

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

为了蓝天

让我们用数据解读污染



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>

前言

这份报告是北京大学光华管理学院和统计科学中心共同发布的第二份关于中国空气质量的报告，第一份报告是在2015年3月发布的《空气质量评估报告：北京城区2010-2014年PM_{2.5}污染状况研究》[1]（简称《北京城区研究报告》）。

由于受当时数据的局限，《北京城区研究报告》仅仅对美国大使馆PM_{2.5}数据进行了分析。我们深知，一个站点的数据并不能完全反映一个城市的污染状况，因此在这次发布的报告中，在北京，我们将观测站点扩展为四个，除了美国大使馆（简称美使馆）外，还对美使馆附近的三个环保部站点的PM_{2.5}数据进行了分析，以确保数据的科学性和准确性。同时，我们还将研究范围从北京扩展至中国的其他区域，并选取了四个颇具代表性的城市：上海、广州、成都和沈阳。在这四个城市中，则各自选用了美国领事馆（简称美领馆）和两个与其邻近的环保部站点的数据。

这份报告的观测周期为2013年1月至2015年12月，分别对这五大城市的美国大使馆或领事馆（简称美国使/领馆），以及其邻近的中国环保部监测站点的PM_{2.5}逐小时数据，结合气象数据，进行了对比分析。通过美国使/领馆与环保部两个独立数据源的交叉验证，来分析中国主要城市的空气质量。同时，我们运用现代统计学的方法，计算出了五大城市自2013年以来在可比气象条件下的PM_{2.5}月度/半年度/年度的均值浓度、中位数浓度¹和90%分位数浓度²。我们利用这些空气质量统计指标，对近几年五大城市的空气质量进行量化分析，提炼出了各城市PM_{2.5}污染的主要特征和动态趋势，以便能为评估中国空气质量全局提供一个观察窗口。

在这份报告中，我们也试图回答公众普遍关心的两大问题：一是中国环保部发布的空气污染数据的质量如何，是否权威可靠；另一个则是，近几年中国主要城市的空气污染状况，是否在持续恶化，还是有所好转。针对这两大问题，本报告将从统计学的角度，用数据进行分析解答，以确保结论的公正性和客观性。

¹中位数浓度：是指有50%的PM_{2.5}数值低于该浓度，50%的数值高于该浓度，它刻画了污染程度的中间水平。

²90%分位数浓度：是指有90%的PM_{2.5}数值低于该浓度，10%的数值高于该浓度，它刻画了最严重的10%的污染程度。

目录

一、背景.....	3
二、五城市的地理和气候条件.....	4
三、数据来源.....	5
四、五城市空气污染的基本统计描述.....	6
五、美国使/领馆与其邻近的环保部站点数据的对比..	9
六、风和降水的影响.....	11
七、剔除气象因素后的污染浓度.....	16
八、年度污染浓度变化.....	20
九、冬季供暖对 PM _{2.5} 的影响.....	24
十、五城市空气质量综合比较.....	27
十一、能源、经济与地形对污染的影响分析.....	32
十二、结论.....	35
参考文献:	37
附录:	39

一、背景

中国过去 20 多年的快速工业化，对促进中国经济增长发挥了重要作用，但也极大地增加了对化石类能源的消耗。国家统计局数据[2]显示，自 2001 年加入世界贸易组织以来，中国的能源总消耗从 2001 年的 15.55 亿吨标准煤迅速提高到了 2014 年的 42.6 亿吨标准煤。这意味着，过去 13 年里中国总的能源消耗增加了 1.75 倍。如此巨量的能源消耗及其伴随着的污染物排放，给中国大气环境带来了沉重的压力[3]。中国东部、中部地区及四川、重庆等地区的污染排放，已经远远超过了自然环境所能承载的上限。与此同时，大气污染防治与环境执法监管的力度，却远远落后于能源消耗和污染排放的增加速度。这两方面的因素，也是导致中国一些人口密集区域备受雾霾天气袭扰的关键原因。

作为中国政治经济发展中非常重要的五个大型城市，北京、上海、广州、成都和沈阳，分别位于京津冀、长三角、珠三角、川渝和辽宁经济区。这五大区域的经济总量占据全国总量的 50% 以上，能源消耗量巨大，也是大气污染和雾霾天气灾害较为严重的区域。雾霾的主要成分 $PM_{2.5}$ 对人类健康有着极大的危害[4-6]，也不同程度地影响着农业、生态、气候和居民的生活质量[7-9]，因此研究中国这五个主要城市 $PM_{2.5}$ 的污染状况及其影响因素，将为中国大气污染的预防和治理提供重要的实证依据。

要量化 $PM_{2.5}$ 污染的严重程度，首先需要可靠的数据支持。中国环保部自 2013 年 1 月开始，正式对全国 74 个城市的 $PM_{2.5}$ 污染状态进行实时播报。从 2015 年 1 月，实时播报范围扩大到 338 个城市。美国驻华大使馆从 2008 年开始发布北京的 $PM_{2.5}$ 污染数据，并分别于 2011 年 11 月、12 月，2012 年 6 月和 2013 年 4 月，开始发布其在广州、上海、成都和沈阳的美领馆所在地的 $PM_{2.5}$ 数据。这两方发布的数据，是目前公众判断空气污染程度最常用的两大数据源。

但是，自 2008 年以来，时有国外媒体怀疑中国环保部大气污染数据的真实性。例如《华尔街日报》[10]在 2012 年 1 月 23 日的一篇报道中称，北京官方的 $PM_{2.5}$ 数据与美国大使馆的数据不一致。这也不完全是空穴来风，因为有研究表明，2013 年以前，中国某些城市的 PM_{10} 数据存在人为干扰的迹象。Andrews[11]在其 2008 年发表的研究中发现北京市的蓝天指数同公布的 PM_{10} 数据存在不一致。Chen 等[12]发现中国许多城市的 PM_{10} 的统计分布在数值

为 100 处有不连续的跳跃，这一跳跃在统计学上找不到解释，唯一的解释是 PM_{10} 等于 100 是定义蓝天的界值。Ghanem 和 Zhang[13] 独立验证了[12]关于 PM_{10} 数据人为干扰的问题。

需要强调的是，大气污染数据的可靠性是大气污染防治的重要保障。因此，本报告的一个目的是运用统计学方法交叉验证美国使/领馆和邻近的环保部站点数据的可靠性。只有大气污染数据的可靠性得以保证，基于真实和高质量数据的后续分析的结果才有价值，才能真实地反映一个城市大气的污染程度。

为了交叉验证数据的可靠性，我们分别使用美国使/领馆和邻近环保部站点两个独立数据源的 $PM_{2.5}$ 数据，分析和比较了描述大气污染不同状态的统计量的一致性和相关系数。同时，在剔除气象因素对数据造成的影响后，使用两个数据源的数据分别计算出各站点的 $PM_{2.5}$ 的月均值和百分位数浓度。通过多方面、多层次的相互对比和相关性分析，我们发现，使用这两个数据源所得到的空气质量评价，有着比较高的一致性。这可以在一定程度上，为公众对中国主要城市空气污染数据质量的评估提供一个参考依据。

同时，我们使用美国使/领馆和邻近的环保部站点数据，量化分析了近年来五个城市 $PM_{2.5}$ 浓度的基本分布状态，提炼出了各城市空气污染的主要特征和动态趋势，并对五城市的相对污染程度给出了合理的比较。

二、五城市的地理和气候条件

从地理条件来看，北京位于华北平原的西北角，西临太行山脉，北靠燕山山脉，地形并不利于大气污染物的扩散。而北京东面和南面的华北平原上分布着大量的重工业企业。因此在气象扩散条件不利时，例如在持续的南风或者无风、高湿的静稳天气下，极易发生污染物输入或是为 $PM_{2.5}$ 的二次化学生成提供有利条件。成都位于四川盆地的西部，其西面和北面都有高山，扩散条件差，极易形成污染物的堆积。而与北京和成都相比，上海、广州和沈阳的地形较为开阔，大气污染物较易扩散。其中上海和广州离海较近，污染物容易被海风吹散。广州靠近北回归线，常年气温较高，大气边界层高度也高于其它城市，易于稀释大气污染物。

从气候条件看，北京属于温带半湿润季风型大陆性气候，春秋冬三季较为干燥，且多北风，其实是不利于 $PM_{2.5}$ 形成的，而夏季有较多的降水，对大气污染也有一定的清洗作用。成都为亚热带湿润季风气候，常年潮湿、风小，极易形成大气悬浮颗粒物。沈阳则为温带半湿润大陆性气候，与北京类似，较为干燥且多风。广州与上海同为亚热带季风气候，虽然空气湿润但多风，并且降水多。如第六节数据分析所示，风和降水都有利于减少 $PM_{2.5}$ 。

三、数据来源

如前所述，本报告使用的 $PM_{2.5}$ 数据，来自五个城市的美国使/领馆及其邻近的环保部站点。环保部的数据始于 2013 年 1 月 1 日，大部分站点数据流较为稳定，但部分站点的个别月份数据严重缺失。另一方面，除了沈阳美领馆是 2013 年 4 月底才开始记录 $PM_{2.5}$ 数据以外，其它城市的美国使/领馆均早于 2013 年 1 月开始收集和公布。但由于初期几个月美国使/领馆的数据观测并不稳定，数据缺失较多，因此我们使用的五城市数据分别起始于：北京，2010 年 1 月 1 日；上海，2012 年 1 月 1 日；广州，2012 年 4 月 1 日；成都，2012 年 6 月 1 日；沈阳，2013 年 5 月 1 日。

图 1 显示了五个城市美国使/领馆以及邻近的环保部站点的地理位置。其中，除了广州的市监测站离美领馆较远（8 公里）外，其他环保部站点均与美国使/领馆的距离不超过 6 公里。对于所有站点，我们研究的数据均截止于 2015 年 12 月 31 日 23 点。需要指出的是，美国使/领馆只公布 $PM_{2.5}$ 的相关数据，而我国环保部站点则会同时公布其他主要污染物的数据，如 PM_{10} 、CO、 NO_2 、 SO_2 和 O_3 的逐小时浓度。

如我们在此前发布的《北京城区研究报告》[1]中所强调的，气象条件对 $PM_{2.5}$ 的浓度变化影响显著。因此，在这次报告中我们也重点观察了气象数据。气象数据主要来源于各个城市的机场观测站。其中，北京首都机场的数据来自于 <http://weather.nocrew.org/>；上海、成都、沈阳的机场数据皆来自于 <https://weatherspark.com/>；广州较为特殊，由于白云机场与美领馆及邻近环保部监测站分别处于白云山的两侧，气象条件会相差较大，所以我们采用的是位于污染监测站点同一侧的国家气象局 59287 站点的数据。图 1 也显示了五个城市气象数据所在站点的位置。本报告使用的气象变量包括：逐小时气温、气压、露点温度、风向、风速以及降水。由于相对湿度可以由气温和露点温度完全决定，所以无需考虑。

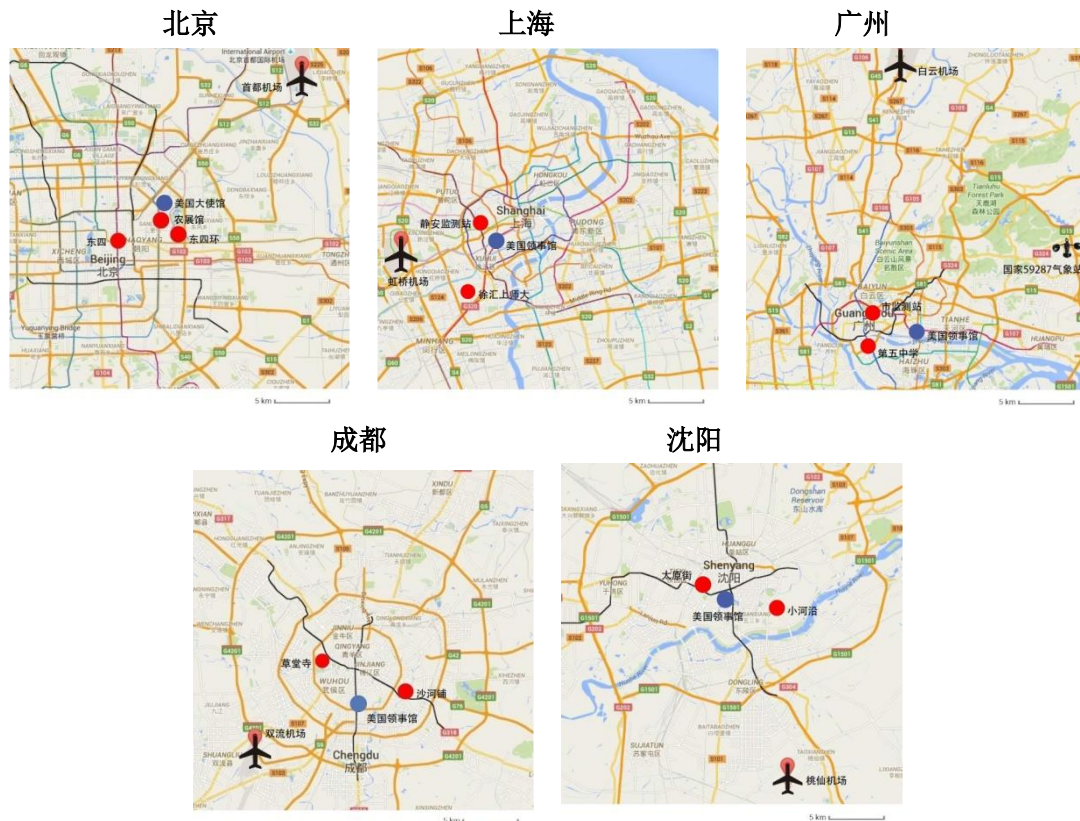


图 1: 五城市美国使/领馆 (蓝色) 和邻近的环保部站点 (红色) 及相应气象站的地理位置图, 飞机符号代表各城市机场所在位置 (黑色)

四、五城市空气污染的基本统计描述

首先, 我们用美国驻五个城市的使/领馆的 $PM_{2.5}$ 数据来描述这五个城市空气污染的基本状况。目前我国以 75 微克/立方米作为优良空气 $PM_{2.5}$ 浓度的最高值, 但本报告的标准将更为严格, 我们使用世界卫生组织所建议的大气污染防治一期所指定的年均值目标 35 微克/立方米[14], 作为优良空气浓度的最高限值。此外, 我们使用 150 微克/立方米作为“严重污染”的最低限水平。具体定义和标准如下:

- “优良空气”: $PM_{2.5}$ 浓度小于或等于 35 微克/立方米;
- “污染状态”: $PM_{2.5}$ 浓度大于 35 微克/立方米;
- “严重污染”: $PM_{2.5}$ 浓度大于 150 微克/立方米。

为了避免季节性差异和年度极端气候的影响, 我们将观察时间周期设置为 12 个月的整数倍。五大城市具体的观察时间周期如下:

- 北京: 2010 年 1 月至 2014 年 12 月;

- 上海：2012 年 1 月至 2014 年 12 月；
- 广州：2012 年 4 月至 2015 年 3 月；
- 成都：2013 年 7 月至 2015 年 6 月；
- 沈阳：2013 年 6 月至 2015 年 5 月。

图 2 给出了关于 PM_{2.5} 的三种空气质量状态（“优良空气”、“污染状态”和“严重污染”）下平均持续时间的盒形图。从图中可以看出，北京和成都相较其他三个城市，有着更长时间的“污染状态”和“严重污染”。其中，北京的“严重污染”和“优良空气”的持续时间都比成都长，而成都则有着最长时间的“污染状态”。同时也可以看到，即便是空气质量较好的上海和广州，其“优良空气”的持续时间也只有 25 小时，即一天左右。

图 3 给出了四种空气质量状态（“优良空气”，“轻度污染”，“中度污染”，“严重污染”）下全年和分季节的比例分布图。这里“轻度污染”是 PM_{2.5} 浓度介于 35 微克/立方米和 75 微克/立方米之间，“中度污染”是指 PM_{2.5} 浓度介于 75 微克/立方米和 150 微克/立方米之间。总体来说，除北京以外，其他四个城市的空气质量都是夏季最好，冬季最差；而北京则是冬季的“严重污染”与“优良空气”都占比最高。从全年分布比例来看，上海和广州的“优良空气”和“轻度污染”较多，占 80%左右；其次是成都和沈阳，占 60%左右；北京则最差，只有 50%左右。

表 1 综合了图 2、图 3 所展示的信息，并给出了五城市基于四个空气质量度量指标下的排名。如果我们把“污染过程”的持续时间和占比作为污染严重程度的评价指标，图 2 和图 3 均表明成都和北京的空气污染在五个城市中是最严重的。如果把“优良空气”的占比作为评价指标，则成都（12%）最差，紧随其后的是沈阳（22%）和北京（24%）。如果以“严重污染”的时间占比作为评价指标，北京（22%）是最差的，其次是沈阳（11%）和成都（9%）。即使在空气质量较好的广州和上海，“优良空气”所占比例也不超过 37%，而且污染状态的平均持续时间也在两天左右。这也力证了中国大气污染防治所面临的严峻挑战。值得注意的是，表 1 给出的排名只是基于不同空气状态的持续时间，并没有充分考虑 PM_{2.5} 浓度变化及其与气象变量的关系，因此我们将在第七、八节中给出更为详细的分析。

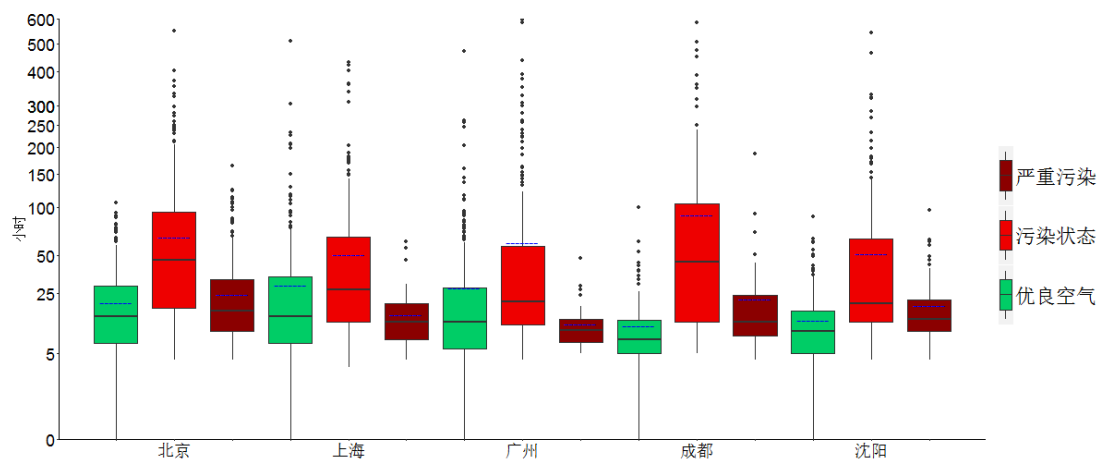


图 2：五城市 PM_{2.5} 三种空气质量状态持续时间的盒形图。盒形图中的实线代表中位数，上下边分别代表 25%和 75%分位数。数据来源：美国使/领馆。

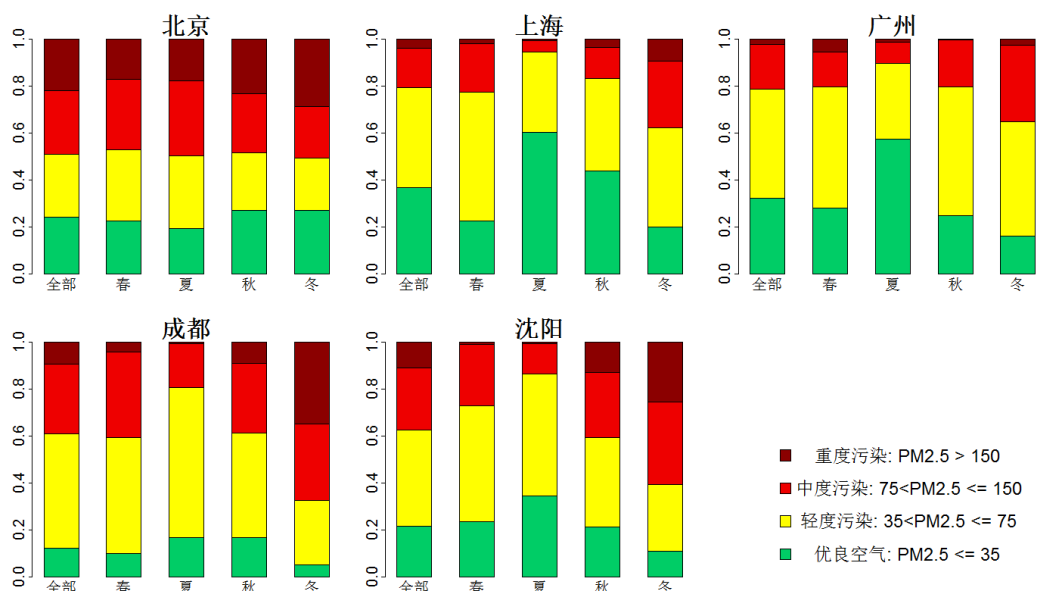


图 3：五城市 PM_{2.5} 的四种空气质量状态在不同季节所占的比例分布。数据来源：美国使/领馆。

表 1：不同度量指标下五城市 PM_{2.5} 污染状况的排名

指标排名	污染状态占比	严重污染占比	优良空气占比	污染平均持续时间 (小时)
1 (最差)	成都 (0.88)	北京 (0.22)	成都 (0.12)	成都 (92.4)
2	沈阳 (0.78)	沈阳 (0.11)	沈阳 (0.22)	北京 (67.9)
3	北京 (0.76)	成都 (0.09)	北京 (0.24)	广州 (62.5)
4	广州 (0.68)	上海 (0.04)	广州 (0.32)	沈阳 (52.4)
5 (最好)	上海 (0.63)	广州 (0.02)	上海 (0.37)	上海 (52.3)

