO_x）。从上述两个反应中可以看到，氮氧化物是臭氧的重要前体物，所以机动车排放与臭氧浓度密切相关。

基于上述臭氧的产生原理和最大 8 小时平均浓度的国家标准，我们将分别分析全天 24 小时臭氧的数据和中午 12 点至晚 7 点的 8 小时臭氧的数据。

图 22 显示了全天 24 小时臭氧季均值浓度在不同年份的空间分布地图及区域污染的程度。从该图中我们发现：

- 臭氧的污染具有很强的季节效应。由于夏季温度高，日照强烈，非常利于光化学反应，生成臭氧。因此，在北京的三个区域，夏季臭氧的浓度都是一年之中最高的。其次由高到低依次是春季、秋季和冬季。夏季比第二严重的春季高出约 15.4% 至 56.9%，春季又高于秋季近一倍。
- 臭氧的空间分布非常不同于 PM_{2.5}、PM₁₀ 和另外三种气体污染物，这具体表现为**北部区域的臭氧浓度是三个区域中最高的**。在最近两年，**北部在春夏两季的臭氧浓度要比**

另外南部高出至少 7.7%，比中心区域高出至少 18.1%。除了 2016 年南部区域的臭氧均值浓度明显高于中心区域之外，在其它年份和季节，南部同中心的臭氧浓度差别并不大。

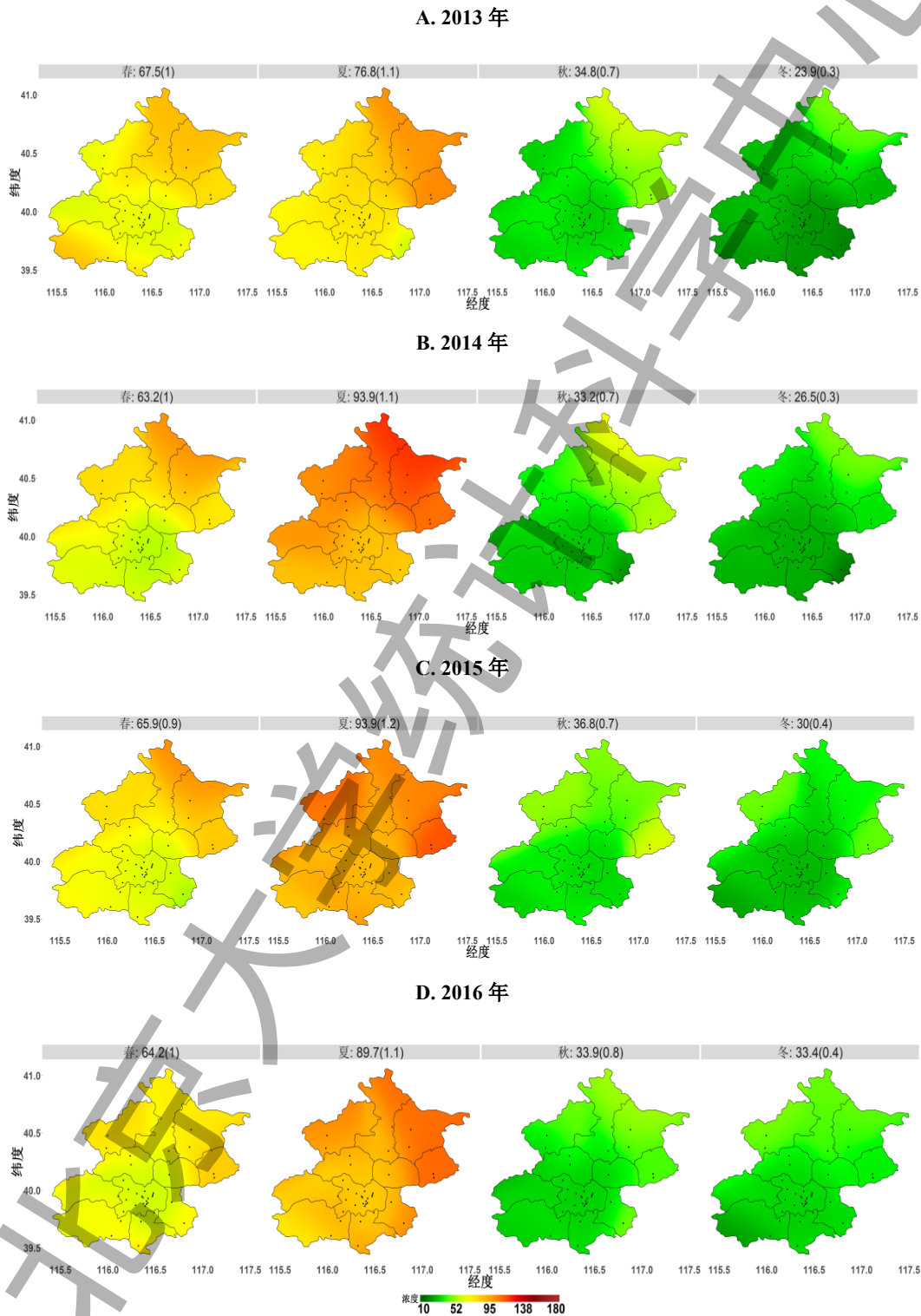


图 22: 北京市 24 小时臭氧 (O₃) 季均值浓度 (微克/立方米) 在不同年份的空间分布地图。图中数字代表季节平均浓度 (标准差)。

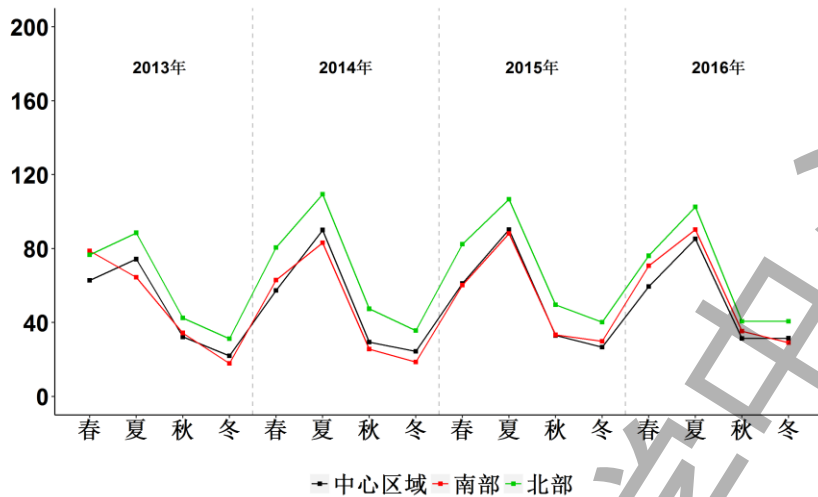
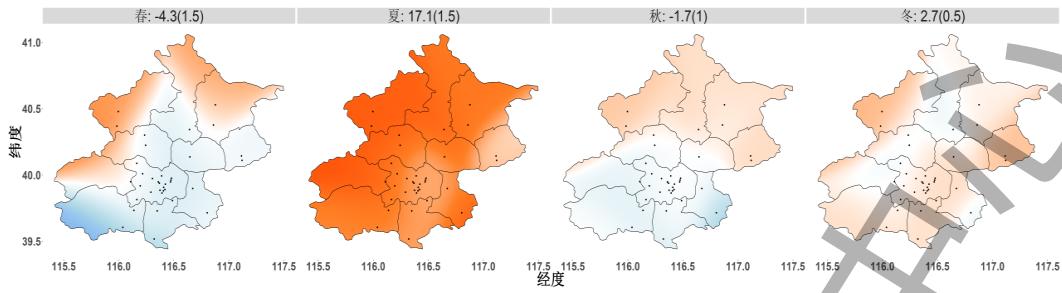


图 23: 北京市三个区域 24 小时臭氧 (O₃) 浓度 (微克/立方米) 的季节平均值变化曲线。

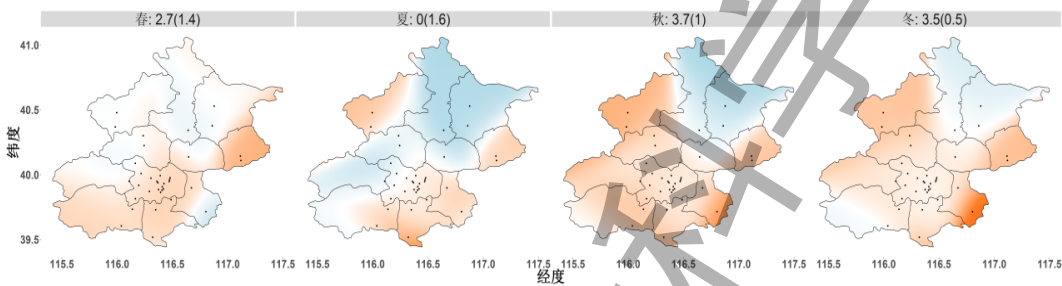
图 23 和图 24 分别展示了基于 24 小时数据的臭氧季均值浓度的时间序列图及相应的年度变化空间分布地图。综合这两个图我们得到如下关于 24 小时臭氧的主要结论:

- 北部区域臭氧高的原因有两个, 第一个原因是北部的一氧化氮浓度比中心和南部区域低。一氧化氮主要来自机动车的含氮有机物的不充分燃烧。而北部区域机动车数量低于平原地区, 导致其一氧化氮浓度低。前面提到一氧化氮、臭氧、二氧化氮之间会发生如下氧化还原反应: $\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$ 。当一氧化氮浓度低的时候, 它能消耗的臭氧较少, 空气中剩余的臭氧浓度就会相对较高。第二个原因是北部地区空气中的颗粒物 (PM_{2.5} 和 PM₁₀) 比中心和南部区域少, 紫外线的照射也更强, 更有利于生成臭氧的光化学反应。从年度变化的角度来看, 对于三个区域而言, 从 2013 年到 2015 年北京市的臭氧浓度均在增加。
- 2016 年比 2015 年在中心和北部区域只有小量减少, 但南部区域有非常显著的增加。到 2016 年, 南部区域的浓度达到 56.4 微克/立方米, 已经明显高于中心区域的 52.0 微克/立方米, 高出幅度达 7.8%。

A. 2014 年减 2013 年



B. 2015 年减 2014 年



C. 2016 年减 2015 年

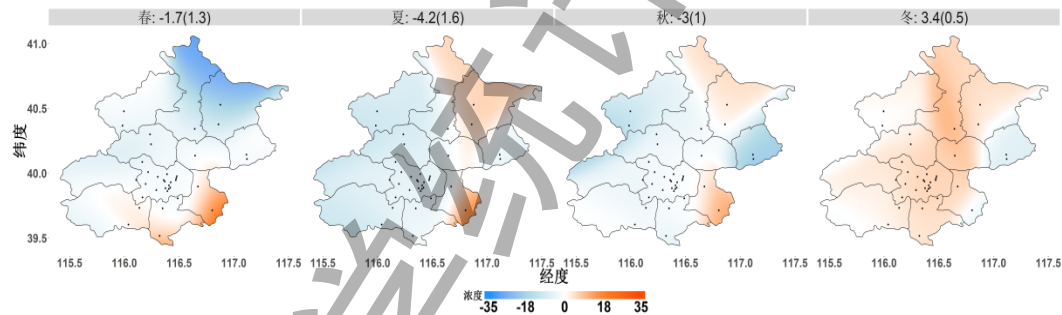
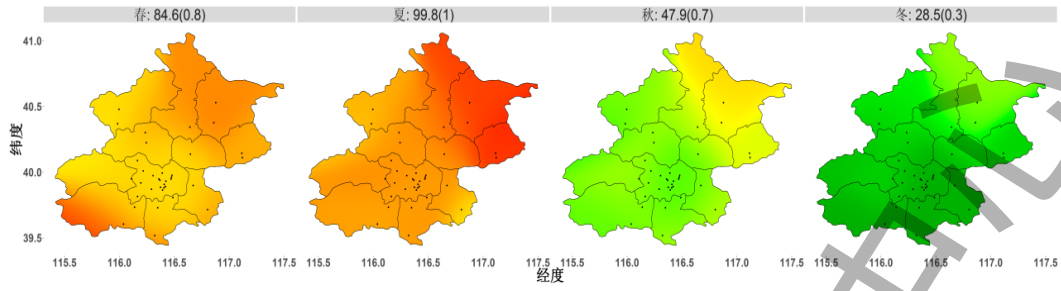


