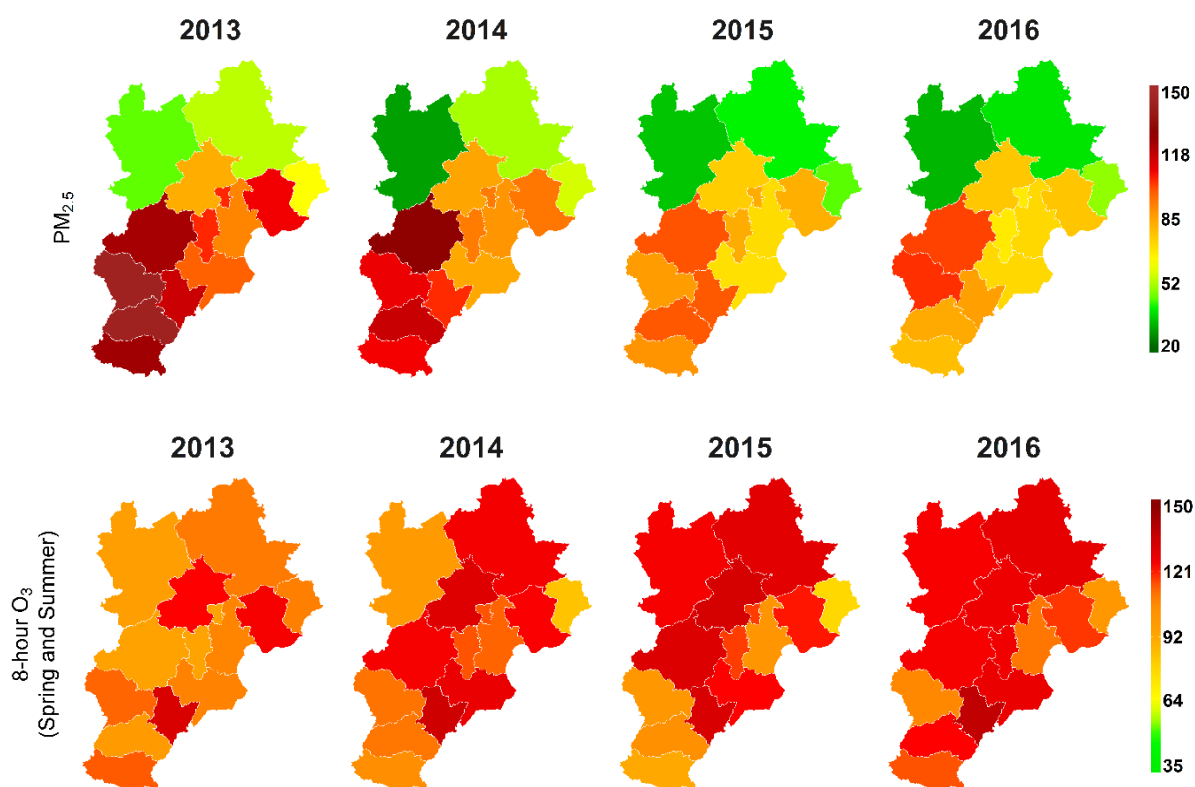


空气质量评估报告（四）

京津冀 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

二零一七年八月

前言

本报告是由北京大学统计科学中心与北京大学光华管理学院团队完成的第四份关于国内重点区域空气质量状况评估的研究报告。前三份报告分别发布于 2015 年、2016 年和 2017 年的三月份，第一份报告[1]就北京城区 2010 年至 2014 年的 $PM_{2.5}$ 污染状况进行了研究；第二份报告[2]通过研究 2013 年至 2015 年北京、上海、广州、成都和沈阳美国使领馆和相邻环保部站点的 $PM_{2.5}$ 数据，比较了两个数据源的一致性，度量和分析了这五个城市的 $PM_{2.5}$ 污染状况；今年 3 月发布的第三份报告[3]，基于北京 36 个空气质量监测站点对该地区 2013-2016 年空气质量变化情况进行评估，分析了 APEC、大阅兵等大型活动临时管制措施对空气质量数据的影响，除了 $PM_{2.5}$ 外，还将其他五种空气常规污染物 (PM_{10} 、二氧化氮、二氧化硫、一氧化碳和臭氧) 数据纳入了研究范围。