注：“优良空气”为 PM_{2.5} 小于或等于 35 微克/立方米，“污染状态”为 PM_{2.5} 大于 35 微克/立方米，“严重污染”为 PM_{2.5} 大于 150 微克/立方米。

五、美国使/领馆与其邻近的环保部站点数据的对比

如果对比美国使/领馆和邻近环保部站点这两个数据源数据，它们所得到的空气质量统计规律是否存在差异？

我们认为，尽管美国使/领馆和环保部站点的物理距离比较接近，但是由于每个站点所在地的污染源、地形和扩散条件不尽相同，所以得到的空气质量统计指标也将不会完全相等。然而，由于每个城市的站点所承受的城市范围内的污染排放压力大体相似，所以如果数据质量好、准确性较高，使用各站点数据得到的空气质量统计，也应具有相同的趋势和较强的相关性。

表 2：五城市站点 PM_{2.5} 不同空气质量状态下的持续时间（小时）及其标准差（括号内）

城市	站点	与使/领馆距离	平均持续时间（标准差）		
			优良空气	污染状态	严重污染
北京	美国大使馆	-	20.0(1.3)	55.6(4.2)	24.5(2.6)
	农展馆	1.2km	21.9(1.4)	56.2(3.7)	24.0(2.6)
	东四环	2km	18.4(1.2)	53.0(3.7)	23.8(2.6)
	东四	6km	23.0(1.4)	56.6(3.9)	24.3(2.6)
上海	美国领事馆	-	31.2(3.1)	50.8(4.9)	15.5(2.2)
	静安监测站	2.5km	28.4(2.4)	50.9(4.5)	16.6(2.0)
	徐汇上师大	5km	31.0(2.8)	54.2(5.1)	17.0(2.0)
广州	美国领事馆	-	26.6(3.3)	46.4(6.8)	14.6(2.3)
	第五中学	6km	24.1(2.7)	46.5(7.2)	7.8(1.3)*
	市监测站	8km	31.9(4.2)	42.9(5.6)	10.0(2.3)
成都	美国领事馆	-	12.1(1.2)	92.4(11.8)	22.9(4.3)
	草堂寺	5km	17.0(1.6)***	66.5(8.2)	16.6(2.3)
	沙河铺	5km	18.1(1.6)***	60.7(6.8)***	15.7(1.6)
沈阳	美国领事馆	-	14.0(0.9)	52.4(5.1)	19.7(1.8)
	太原街	2km	13.6(0.9)	53.5(4.9)	17.0(1.4)
	小河沿	3km	16.8(1.1)*	50.0(4.7)	16.6(1.6)

的个数代表检验美使/领馆与邻近的环保部站点持续时间是否相等的显著性水平(无:p 值大于 0.05, 表示无显著性差异; *:p 值介于 0.025 和 0.05 之间; **:p 值介于 0.01 和 0.025 之间; ***:p 值小于 0.01。)

为了检验美国使/领馆和邻近的环保部站点 PM_{2.5} 数据是否存在差异，我们对每一个城市每一个站点的 PM_{2.5} 浓度数据，计算了“优良空气”、“污染状态”和“严重污染”这三个空气质量状态下的平均持续时间，以及其所占时间比例分布。表 2、表 3 分别给出了这两类描

述统计量的数值与分布值。从这两个表可以看到：

- 环保部站点和美国使/领馆的距离越近，空气质量描述统计量的数值就越接近，并具有非常相似的分布模式。这说明两个数据源有着基本的一致性。
- 比如北京，四个站点的“优良空气”持续时间都在 20 小时左右，占比都大约为 30%；且“污染状态”和“严重污染”的持续时间分别都在 55 小时和 24 小时左右，所占比例分别在 69%-72%和 17%-19%区间内。
- 相对而言，成都美领馆与其邻近的两个环保部站点所得到的描述统计量差距较大。为了理清原由，我们将在下文对成都的情况作进一步的分析和阐述。

表 2 所给出的美国使/领馆和邻近的环保部站点关于三种空气质量的统计数值在统计学意义上有显著不同吗？需要说明的是，统计学意义上的一个统计指标的显著相同或不同，是考虑到了数据的随机变异性及其概率分布。为了回答这个问题，针对每一个城市，我们利用统计学两样本 t 检验³，分别检验美国使/领馆与每一个邻近环保部站点，在每一种空气状态下的持续时间是否有差异。我们用星号“*”的个数，表明美国使/领馆与邻近的环保部站点，在每一种空气状态下的持续时间不同的程度。星号越多，表明美国使/领馆与环保部站点的持续时间的差异越显著。如果检验结果表明两个站点没有统计学意义下的差别，则无星号。在五大城市共计 33 个检验中，只有 5 个带星号，其中有 3 个在成都，且均为非常显著的不同（3 颗星）；一个在广州，一个在沈阳，但均为一般显著（1 颗星）。总体而言，我们通过污染状态的描述统计量的分析发现：

- 美国使/领馆和绝大多数环保部站点的 $PM_{2.5}$ 数据，在统计学意义上是高度一致的。
- 环保部站点所显示的“污染状态”和“严重污染”的持续时间，并不一定比美国使/领馆要短，而“优良空气”的持续时间并不一定更长。
- 例如：环保部北京农展馆站点的“污染状态”持续时间要长于美国大使馆，而东四环站点的“优良空气”持续时间则要短于美国大使馆；广州的第五中学站点和沈阳的太原街站点，“优良空气”持续时间比该城市的美领馆要短。

³两样本 t 检验：一种常用的统计学方法，用以检验两个总体的均值是否相等。

表 3：五城市各站点不同空气质量状态占比的对比

城市	站点	与使/领馆距离	比例		
			优良空气	污染状态	严重污染
北京	美国大使馆	-	0.28	0.72	0.18
	农展馆	1.2km	0.30	0.70	0.17
	东四环	2km	0.28	0.72	0.19
	东四	6km	0.31	0.69	0.17
上海	美国领事馆	-	0.38	0.62	0.04
	静安监测站	2.5km	0.36	0.64	0.05
	徐汇上师大	5km	0.37	0.63	0.06
广州	美国领事馆	-	0.38	0.62	0.01
	第五中学	6km	0.35	0.65	0.00
	市监测站	8km	0.43	0.57	0.00
成都	美国领事馆	-	0.12	0.88	0.09
	草堂寺	5km	0.21	0.79	0.05
	沙河铺	5km	0.24	0.76	0.04
沈阳	美国领事馆	-	0.22	0.78	0.11
	太原街	2km	0.21	0.79	0.13
	小河沿	3km	0.26	0.74	0.10

六、风和降水的影响

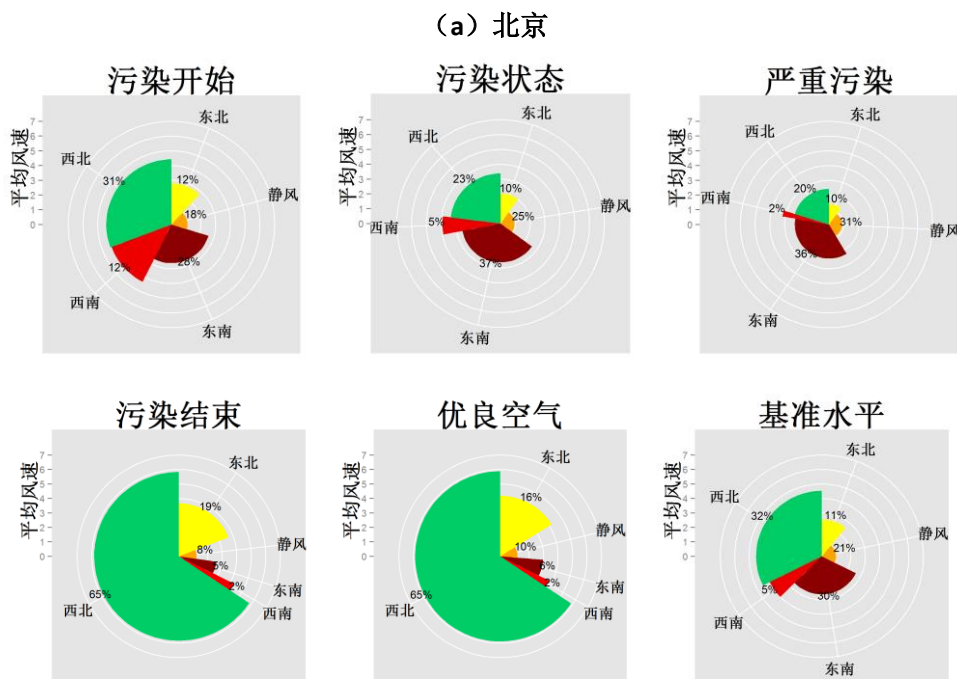
上一节的分析报告中我们基于原始 $PM_{2.5}$ 数据，对各监测站点的空气质量表现进行了横向对比，并没有考虑与其相伴随的气象条件。考虑到气象条件对环境影响的重要性，在本节我们将重点研究五个城市的风和降水对 $PM_{2.5}$ 的影响。此外，露点温度、气压和气温也对 $PM_{2.5}$ 有显著的影响（见[1]和[15]），但囿于篇幅，因此本报告不对这些因素作单独说明。

风对 $PM_{2.5}$ 的影响，主要取决于风向和累积风速两大因素。风速直接决定了污染物的扩散速度，风向则决定了污染物的传输方向。所谓累积风速，是指在某一固定风向下风速的逐小时累积值。若风向改变，累积风速则重新从零累加。为了方便计算，我们将 16 个气象学意义上的风向合并为 5 个主要风向：西北，东北，西南，东南和静风。由于各个城市的地理气象特征不同，我们在充分尊重数据的原则下，基于数据对非线性回归模型的拟合程度，提出了每个城市的风向合并策略，具体见附录表 S1。附录中图 S1 也展示了各个城市合并风向后，风向及风速的季节分布情况的雷达图。从图 S1 我们可以看到如下特征：

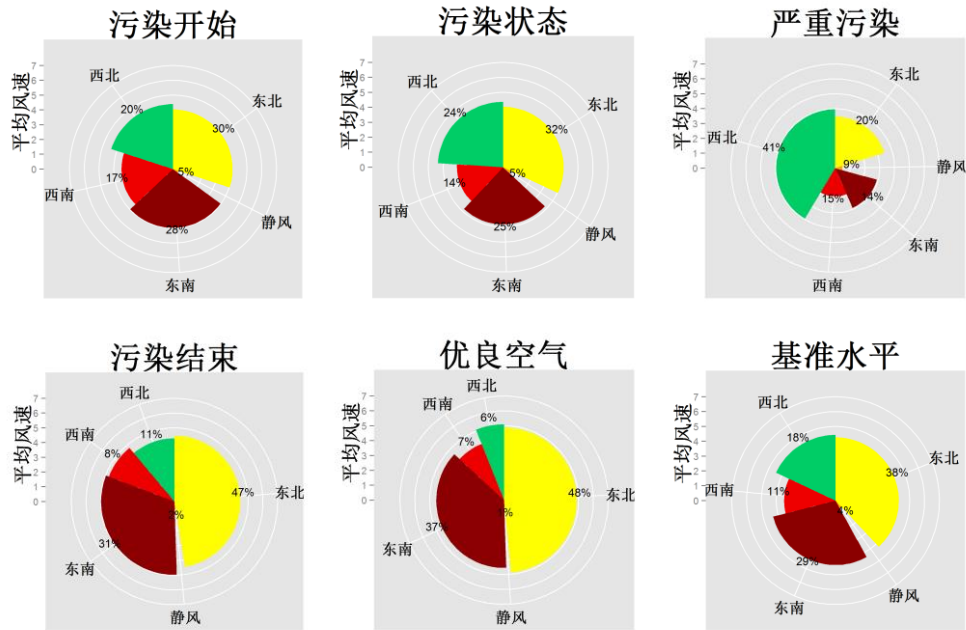
- 北京秋、冬两季多北风，尤以西北风居多；而在春、夏两季，南风为主导风向。
- 上海全年多东风。在春季和夏季，强东南风比例显著增加；在秋季和冬季，偏北风的比例较其他季节有明显提升。
- 在广州，西北风是秋冬季节的盛行风，而到了春天和夏天，东风所占比重变得更大。
- 与北京相似，沈阳在秋、冬两季最常见的也是西北风，春夏最频繁的是西南风。
- 由于地处盆地，成都常年多为静风，不论何种风向，成都的风速较其它城市要弱很多，并且风向分布的季节差异也不明显。

为了更加深入地说明“风”对 $PM_{2.5}$ 的影响，我们在图 4 中给出了在不同 $PM_{2.5}$ 污染状态下风速及风向分布情况的雷达图。其中，雷达图的半径越长表示风速越大，扇面角度越大则表示风向占比越高。对每个城市，我们依次考虑六个空气质量状态：污染开始、污染状态 ($PM_{2.5}$ 大于 35 微克/立方米)、严重污染 ($PM_{2.5}$ 大于 150 微克/立方米)、污染结束、优良空气 ($PM_{2.5}$ 小于或等于 35 微克/立方米) 和基准水平。

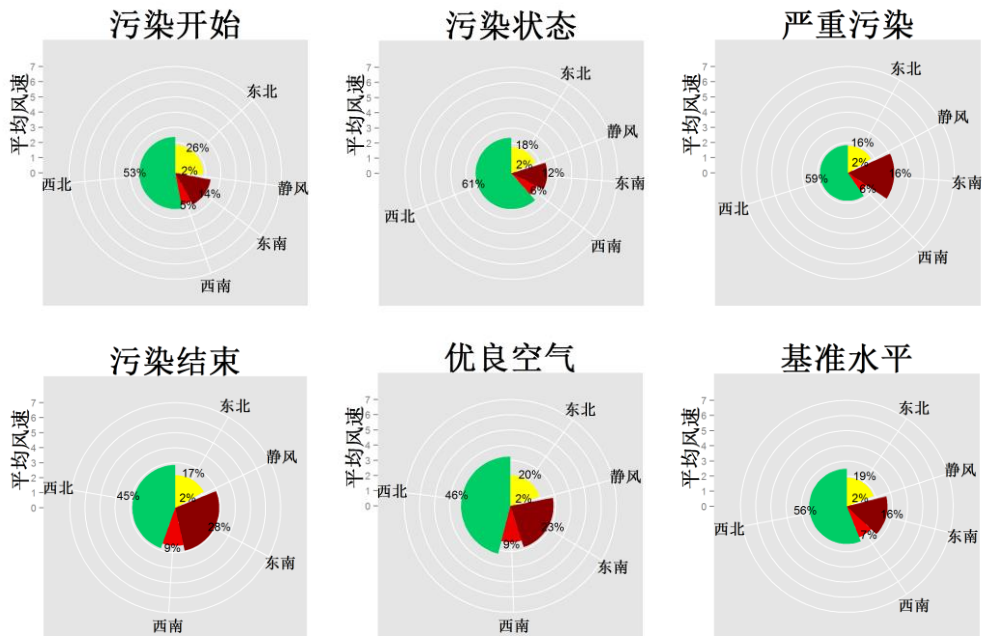
这里，污染开始状态是指 $PM_{2.5}$ 的 3 小时平均浓度第一次超过 35 微克/立方米，与之相对应的污染结束状态是指 $PM_{2.5}$ 的 3 小时平均浓度第一次低于 35 微克/立方米，而基准水平状态则是指不考虑污染状态时的风向、风速的历史平均分布情况。



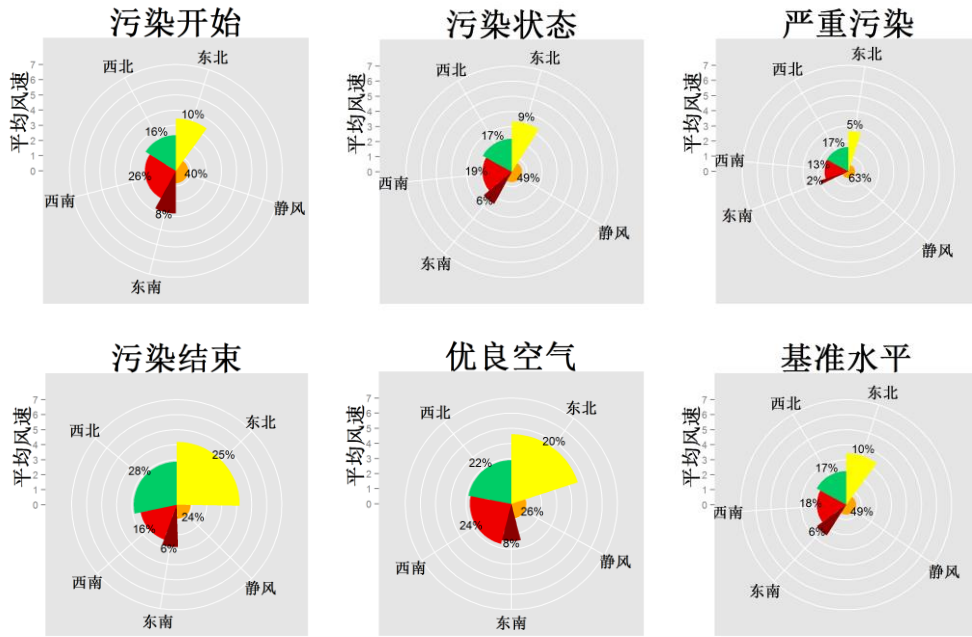
(b) 上海



(c) 广州



(d) 成都



(e) 沈阳

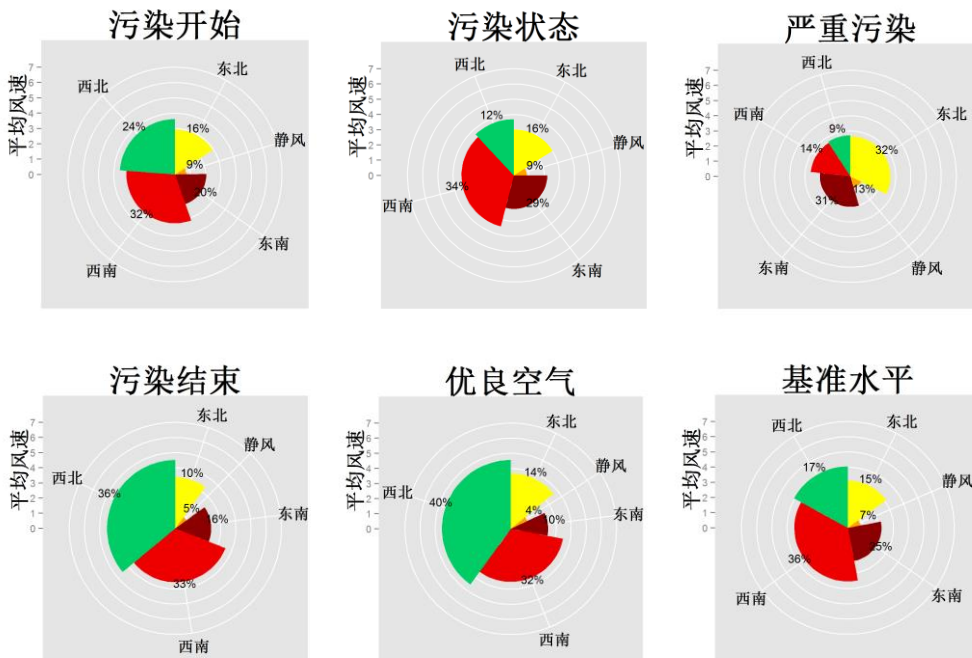


图 4：从“污染开始”、“污染状态”、“严重污染”、“污染结束”到“优良空气”状态下及基准水平风向分布及各风向下的平均风速的雷达图

与基准水平状态相比，在优良空气下比例增加最多的风向是有利于 PM_{2.5} 浓度减少的风向。反之，在“污染状态”和“严重污染”下，与基准水平状态相比，占比增大的风向是不利于 PM_{2.5} 浓度减少的风向。由图 4 我们可以发现：