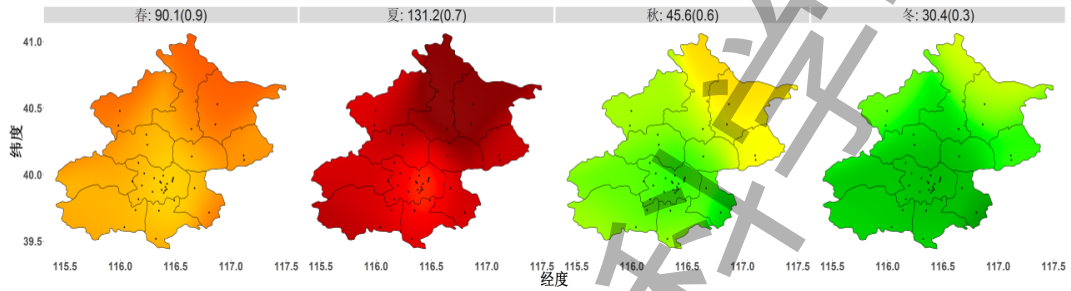
图 24: 北京市 24 小时臭氧 (O₃) 季均值浓度 (微克/立方米) 的年度变化及区域分布地图。图中数字代表浓度差值的平均值 (标准差)。红色代表增加, 蓝色代表减少。

图 25 给出了 8 小时臭氧的季均值浓度在不同年份的空间分布地图。对比图 22 我们发现, 8 小时臭氧的地图颜色远远深于 24 小时臭氧的地图颜色。尤其是在夏季, 8 小时臭氧的均值远远高于 100 微克/立方米的国家标准, 这说明北京夏季的臭氧污染应得到足够的重视。

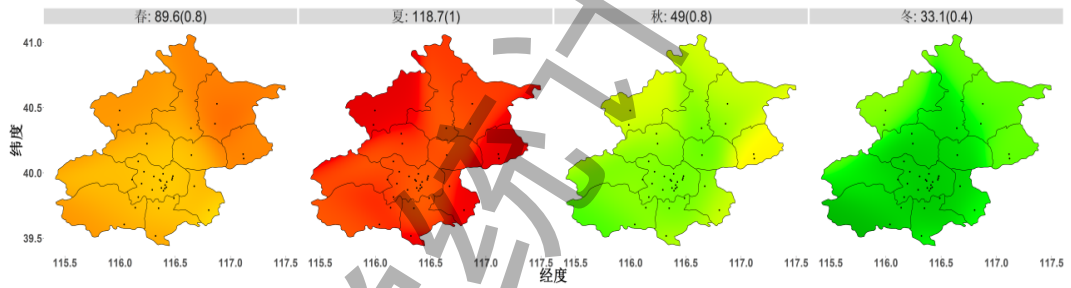
A. 2013 年



B. 2014 年



C. 2015 年



D. 2016 年

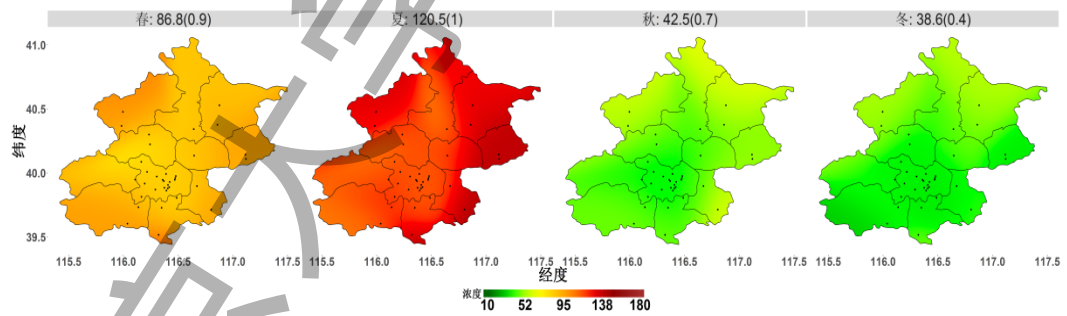


图 25: 北京市 8 小时臭氧 (O_3) 季均值浓度 (微克/立方米) 在不同年份的空间分布地图。图中数字代表季节平均浓度 (标准差)。

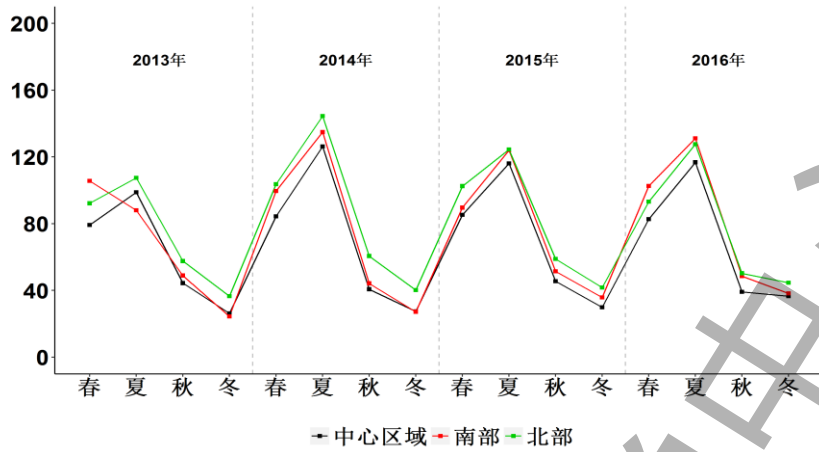
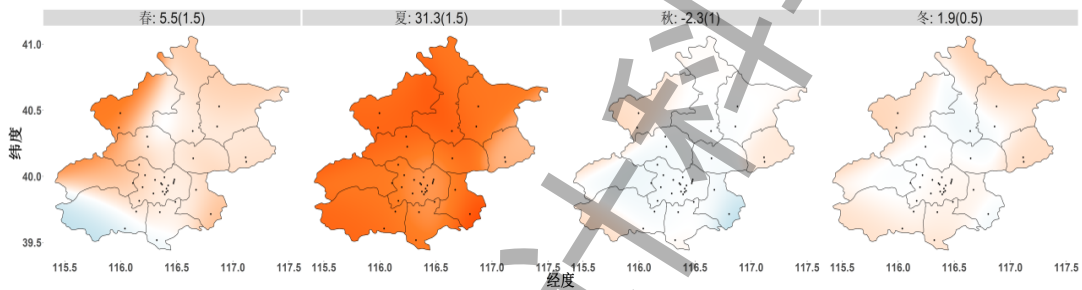
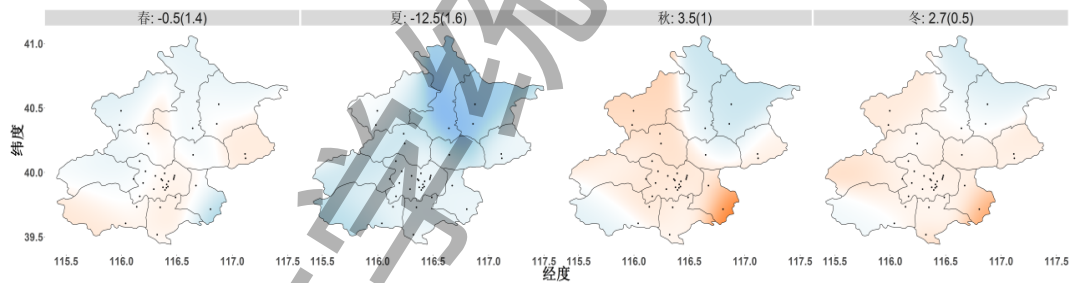


图 26: 北京市三个区域 8 小时臭氧 (O₃) 浓度 (微克/立方米) 的季节平均值变化曲线。

A. 2014 年减 2013 年



B. 2015 年减 2014 年



C. 2016 年减 2015 年

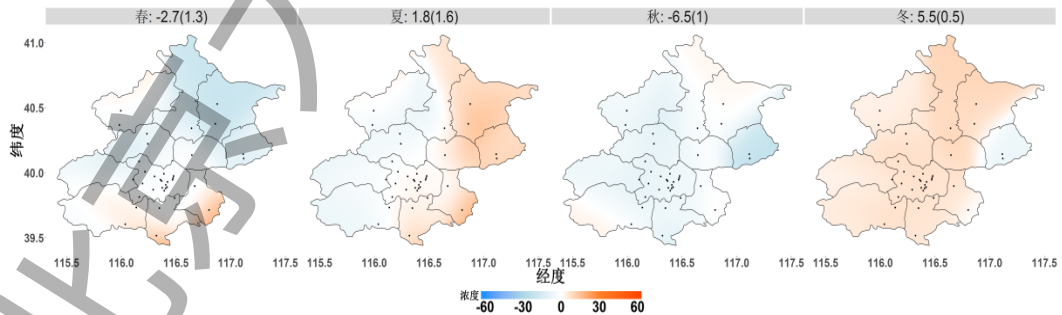


图 27: 北京市 8 小时臭氧 (O₃) 季均值浓度 (微克/立方米) 的年度变化及区域分布地图。图中数字代表浓度差值的平均值 (标准差)。红色代表增加, 蓝色代表减少。

图 26 和图 27 分别展示了 8 小时臭氧季均值浓度的时间序列图及相应的年度变化空间分布地图。这两个图揭示出如下关于 8 小时臭氧的主要结果：

- 基于 8 小时数据计算的臭氧浓度在每个季节都远远高于 24 小时臭氧的浓度。
- 北部和南部区域在夏季自 2014 年以来 8 小时臭氧的季均值浓度均超过 100 微克/立方米的国家标准限值，且 2016 年相比 2015 年都有上升的趋势。
- 中心区域夏季的 8 小时臭氧的季均值浓度自 2014 年起一直在 100 微克/立方米以上。
- 北部区域在春夏两季的 8 小时臭氧浓度仍高于中心区域，但是南部在 2016 年春季和夏季分别达到 102.6 微克/立方米和 131.2 微克/立方米，首次超过了北部。

综合 24 小时和 8 小时臭氧数据的分析结果，我们发现近几年北京市臭氧的改善甚微，并在 2016 年有加重的迹象，尤其体现在浓度高的东北部和东南部地区的夏季。这意味着北京目前在 PM_{2.5} 污染相对较轻的夏季，臭氧浓度已经超标。

七、冬季供暖对六种污染物的影响

北京是提供冬季集中供暖的城市。尽管北京市的中心区域已经用天然气取代煤作为冬季取暖能源，但在北京郊区和毗邻的河北省煤炭仍然是主要的取暖燃料，其中散煤燃烧的量依然相当大[9]。如附图 1 所示，北京市含散煤燃烧的其他类煤炭消费在 2015 年冬季有 115 万吨。尽管比 2014 年的 198 万吨少了许多，但仍是一个可观的数字，因为研究[9]表明散煤燃烧会产生比天然气更多的 PM_{2.5} 及其前体物二氧化硫和一氧化碳等。我们在之前的报告[1][2]中研究了北京和沈阳，揭示了冬季取暖对 PM_{2.5} 的显著影响。在这一节中，我们要评估冬季供暖对北京市包括 PM_{2.5} 在内的六种常规污染物的影响。我们也关心北京的“煤改气”和“煤改电”方案的实施是否减少了供暖期这些污染物的浓度。

北京的供暖时间一般是从每年的 11 月 15 日至来年的 3 月 15 日。若遇极端低温天气，供暖时间将会适当提前或延后。为了揭示供暖对空气质量的影响，我们定义：

供暖期为 11 月供暖开始后的两周及 3 月停止供暖前的两周；

非供暖期为 11 月供暖开始前的两周和 3 月停止供暖后的两周。

本研究中我们将供暖期作为实验组，非供暖期作为对照组。原则上讲，如果两个时期的气象条件是相同的，实验组（供暖期）的平均污染物浓度减去对照组的差就是供暖所带来的污染物的增加。然而事实上这两个时期的气象条件会很不同。这就需要我们运用统计学的方法先构造出可比的气象条件，进而科学地计算供暖效应。为此我们综合了北京所有气象站点 2010 年至 2016 年这七年的 11 月份或 3 月份包含非供暖期和供暖期的气象变量作为基准气象条件。之后我们分别建立了供暖期和非供暖期的六种污染物（PM_{2.5}、PM₁₀、二氧化氮、二氧化硫、一氧化碳和臭氧）与气象变量的回归关系，再对每个污染物的浓度进行气象变量的时空调整，从而得到 2013 年到 2016 年每种污染物在 11 月份或 3 月份供暖期和非供暖期的均值浓度。供暖期均值浓度除以非供暖期均值浓度就是**供暖效应比例**。如果这个比例在统计学意义下显著地大于 1，表示有供暖效应，否则表示没有供暖效应。我们并以此为基础计算了每种污染物在每个站点的供暖效应比例。

我们的计算结果表明，二氧化氮和臭氧在所考虑的四年 8 个供暖期均没有供暖效应。这也是可以理解的，因为从大气化学反应的角度看，这两个化学气体同燃煤或燃气供暖的联系并不大。对于另外四种污染物，我们发现了供暖效应。图 28 给出了这四种污染物在供暖期沿纬度方向分布的供暖效应比例。图 28 告诉我们如下主要结论：

（1）我们发现 PM_{2.5}、二氧化硫和一氧化碳在每个供暖期均有显著的供暖效应。然而 PM₁₀ 的供暖效应并不像其它三种污染物那样显著。它在 2013 年 11 月、2014 年和 2015 年 3 月就没有供暖效应。关于这两个春季，我们可以理解为供暖和沙尘混杂在一起的缘故。关于 2013 年 11 月份为什么 PM₁₀ 没有供暖效应的解释见下面（3）。

（2）二氧化硫、一氧化碳、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的供暖效应比例的排序在不同年份都有较高的一致性，即如果一个污染物的浓度在一个供暖期高或低，其它污染物的浓度也会相应地高或低。这说明这四个污染物有很高的相关性，也说明了燃煤取暖会同时促进这四种污染物浓度的增加。

（3）不论是在 11 月还是 3 月的供暖期，在大部分区域，二氧化硫的供暖效应比例是最高的，其次是一氧化碳，再次是 PM_{2.5}，最后才是 PM₁₀。我们发现在 PM₁₀ 没有效应的三个供暖期，二氧化硫、一氧化碳和 PM_{2.5} 的供暖效应也普遍走低。这为 PM₁₀ 在 2013 年 11 月没有供暖效应提供了一个解释，因为那个供暖期一氧化碳和 PM_{2.5} 的效应也偏低。

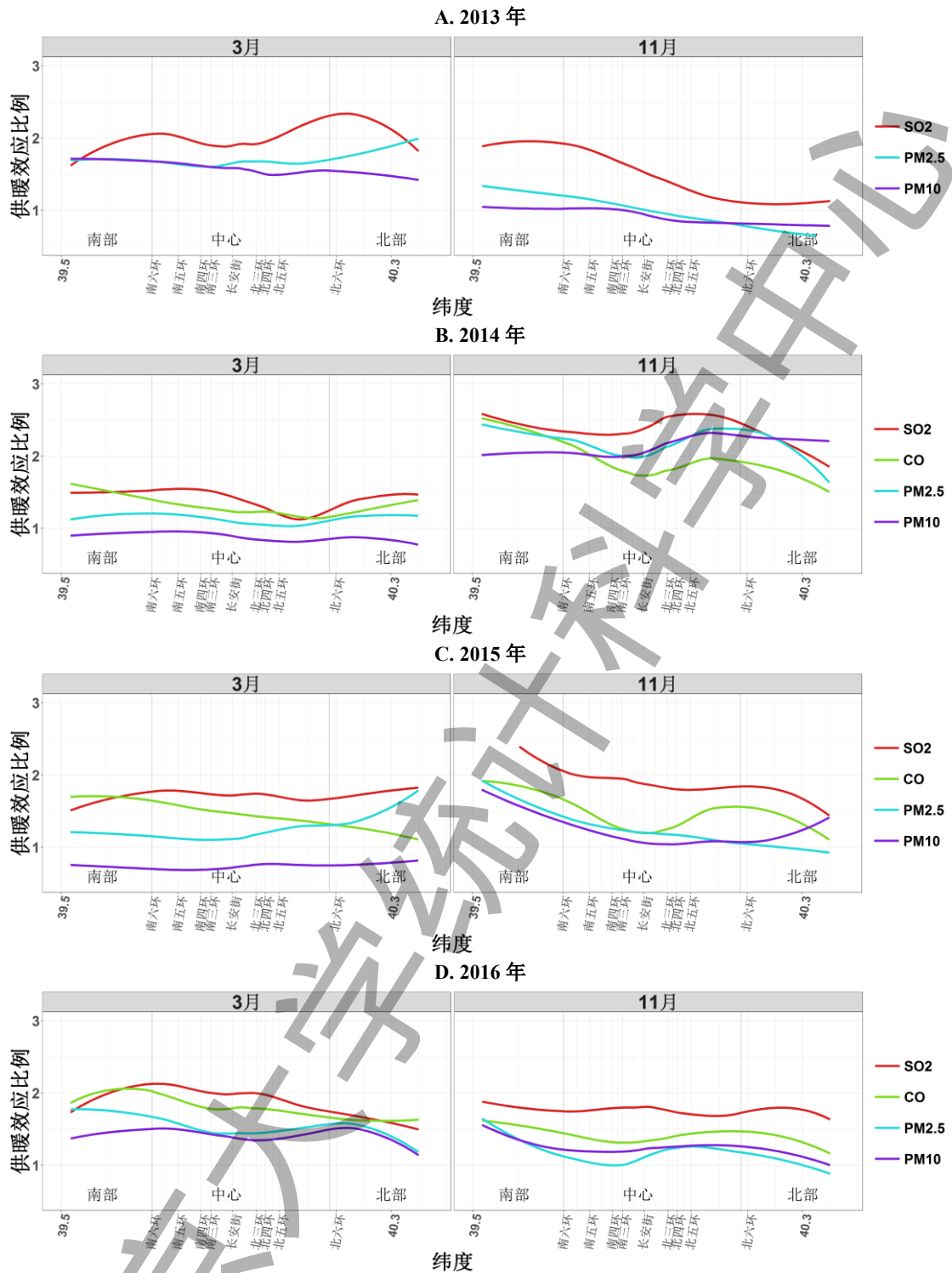


图 28: 北京市三月和十一月供暖期 PM_{2.5}、PM₁₀、二氧化硫 (SO₂) 和一氧化碳 (CO) 沿纬度 (南北方向) 分布的供暖效应比例曲线。

(4) 我们看到, 这四种污染物的供暖效应比例在不同的年和不同的供暖期有很大的差异。2014 年 11 月的供暖效应比例显著高于其它七个供暖期, 这是由于 APEC 会议在 2014 年 11 月非供暖期所实行的减排措施大幅降低了非供暖期的污染物浓度所致。

八、APEC 对六种污染物的影响

2014 年 11 月 10-12 日 APEC 首脑会议在北京怀柔举行。为了保证 APEC 会议期间的空气质量，各级政府自 11 月 3 日起采取了一系列的控制措施，暂时关闭了北京周边及河北省廊坊、保定、石家庄、邢台等沿太行山脉城市的一些工厂，实施了重污染应急减排措施。从 11 月 6 日开始，这一应急减排措施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（如北京、天津）实施机动车单双号限行，并尽可能地采取了限、停产措施。北京市学校、公共机构部门也都放假以减少污染物排放。在 APEC 会议期间，著名的“APEC 蓝”时有出现。

“APEC 蓝”是人们的直观感受，但从空气质量管理的角度看，如何量化 APEC 期间所采取的减排措施对空气质量的影响呢？由于在 2013 至 2016 四年间，只有 2014 年的 11 月 3 日到 12 日在北京市及周边华北地区采取了大规模的减排措施，这就给我们提供了一个对比实验的机会。对 2014 年 APEC 期间的调整均值与其它年份同期的调整均值进行对比，如果 2014 年 APEC 期间调整均值显著低于其它年份的同期浓度，说明 APEC 效应十分明显。

图 29 给出了 2013-2016 年每年的 APEC 时段（11 月 3 日-12 日）六种污染物的均值浓度沿纬度方向的变化曲线。从图中我们得到如下主要结论：

- 在六种污染物中， $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、二氧化氮和一氧化碳有较强的 APEC 效应，二氧化硫和臭氧没有 APEC 效应。其中， PM_{10} 浓度在 2014 年的降低主要是由于 $PM_{2.5}$ 的降低造成的。二氧化氮的 APEC 效应表明 APEC 期间对机动车的管控措施产生了积极的效果。而二氧化硫没有 APEC 效应有可能是由于潜在的供暖期燃煤造成的。APEC 管控期正值冬季供暖开始的阶段，在正式供暖开始前，存在有些单位或者个体提前供暖的现象，这部分的燃煤供暖作为混杂因素可能会对 APEC 效应的计算造成影响。