- 五个城市有利风向分别为：北京和成都——偏北风（西北和东北），上海——偏东风（东北和东南），广州——偏南风（东南和西南），沈阳——西北风。
- 五个城市的不利风向为：北京——偏南风，上海——偏西风（西北和西南），广州——西北风，沈阳——偏东风，成都——静风。对于各个城市，较高的静风比例和较小的风速往往与较高的 PM_{2.5} 浓度正相关；同时，较低的静风比例和有利风向下较大的风速，常与优良空气相伴。

表 4：五城市有利与不利风向

	北京	上海	广州	成都	沈阳
有利于 PM _{2.5} 浓度减少的风向	偏北风	偏东风	偏南风	偏北风	西北风
导致 PM _{2.5} 浓度增加的风向	偏南风 静风	偏西风 静风	西北风 静风	静风	偏东风 静风

综合考虑五个城市周边的地理、工业布局特点，我们可以发现，有利于减轻 PM_{2.5} 污染的风，往往来自于该城市周边的低工业负荷地区，这与我们在第二节中对城市地形条件的分析是一致的。而加重 PM_{2.5} 污染的风，则多来自于城市周边工业排放密集的地区。这也验证了污染传输对一个城市的 PM_{2.5} 污染有着显著的影响。

除了风以外，降水对于清洗空气中大气污染物也有着比较明显的作用。但不同城市由于其污染物排放强度、PM_{2.5} 的构成成分等因素不尽相同，所以降水对 PM_{2.5} 的影响也有差异。在以下的降水影响分析中，我们只选取北京、上海、广州、成都、沈阳的美国使/领馆 PM_{2.5} 数据，并结合各城市的降水数据进行研究。这些数据分别起始于 2010 年 1 月 1 日，2012 年 1 月 1 日，2012 年 4 月 1 日，2012 年 6 月 1 日，2013 年 5 月 1 日，结束时间均为 2015 年 6 月 30 日。图 5 展示了五个城市 PM_{2.5} 浓度与累积降水量的散点图，图中红色曲线是 PM_{2.5} 浓度对累积降水的非参数回归拟合曲线。从该图中我们可以看到：

- 南方城市上海、广州、成都多雨，其累积降水量远远大于北京和沈阳。
- 无论在哪个城市，随着累积降水量逐渐增大，PM_{2.5} 都有显著的下降趋势。其中，当累积降水量大于 50 毫米时，五个城市的 PM_{2.5} 浓度都会下降到 35 微克/立方米以下。

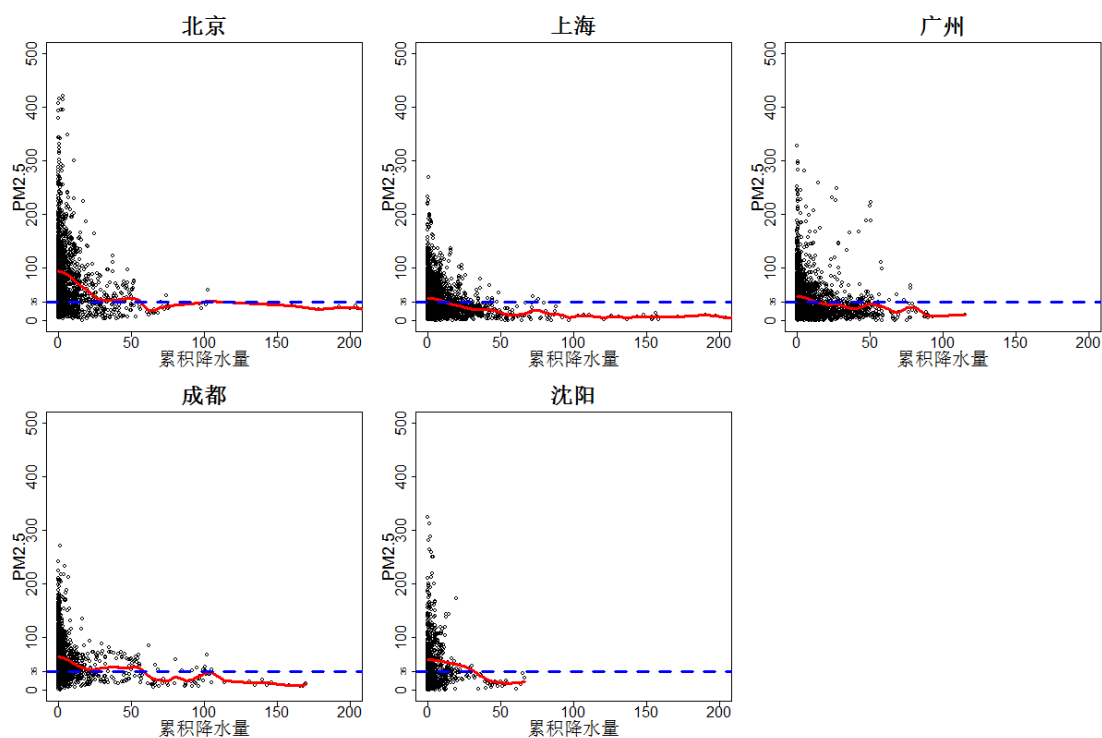


图 5：五城市累计降水量（毫米）与 $PM_{2.5}$ 浓度（微克/立方米）的关系图。红色曲线为非参数回归拟合曲线。

七、剔除气象因素后的污染浓度

我们观测到的 $PM_{2.5}$ 浓度主要受三个因素影响：(i) 污染物排放，(ii) 天气因素，(iii) 以上二者的交互作用[16]。我们之前的研究[15]发现北京城区 $PM_{2.5}$ 近 80% 的变异(Variation)可以由天气因素所解释。实际上，人们也常常将产生严重 $PM_{2.5}$ 污染的原因归咎于气象条件。**然而导致 $PM_{2.5}$ 污染的根本原因是过量排放。**举例来说，甲地的污染排放比乙地的高许多，但前者有比后者更好的污染物扩散条件（多风、湿度低等），这就使得甲地的 $PM_{2.5}$ 读数要比乙地低很多。这说明，我们在评估污染排放时要将气象条件的影响剔除掉，这样才能公平地比较甲、乙两地减排措施的实施效果。

由于气象条件是不可控的，大气污染防治的一个关键技术是度量排放对 $PM_{2.5}$ 的影响，利用数据检测每年的排放是否有减少，减少的量是否使 $PM_{2.5}$ 的减少达到了预期目标。为了量化在不受气象条件干扰下排放对 $PM_{2.5}$ 的影响，我们给出了在可比气象条件下每个月关于 $PM_{2.5}$ 污染的三个“月度指标”：均值、中位数和 90% 分位数浓度。 $PM_{2.5}$ 月中位数浓度（50% 分位数）是指有 50% 的经过气象因素调整后的 $PM_{2.5}$ 浓度大于它，有 50% 的小于它，正好处于 $PM_{2.5}$

分布的中间。同样的，90%分位数浓度是指有10%的 $PM_{2.5}$ 大于该浓度，有90%的 $PM_{2.5}$ 小于该浓度，所以90%分位数度量了最严重的10%的污染情况。

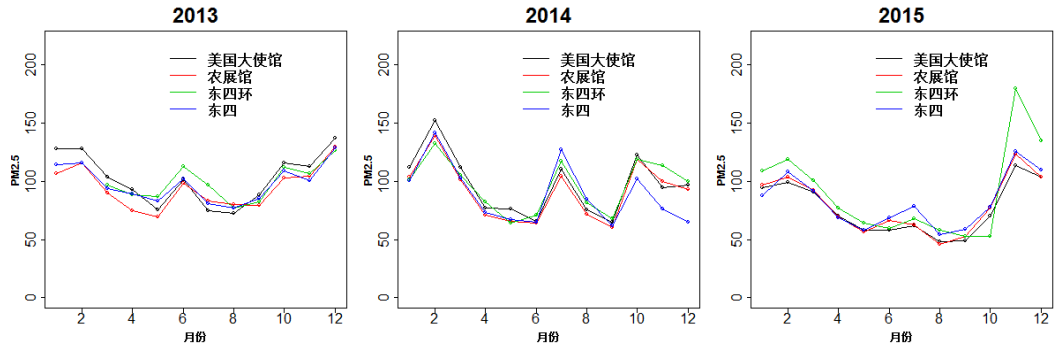
我们此前在《北京城区研究报告》[1]中，提出了一个剔除不同年份气象因素变异对 $PM_{2.5}$ 浓度影响的统计方法，来计算以上三个“月度指标”。这种统计学方法的详细描述可参见英文文章[15]，该文章已发表在英国《皇家学会会刊》上。

图6给出了自2013年以来各个城市各站点剔除气象因素后的月均值浓度。在附录中的图S2和S3，分别给出了各站点在剔除气象因素后的 $PM_{2.5}$ 月中位数和月90%分位数浓度。由于广州的环保部站点在2013年的7、8、10和11月份的数据，有超过90%以上的缺失，沈阳美领馆2013年1月到4月数据也完全缺失，故我们的分析不包括这两个城市的上述月份。

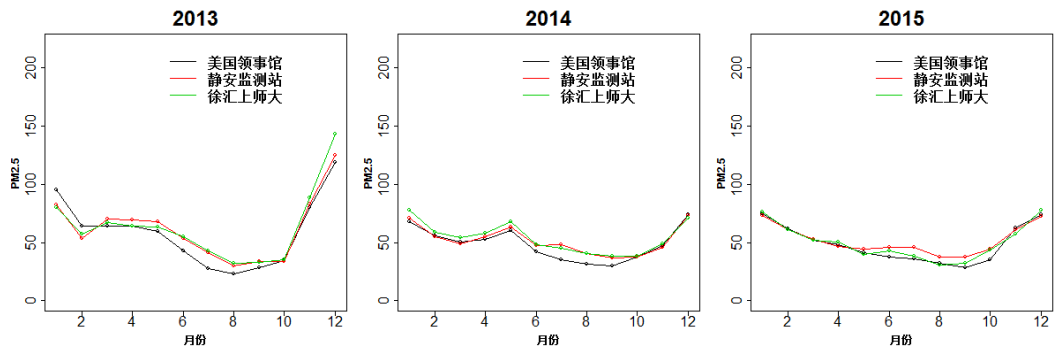
综合图6、图S2和图S3的结果，我们可以得到的主要结论，如下：

- 对每一个城市而言，不管是调整后的月均值还是月中位数和90%分位数浓度，在自2013年以来的三年中，各站点（包括美国使/领馆）调整后的 $PM_{2.5}$ 浓度的三个月度指标，在月与月之间要么同时下降，要么同时上升。各站点的三个指标随时间的变化趋势非常一致。例如，在2014年2月、7月和10月，北京所有站点的月均值浓度，都比相邻月份有所升高。相同的现象也发生在2014年5月和10月的成都。
- 剔除气象因素后，我们所研究的五大城市有一个共同的特点，利用环保部站点得到的 $PM_{2.5}$ 月均值和两个分位数指标浓度，与美国使/领馆相对应的三个指标相比，没有系统性偏低的现象。换言之，环保部发布的数据并非总是低于美国使/领馆发布的数据。相反，在相当多的月份，环保部站点的月均值和分位数浓度，还要高于相对应的美国使/领馆的数据。
- 不过，自2014年6月起，成都美领馆的月均值浓度，比其邻近的环保部站点的浓度明显高出一些，这验证了前面表2和表3中的结果。关于成都的浓度差异，我们将在下文通过相关系数作进一步研究和解读。

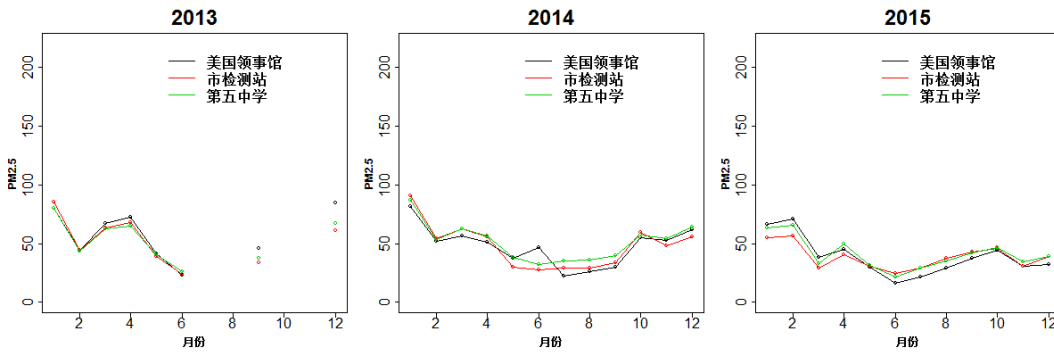
(a) 北京



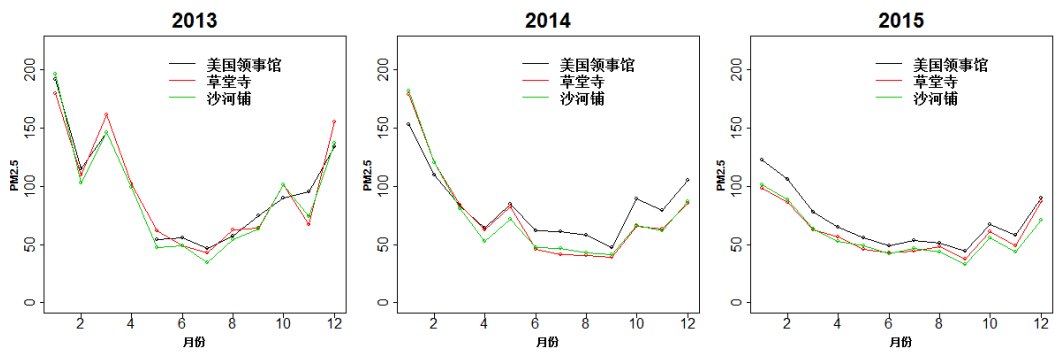
(b) 上海



(c) 广州



(d) 成都



(e) 沈阳

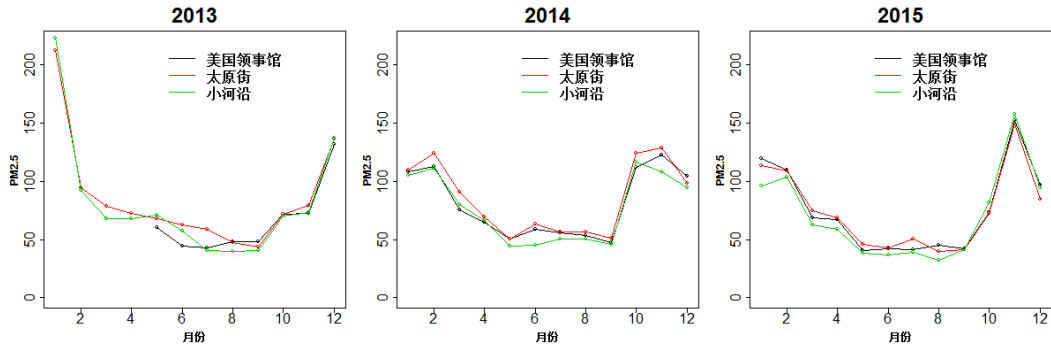


图 6: 五城市各站点剔除气象因素后的 $PM_{2.5}$ 月均值浓度 (微克/立方米)。注: (a) 中北京东四环在 2015 年 10 月到 12 月的波动, 是由于该站点在这三个月的数据有 80% 是缺失的。

为了进一步检验利用美国使/领馆和环保部站点两个数据源, 计算得到的空气质量的三个指标是否存在显著差异, 我们首先将各个城市环保部站点的三个“月度指标”分别进行平均, 再去分别计算各城市的美国使/领馆与邻近的环保部站点之间在这三个指标上的相关系数⁴。

表 5 给出了三个月度指标在不同时间段的相关系数。我们发现, 表 5 中给出的总共 60 个相关系数中有 52 个在 0.9 以上, 其中低于 0.9 的只有 8 个, 最小的相关系数不低于 0.55。这表明, 在剔除了气象因素后, $PM_{2.5}$ 的均值、中位数和 90% 分位数浓度这三个指标, 在美国使/领馆和邻近的环保部站点之间, 具有高度的正相关性。最后, 我们以三年共计 36 个月的总体情况进行比较, 发现在每一个城市里, 美国使/领馆和邻近的环保部站点之间的相关系数在这三个指标上的数值全部在 0.86 以上。

成都在三个指标的 12 个相关系数中, 有 11 个不低于 0.95。这说明两点: (1) 尽管成都美领馆和与其邻近的环保部站点两个数据源计算的 $PM_{2.5}$ 浓度存在显著差异, 但利用二者得到的三个月度指标是高度相关的; (2) 两个数据源计算得到的 $PM_{2.5}$ 浓度的差异可能是由于局部污染排放或测量仪器的差异造成的。

综合以上的相关性分析, 我们可知, 在剔除气象影响后, 对比分析美国使/领馆数据与邻近的环保部站点数据, 得到的结论更加准确、可靠, 同时也再次交叉验证了两大独立数据

⁴相关系数: 统计学术语, 表示了两个变量之间的相关程度, 在-1 和 1 之间取值, 取值接近 1 表示高度正相关, 取值接近-1 表示高度负相关, 取值接近于 0 表示无线性相关关系。

源数据的一致性。

表 5：五城市美国使/领馆与邻近的环保部站点 PM_{2.5} 的“月度指标”的相关系数表

	指标	相关系数			
		2013	2014	2015	全部(标准差)
北京	均值	0.95	0.55	0.99	0.96(0.05)
	中位数	0.70	0.70	0.96	0.93(0.06)
	90%分位数	0.96	0.96	0.99	0.97(0.04)
上海	均值	0.96	0.86	0.98	0.96(0.05)
	中位数	0.95	0.95	0.98	0.95(0.05)
	90%分位数	0.98	0.98	0.96	0.97(0.04)
广州	均值	0.94	0.91	0.96	0.92(0.07)
	中位数	0.98	0.96	0.96	0.96(0.05)
	90%分位数	0.93	0.75	0.91	0.85(0.10)
成都	均值	0.97	0.80	0.99	0.99(0.05)
	中位数	0.97	0.97	0.99	0.96(0.05)
	90%分位数	0.96	0.96	0.99	0.95(0.05)
沈阳	均值	0.95	0.58	0.99	0.97(0.04)
	中位数	0.93	0.93	0.99	0.97(0.05)
	90%分位数	0.98	0.98	0.99	0.97(0.04)