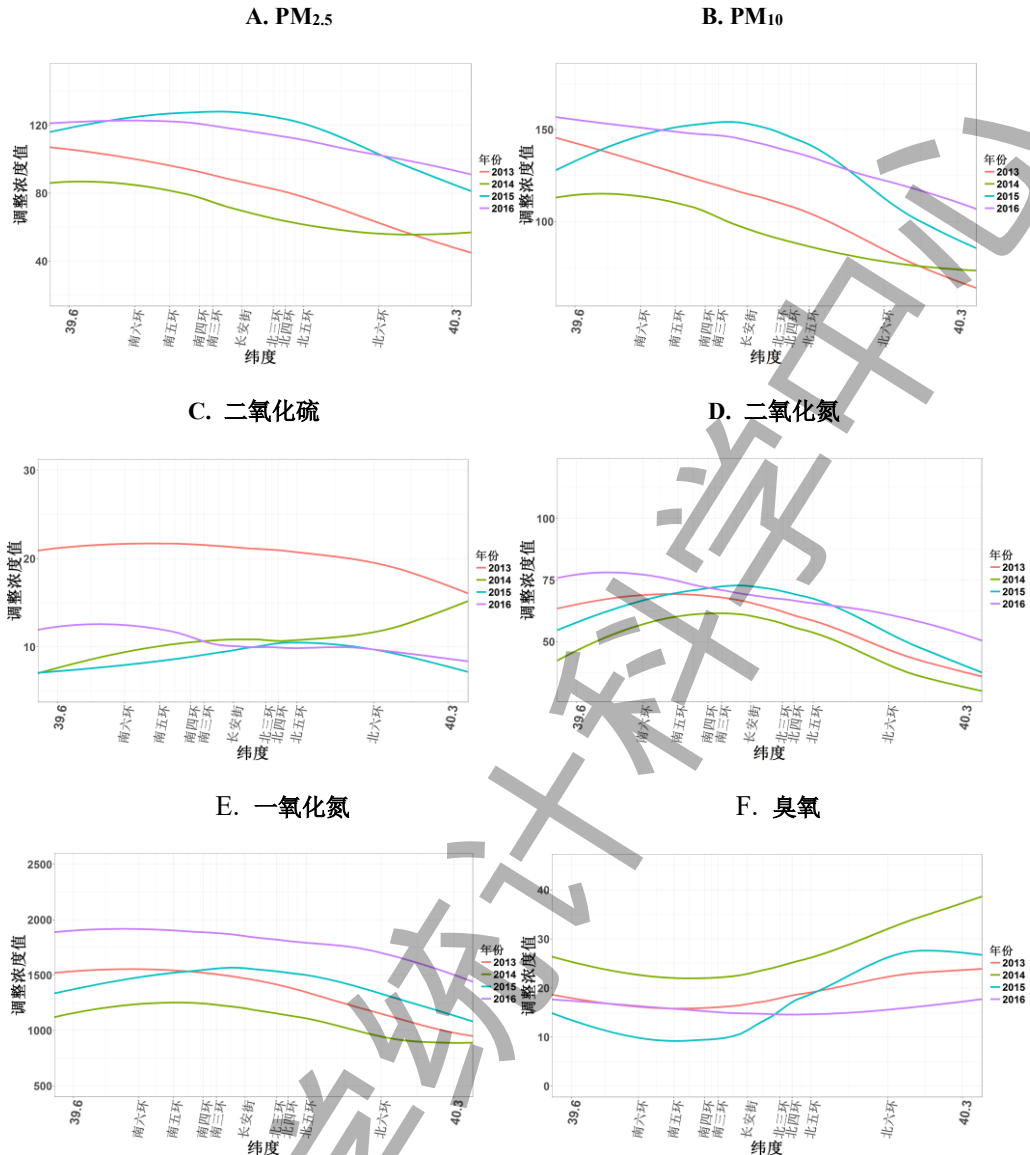


图 29: 2013-2016 年四年间六种污染物在 APEC 时段的均值浓度 (微克/立方米) 沿纬度方向的变化曲线。

- 2014 年 APEC 期间, 中心和南部两个区域的 PM_{2.5} 浓度比 2013 年同期减少 20%左右。在中心区域, 2015 年和 2016 年同期的浓度比 APEC 期间要高出 79%和 68%。南部区域 2015 年和 2016 年的增长比率低于中心区域, 这是由 APEC 期间该区域的平均浓度高出中心区域 26 微克/立方米所致。
- 尽管 2015 和 2016 年北京的 PM_{2.5} 空气污染比 2014 年已经有了降低, 但是 2014 年 APEC 期间的浓度水平远远低于 2015 年和 2016 年 11 月 3 日至 12 日期间的 PM_{2.5} 平均浓度。这说明 APEC 期间如果不实施减排措施, 鉴于当时的气象条件, “APEC 蓝”很可能不会出现。

九、大阅兵对六种污染物的影响

为了纪念抗日战争暨世界反法西斯战争胜利 70 周年，中国在 2015 年 9 月 3 号在北京举行了盛大的阅兵式。为了保障 9 月 3 号阅兵时的空气质量，鉴于 APEC 期间空气质量联防联控的成功经验，区域空气质量保障措施在 2015 年 8 月 20 日至 9 月 3 日期间于华北地区实行。在此期间，北京实施了机动车临时交通管制、工业企业停限产、扬尘污染控制等一系列的保障措施，措施包括：北京全市区域实施机动车单双号行驶、公务用车停驶 80%、建筑垃圾和各种运输车全天禁止在市政道路内行驶等。从 8 月 23 日到 28 日，河北、天津、山西、山东等地也启动了空气质量保障措施。大阅兵期间采取停限产措施的工业企业，远远多于 APEC 期间。“阅兵蓝”给人们留下了深刻的印象。

为了评估大阅兵减排措施的效果，我们进行了纵向和横向的效应对比研究。所谓纵向对比研究是比较 2013 年到 2016 年 8 月 20 日至 9 月 3 日期间的浓度。因为只有 2015 年采取了严格的减排措施，我们可以通过“非阅兵年”与 2015 年的差来评估大阅兵的效果。由于每年的背景排放水平不同（比如说二氧化硫的浓度逐年下降等），所以纵向比较可能会同污染物的年度变化因素混杂在一起。

横向比较是将“阅兵中”（8 月 20 日至 9 月 3 日，共 15 天）的污染物均值浓度同“阅兵前”（2015 年 8 月 5 日至 8 月 19 日，共 15 天）和“阅兵后”（9 月 4 日至 9 月 18 日，共 15 天）的污染物均值浓度进行比较，它能够避免同以上提到的年度变化的因素混杂在一起。

图 30 给出了 2013 年到 2016 年四年间 8 月 20 日至 9 月 3 日六种污染物的纵向大阅兵效应比较结果。

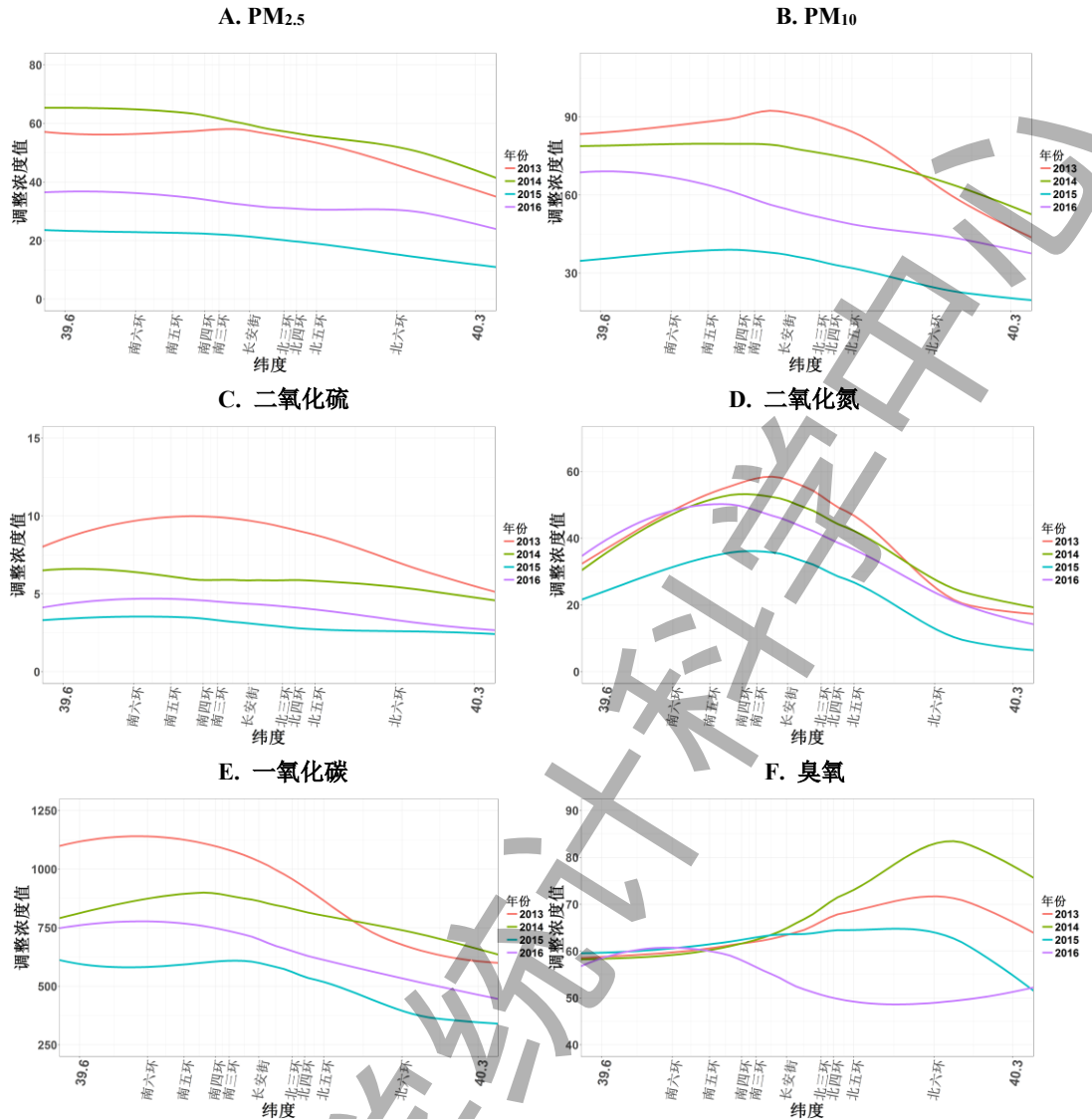


图 30: 六种污染物在 2013-2016 年四年阅兵时段均值浓度 (微克/立方米) 沿纬度方向的变化曲线。

从图 30 中我们得出以下主要结论:

- 在六种污染物中, 除去臭氧外, 从南到北的全部站点 2015 年大阅兵期间的浓度水平都是这四年中最低的。这说明阅兵期间的大气管理措施对 PM_{2.5}、PM₁₀、二氧化硫、二氧化氮和一氧化碳效果明显, 但是对臭氧的影响不大。在大阅兵效应比较明显的五种污染物中, 我们发现 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的大阅兵效应最为显著, 2015 年的污染物浓度大致为 2013、2014 年的三分之一, 为 2016 年的一半。一氧化碳的大阅兵效应不如其它污染物明显, 其在阅兵期间的浓度大致只有其它年份的三分之二。
- 尽管近几年二氧化硫有一个下降的趋势, 但阅兵期间二氧化硫的浓度仍然低于 2016 年

同期。对于其它有阅兵效应的四个污染物，考虑到我们在第四节和第六节的结果（2016 年比 2015 年下降有限或没有改善），2015 年阅兵期间的低浓度反映了空气质量保障措施实施的效果。

- 在 2015 年大阅兵期间，中心和南部区域的 PM_{2.5} 浓度均值分别下降到了 20.2 微克/立方米和 24.6 微克/立方米，均达到了我国空气质量优（0-35 微克/立方米）及美国空气质量良（12.1-35.4 微克/立方米）的标准。
- 与其它三年 8 月 20 日-9 月 3 日期间相比，在中心和南部区域，2015 年大阅兵期间的 PM_{2.5} 均值浓度低于 2013 年和 2014 年 60%以上；在中心区域，2016 年高出 2015 年阅兵期间 63%；在南部地区，2016 年高出 2015 年 38%。

为了研究大阅兵对空气质量影响的横向比较，我们选取了大阅兵管控措施开始前 15 天及结束后 15 天作为对比时间段，分别计算了每个时间段内六种污染物的均值浓度。图 31 给出了“阅兵前”，“阅兵中”和“阅兵后”三个区域污染物均值浓度的盒形图。

图 31 显示了北京市的三个区域的六种污染物几乎均具有显著的“凹”字型阅兵效果，即阅兵前后污染物的浓度高，阅兵中的浓度低。三个区域中，北部的效果最大，南部最低。值得注意的是临近河北的南部区域对二氧化硫没有阅兵效应。

大阅兵期间的一系列减排措施在保障北京空气质量方面发挥了举足轻重的作用。与 2014 年的 APEC 效应相比，大阅兵的效应比例更高。这也从实际效果上验证了大阅兵期间实施的各项防控措施多于 APEC 期间的防控措施。这些比 APEC 期间更加严厉的措施实实在在地收获了更加可喜的空气质量改善效果，同时也说明，只要肯从源头上限制住污染物的排放，北京的空气质量不仅是可改善的，更是可控的。要想让“APEC 蓝”和“阅兵蓝”得以持续，为改善空气质量设计一个可持续的管控体系才是长久之道。

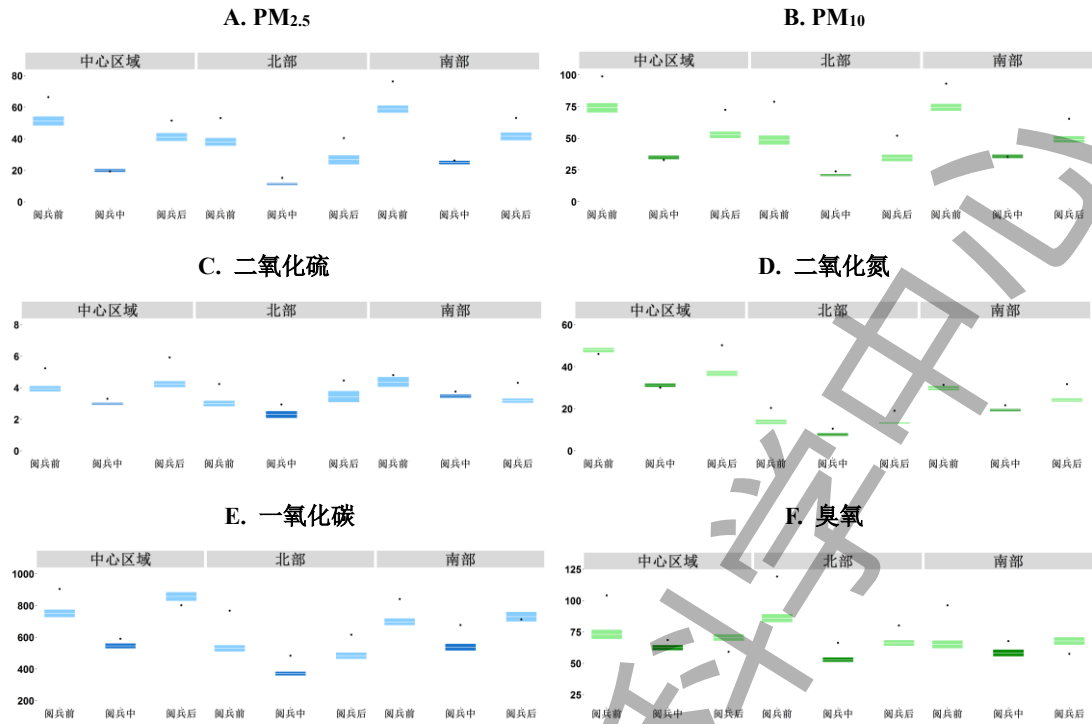


图 31: 北京市在阅兵前、阅兵中、阅兵后三个时间段六种污染物浓度(微克/立方米)的盒形图。白线为调整均值浓度, 矩形区域为 95% 的置信区间, 黑点为原始均值浓度。

十、数据质量

大气监测数据的质量是空气质量统计分析的前提, 数据质量决定了统计分析的质量, 也是政府部门制定有效大气治理政策的基础。这也是我们单独用一节来讨论北京大气污染的数据质量的初衷。一个区域的数据质量可以从两个方面考虑, 一个是数据缺失情况, 它反映了有多少应该收集的数据却被遗失了。另一个是数据采集站点的分布是否能正确、高效、合理、经济地反映这个区域的空气质量状态。

(一) 数据缺失

我们在第二节中已经提到在我国刚开始建立大气质量监测网的 2013 年 1、2 月份数据缺失的比例很高。这也是我们的研究时间段从 2013 年 3 月份开始并使用“季节年”的一个原因。

从 2014 年起监测数据的缺失比例有所下降。附表 2 和附表 3 给出了北京市 36 个监测站点中 2014-2016 三个自然年平均缺失比例最高的前 25 名站点名单。从这两个附表, 我们

发现 PM₁₀ 的缺失比例是最高的，前 25 名站点都有超过 30% 的缺失率，其中包括 5 个国控站（奥体中心、顺义、怀柔、东四、天坛）。臭氧缺失比例第二高，有 21 个站点超过 11%。其它四个污染物的缺失比例相对较低。

表 3 给出了基于 6 种污染物平均缺失比率的综合排名。这里，由于美国大使馆只监测 PM_{2.5} 数据，在综合排名中我们没有将其包括在内。从表 3 中我们可以看到，国控站的缺失比率普遍低于非国控站。但从附表 2、3 我们也发现在缺失比率较高的前 25 名监测站中也有国控站（表中用红色标出）的排名在非国控站之前。

表 3：北京市 36 个污染监测站点 2014-2016 年六种污染物平均缺失比率综合排名

| 排名 | 站点 | 平均缺失比率 | 排名 | 站点 | 平均缺失比率 |
|----|------|--------|----|-------|--------|
| 1 | 八达岭 | 0.19 | 19 | 密云 | 0.10 |
| 2 | 榆垓 | 0.14 | 20 | 延庆 | 0.10 |
| 3 | 东高村 | 0.14 | 21 | 门头沟 | 0.10 |
| 4 | 前门 | 0.14 | 22 | 丰台 | 0.10 |
| 5 | 永乐店 | 0.14 | 23 | 云冈 | 0.09 |
| 6 | 琉璃河 | 0.13 | 24 | 顺义 | 0.09 |
| 7 | 南三环 | 0.13 | 25 | 奥体中心 | 0.09 |
| 8 | 植物园 | 0.12 | 26 | 怀柔 | 0.08 |
| 9 | 密云水库 | 0.12 | 27 | 天坛 | 0.08 |
| 10 | 北部新区 | 0.12 | 28 | 东四 | 0.08 |
| 11 | 西直门北 | 0.12 | 29 | 定陵 | 0.07 |
| 12 | 东四环 | 0.11 | 30 | 万柳 | 0.07 |
| 13 | 亦庄 | 0.11 | 31 | 万寿西宫 | 0.07 |
| 14 | 房山 | 0.11 | 32 | 农展馆 | 0.06 |
| 15 | 平谷 | 0.11 | 33 | 昌平 | 0.06 |
| 16 | 通州 | 0.11 | 34 | 官园 | 0.06 |
| 17 | 永定门 | 0.11 | 35 | 古城 | 0.06 |
| 18 | 大兴 | 0.10 | 36 | 美国大使馆 | 0.05 |

注：标红色为国控站点。

远郊站点六种污染物平均缺失比率（八达岭、定陵、榆垓、东高村、永乐店、琉璃河、密云水库、密云）要高于市内，但市内几个站点的缺失，如前门、南三环、西直门、东四环、永定门也在 10% 以上。尽管国控站普遍低于非国控站，但国控站的平均缺失也在 5% 以上，其中顺义、奥体中心有 9%，怀柔有 8%。在大气污染呈现下降趋缓的情况下，这么高的数据缺失比例为正确地判断空气质量是否有效改善增加了不确定性。希望北京市环保局能够

采取行动，改善数据的缺失状况，尤其要重点检查 PM₁₀、臭氧和远郊站点的运行情况，同时也应该重视各区县非官员考核站点（如交通站前门、南三环、东四环、西直门北）的运行情况，因为它们也是北京市大气监测网的重要组成部分。

（二）监测站点合理布局

北京市目前有 35 个空气质量监测站（不包括美使馆，具体站点信息见图 1 和附表 1）。在空间上，中心区域（六环内加昌平和顺义的城区）共有 24 个站点，南部同河北交界处有 3 个，另外有 8 个分布在北部区域（延庆、密云和平谷各 2 个，怀柔 1 个，昌平北部 1 个）。

从人口密集度和大气污染对人体健康影响的角度看，在中心城区放置近 70% 的监测站点是有道理的，毕竟这一区域居住着北京近 80% 的人口。但从研究大气污染的传输和空间分布的角度看，这样做未必“经济实惠”。与此形成鲜明对比的是，目前南部的房山、大兴、通州三个区的站点布局过于稀疏（如图 32 所示），本报告中定义的南部区域就只有 3 个站点。

在六环内，站点虽多但分布并不均匀，比如在奥体中心到昌平、怀柔城区和顺义新城之间的扇形地带就没有站点，形成了监测的盲区。这个区块的人口密度并不低，其包括天通苑、北苑等人气很旺的居住区。另外介于顺义和平谷、顺义和通州的中间地带也应该安设站点。与此相对照的是城市中心地带的站点数量可能不需要那么密集，因为我们的研究发现五环内站点的数据间有很强的空间相关性。

从统计学实验设计的角度上看，为确保空气质量监测数据的有效性，应该在空气质量变化梯度大的区域放置较多的站点（比如南部、东部），在空气质量变化平缓的区域可以少放置站点。这样将极大化地提高大气环境监测的经济效率，提升环保监测经费的使用效率。据报道，北京市计划将站点的数量增加到 70 个。这将是一个非常好的机会来完善空气质量监测网的站点分布，使之更加合理，从而提高数据采集的效率。同时也要防止把新增加的站点多放在一个区县空气质量相对较好的地点（比如安置在一个区的北面，以利用南高北低的浓度分布特征），因为这样做将扭曲空气质量统计数据的客观代表性。我们建议北京市应对新增站点的位置设定进行科学的论证。

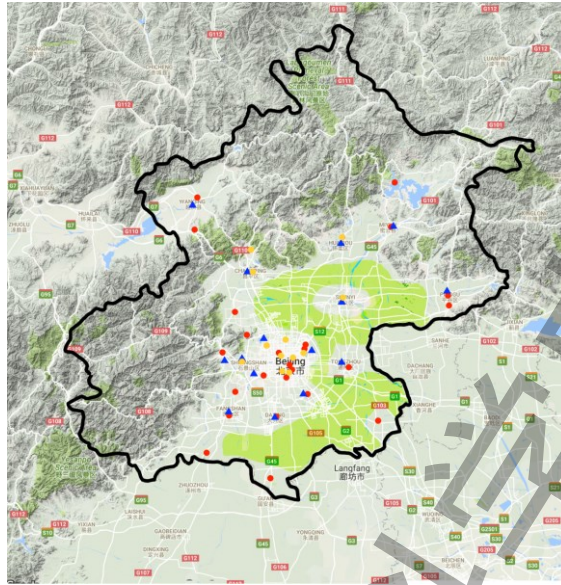


图 32：北京市现有监测站点布局。其中黄点代表国控站，红点代表非国控站，浅绿色代表稀疏区域。

最后我们建议将更多的国控站放置在南二环所处纬度以南的区域。目前北京 12 个国控站均在南二环的纬度以北。由于北京 $PM_{2.5}$ 浓度具有南高北低的空间分布特征，如此布局会低估北京 $PM_{2.5}$ 的浓度。在南二环以南布局国控站点，将会提高北京市度量大气污染浓度的客观性和代表性。

十一、能源分析

过度的化石类能源消费是我国正在面临的大气污染困境的根本原因，所以从这一困境解脱的有效方法应该是减少化石类能源（尤其是煤）的消耗。从 2001 年中国加入世贸组织到 2015 年，我国能源总消耗从 15.5 亿吨（标准煤）增加到 43 亿吨，其中煤炭消耗从 2001 年的 14.45 亿吨增加到 2016 年的 39.2 亿吨（2013 年峰值为 42.44 亿吨），增加了 171%；汽油消耗从 2001 年的 3597 万吨增加到 2014 年的 9776 万吨，柴油消耗从 7157 万吨增加到 17165 万吨，分别增长了 172%和 140%¹。