八、年度污染浓度变化

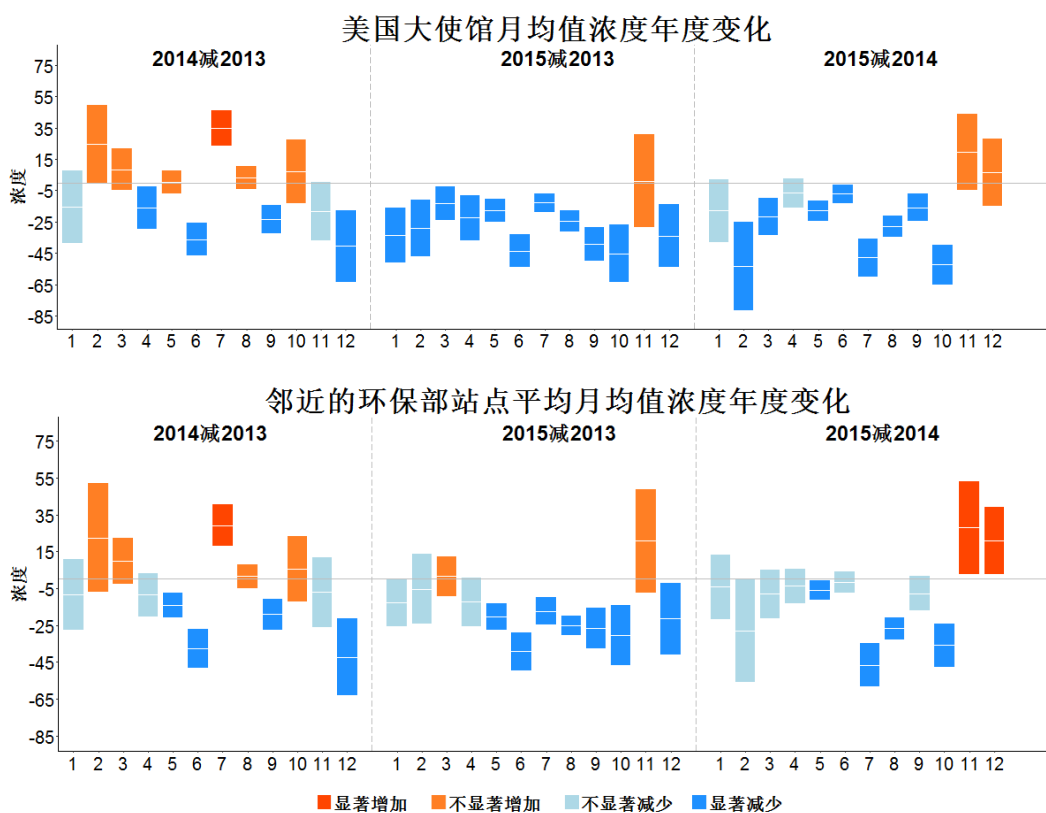
各大城市美国使/领馆的 PM_{2.5} 观测值，和邻近环保部站点的观测值存在一些差异，我们认为这些差异可能是由于地理位置的不同所致，也可能是局部排放和污染物测量仪器的不同造成的。为了更全面地检验每个城市在描述空气质量的统计学指标上的一致性，我们比较了美国使/领馆和邻近的环保部站点在剔除气象因素后的年度变化差值，其中我们将环保部各个城市的站点的浓度结果做了平均。气象因素调整后的年度月浓度差值，是某年某月的指标浓度（如均值或 90%分位数）减去该月在其他年度的指标浓度。图 7 分别给出了五个城市的美国使/领馆和邻近的环保部站点，2013 年 1 月-2015 年 12 月共 36 个月的 PM_{2.5} 的年度月均值浓度差值及其 95%置信区间⁵。中位数和 90%分位数浓度的年度变化差值，在附录的图 S4 中呈现。针对各个月份，我们进行了统计学检验（5%显著性水平⁶），查看两个年份之间的差异是否显著大于 0（代表污染增加）或显著小于 0（代表污染减少）。在图 7 及图 S4 中，红

⁵95%置信区间：统计学术语，是指统计量有 95%的概率落在这个区间内。

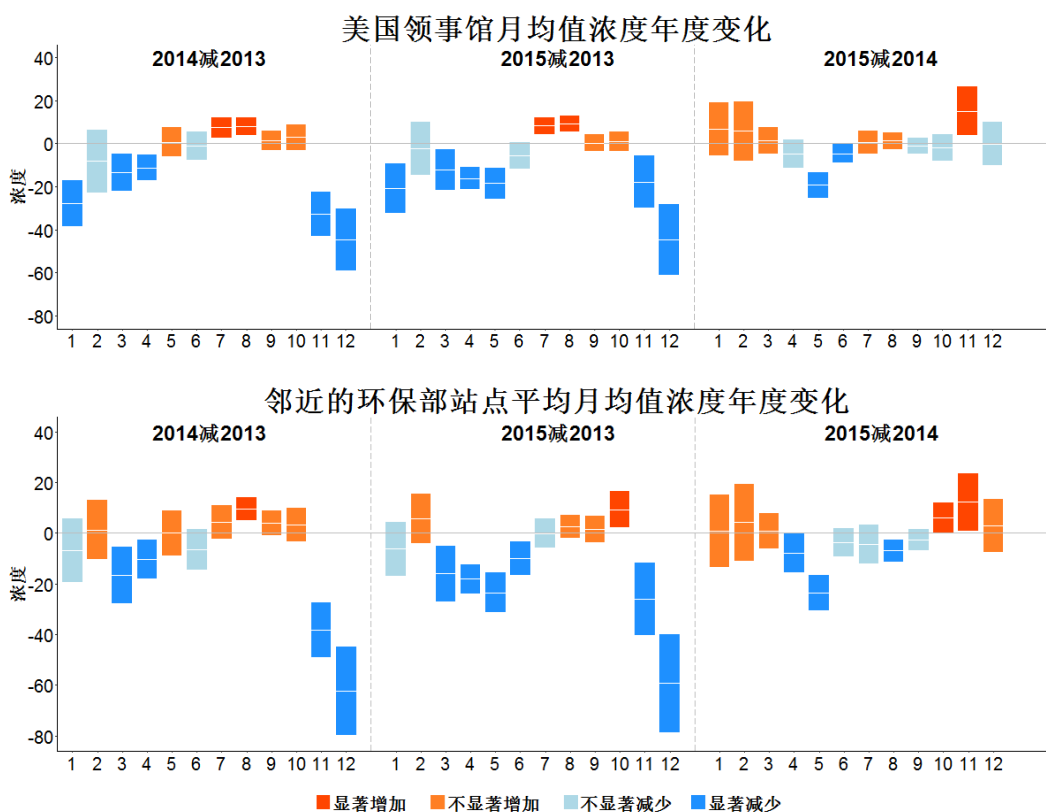
⁶显著性水平：统计学术语，是指统计学检验中犯第一类错误（拒绝正确假设）的概率的上限。

色代表显著增加，黄色代表增加但不显著，浅蓝代表减少但不显著，深蓝代表显著减少。

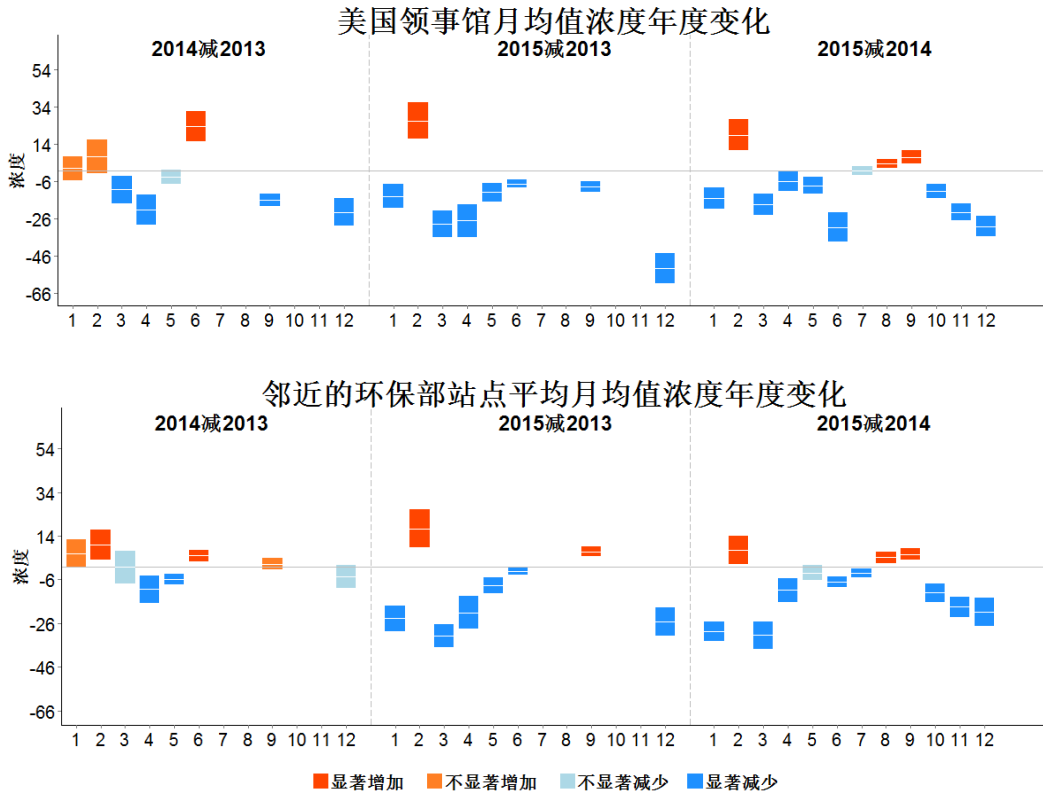
(a) 北京



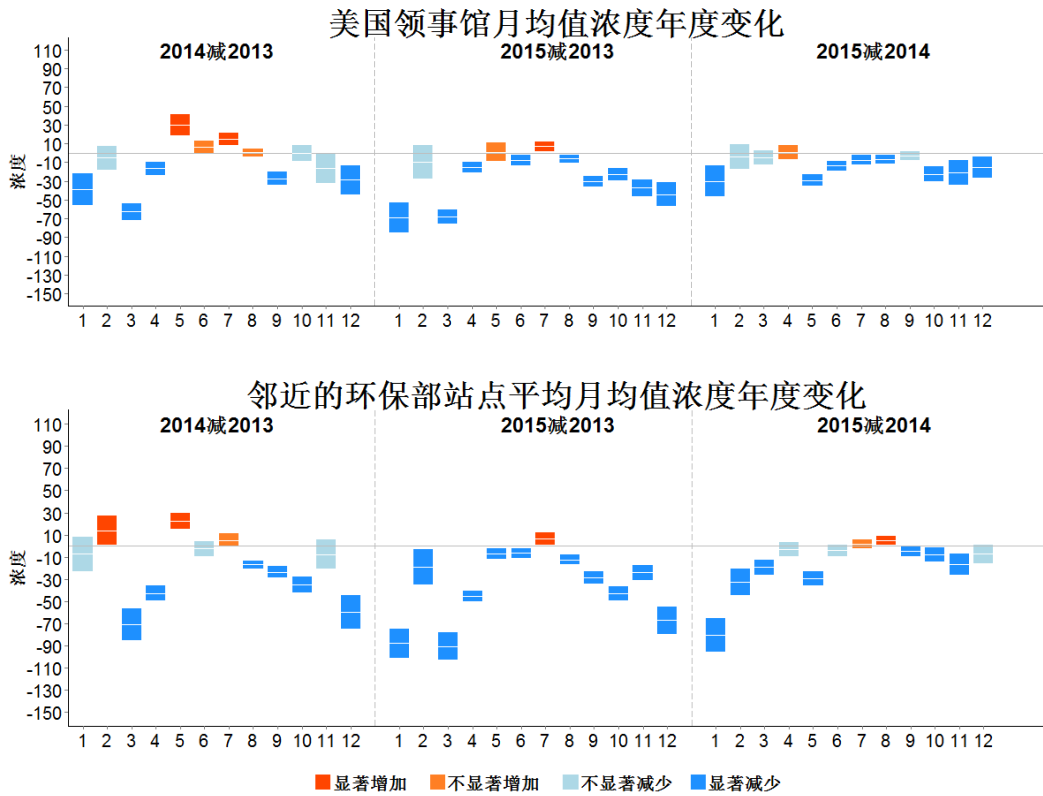
(b) 上海



(c) 广州



(d) 成都



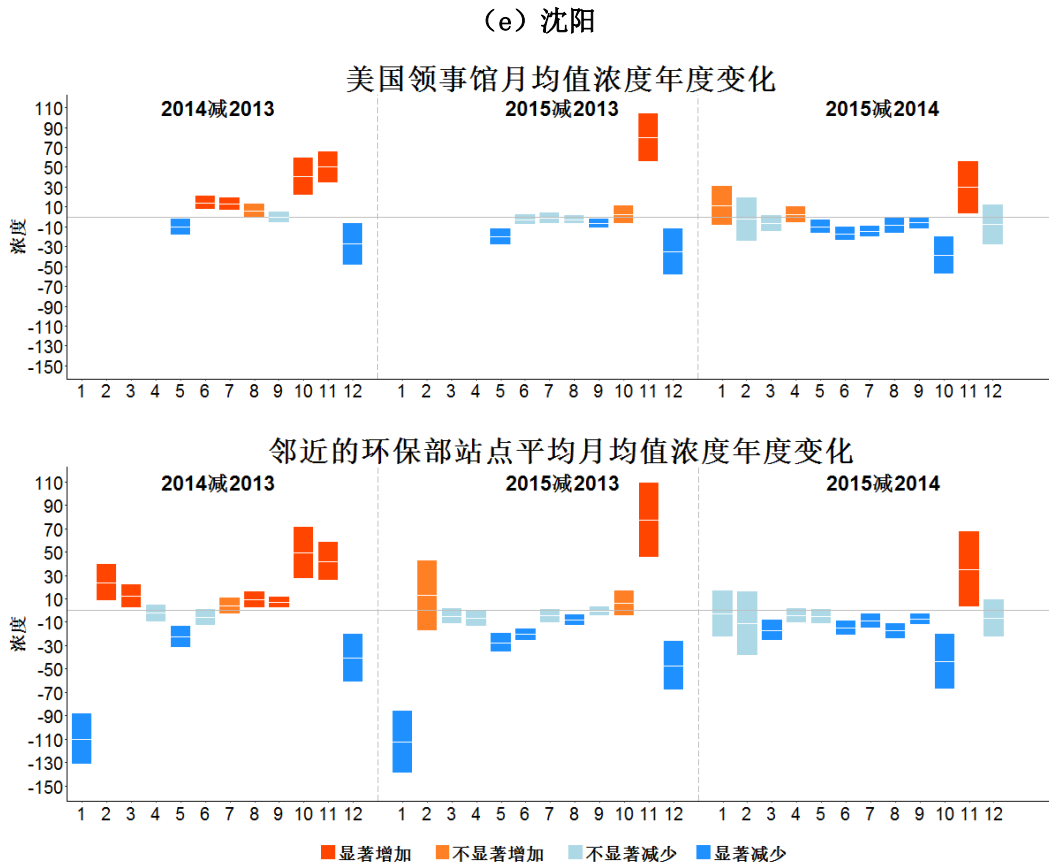


图 7: 五城市美国使/领馆与邻近的环保部站点剔除气象因素后的 $PM_{2.5}$ 月均值浓度(微克/立方米) 年度变化对比。

从图 7 中，我们可以得到以下两大要点：

- 在 36 个 $PM_{2.5}$ 月均值浓度年度变化的比较中，美国使/领馆与邻近的环保部站点，基本具有一致的变化结果，大多数月份要么同增，要么同减。以北京为例，图 7(a) 显示，两个数据源的 $PM_{2.5}$ 月均值浓度年度变化有 24 个月是完全一致的（增减趋势相同，显著性也相同），有 10 个月是接近的（增减趋势相同，显著性不同），只有两个月得到完全相反的结论；在上海，两个数据源则有 24 个月完全一致，12 个月接近，没有相反的结论；广州 20 个月完全一致，6 个月接近，2 个月相反的结论；成都 20 个月完全一致，12 个月接近，只有 4 个月得到完全相反的结论；沈阳 16 个月一致，10 个月接近，两个月有相反的结论（共 28 个月）。
- 2015 年与 2013、2014 年同期相比，五个城市的 $PM_{2.5}$ 污染水平都有不同程度的下降（除了上海 2015 减 2014），尽管美国使/领馆和环保部站点所展现的结果在显著性方面有所不同，但基本的趋势是一致的。例如，2015 年相比 2013 年，除了 3 月份外，位于北京的美国大使馆和邻近的环保部站点的 $PM_{2.5}$ 月均值都是减少的。

九、冬季供暖对 PM_{2.5} 的影响

在本报告研究的五个城市中，北京和沈阳是具有集中供暖的两个城市。尽管近几年北京逐渐用天然气取代煤作为冬季取暖能源，但煤炭仍然是最主要的取暖材料，尤其是在北京郊区和河北省，其中散煤燃烧的量依然相当大。煤炭会产生比天然气更多的 PM_{2.5} 前期物 (precursor)。冬季取暖为我们提供了一个准实验研究的机会 (Quasi-experiment) [17]，我们可以利用北京和沈阳两大城市的数据，去衡量和评估城市冬季供暖对 PM_{2.5} 的影响。同时，我们对冬季供暖效应的分析，也为检验美国使/领馆和邻近的环保部站点的数据是否一致提供了另一种研究方法。

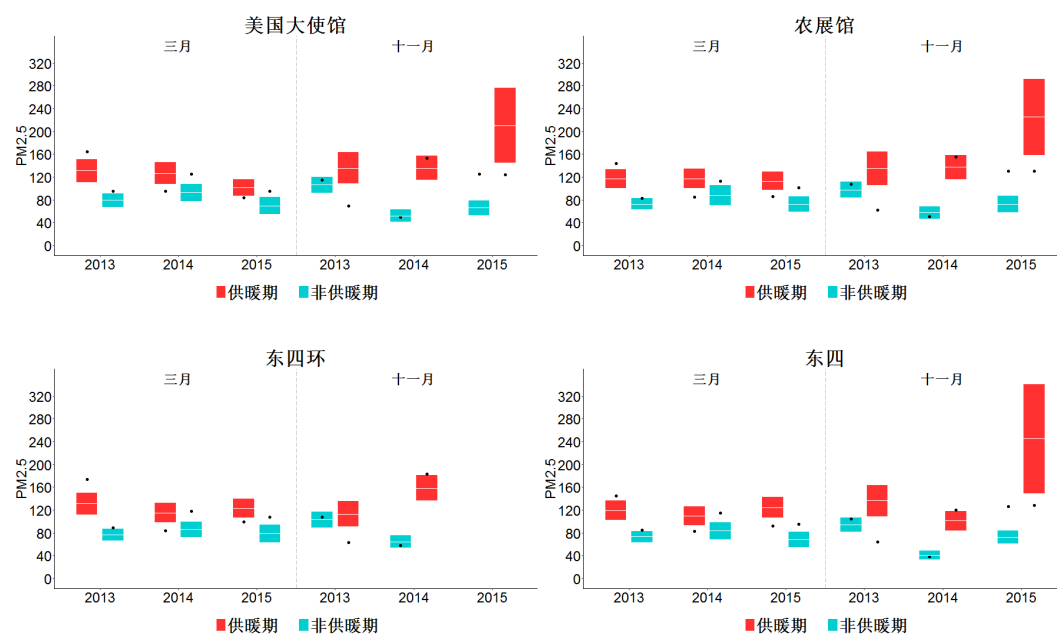
北京的供暖时间，一般是从每年的 11 月 15 日至来年的 3 月 15 日。而沈阳由于冬季时间更长，供暖时间则从每年的 11 月 1 日至下一年的 3 月 31 日。若遭遇极端低温天气，当年的供暖时间还将被延长。为了更加准确地揭示供暖对 PM_{2.5} 的影响，我们定义非供暖期为 11 月供暖开始前的两周和 3 月停止供暖后的两周；定义供暖期为 11 月供暖开始后的两周及 3 月停止供暖前的两周。为了剔除气象因素的影响，我们综合有气象数据的所有年份非供暖期和供暖期的气象变量作为基准，分别通过回归供暖期和非供暖期的 PM_{2.5} 与气象变量的关系，对污染浓度进行气象调整，以此得到 11 月份和 3 月份的供暖效应。所用的统计学方法详见 [15]。

图 8 呈现了北京和沈阳两地美国使/领馆和邻近的环保部站点，自 2013 年以来三个供暖季共六个时段（2013 年 3 月、11 月，2014 年 3 月、11 月和 2015 年 3 月、11 月），剔除气象因素后供暖期与非供暖期的 PM_{2.5} 均值浓度及其 95% 置信区间。其中，每一个站点的供暖期置信区间由红色长方形表示，其间的白色实线则代表剔除气象因素后的 PM_{2.5} 均值浓度；相应地，非供暖期的置信区间由蓝色长方形表示；图中的黑色实点，则代表未剔除气象因素的原始均值浓度。从图 8 中我们可以看到，在有些时段，非供暖期比供暖期的原始均值浓度还要高，例如北京的 2014 年 3 月份和 2013 年 11 月份。但经过可比的气象调整后，供暖期就比非供暖期高出许多，这说明如果不剔除气象因素，供暖效应会被气象因素的干扰所覆盖，从而无法正确体现供暖对 PM_{2.5} 浓度的影响。

供暖时段的供暖效应，是供暖期的 PM_{2.5} 均值浓度减去非供暖期的均值浓度（均为剔除

气象影响后的数据)。我们对两个城市共 7 个站点的供暖效应的显著性，进行显著性水平为 5% 的统计学检验。检验结果表明，对北京而言，除了 2013 年 11 月供暖季的东四环北路站点外 (p 值 0.186)，其它站点在供暖期的 $PM_{2.5}$ 均值浓度，均高于非供暖期的 $PM_{2.5}$ 均值浓度 (5% 检验水平)。

(a) 北京



(b) 沈阳

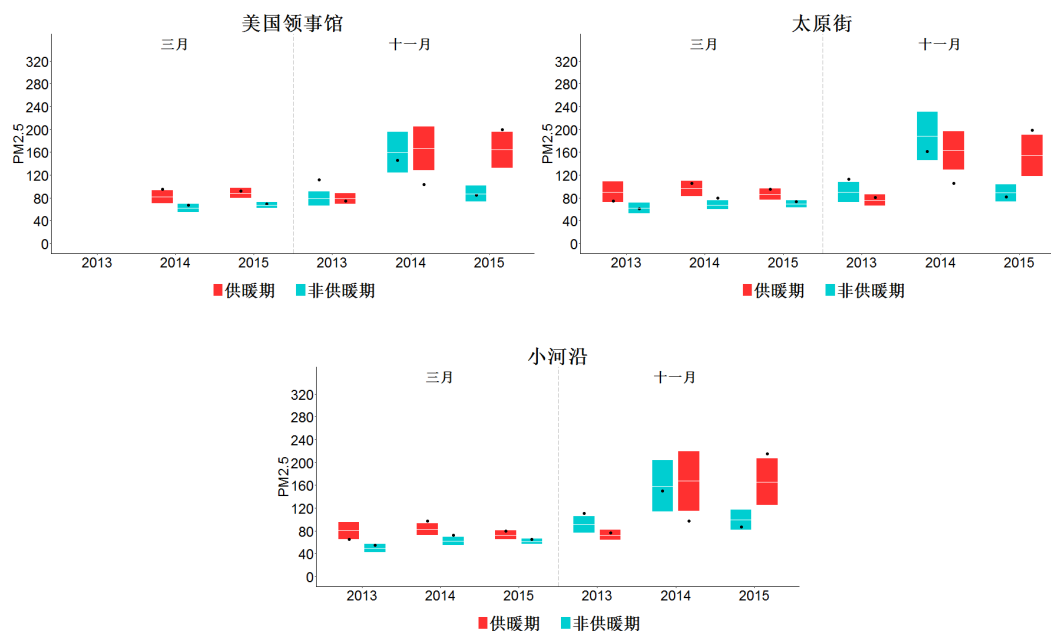


图 8: 北京和沈阳冬季供暖对 $PM_{2.5}$ 的效应。白色实线为剔除气象因素后 $PM_{2.5}$ 的均值浓度 (微克/立方米), 盒子表示 95% 的置信区间, 黑点表示未剔除气象因素的原始 $PM_{2.5}$ 的均值浓度。其中北京东四站点 2015 年 11 月和沈阳美领馆站点 2013 年 3 月份的原始 $PM_{2.5}$ 数据缺失, 所以这两个站点的相应月份的数据并未剔除气象因素。

沈阳的三个站点，11月份的供暖效应在2013年和2014年都不显著，而只在2015年显著，但3月份供暖时段所有站点的供暖效应，在2013年-2015年全部显著（5%检验水平）。那么，11月供暖效应为什么在有些年份不显著呢？我们认为，这是由于沈阳的非供暖期处于10月最后两周，而这两周在沈阳及周边区域进行的秸秆燃烧往往会产生高浓度的PM_{2.5}。由于掺入了生物燃烧因素，导致供暖效应并不显著。事实上，在中国许多地区，10月都是秸秆燃烧的高峰期。幸运的是，北京供暖开始于11月15日，这样非供暖期是11月1日至11月14日，刚好错过了秸秆燃烧的高峰，使我们在监测北京11月份的供暖效应对空气质量的影响时不受其它因素的影响。

从图8中，我们还可以发现，北京的四个站点之间和沈阳的三个站点之间，在每一个供暖季，供暖效应的量和趋势都是基本一致的。而且，我们发现北京四个站点的2014年11月份的供暖效应都比2013年同期的供暖效应高很多。究其原因是由于在2014年11月份的非供暖期期间，北京举办了APEC峰会，会议期间有所谓的“APEC蓝”，使得非供暖期的PM_{2.5}均值浓度较往年偏低很多，因而造成供暖期的PM_{2.5}均值浓度与非供暖期的PM_{2.5}均值浓度的差值，即供暖效应显著增高。即便如此，北京的这四个站点之间依然保持着供暖效应在量和趋势上的一致性。关于“APEC蓝”效应对北京PM_{2.5}的影响可详见《北京城区研究报告》[1]和发表在英国《皇家学会会刊》上的英文文章[15]。

综合上述分析对比，我们得出的主要结论，如下：

- 通过分析北京与沈阳在冬季供暖季的PM_{2.5}数据，我们发现，美国使/领馆和邻近的环保部站点数据，对这两个城市的供暖效应的度量基本一致。这主要表现在，每个站点供暖期和非供暖期的PM_{2.5}均值浓度的变化具有相同趋势。且两者年度变化趋势也基本吻合。这也从另一个侧面再次验证了美国使/领馆数据和邻近的环保部站点PM_{2.5}数据的一致性和可靠性。
- 综合北京各站点11月份（2013年）和3月份（2013年-2015年）的PM_{2.5}数据，我们计算得出了北京平均的供暖效应比例⁷（标准差）是47%（19%）。在这里，我们没有考虑2014年和2015年11月份的供暖效应，这是由于这两年11月份的供暖效应比例都异常大（大于100%，甚至200%）。2014年11月份的异常是由于非供暖期北

⁷供暖效应比例：供暖期PM_{2.5}均值浓度减非供暖期PM_{2.5}均值浓度再除以非供暖期PM_{2.5}均值浓度，它代表了供暖期PM_{2.5}均值浓度相比非供暖期PM_{2.5}均值浓度增加的比例。

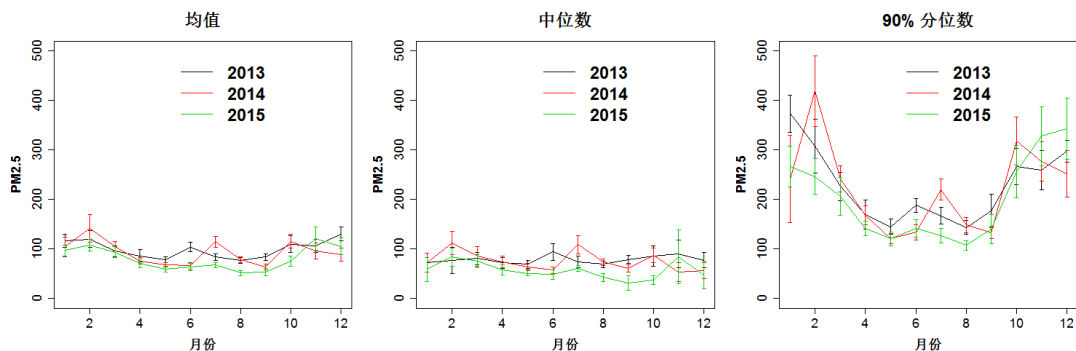
京召开了 APEC 高峰会议造成的，而 2015 年 11 月份的异常还需要进一步研究。以上利用北京多站点计算得到的 47% 的供暖效应比例，与此前《北京城区研究报告》[1]中基于美使馆一个站点得到的 50% 的供暖效应比例非常接近。

- 由于沈阳 11 月份供暖效应不显著，我们只计算了 3 月份沈阳各站点（2013 年-2015 年）的平均供暖效应比例（标准差），结果为 37%（16%）。由此看出，沈阳的供暖效应比例低于北京。
- 2015 年 11 月份供暖效应在北京、沈阳两城市的所有站点都急剧增加。这是因为供暖用煤的质量比 2013 年和 2014 年差许多造成的，还是另有它因，需要做进一步的研究。由于我们已经剔除了气象因素的影响，所以不应该归咎于厄尔尼诺现象。

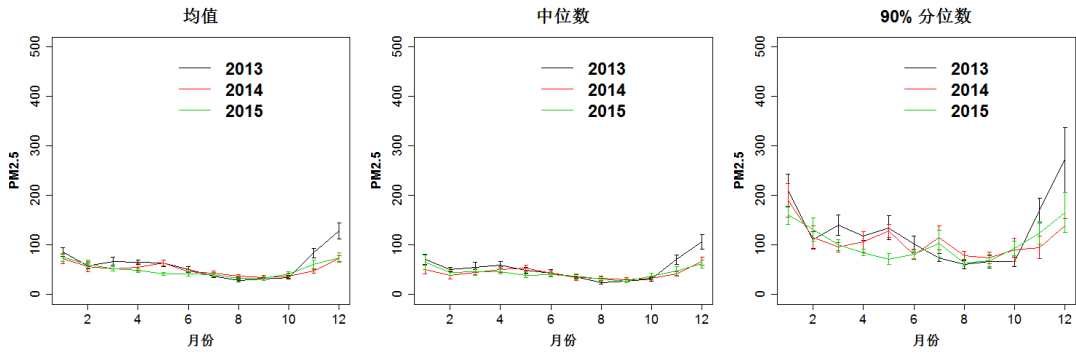
十、五城市空气质量综合比较

鉴于美国使/领馆和邻近的环保部站点的数据在这五城市具有一致性和可比性，我们把同一个城市不同站点的关于空气质量的三个“月度指标”综合平均，得到每个城市 PM_{2.5} 的月均值、中位数以及 90% 分位数浓度。图 9 展示了这三个“月度指标”从 2013 年到 2015 年 36 个月间的动态趋势以及它们各自的 95% 置信区间。

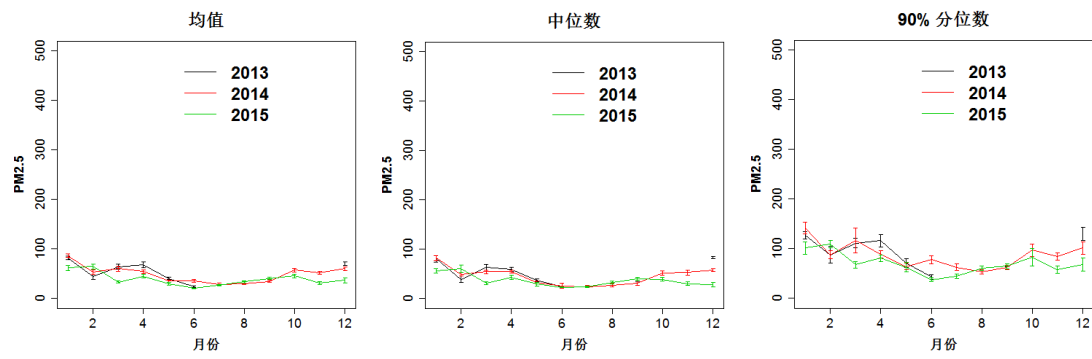
(a) 北京



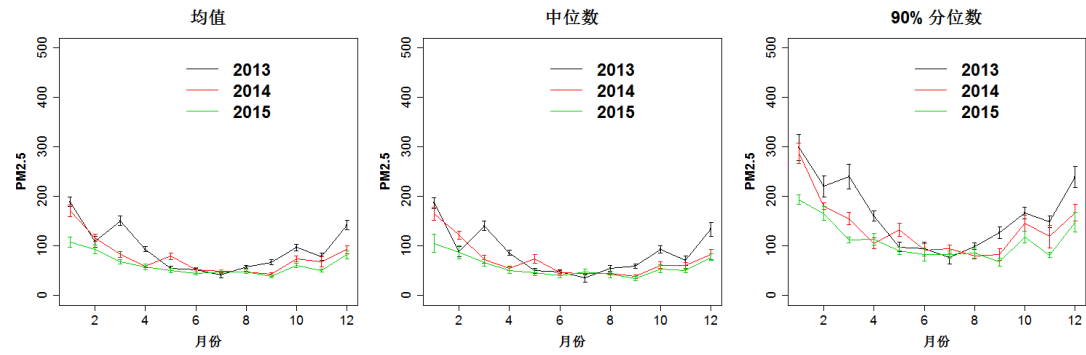
(b) 上海



(c) 广州



(d) 成都



(e) 沈阳

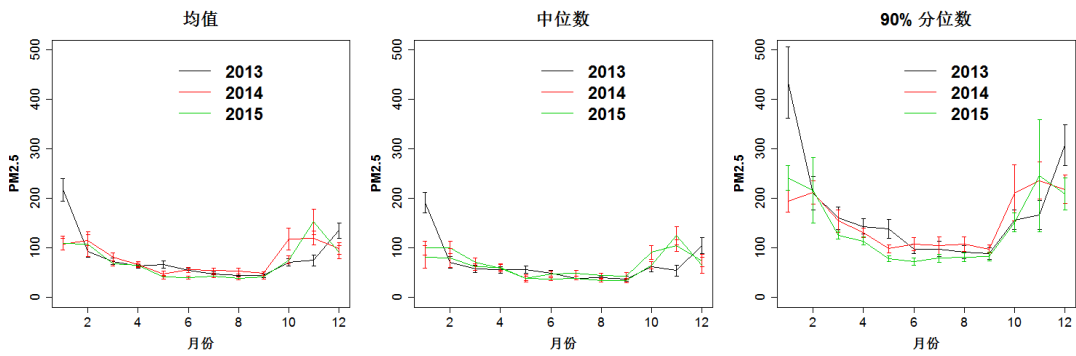


图 9:五城市各站点平均的 PM_{2.5}月均值、中位数、90%分位数浓度 (微克/立方米)。

图 9 中的月均值和 90%分位数浓度都表明，对每一个城市来说，冬季（十一月至二月）的 PM_{2.5} 水平是最高的。由于 90%分位数描述了污染物浓度最高的 10%的情况，即重度污染的情况，我们从图 9 看到它在冬季也是最高的。这对于北京和沈阳并不意外，因为这两个城市在冬季有集中供暖，煤炭等化石燃料的燃烧引起的污染物排放较其它季节有显著的增长。然而，成都和上海也有比较明显的冬季效应，PM_{2.5} 浓度在冬季也是最高的。例如，上海 2013 年 11 月和 12 月的浓度增长是非常大的，这表明上海的污染状况在冬季也可能变得很严重。相似的现象也发生在广州，虽然程度相对轻一些。此外，我们发现在数值上月度的中位数浓度要比均值和 90%分位数浓度更稳定，这是由于中位数是一个更稳健的统计量，它对极端污染不敏感。

得到了每一个城市经过剔除气象因素影响后的月均值、中位数和 90%分位数浓度，我们再对这三个月度指标进行年度平均，进一步得到了表 6 和图 10 中给出的年度平均的均值、中位数及 90%分位数浓度(半年度平均结果见表 S2)。

表 6: 五城市 PM_{2.5} 年度均值、中位数、90%分位数浓度（微克/立方米）比较
(括号中是标准差)

城市	年份	均值 (标准差)	中位数 (标准差)	90%分位数 (标准差)
北京	2013	99.4(1.71)	78.6(2.45)	226.8(4.55)
	2014	93.4(1.98)*	75.5(2.26)	222.7(6.16)
	2015	80.6(1.7)***	56.7(3.14)***	202.1(5.47)**
上海	2013	61.4(1.09)	52.1(1.15)	127.2(3.80)
	2014	51.5(0.90)***	43.3(0.90)***	109.0(2.87)**
	2015	50.3(0.88)	43.7(2.45)	104.1(2.87)
广州	2013	54.3(0.73)	53.5(2.59)	93.4(3.42)
	2014	49.1(0.51)***	45.6(1.95)**	86.4(2.68)
	2015	39.4(0.50)***	36.7(1.75)***	70.1(2.42)***
成都	2013	94.6(1.06)	87.2(1.25)	164.2(2.44)
	2014	78.0(1.00)***	72.5(1.09)***	136.9(2.05)***
	2015	62.6(0.84)***	58.7(1.24)***	112.0(1.62)***
沈阳	2013	82.3(1.50)	68.5(1.52)	174.8(4.44)
	2014	80.8(1.54)	69.0(1.44)	156.3(3.78)*
	2015	73.2(1.81)***	60.5(1.74)***	141.7(5.96)*

的个数代表统计检验该年相比前一年是否有下降的显著性水平(无:p 值大于 0.05, 表示无显著性差异;
*:p 值介于 0.025 和 0.05 之间; **: p 值介于 0.01 和 0.025 之间; ***:p 值小于 0.01)。

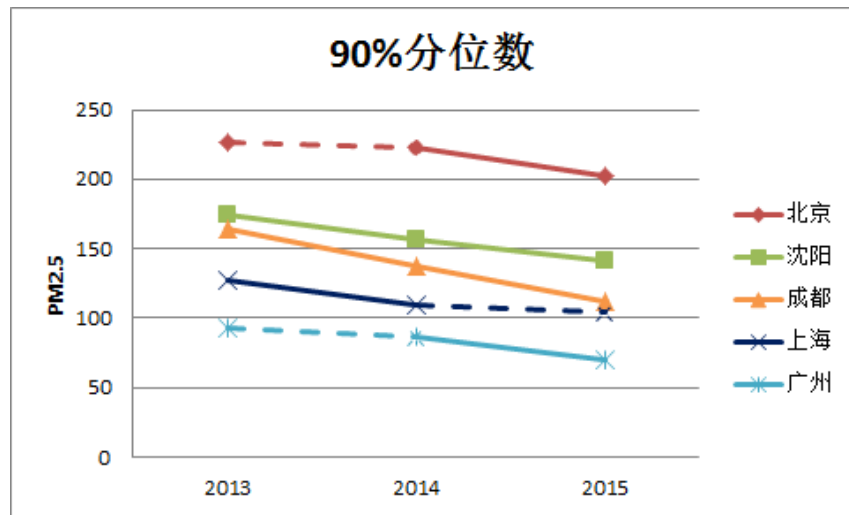
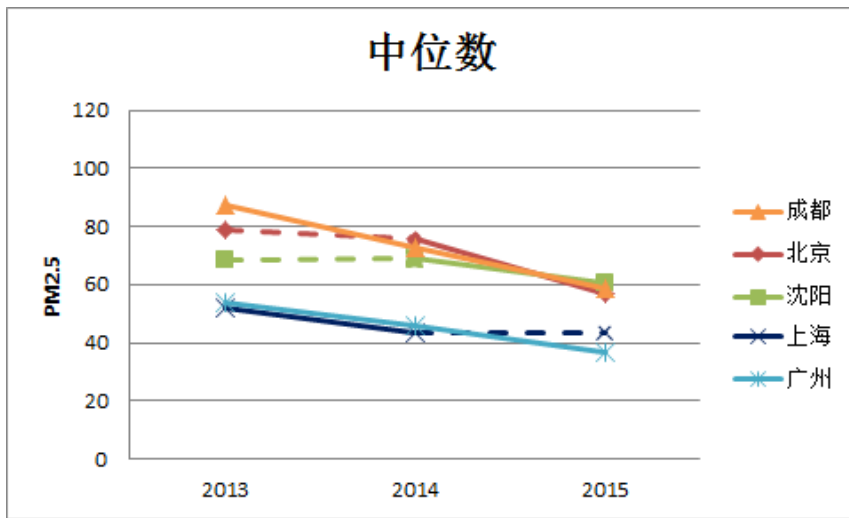
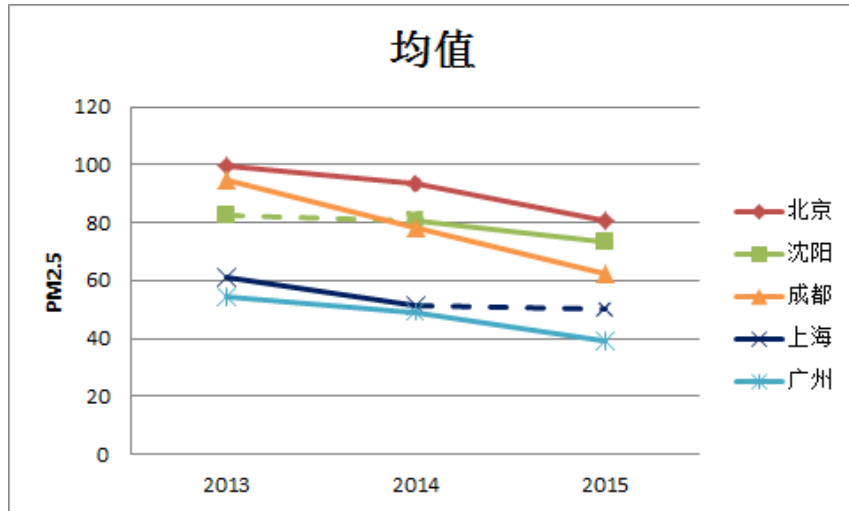