¹本文中的全国各省市煤炭消耗月度数据均基于中国煤炭资源网 <http://www.sxcoal.com/>。国家统计局网站提供煤炭消耗年度数据（更新至 2014 年）。全国汽油和柴油消耗量（年度）数据来源于国家统计局网站，目前也更新至 2014 年。

处于华北的北京市同世界钢铁首要产区河北省四面相邻，离中国第一产煤、炼焦炭大省山西只有太行山之隔，同中国第一用煤大省山东也只隔着河北，都属于华北地区。如图 33 所示，河北省的煤炭消耗在 2001 年只有 1.2 亿吨，到 2013 年达到峰值 3.2 亿吨。山东省自 2001 年以来一路增长，在 2016 年煤炭消耗达到了 4.3 亿吨，又创历史新高。

附图 1 给出了北京市自 2011 年以来不同行业的季度煤炭消耗量。北京的煤炭消费量中，电力行业占比是最高的，其煤耗量在冬季最高，这是由于冬季供暖所致。其它类煤耗包括散煤燃烧。北大大气环境团队的研究[9]表明散煤燃烧是大气污染的一个重要污染源。图 34 给出京津冀晋鲁豫四省二市自 1995 年以来的年度煤炭消耗量（按自然年）。从图 34 中我们可以看到北京的煤炭消耗自 2007 年（奥运会之前）开始持续减少，尤其是从 2013 年开始，减速加快。2013 年北京的煤炭消耗量是 2019 万吨，到 2015 年下降到 1724 万吨，减少了 15%；2016 年又进一步下降²。包含散煤燃烧的其它类，也从 2013 年的 647 万吨降到 2015 年的 293 万吨，降幅达 55%，2016 年又降至 107 万吨³。这些都体现了北京市实施“煤改气”和降低散煤燃烧的效果。大力减少煤炭消耗对大气污染防治的一个明显效果是二氧化硫的快速下降（如图 12 和图 13 所示），并促成减少 PM_{2.5} 组成成分之一的硫酸盐的含量。我们认为，煤耗量的下降是北京市近几年 PM_{2.5} 和二氧化硫下降的主要推动力之一。

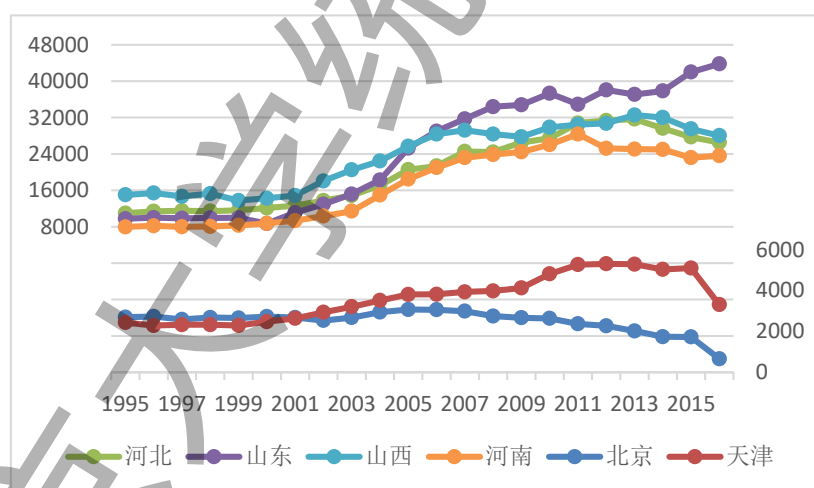


图 33: 京津冀晋鲁豫四省二市年度煤炭消费量(万吨)。1995-2014 年数据来自国家统计局网站，2015-2016 年数据来自中国煤炭资源网。

²由于统计口径不同，由中国煤炭资源网提供的 2016 年的北京年度煤炭消费量为 660 万吨，这一数字可能过低。我们建议国家提供更详细的能源统计数据，这对及时研判环保政策、排放与污染之间的关系起着重要作用。

³这一数字可能低估。

由于大气污染具有很强的区域传输性，我们在研究北京市的大气污染时也要考虑河北省的能源消费。河北省 2013 年至 2015 年的煤炭消费是北京的 15-16 倍⁴。附图 2 给出了河北省不同行业季度煤炭消耗量。河北省的最主要耗煤行业为电力和冶金，这两个行业占总耗煤量的 70-80%。从 2013 年至 2015 年，河北省的年度煤炭消费量下降了 12.5%，其中电力行业耗煤量下降了 1.4%，冶金行业下降了 9.9%，其它类（含散煤）耗煤量下降了 37.6%。2016 年春季和夏季，河北省耗煤量又比 2015 年同期分别下降了 5%和 7.6%，其中电力行业耗煤量同比下降了 2.2%和 2.5%，而冶金行业的耗煤量下降了 2.1%和 4.8%；然而 2016 年秋季的总耗煤量同比增加了 3.2%，其中电力行业同比上升 12.7%，冶金行业同比上升 5.2%。这应该与北京和河北一些城市的 PM_{2.5} 浓度在 2016 年秋季开始回升有关。

每年消耗 2.6 亿吨煤的河北省并不是华北地区煤炭消费量最多的，同处于华北地区的晋鲁豫三省也都是煤炭消费大户。山东 2015 年和 2016 年消耗量均超过 4 亿吨，其中 2016 年上升到 4.37 亿吨，是河北的 1.6 倍。中国产煤第一的山西省的消费量略高于河北，河南略低于河北。所以晋鲁豫三省的煤炭年消费量是京津冀的 3 倍以上。

京津冀三省市从 2013 年至 2016 年煤炭消耗量从 3.9 亿吨下降到 3 亿吨，下降了 21.7%。但京津冀晋鲁豫四省二市从 2013 年的 13.4 亿吨到 2016 年的 12.6 亿吨，仅下降了 5.8%。山东省煤耗量的持续上升是影响华北地区煤炭下降幅度的主要原因。环北京的华北地区每年 13 亿吨的巨量燃煤是北京乃至华北地区大气污染的主要症结之一。华北地区减煤运动的下一步也应该重点考虑山东、山西和河南。

十二、结论

图 34 展示了北京市不同区域 2013-2016 年六种污染物的年均值浓度的折线图。它宏观地展示了每种污染物在过去四年的年度变化趋势。通过分析图 34 的结果，同时结合我们在前面几节对北京六种污染物的空气质量数据结合气象数据进行的统计学分析，我们对北京过去四年大气污染治理的进程和目前的空气质量状况作出如下的结论：

⁴如按 2016 年北京煤耗总量为 660 万吨，河北是北京的 40 倍。但是 660 万吨可能低估，见注 3。

1. 北京市目前的 $PM_{2.5}$ 水平相比 2013 年和 2014 年的浓度水平已经有了显著下降。这一下降主要发生在 2015 年。在中心、北部和南部区域，2015 年的 $PM_{2.5}$ 浓度比 2014 年分别有 12.4%、16.3% 和 8.7% 的下降。尽管环保部门根据 11 个国控站点原始浓度计算得到的 2016 自然年的 $PM_{2.5}$ 浓度比 2015 年下降了 9.9%，但我们的研究表明，在中心区域 2016 “季节年” 比 2015 年增加了 1.4%，其中春夏两季的 $PM_{2.5}$ 水平同 2015 年同季节持平，但秋季有 3.9% 的显著增加，冬季上升幅度为 3.1%。**这说明 2016 年的实际 $PM_{2.5}$ 浓度与 2015 年相比有回升。**
2. 北京市近几年大气环境改善的一个亮点是二氧化硫浓度的大幅度下降。从 2015 年开始，在夏秋两季，从南到北三个区域的二氧化硫浓度均已进入个位数时代。这反映了北京市自 2014 年开始实施的“煤改气”和“煤改电”使得煤炭消费量大幅下降，在减硫方面卓有成效。二氧化硫的大幅改善为其它污染物治理提供了成功案例和经验。
3. 北京市 PM_{10} 浓度在这四年中也有一定的改善，这主要是由 PM_{10} 中的 $PM_{2.5}$ 的改善促成的。但在 PM_{10} 中直径大于 2.5 微米的颗粒物 $PM_{10-2.5}$ 的浓度并没有下降。这说明北京市在控制 $PM_{2.5}$ 浓度的同时，也要注重道路扬尘和建筑工地防尘的管理。
4. 过去四年北京市二氧化氮和一氧化碳的污染状况改善有限，在南部区域甚至有增加的态势；臭氧整体呈增加趋势。我们认为，北京过去几年 $PM_{2.5}$ 浓度下降主要是二氧化硫减少所驱动的。在北京二氧化硫浓度已经显著下降，在无法控制污染物从外部输入的前提下，要进一步降低北京的 $PM_{2.5}$ 浓度，必须在氮氧化物和一氧化碳的减排上下功夫。也就是说，北京下一步 $PM_{2.5}$ 的下降空间应该重点放在对机动车排放的管控方面。这将直接减少氮氧化物（含二氧化氮）、一氧化碳和 $PM_{2.5}$ 的浓度，间接减少二次化学反应所产生的 $PM_{2.5}$ ，同时又能遏制臭氧增加的势头。北京在进一步提高油品质量的同时，还应该重点治理交通拥堵，因为机动车的低速行驶会产生更多的氮氧化物和一氧化碳。考虑到已有 550 万的机动车保有量，北京市应该借鉴世界其它城市（如新加坡、伦敦）在治理交通拥堵上的经验，利用经济手段调控车辆行驶速度。另外，路边停车（尤其是环路辅路上的停车）也是影响车速的一个原因。北京市应该多建停车场，让车停到其中而非道路边，以此减轻道路堵塞。