图 10:五城市 PM_{2.5}年度均值、中位数、90%分位数浓度(微克/立方米)比较。实线代表在 5%水平下相比上一年有显著减少,虚线代表在 5%水平下相比上一年没有显著性变化。

表 6 和图 10 揭示如下主要结果：

- 北京，在年度均值和 90%分位数浓度指标上都是五个城市中空气质量最差的城市。沈阳、成都的污染严重程度相似，分别位列第二和第三。广州和上海最好。上海的年度均值主要在 50-60 微克/立方米的范围，广州在 40-50 微克/立方米之间。而北京的年度均值浓度却在 80-100 微克/立方米的区间里，沈阳在 70-85 微克/立方米之间，成都在 60-95 微克/立方米之间。这三个城市都远远高于广州和上海。
- 从中位数浓度上来看，成都的空气质量最差，在 60-90 微克/立方米之间，紧随其后的是北京，在 60-80 微克/立方米之间。沈阳在 60-70 微克/立方米之间。广州和上海的中位数浓度最低，基本处于 40-55 微克/立方米的范围。
- 从重度污染的程度（90%分位数浓度）来看，广州是五城市中唯一一个 90%分位数浓度低于 100 微克/立方米的的城市，而最严重的三个城市（北京、沈阳和成都）的 90%分位数浓度都超过 110 微克/立方米。尤其是北京，其年平均 90%分位数浓度在过去三年均高于 200 微克/立方米。
- 广州的 $PM_{2.5}$ 浓度是五城市中最低的，上海名列第二。广州的年均值和中位数浓度在 2015 年初次低于 40 微克/立方米。上海逊色于广州的原因，是由于上海的极端污染程度要比广州高得多。造成这种情况的部分原因是长三角地区自身的能源消耗也远高于广东。此外，上海比广州更偏北，它会收到更多来自北方的污染传输。
- 成都有最高的中位数浓度，而 90%分位数浓度低于北京和沈阳反映了成都大气污染的特点：长期处于中度污染状态，而严重污染的比例并不高于北京、沈阳。成都不像北京的污染浓度是大起大落的。

本节的排序与第四节表 1 中基于 $PM_{2.5}$ 空气质量状态的持续时间与占比的排名稍有不同，即广州的空气质量在三个浓度指标下均比上海好，成都的 $PM_{2.5}$ 浓度比北京、沈阳要轻。值得注意的是，由于将污染的浓度而不仅仅是污染过程的持续时间和占比作为评价因素，因此本节的排序也更加全面，从另一个不同的角度评价了五个城市的污染状况。

为了进一步得到五大城市近几年的空气质量变化趋势，表 6 也给出了从 2014 年开始，每个年度平均指标，与上一年的相应指标相比，是否有统计学意义上的显著减少。同时，图 10 以折线图的方式呈现了这些数据。我们以 5%作为显著水平，星号的个数代表减少的显著性程度；星号越多，表示减少的程度越大，没有星号表示不显著，即 $PM_{2.5}$ 没有明显下降。

表 6 中的显著性结果表明，从 2014 年开始，五大城市的三个主要浓度指标（均值、中位数、90%分位数）均有所降低。具体而言，五个城市的污染在 2013 年都是最严重的。与 2013 年相比，2014 年的污染程度有所改善，2015 年又有进一步的改善。但各城市的改善程度并不尽相同。

在过去两年中，成都的三个空气质量指标每年均有非常显著的改善（三个星号）。成都的改善主要体现在重度污染（90%分位数）的减轻，这也使得均值和中位数浓度相应减少。广州的改善程度排在第二。在过去两年中，广州有四次非常显著的改善（三个星号），一次很显著的改善（两个星号）。北京和沈阳各有两次非常显著的改善和两个其它程度的改善。上海的改善程度是最小的，仅 2014 年比 2013 年同期有显著改善，2015 年同 2014 年比，上海在三个指标上都没有改善。

在五个城市中，除上海之外，最明显的改善均出现在 2015 年。我们认为，2015 年 $PM_{2.5}$ 的显著改善大致有两个原因：一是从 2015 年开始中国政府实施了更严格的大气环境监管措施，这些措施赋予了环境管理部门更多的“硬权力”来监督和惩处超量排污者；另一个原因则是中国自 2013 年开始的经济增速放缓。剥离、量化前述两方面的原因对空气质量改善的贡献，对大气污染防治策略的制定非常重要。但目前我们面临数据不足的问题，详见第十二节。

十一、能源、经济与地形对污染的影响分析

从表 1 和表 6 的空气质量排序可以得知，北京和成都排在五大城市中后两位，广州、上海相对较好。是什么因素决定了这一排序呢？不少人会提到各大城市的经济发展水平，以及能源消费结构等。那么，真是这些因素决定的吗？为此，我们对能获得的能源消费统计数据以及其他经济数据，进行了对比和分析。

图 11 给出了五城市所在的五大经济区域，自 2002 年以来的煤炭、汽油、柴油消耗量以及 GDP 总量[2]。从经济规模和能源消耗的角度来看，北京、上海和广州处在我国经济最发达，工业最密集的区域。其中，上海所在的长三角地区煤炭、汽油和柴油的消费量是五个区

域中最多的。长江三角洲地区的 GDP 总量也是五个区域中最高的，几乎是排名第二的珠江三角洲（广州所在区域）和排名第三的华北地区（北京所在区域）的两倍。华北地区是第二大煤炭消费地区。广州所在的珠江三角洲则是第二大汽油和柴油消耗地区。相比之下，辽宁（沈阳所在区域）和成渝地区（成都所在区域）的能源消耗与 GDP 的排名都在五个区域中靠后。

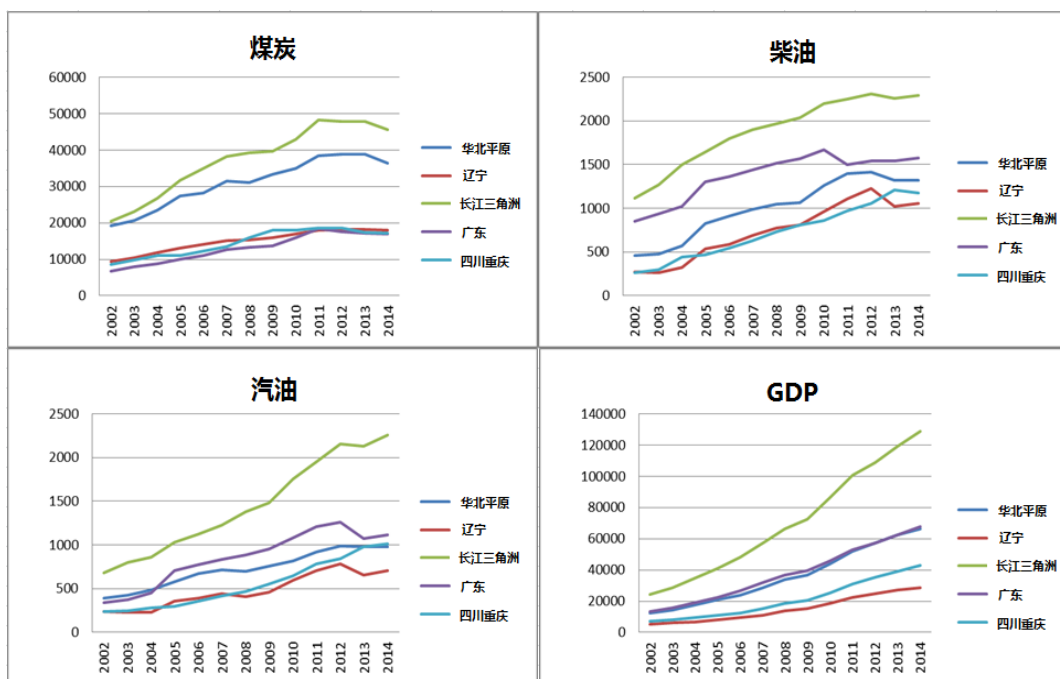


图 11：2002—2014 年五城市所在的区域煤炭、汽油、柴油年消耗量及年 GDP 总量。能源消耗量的单位为万吨，GDP 的单位为亿元。

图 11 只给出了五个城市所在区域能源消耗的绝对量，没有考虑各地区的土地面积和经济总量（GDP）。为使数据评价更为客观和全面，在图 12 中我们给出了全国主要省市的单位面积能源消耗和单位 GDP 能源消耗。此外，表 S3 给出了五城市所在的地区的单位面积能源消耗和单位 GDP 能源消耗的具体数值。在单位面积能耗方面，长江三角洲地区在三种能源（煤炭，汽油和柴油）消耗上都排第一，珠江三角洲地区和华北地区次之，成渝地区最低。如果考虑单位 GDP 能源消耗，长江三角洲地区在柴油消耗上排名变为倒数第一位，在煤炭和汽油消耗上分别排名第四和第三位。华北地区在煤炭消耗上排名第二。辽宁在煤炭、汽油和柴油消耗上均排名第一。同时，成渝地区上升至第二或者第三的位置上，而珠江三角洲地区的煤炭消费是最少的，柴油和汽油也分别降到第三和第四位。这表明，长江三角洲和珠江三角洲地区的能源利用效率最高。而辽宁、华北以及成渝地区比这两个地区的能源利用效率都要低很多，这也说明三个区域的经济相对来说是能源密集型的。能源利用效率与各区域的经

济结构有关：长三角和珠三角的轻工业和服务业比例更高，而华北和辽宁的经济很大程度上靠重工业驱动，因而能源消耗强度更高。

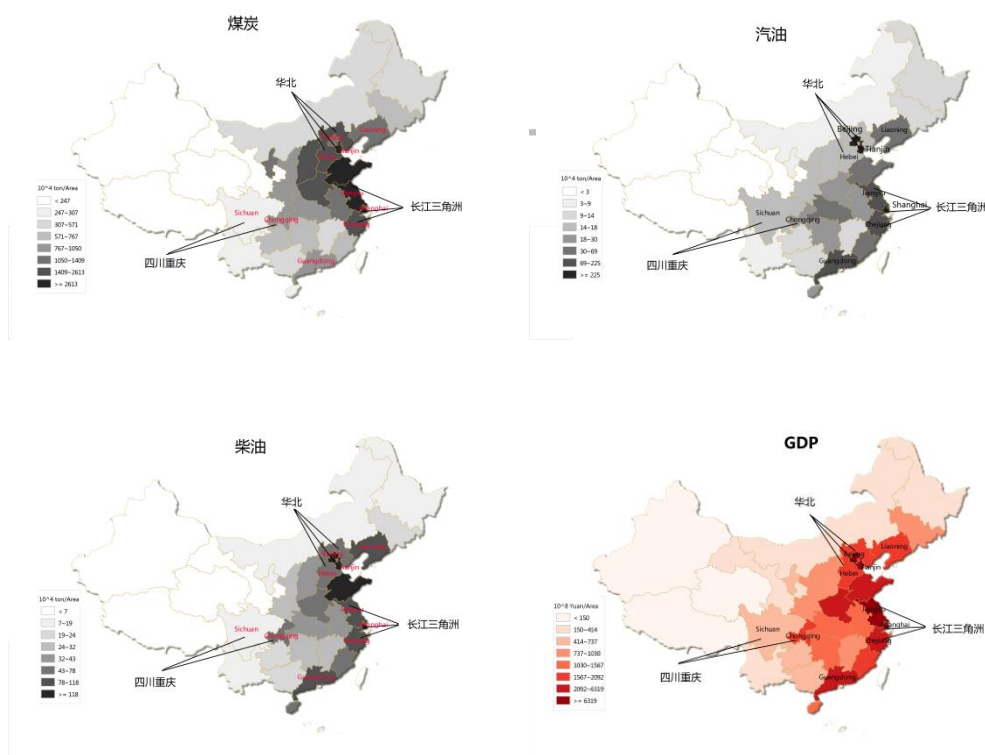


图 12：五城市单位面积能源（煤炭、柴油、石油）年消耗量及单位面积年均 GDP。

在本报告所研究的五个城市当中，广州和上海有相对好的空气质量，北京和成都最差。然而以上对能源消耗数据的分析表明，上海所在的长江三角洲地区在这五个区域里能源消耗最多，广州在某些能耗指标上也排在第二、三位。与之对应的是，四川消耗了最少的能源，而成都却是空气质量最差的城市之一。这说明，要保证良好的空气质量，不同城市或地区，有不同的能源消耗和工业活动承载的上限。这个上限，很大程度上受该地区的地理环境和气象条件影响。**经济发展和人类活动都应当尊重这一上限。**北京所在的华北平原就是一个典型的反例，因为华北地区忽略了其地理上两面环山、不利于污染物扩散的客观条件，而发展了大量的高能耗的重工业，使得华北地区的大气污染排放远远超过了其可以承载的上限。

十二、结论

通过对中国五大主要城市 2013 年-2015 年的 PM_{2.5} 数据，结合气象数据进行统计分析，我们得出了以下主要结论，并给出了相应建议：

(1) 由美国使/领馆和邻近的环保部站点的原始 PM_{2.5} 数据计算得出的评价空气质量的统计指标，具有很高的一致性与可比性。我们运用统计学的方法，验证了这两个独立数据源的数据均具有较高质量。我们的分析表明，在这五个城市中，这两个来源的数据有着一致可比的 PM_{2.5} 月均值，中位数和 90% 分位数。这种一致可比性，也体现在空气质量三个指标的年度变化以及北京、沈阳两城市的冬季供暖效应上。

(2) 需要强调的是，我们的分析结果，并不能说明在其它地区的数据也是可靠的。其它城市的数据可靠与否，同样需要对其数据进行系统分析后才能得出结论。我们认为，原始污染数据的可靠性是大气污染防治的本钱、底线，倘若数据本身的质量有问题，那么基于数据的研究都是徒劳的，这也是这份报告不断交叉验证分析美国使/领馆和邻近的环保部站点两大数据源的数据是否一致的原因之一。我们看到，目前空气质量已经被列入各级政府官员的政绩评判标准中，对数据进行人为干扰的风险或许也将提高。对中国大气污染数据质量的区域性监控，应是大气污染防治的基本任务之一。

(3) 我们对五城市的空气质量进行统计评估发现，PM_{2.5} 水平近年来有一定的下降，最明显的下降出现在 2015 年。这种改善是喜人的，但大家应当注意到，**五城市的 PM_{2.5} 水平还远远高于世界卫生组织所建议的上限**。世界卫生组织的初期过度目标是年平均 PM_{2.5} 浓度在 35 微克/立方米以下，第二和第三期目标分别是 25 微克/立方米和 15 微克/立方米以下。美国环保署将 35 微克/立方米设定为三年 24 小时 PM_{2.5} 平均浓度的 98% 分位数⁸的最高上限值 [18]。而在我们研究的这五个中国城市中，只有广州的 90% 分位数浓度在 100 微克/立方米以下，其它四个城市的 90% 分位数浓度都在 100 微克/立方米以上。即便是空气质量较好的 2015 年，北京、成都和沈阳的月均值浓度，均超过了 60 微克/立方米。其中，北京为 80 微克/立方米，是世界卫生组织初期过度目标的两倍多。即便在上海这个空气质量相对较好的

⁸98%分位数：有 98% 的 PM_{2.5} 数值低于该浓度，2% 的数值高于该浓度，它刻画了最严重的 2% 的污染严重程度。注意：98% 分位数，比 90% 分位数要高，所以，空气质量目标设定为 98% 分位数不超过 35 微克/立方米要比设定 90% 分位数不超过 35 微克/立方米严格许多。而我们现在主要还在说均值浓度不超过 35 微克/立方米。

城市，2015 年的 90%分位数浓度也达到 104 微克/立方米。在三个污染最严重的城市，90%分位数都超过了 112 微克/立方米，其中北京为 202 微克/立方米。因此，即使要达到世卫组织的初期目标，中国的大气污染防治依然有很长的路要走。

(4) 我们的统计分析发现北京和沈阳具有非常显著的冬季供暖效应。这一效应，对于整个淮河以北地区应该说也同样适用。冬季的大气污染防治是中国北方地区面临的巨大挑战。**解决这一问题的关键是大大提高天然气等低排放能源的使用，替代、减少煤炭的消耗，**包括使用经济手段极大的抑制煤炭的消耗。如果中国的冬季供暖暂时还离不开燃煤，**我们建议：建立严格的监管体系并有效实施，检测市场上所售煤炭的质量，禁止开采、贩卖低质煤炭，从而有效减少因冬季供暖用煤带来的污染物排放。**

(5) 我们在五大城市空气质量的比较研究中发现，最明显的空气质量改善主要出现在 2015 年。我们认为这可能是由于两个原因：一是从 2015 年开始实施了更严格的大气环境监管措施；另一个原因则是中国经济增速放缓。然而，中国目前公开的经济、能源数据，在时间和空间的维度上都非常粗略，不能为确定剥离这两方面的原因提供足够的数据支持。例如，各省的能源消耗数据是年度的，而月度数据也只有全国范围的。同时数据公开的时间滞后也很严重。这种数据生态，会严重影响中国对正在实施的大气污染管理办法进行及时的、科学的判断。**我们建议：公开更细化更精准的经济、能源和排放源数据。**

(6) 我们建议：各城市、区域应该确定各自的环境污染物排放的承载上限。承载上限的确定应该基于地理条件的限制和气象条件的特点。在今后的城市区域规划和经济发展中，环境污染的承载上限应当被充分遵守，这样才能实现经济和环境的双赢。扩散条件不好的区域，如四川盆地，华北平原，关中平原等，应该避免布局高污染、高排放的工业项目，多发展低排放的服务业等其它行业。

(7) 发达国家的经验和教训说明，极大地减少煤炭的消耗是解决大气污染问题的一个有效方法。中国自加入世贸组织以来，煤炭消耗占世界总消耗的份额从 31% 剧增到 2012 年的 48%，绝对量上增加了 1.75 倍。中国需要核算煤炭及其它主要能源（如天然气），所带来的经济效益，及由其产生的污染所带来的环境成本、人类健康损害成本、农作物/食品质量

成本和气候变化等成本。这一能源费效核算，理应成为国家制定能源战略的基础数据之一，为建立大气污染防治的能源策略提供科学的依据。

参考文献：

[1] 北京大学统计科学中心环境统计组. 空气质量评估报告：北京城区 2010-2014 年 PM_{2.5} 污染状况研究，2015 年 3 月。（http://www.stat-center.pku.edu.cn/Stat/Index/article_show/id/159）

[2] 中国国家统计局. 国家数据：<http://data.stats.gov.cn/>

[3] Tian, H. Z., Hao, J. M., Hu, M. Y., and Nie, Y. F. (2007). Recent trends of energy consumption and air pollution in China. *Journal of Energy Engineering*, 133(1), 4-12.

[4] Zhang, X. Y., Wang, Y. Q., Niu, T., Zhang, X. C., Gong, S. L., Zhang, Y. M., and Sun, J. Y. (2012). Atmospheric aerosol compositions in China: spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(2), 779-799.

[5] Guo, S., Hu, M., Zamora, M. L., Peng, J., Shang, D., Zheng, J., ...and Molina, M. J. (2014). Elucidating severe urban haze formation in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(49), 17373-17378.

[6] Pope III, C. A., Ezzati, M., and Dockery, D. W. (2009). Fine-particulate air pollution and life expectancy in the United States. *New England Journal of Medicine*, 360(4), 376-386.

[7] Burney, J., and Ramanathan, V. (2014). Recent climate and air pollution impacts on Indian agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(46), 16319-16324.

[8] Charlson, R. J., Schwartz, S. E., Hales, J. M., Cess, R. D., COAKLEY, J. J., Hansen, J. E., and Hofmann, D. J. (1992). Climate forcing by anthropogenic aerosols. *Science*, 255(5043), 423-430.

[9] Grantz, D. A., Garner, J. H. B., and Johnson, D. W. (2003). Ecological effects of particulate matter. *Environment International*, 29(2), 213-239.

[10] Spegele, B. Comparing pollution data: Beijing vs. US Embassy on PM_{2.5}. *The Wall Street Journal* (January 23th, 2012).

[11] Andrews, S. Q. (2008). Inconsistencies in air quality metrics: 'BlueSky' days and PM₁₀ concentrations in Beijing. *Environmental Research Letters*, 3(3), 034009.

[12] Chen, Y., Jin, G. Z., Kumar, N., and Shi, G. (2012). Gaming in air pollution data? lessons from china. *The BE Journal of Economic Analysis & Policy*, 12(3).

[13] Ghanem, D., and Zhang, J. (2014). Effortless Perfection: Do Chinese cities manipulate air pollution data?. *Journal of Environmental Economics and Management*, 68(2), 203-225.

[14] World Health Organization (2006). Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide: global update 2005.

[15] 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* (Vol. 471, No. 2182, p. 20150257).
(<http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/471/2182/20150257>)

[16] Liang, X., Li, S., Zhang, S., Huang, H., and Chen, S. X. (2015, October). Tales of Five Chinese Cities: PM_{2.5} data Reliability and Compatibility in Air-Quality Assessment. Working Paper, Center for Statistical Science, Peking University.

[17] Dominici, F., Greenstone, M., and Sunstein, C. R. (2014). Particulate matter matters. *Science (New York, NY)*, 344(6181), 257.

[18] U.S. Environmental Protection Agency (2013). National ambient air quality standards for particulate matter, final rule. *Federal Register* (78), 3086-3287.

附录：

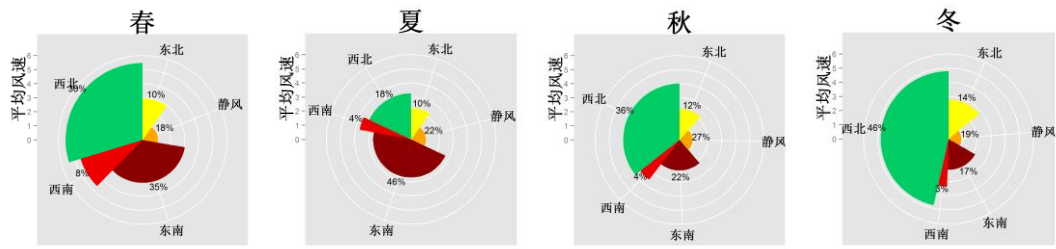
1. 五城市风向的合并分类

表 S1：五城市的风向合并分类

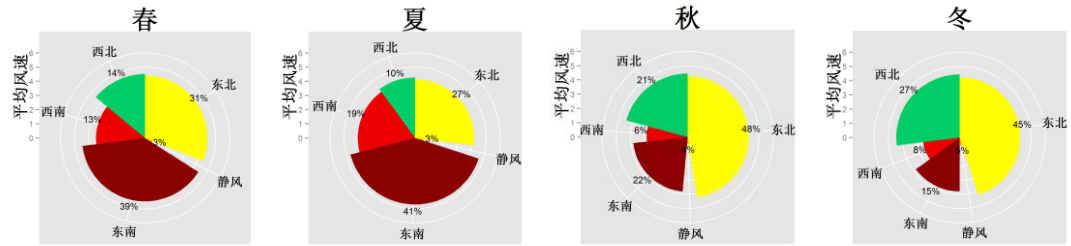
风向	北京	上海	广州	成都	沈阳
西北 (NW)	正西, 西北偏西, 西北, 西北偏北, 正北	正西, 西北偏西, 西北, 西北偏北	西北偏西, 西北, 西北偏北, 正北	西北偏西, 西北, 西北偏北, 正北	西北偏西, 西北, 西北偏北, 正北
东北 (NE)	东北偏北, 东北, 东北偏东	正北, 东北偏北, 东北, 东北偏东, 正东	东北偏北, 东北, 东北偏东, 正东	东北偏北, 东北, 东北偏东, 正东	东北偏北, 东北, 东北偏东
东南 (SE)	正东, 东南偏东, 东南, 东南偏南, 正南	东南偏东, 东南, 东南偏南	东南偏东, 东南, 东南偏南	东南偏东, 东南, 东南偏南	正东, 东南偏东, 东南, 东南偏南
西南 (SW)	西南偏南, 西南, 西南偏西	正南, 西南偏南, 西南, 西南偏西	正南, 西南偏南, 西南, 西南偏西, 正西	正南, 西南偏南, 西南, 西南偏西, 正西	正南, 西南偏南, 西南, 西南偏西, 正西
静风 (CV)	包含静风 (风速小于 0.5 米/秒) 和无持续风向				

2. 五城市基准风向及风速的季节分布

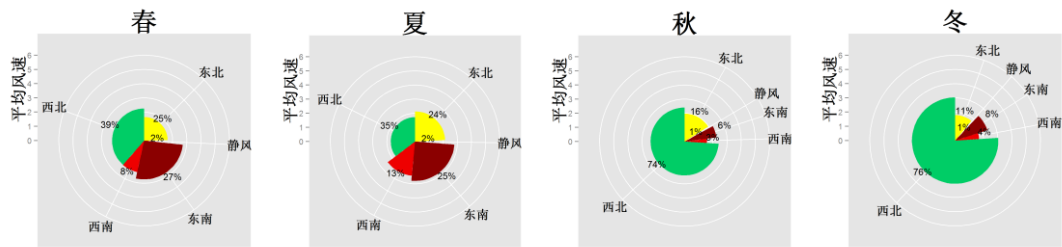
(a) 北京



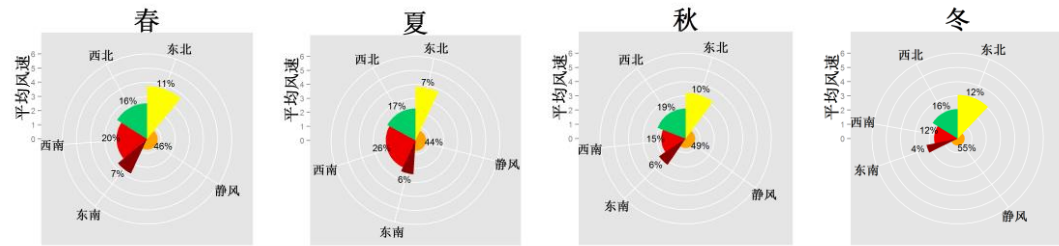
(b) 上海



(c) 广州



(d) 成都



(e) 沈阳

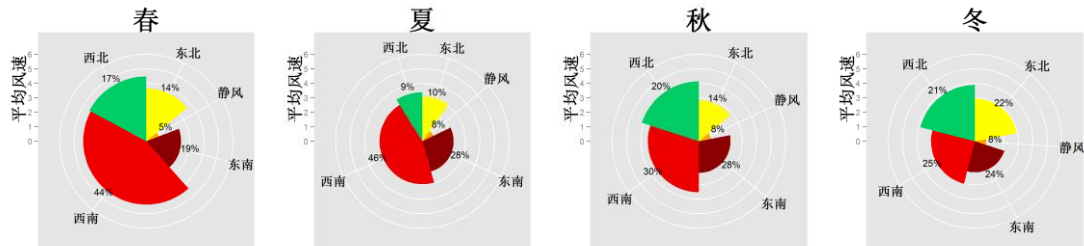
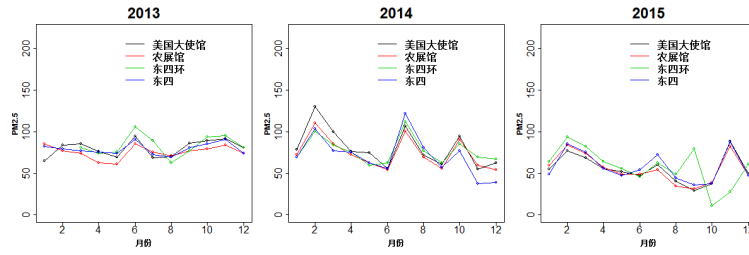


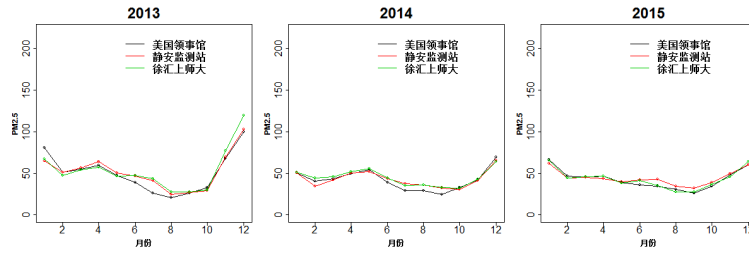
图 S1: 五城市四季基准风向及风速分布图, 角度代表风向比例, 半径代表平均风速大小。

3. 五城市各站点剔除气象因素后的月度 $PM_{2.5}$ 中位数与 90%分位数浓度

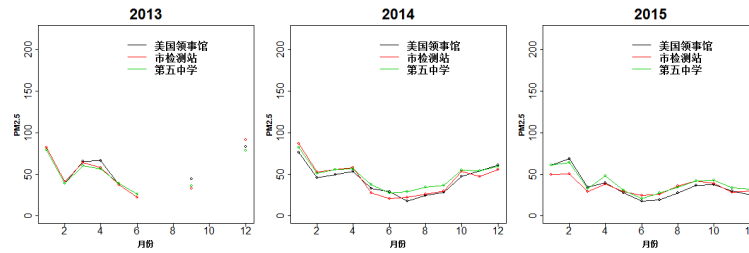
(a) 北京



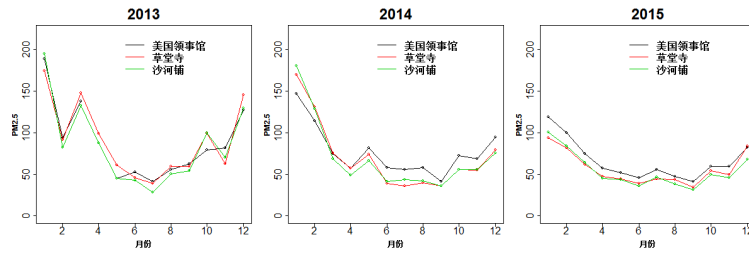
(b) 上海



(c) 广州



(d) 成都



(e) 沈阳

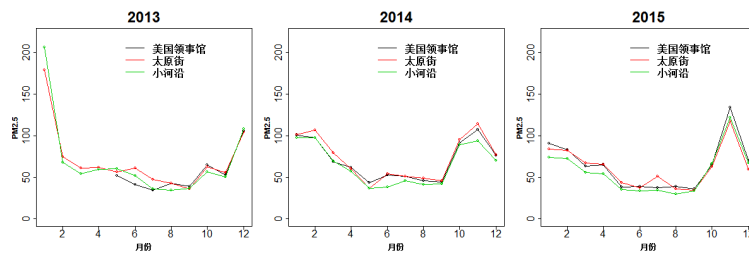
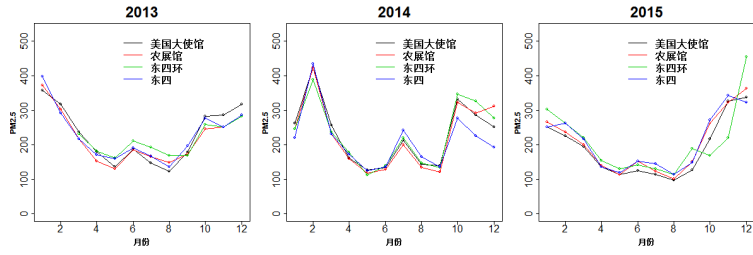
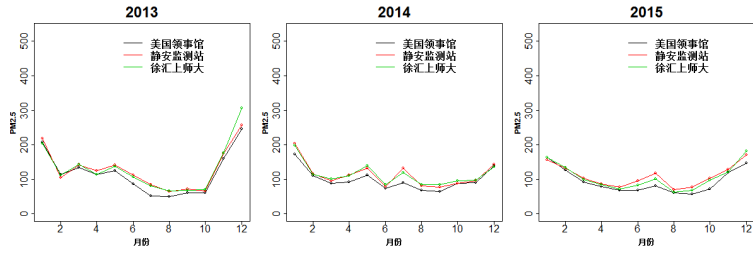


图 S2: 五城市各站点剔除气象因素后的 $PM_{2.5}$ 月中位数浓度 (微克/立方米)。注: (a)中北京东四环在 2015 年 10 月到 12 月的波动, 是由于该站点在这三个月的数据有 80%是缺失的。

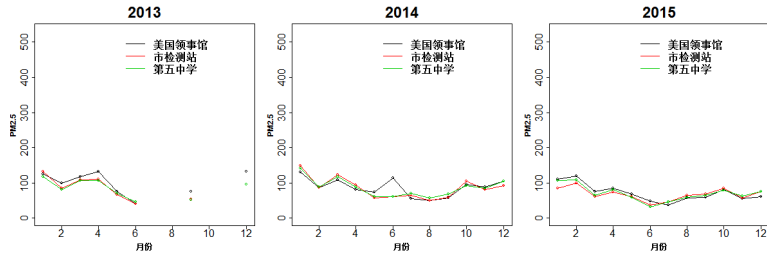
(a) 北京



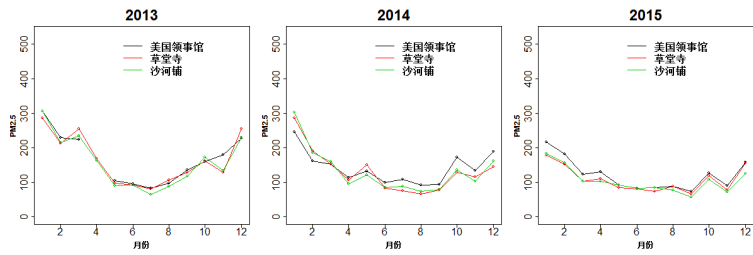
(b) 上海



(c) 广州



(d) 成都



(e) 沈阳

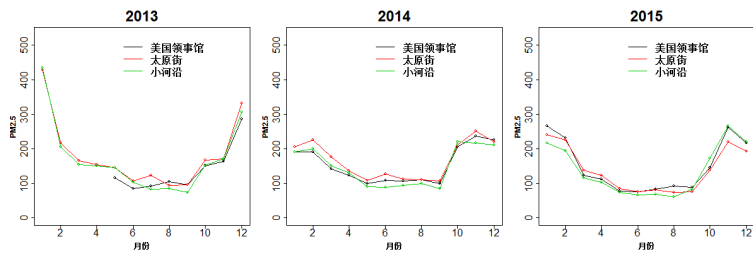


图 S3: 五城市各站点剔除气象因素后的 PM_{2.5}月 90%分位数浓度 (微克/立方米)。注: (a)中北京东四环在 2015 年 10 月到 12 月的波动, 是由于该站点在这三个月的数据有 80%是缺失的。