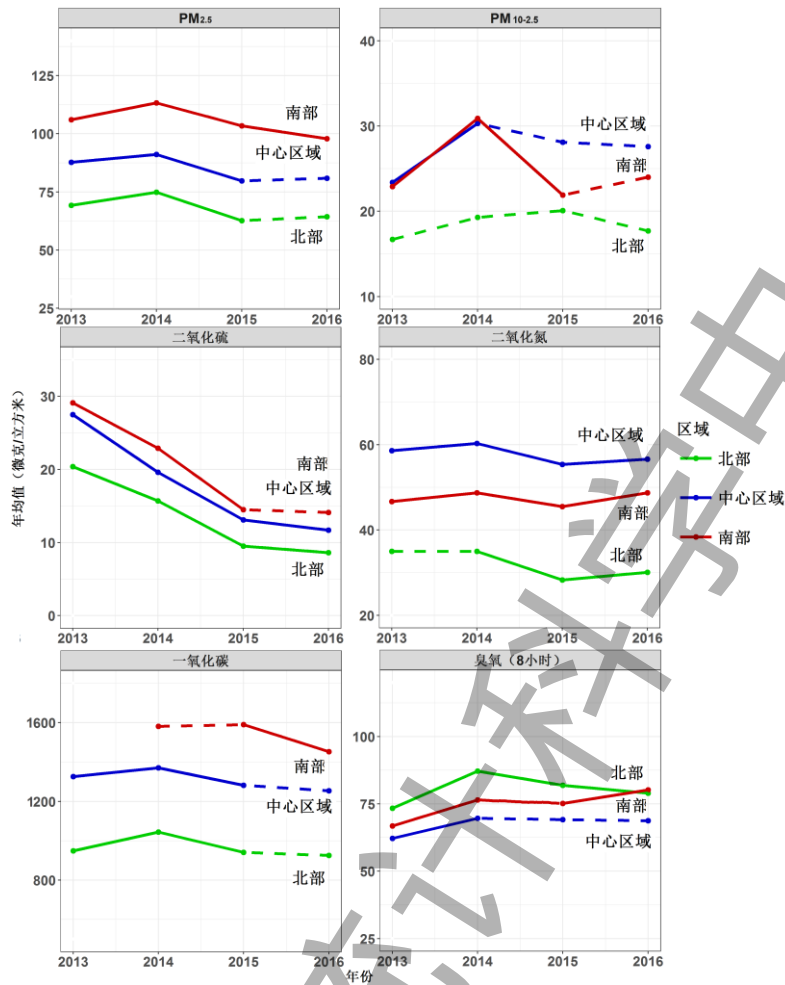


图 34：北京市不同区域六种污染物年均值浓度（微克/立方米）比较。实线代表相比上一年有显著（5%水平）减少或增加，虚线代表相比上一年没有显著变化。

- 北京市的空气污染受周边地区传输的影响很大。我们在去年发布的《五城市报告》中指出促成北京 2015 年空气质量显著好转的原因有两个：一个是由于 2015 年初开始实施的更严格的大气环境监管，另一个是中国自 2014 年开始的经济放缓。这两个因素一起导致京津冀近几年煤炭消耗的显著下降。但是最新的京津冀煤炭消耗和钢铁产量数据显示，河北省 2016 年秋季煤炭消耗在经历 3 年下降后首次开始反弹增加，2016 年河北钢和铁的产量均创出历史新高。（具体数据见将发布的《京津冀 2013-2016 空气质量报告》[7]）。这是 2016 年秋冬两季北京 PM_{2.5} 大致呈现增加趋势的原因，体现了经济回升对污染的贡献。
- 展望 2017 年大气污染防治的形势，我们认为在经济回升期的大气环境治理将更加具有挑战。经济进一步的回暖将直接导致对钢铁、水泥、化工产品等需求的加大。作为中国

重工业的首要区域，华北地区（也含山东、河南、山西）的煤炭、柴油、汽油的消耗势必增加，现有减排监管措施下的 $PM_{2.5}$ 和其它主要污染物减少的空间势必减小，2017 年的大气环境治理也势必难于 2016 年。如果说 2015 年大气环境治理在经济放缓的背景下是“顺水行船”，那么 2017 年将是“逆水行舟”。要想在 2015 年和 2016 年的水平上进一步减少 $PM_{2.5}$ 及其它污染物的浓度，**更严格的环境监管和更有效的减排措施无疑将是唯一可靠的手段**。而这应当回到空气质量监管的科学问题本身：提高监测数据的质量是当务之急，建立更有效的监测站点格局势在必行，采用更加科学、精准的空气品质评估方法，是保卫蓝天不可回避的选择！

北京大学统计学系

参考文献

- [1] 北京大学统计科学中心和光华管理学院环境统计课题组(2015年3月)。空气质量评估报告(一): 北京城区 2010-2014 年 PM_{2.5} 污染状况研究。
(http://www.stat-center.pku.edu.cn/Stat/Index/research_show/id/169)
- [2] 北京大学统计科学中心和光华管理学院环境统计课题组(2016年3月)。空气质量评估报告(二): 中国五城市空气污染状况之统计学分析。
(http://www.stat-center.pku.edu.cn/Stat/Index/research_show/id/215)
- [3] Liang, X., Zou, T., Guo, B., Li, S., Zhang, H., Zhang, S., Huang, H., and Chen, S. X. (2015). Assessing Beijing's PM_{2.5} pollution: severity, weather impact, APEC and winter heating. *Proceedings of the Royal Society A*, 471(2182), 20150257.
(<http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/royprsa/471/2182/20150257.full.pdf>)
- [4] Liang, X., Li, S., Zhang, S., Huang, H., and Chen, S. X. (2016). PM_{2.5} data reliability, consistency and air quality assessment in five Chinese cities. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121, doi: 10.1002/2016 D024877.
(<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2016JD024877/epdf>)
- [5] Zhang, S., Guo, B., Wang, H., Lin, W., and Chen, S. X. (2017). Air quality assessment with spatial and temporal adjustment around Beijing. Working Paper, Center for Statistical Science, Peking University.
- [6] 国发(2013)37号, 大气污染防治行动计划。简称《大气十条》。
- [7] 北京大学统计科学中心和光华管理学院环境统计课题组(2017年)。空气质量评估报告(四): 京津冀 2013-2016 年区域污染状况研究。
- [8] Guo, S., Hu, M., Zamora, M. L., et al (2014). Elucidating severe urban haze formation in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(49): 17373-17378.
- [9] Liu, J., Mauzerall, D. L., Chen, Q., et al (2016). Air pollutant emissions from Chinese households: A major and underappreciated ambient pollution source. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(28): 7756-7761.

附录

附表 1：北京市污染物监测站点分布情况及与气象站点匹配情况。

匹配气象站 1 为 2015 年 2 月及其之前匹配的气象站，匹配气象站 2 为 2015 年 3 月及其之后匹配的气象站。红色为国控站。

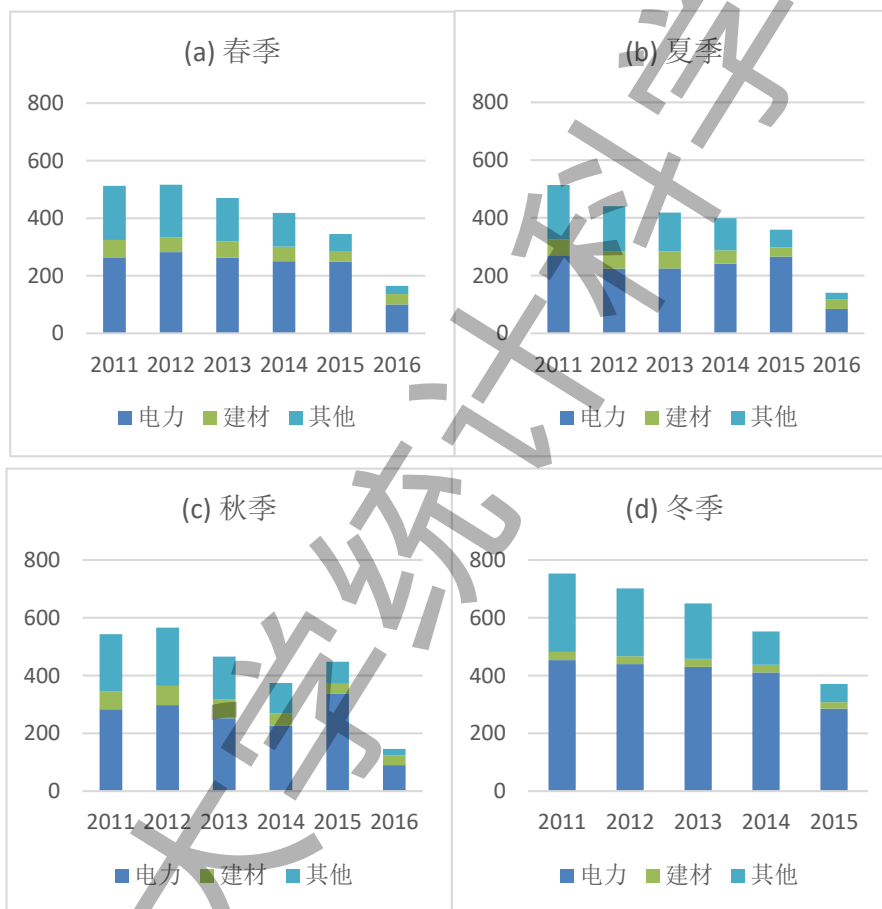
| 所属区域 | 所属于子区域 | 污染物监测站 | 站点类型 | 匹配气象站 1 | | 匹配气象站 2 | |
|------|--------|--------|-------|---------|-------|---------|-----|
| | | | | 代码 | 名称 | 代码 | 名称 |
| 中心区域 | 西北 | 奥体中心 | 国控站 | 54399 | 海淀 | 54511 | 南郊 |
| | | 北部新区 | 省控站 | 54499 | 昌平 | 54499 | 昌平 |
| | | 昌平 | 国控站 | 54499 | 昌平 | 54499 | 昌平 |
| | | 官园 | 国控站 | 54399 | 海淀 | 54511 | 南郊 |
| | | 古城 | 国控站 | 54513 | 石景山 | 54505 | 门头沟 |
| | | 门头沟 | 省控站 | 54505 | 门头沟 | 54505 | 门头沟 |
| | | 万柳 | 国控站 | 54399 | 海淀 | 54511 | 南郊 |
| | | 西直门北 | 省控站 | 54399 | 海淀 | 54511 | 南郊 |
| | | 植物园 | 省控站 | 54399 | 海淀 | 54499 | 昌平 |
| | | 东四 | 国控站 | 54433 | 朝阳 | 54511 | 南郊 |
| | 东北 | 东四环 | 省控站 | 54433 | 朝阳 | 54511 | 南郊 |
| | | 美国大使馆 | 省控站 | 54433 | 朝阳 | 54511 | 南郊 |
| | | 农展馆 | 国控站 | 54433 | 朝阳 | 54511 | 南郊 |
| | | 顺义 | 国控站 | 54398 | 顺义 | 54398 | 顺义 |
| | | 大兴 | 省控站 | 54594 | 大兴 | 54594 | 大兴 |
| | 西南 | 房山 | 省控站 | 54596 | 房山 | 54596 | 房山 |
| | | 丰台 | 省控站 | 54514 | 丰台 | 54511 | 南郊 |
| | | 南三环 | 省控站 | 54514 | 丰台 | 54511 | 南郊 |
| | | 万寿西宫 | 国控站 | 54514 | 丰台 | 54511 | 南郊 |
| | | 云冈 | 省控站 | 54596 | 房山 | 54596 | 房山 |
| | | 前门 | 省控站 | 54433 | 朝阳 | 54511 | 南郊 |
| | | 天坛 | 国控站 | 54433 | 朝阳 | 54511 | 南郊 |
| | 东南 | 通州 | 省控站 | 54431 | 通州 | 54431 | 通州 |
| | | 亦庄 | 省控站 | 54594 | 大兴 | 54511 | 南郊 |
| | | 永定门 | 省控站 | 54514 | 丰台 | 54511 | 南郊 |
| | 南部地区 | 琉璃河 | 省控站 | 54596 | 房山 | 54596 | 房山 |
| 永乐店 | | 省控站 | 54431 | 通州 | 54431 | 通州 | |
| 榆垓 | | 省控站 | 54594 | 大兴 | 54594 | 大兴 | |
| 北部地区 | 八达岭 | 省控站 | 54406 | 延庆 | 54406 | 延庆 | |
| | 定陵 | 国控站 | 54499 | 昌平 | 54499 | 昌平 | |
| | 东高村 | 省控站 | 54424 | 平谷 | 54424 | 平谷 | |
| | 怀柔 | 国控站 | 54419 | 怀柔 | 54419 | 怀柔 | |
| | 密云 | 省控站 | 54416 | 密云 | 54416 | 密云 | |
| | 密云水库 | 省控站 | 54416 | 密云 | 54416 | 密云 | |
| | 平谷 | 省控站 | 54424 | 平谷 | 54424 | 平谷 | |
| | 延庆 | 省控站 | 54406 | 延庆 | 54406 | 延庆 | |

附表 2：2014-2016 年北京市 36 个污染监测点 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 数据缺失比例前 25 名。