4. 剔除气象因素后的 PM_{2.5} 月中位数与 90%分位数浓度的年度变化

(a) 北京

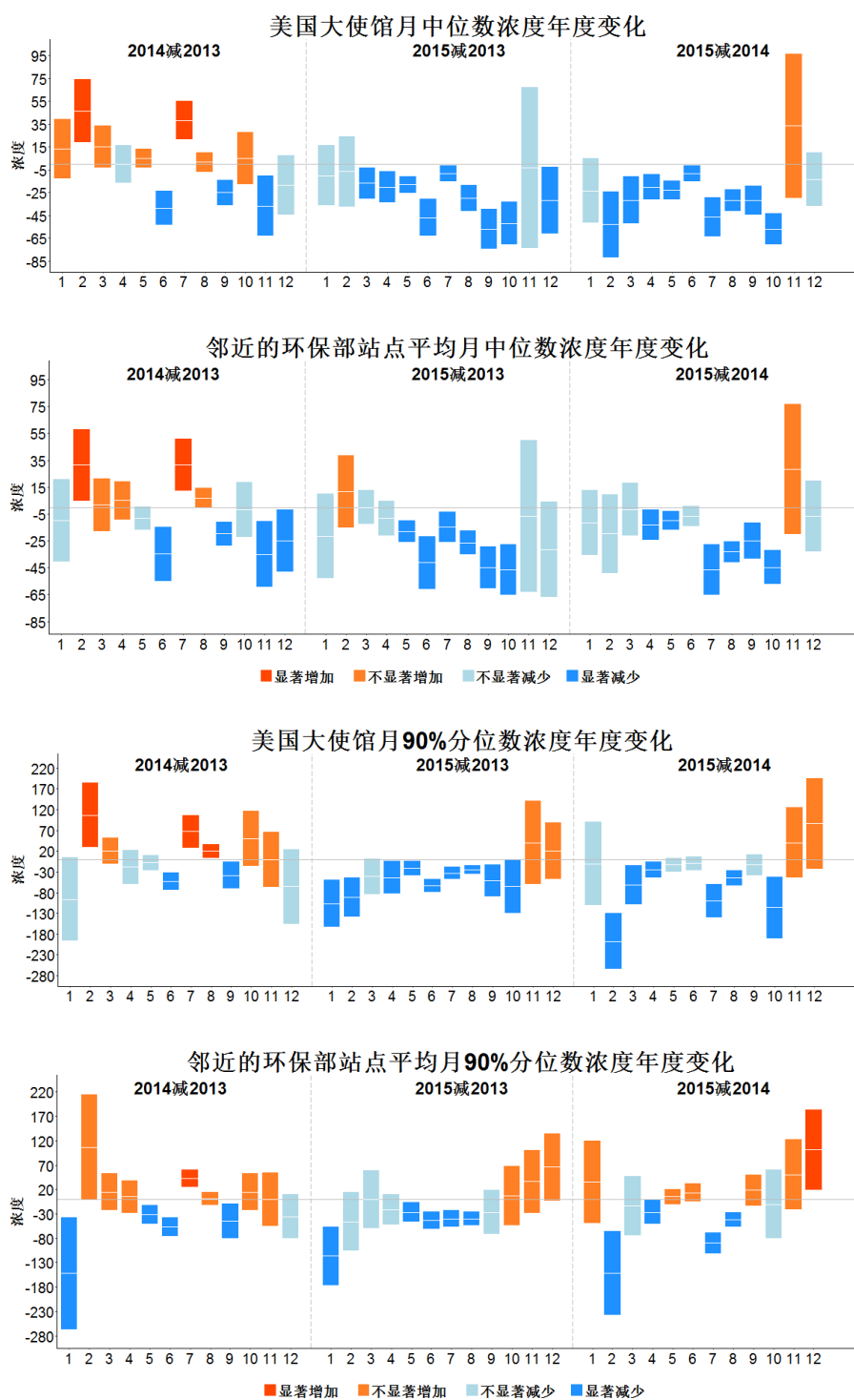


图 S4-(a)：北京美国大使馆与邻近的环保部站点剔除气象因素后的 PM_{2.5} 月中位数和 90%分位数浓度（微克/立方米）年度变化对比

(b) 上海

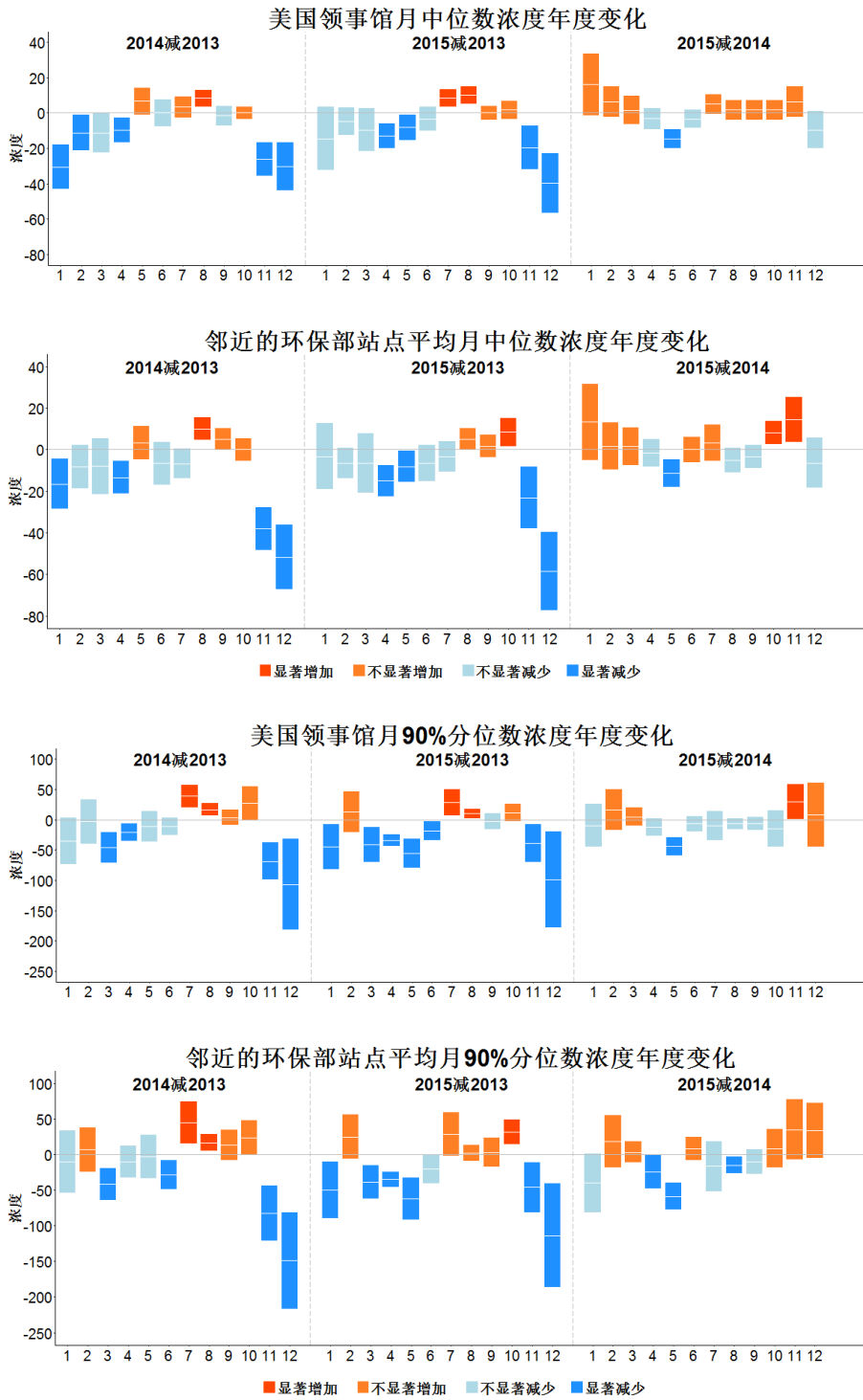


图 S4-(b)：上海美国领事馆与邻近的环保部站点剔除气象因素后的 PM_{2.5} 月中位数和 90%分位数浓度（微克/立方米）年度变化对比

(c) 广州

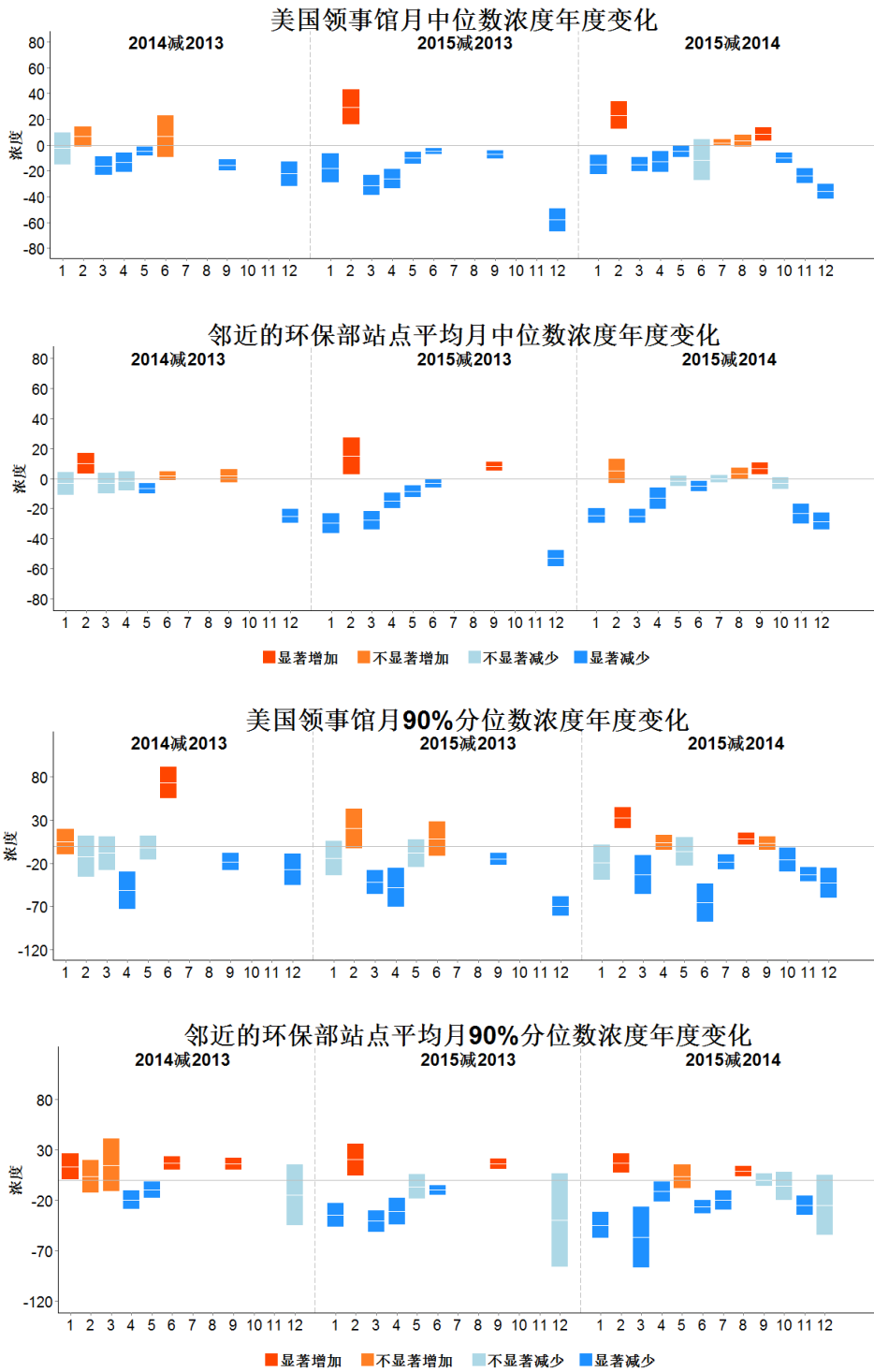


图 S4-(c)：广州美国领事馆与邻近的环保部站点剔除气象因素后的 PM_{2.5} 月中位数和 90%分位数浓度（微克/立方米）年度变化对比

(d) 成都

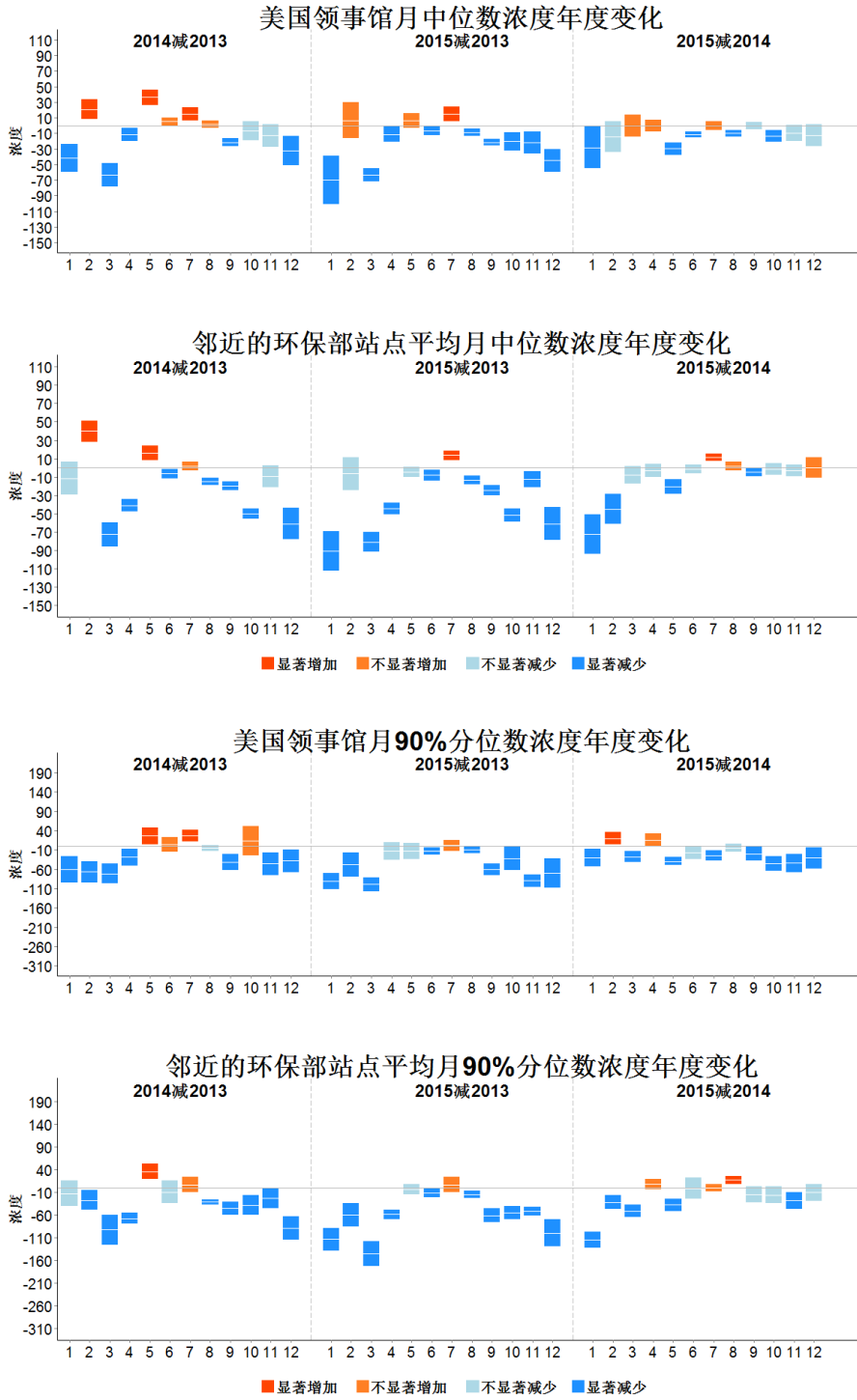


图 S4-(d)：成都美国领事馆与邻近的环保部站点剔除气象因素后的 PM_{2.5} 月中位数和 90%分位数浓度（微克/立方米）年度变化对比

(e) 沈阳

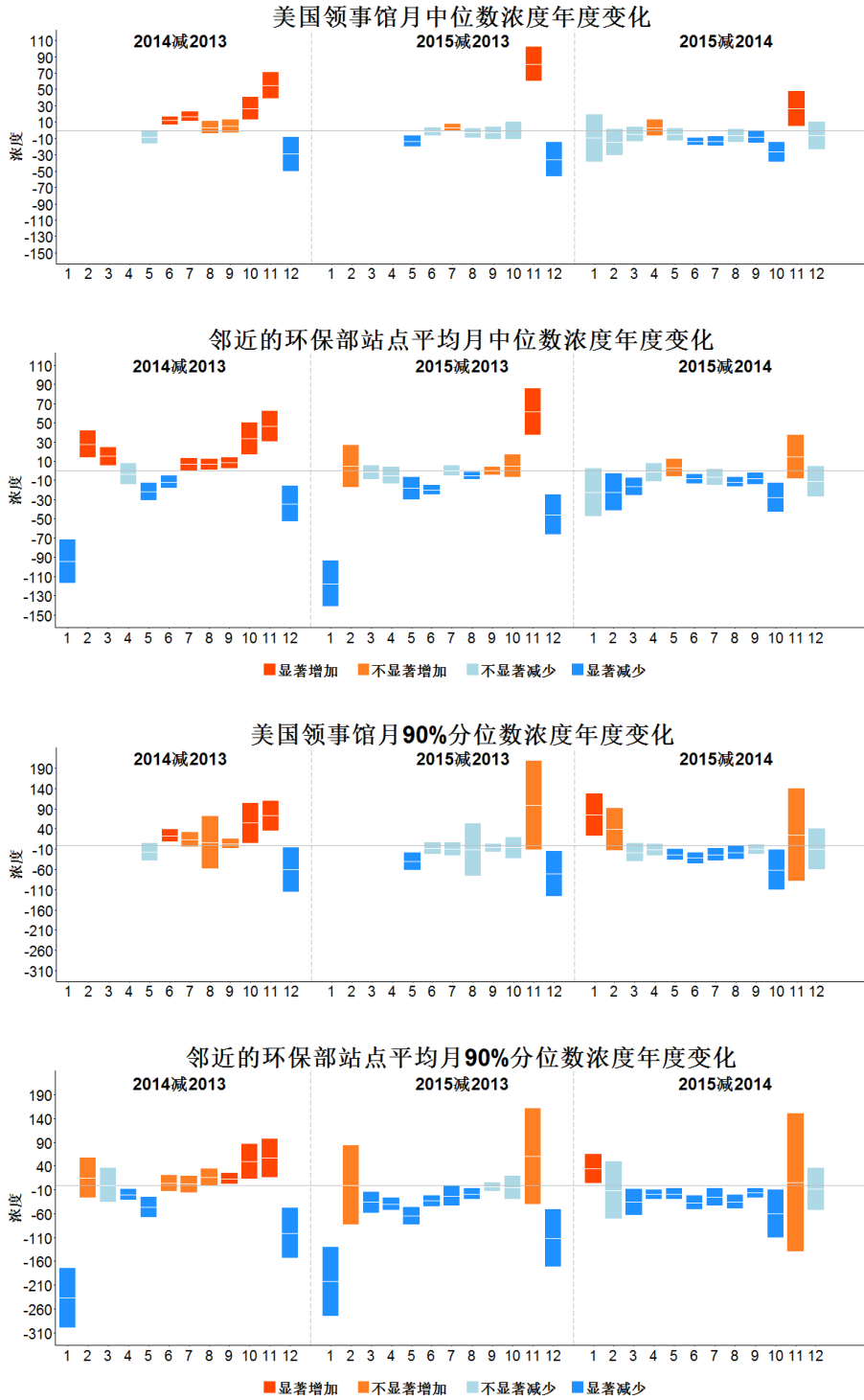


图 S4-(e)：沈阳美国领事馆与邻近的环保部站点剔除气象因素后的 $PM_{2.5}$ 月中位数和 90%分位数浓度（微克/立方米）年度变化对比

5. 五城市 PM_{2.5}月均值、中位数、90%分位数浓度的半年度平均比较

表 S2: 五城市半年度均值、中位数、90%分位数浓度比较 (括号中是标准差)

城市	年份	均值 (标准差)	中位数 (标准差)	90%分位数 (标准差)
北京	2013 (1月-6月)	100.2(2.50)	77.8(3.46)	235.2(6.80)
	2014 (1月-6月)	93.8(3.13)	77.8(3.36)	220.8(10.11)
	2015 (1月-6月)	82.1(1.97)**	62.7(3.11)**	187.4(6.09)**
	2013 (7月-12月)	98.6(2.34)	79.3(3.47)	218.4(6.04)
	2014 (7月-12月)	93.0(2.42)	73.3(3.02)	224.7(7.05)
	2015 (7月-12月)	79.1(2.77)***	50.8(5.44)***	216.9(9.08)
上海	2013 (1月-6月)	65.3(1.39)	54.8(1.64)	135.9(4.45)
	2014 (1月-6月)	57.5(1.54)***	46.9(1.38)***	119.3(4.21)**
	2015 (1月-6月)	53.4(1.17)*	46.8(1.63)	105.1(3.03)**
	2013 (7月-12月)	57.5(1.69)	49.3(1.61)	118.5(6.16)
	2014 (7月-12月)	45.5(0.94)***	39.7(1.14)***	98.7(3.91)***
	2015 (7月-12月)	47.1(1.32)	40.6(1.25)	103.2(4.87)
广州	2013 (1月-6月)	54.0(0.91)	51.1(2.92)	92.8(3.93)
	2014 (1月-6月)	54.3(0.83)	50.0(2.89)	96.1(4.00)
	2015 (1月-6月)	42.8(0.77)***	40.7(2.60)*	76.9(3.58)***
	2013 (7月-12月)	55.1(1.01)	60.7(5.51)	95.3(6.90)
	2014 (7月-12月)	44.0(0.59)***	41.2(2.62)**	76.8(3.58)*
	2015 (7月-12月)	36.0(0.63)***	32.6(2.23)**	63.3(3.25)***
成都	2013 (1月-6月)	108.2(1.70)	100.0(1.71)	185.3(3.99)
	2014 (1月-6月)	94.1(1.59)***	89.4(1.75)***	159.0(2.75)***
	2015 (1月-6月)	70.3(1.38)***	66.1(2.15)***	126.4(2.22)***
	2013 (7月-12月)	80.9(1.39)	74.4(1.84)	143.1(2.80)
	2014 (7月-12月)	62.4(1.30)***	55.5(1.30)***	114.9(3.05)***
	2015 (7月-12月)	54.8(0.97)***	51.3(1.25)**	97.5(2.35)***
沈阳	2013 (1月-6月)	94.8(2.37)	80.5(2.35)	197.6(7.31)
	2014 (1月-6月)	79.5(1.73)***	69.9(2.02)***	149.8(3.72)***
	2015 (1月-6月)	72.2(2.53)**	60.3(2.66)**	141.6(6.16)
	2013 (7月-12月)	69.7(1.82)	56.4(1.93)	151.7(5.05)
	2014 (7月-12月)	82.2(2.56)	68.0(2.05)	162.8(6.58)
	2015 (7月-12月)	74.2(2.59)**	60.7(2.24)**	141.8(10.2)

的个数代表统计检验该年相比前一年是否有下降的显著性水平(无:p 值大于 0.05, 表示无显著性差异;
*:p 值介于 0.025 和 0.05 之间; **: p 值介于 0.01 和 0.025 之间; ***:p 值小于 0.01)。

6. 五城市所在省市单位面积的能源消耗和单位 GDP 的能源消耗

表 S3: 五城市所在省市单位面积的能源消耗(万吨/万平方公里)和单位 GDP 的能源消耗(万吨/亿元)。华北平原包括京津冀三省市, 长江三角洲包括苏浙沪三省市。

	华北平原	长江三角洲	广东	四川-重庆	辽宁
单位面积 煤炭消耗	1683	2166	946	302	1216
单位面积 汽油消耗	45	107	62	18	48
单位面积 柴油消耗	61	109	88	21	72
单位 GDP 煤炭消耗	0.548	0.354	0.251	0.401	0.629
单位 GDP 汽油消耗	0.015	0.018	0.017	0.024	0.025
单位 GDP 柴油消耗	0.020	0.018	0.023	0.027	0.037

课题组成员：



梁萱，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对本研究的大力支持。感谢在意空气 App (<http://air.fresh-ideas.cc/>)，网站 pm25.in，青悦开放环境数据中心 (<http://wat.epmap.org/>)，中国环保部网站，美国驻华使/领馆数据网站和北京维艾斯气象信息科技有限公司为本次报告提供数据。感谢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，感谢伦敦政治经济学院姚琦伟教授、罗格斯大学陈嵘教授、哈佛大学孟晓犁教授、密歇根大学何旭铭教授、芝加哥大学 Ruey S. Tsay 教授的交流讨论。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副院长柴发合教授在本项目研究过程中提出的建议。感谢北京师范大学殷水清博士，北京大学邹韬、何婧、黄家盛、梁德才、王海明、陈磊同学，爱荷华州立大学王恒放、张豪哲、王振中同学，密歇根大学郭心舟同学，以及王文庆先生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林伟老师，四川大学经济学院郭斌老师，庞立春女士，北京大学统计科学中心张卫香、常珂琪、井天景的帮助。感谢光华管理学院晏琴和牟修锐在报告写作过程中提供的中文编辑服务，纽约室内设计学院姚佳妮再次设计报告的封面。

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>