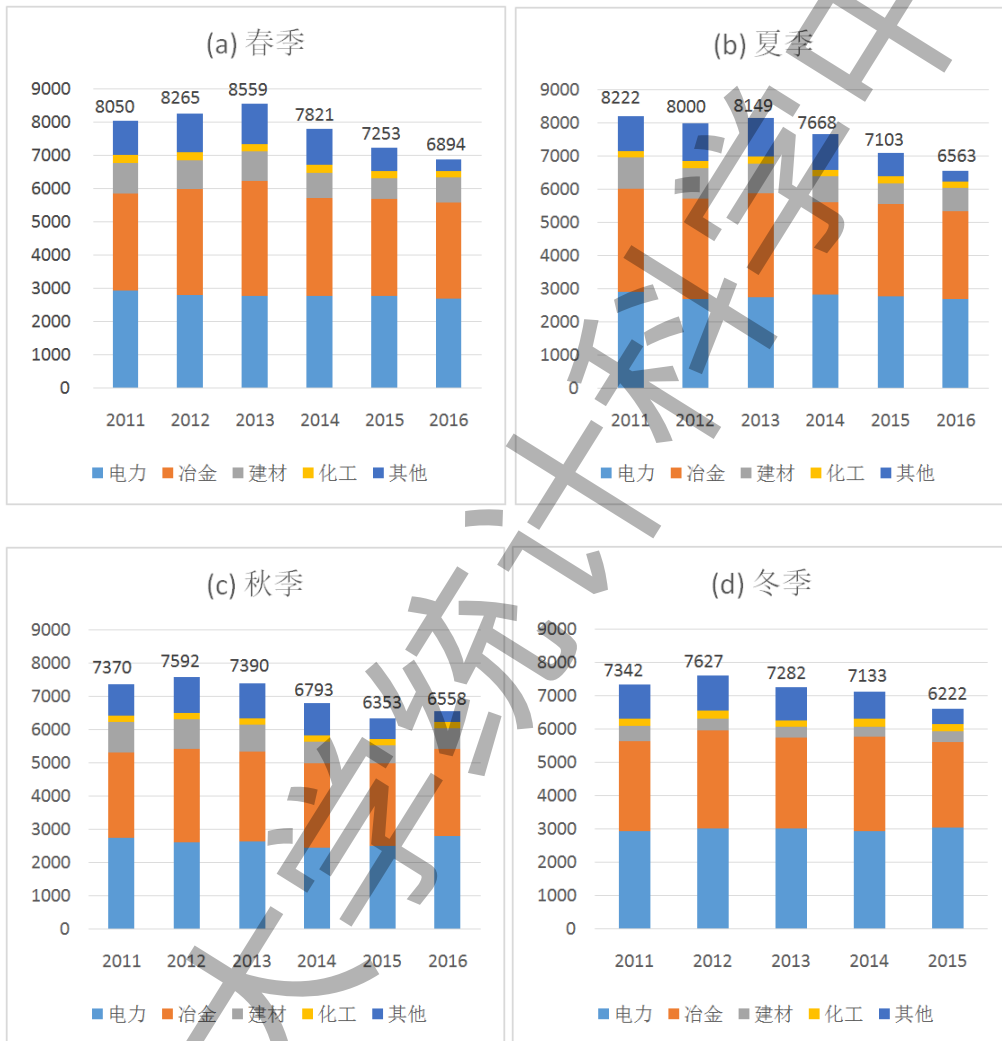
| 排名 | PM _{2.5} | | PM ₁₀ | |
|----|-------------------|------|------------------|------|
| | 站点 | 缺失比例 | 站点 | 缺失比例 |
| 1 | 八达岭 | 0.14 | 东高村 | 0.47 |
| 2 | 榆垓 | 0.10 | 永乐店 | 0.47 |
| 3 | 前门 | 0.09 | 八达岭 | 0.41 |
| 4 | 南三环 | 0.08 | 密云水库 | 0.41 |
| 5 | 琉璃河 | 0.07 | 房山 | 0.40 |
| 6 | 西直门北 | 0.07 | 琉璃河 | 0.40 |
| 7 | 植物园 | 0.07 | 平谷 | 0.40 |
| 8 | 北部新区 | 0.06 | 榆垓 | 0.40 |
| 9 | 东四环 | 0.06 | 前门 | 0.39 |
| 10 | 密云水库 | 0.06 | 北部新区 | 0.37 |
| 11 | 通州 | 0.06 | 永定门 | 0.37 |
| 12 | 永乐店 | 0.06 | 延庆 | 0.36 |
| 13 | 大兴 | 0.05 | 奥体中心 | 0.35 |
| 14 | 东高村 | 0.05 | 密云 | 0.35 |
| 15 | 丰台 | 0.05 | 顺义 | 0.35 |
| 16 | 美国大使馆 | 0.05 | 亦庄 | 0.35 |
| 17 | 门头沟 | 0.05 | 植物园 | 0.35 |
| 18 | 平谷 | 0.05 | 大兴 | 0.33 |
| 19 | 亦庄 | 0.05 | 东四环 | 0.33 |
| 20 | 永定门 | 0.05 | 丰台 | 0.33 |
| 21 | 云冈 | 0.05 | 怀柔 | 0.33 |
| 22 | 奥体中心 | 0.04 | 通州 | 0.33 |
| 23 | 房山 | 0.04 | 东四 | 0.32 |
| 24 | 密云 | 0.04 | 天坛 | 0.31 |
| 25 | 延庆 | 0.04 | 西直门北 | 0.30 |

附表3：2014-2016年北京市36个污染监测点二氧化硫、二氧化氮、一氧化碳和臭氧和数据缺失比例前25名。

| 排名 | 二氧化硫 | | 二氧化氮 | | 一氧化碳 | | 臭氧 | |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 站点 | 缺失比例 | 站点 | 缺失比例 | 站点 | 缺失比例 | 站点 | 缺失比例 |
| 1 | 八达岭 | 0.12 | 八达岭 | 0.13 | 八达岭 | 0.13 | 八达岭 | 0.19 |
| 2 | 前门 | 0.08 | 永乐店 | 0.09 | 南三环 | 0.11 | 东高村 | 0.17 |
| 3 | 东四环 | 0.07 | 前门 | 0.08 | 前门 | 0.08 | 北部新区 | 0.15 |
| 4 | 琉璃河 | 0.07 | 琉璃河 | 0.07 | 榆堡 | 0.07 | 南三环 | 0.14 |
| 5 | 南三环 | 0.07 | 门头沟 | 0.07 | 植物园 | 0.07 | 西直门北 | 0.14 |
| 6 | 西直门北 | 0.07 | 密云水库 | 0.07 | 东四环 | 0.06 | 前门 | 0.13 |
| 7 | 榆堡 | 0.07 | 南三环 | 0.07 | 琉璃河 | 0.06 | 榆堡 | 0.13 |
| 8 | 植物园 | 0.06 | 榆堡 | 0.07 | 门头沟 | 0.06 | 琉璃河 | 0.12 |
| 9 | 东高村 | 0.05 | 植物园 | 0.07 | 西直门北 | 0.06 | 永乐店 | 0.12 |
| 10 | 门头沟 | 0.05 | 东四 | 0.06 | 大兴 | 0.05 | 植物园 | 0.12 |
| 11 | 密云水库 | 0.05 | 西直门北 | 0.06 | 东高村 | 0.05 | 东四环 | 0.11 |
| 12 | 通州 | 0.05 | 亦庄 | 0.06 | 密云 | 0.05 | 亦庄 | 0.11 |
| 13 | 亦庄 | 0.05 | 北部新区 | 0.05 | 密云水库 | 0.05 | 大兴 | 0.10 |
| 14 | 永乐店 | 0.05 | 东高村 | 0.05 | 通州 | 0.05 | 房山 | 0.10 |
| 15 | 北部新区 | 0.04 | 东四环 | 0.05 | 亦庄 | 0.05 | 丰台 | 0.10 |
| 16 | 大兴 | 0.04 | 房山 | 0.05 | 云冈 | 0.05 | 门头沟 | 0.10 |
| 17 | 房山 | 0.04 | 顺义 | 0.05 | 北部新区 | 0.04 | 密云 | 0.10 |
| 18 | 丰台 | 0.04 | 通州 | 0.05 | 房山 | 0.04 | 密云水库 | 0.10 |
| 19 | 密云 | 0.04 | 云冈 | 0.05 | 丰台 | 0.04 | 通州 | 0.10 |
| 20 | 平谷 | 0.04 | 奥体中心 | 0.04 | 平谷 | 0.04 | 永定门 | 0.10 |
| 21 | 天坛 | 0.04 | 大兴 | 0.04 | 顺义 | 0.04 | 云冈 | 0.10 |
| 22 | 延庆 | 0.04 | 丰台 | 0.04 | 延庆 | 0.04 | 平谷 | 0.09 |
| 23 | 永定门 | 0.04 | 怀柔 | 0.04 | 永定门 | 0.04 | 延庆 | 0.09 |
| 24 | 云冈 | 0.04 | 密云 | 0.04 | 永乐店 | 0.04 | 顺义 | 0.05 |
| 25 | 奥体中心 | 0.03 | 平谷 | 0.04 | 奥体中心 | 0.03 | 万柳 | 0.05 |



附图 1: 北京市各行业季度煤炭消耗总量 (万吨)。数据来源: 中国煤炭资源网。



附图 2：河北省各行业季度煤炭消耗总量（万吨）。数据来源：中国煤炭资源网。

课题组成员



张澍一，北京大学光华管理学院博士研究生，主要完成人



郭斌，西南财经大学统计研究中心、统计学院助理教授，主要完成人



王恒放，Iowa State University 统计系博士研究生



何婧，西南财经大学统计学院助理教授



董安澜，北京大学统计科学中心博士研究生



许子平，北京大学元培学院本科生



林伟，北京大学数学院概率统计系，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、统计科学中心讲席教授，课题负责人

致谢

本报告得到了国家重点研发计划《大气污染成因与控制技术研究专项》项目2016YFC0207700的资助及北京大学统计科学中心、北京大学光华管理学院的支持。感谢青悦开放环境数据中心，在意空气 App (<http://air.fresh-ideas.cc/>)，网站 pm25.in，中国环保部网站，美国驻华使/领馆为本次报告提供数据。感谢北京大学荣誉教授刁锦寰先生，中国科学院数学与系统科学研究院马志明院士的长期指导。感谢中国科学院大气物理研究所王自发研究员，北京大学环境科学与工程学院张远航院士和朱彤教授，中国环境科学研究院柴发合研究员、高健研究员在本项目研究过程中提出的建议。感谢伦敦政治经济学院姚琦伟教授，爱荷华州立大学气象系吴小青教授，罗格斯大学陈嵘教授的交流讨论。感谢北京大学统计科学中心黄辉、徐敏亚、涂云东、宋晓军博士，澳洲国立大学邹涛博士，北京大学梁萱、陈磊、杨兵、张爽、黄家盛、梁德才、刘慧杰、孔祥顺同学，爱荷华州立大学张豪哲同学的有益研讨。感谢王文庆先生在数据采集与分析方面提供了协助，北京大学统计科学中心张卫香、常珂琪、井天景提供有效的后勤支持。感谢牟修锐女士，光华管理学院莫舒君、晏琴、王兔然、庞立春在报告写作过程中提供的中文编辑及校对服务。再次感谢纽约姚佳妮女士为本报告设计封面。

版权说明：本报告版权属于北京大学统计科学中心和光华管理学院环境统计课题组，受法律保护。任何转载、摘编或使用本报告文字和图表，均应注明“来源于北京大学统计科学中心和光华管理学院环境统计课题组”。

北京大学统计科学中心
www.stat-center.pku.edu.cn

北京大学光华管理学院
www.gsm.pku.edu.cn

二零一七年三月