京津冀地区是中国目前空气污染最严重的区域，也是中国大气污染治理的首要之地。2013 年 9 月，国务院发布的《大气污染防治行动计划》（简称“国十条”）要求京津冀在 2017 年 $PM_{2.5}$ 浓度比 2012 年下降 25%，其中北京市的年平均浓度要控制在 60 微克/立方米左右。“国十条”发布三年多以来，京津冀地区的污染是否有所改善？有多大程度的改善？这正是本报告的研究目的。本报告将通过分析和评估北京市、天津市以及河北省 11 个地级市共 13 个城市的空气质量监测数据来回答以上问题。我们将基于 73 个国控空气质量监测站点 2013 年 3 月至 2017 年 5 月污染物监测数据和 25 个气象站过去七年的气象数据（数据总量超过 4400 万条），科学分析和评估京津冀地区过去四年多空气质量实际状态和变化趋势。

在本报告前三部分，我们对研究背景、所采用的数据来源进行说明，就京津冀在研究时段内的空气质量等级状况作了总体比较和概述。在报告第四部分，我们重点对六大常规空气污染物作了分类评估，就不同区域、不同季节呈现的变化特征进行具体分析。报告的五、六、七部分还对京津冀地区的污染物监测数据质量和相关能源使用和工业运行情况作了分析，并做出整体总结、提出了相应建议。

本报告有以下具体目标：

- 描述 2013 年 3 月-2017 年 5 月，环保部监测的六种污染物（ $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、二氧化氮、二氧化硫、臭氧和一氧化碳）在京津冀 13 个城市的季节和空间分布特征；
- 分析每个城市和整个地区六种污染物的浓度变化趋势，就京津冀地区空气质量是否改善，“国十条”任务是否能顺利完成给出解答；
- 分析能源消费结构对大气污染的影响。

目录

前言.....	封二
一、目录.....	1
二、背景介绍.....	2
二、采用数据说明.....	2
三、空气质量基本描述.....	4
四、六大常规空气污染物分类评估.....	9
五、数据质量问题说明.....	39
六、区域煤炭能耗与工业运行数据分析.....	41
七、结论.....	47
附录.....	52
参考文献.....	57
致谢.....	封三

一、背景介绍

从地理条件来看，京津冀大部分区域（张家口和承德除外）位于华北平原北部，西靠太行山脉，北依燕山，东临渤海，呈现半封闭的地形。京津冀地区的几个主要城市，北京、保定、石家庄、邢台和邯郸都坐落在太行山脚下，大气扩散条件差，非常不利于污染物的扩散。这一地形因素使得该地区的大气环境承载能力并不高，不适合聚集大量的工业，尤其是炼钢、炼铁、炼焦、造水泥等高污染行业。然而，2001年北京获得奥运会举办权和加入世贸组织之后，北京东面和南面的华北平原上出现了大量的重工业。河北省也迅速发展成为一个重工业大省，成为中国乃至世界第一的钢铁生产地区。不仅如此，华北平原南部的山东和河南也是能源消耗大户。如果遇到不利的气象扩散条件，如在持续的南风或者无风高湿的静稳天气下，过量的排放极易导致京津冀地区持续的极端污染。

2013年初我国建立大气污染监测网络，实时监测包括PM_{2.5}在内的六种常规污染物（PM_{2.5}、PM₁₀、二氧化氮、二氧化硫、臭氧和一氧化碳）的浓度。2013年9月，国务院发布了《大气污染防治行动计划》[4]，即“国十条”，设定了全国主要区域2017年空气质量的具体指标：到2017年，全国地级及以上城市可吸入颗粒物（PM₁₀）浓度比2012年下降10%以上；优良天数逐年提高；京津冀、长三角、珠三角等区域细颗粒物（PM_{2.5}）浓度分别下降25%、20%、15%左右，其中北京市细颗粒物年均浓度控制在60微克/立方米左右。如今，我们已经步入了2017年的考核年，人们普遍关心的是“近年来，京津冀地区空气质量是否有所好转，如有好转，改善幅度是多少”，“2017年污染物浓度下降的目标能否实现”。在本报告中，我们将通过数据研究回答这些问题。

二、采用数据说明

本报告所使用的污染物浓度数据主要来自于环保部所属的国控站，共73个站点。其中包含：

- 北京市11个国控空气质量监测站（不包括定陵）
- 天津市位于中心城区的11个国控空气质量监测站
- 河北省11个城市共51个国控空气质量监测站

图1给出了这73个站点的位置（红点），总体可以看出，京津冀地区，尤其是河北省的城市，空气质量检测站点都比较集中，分散度不够。

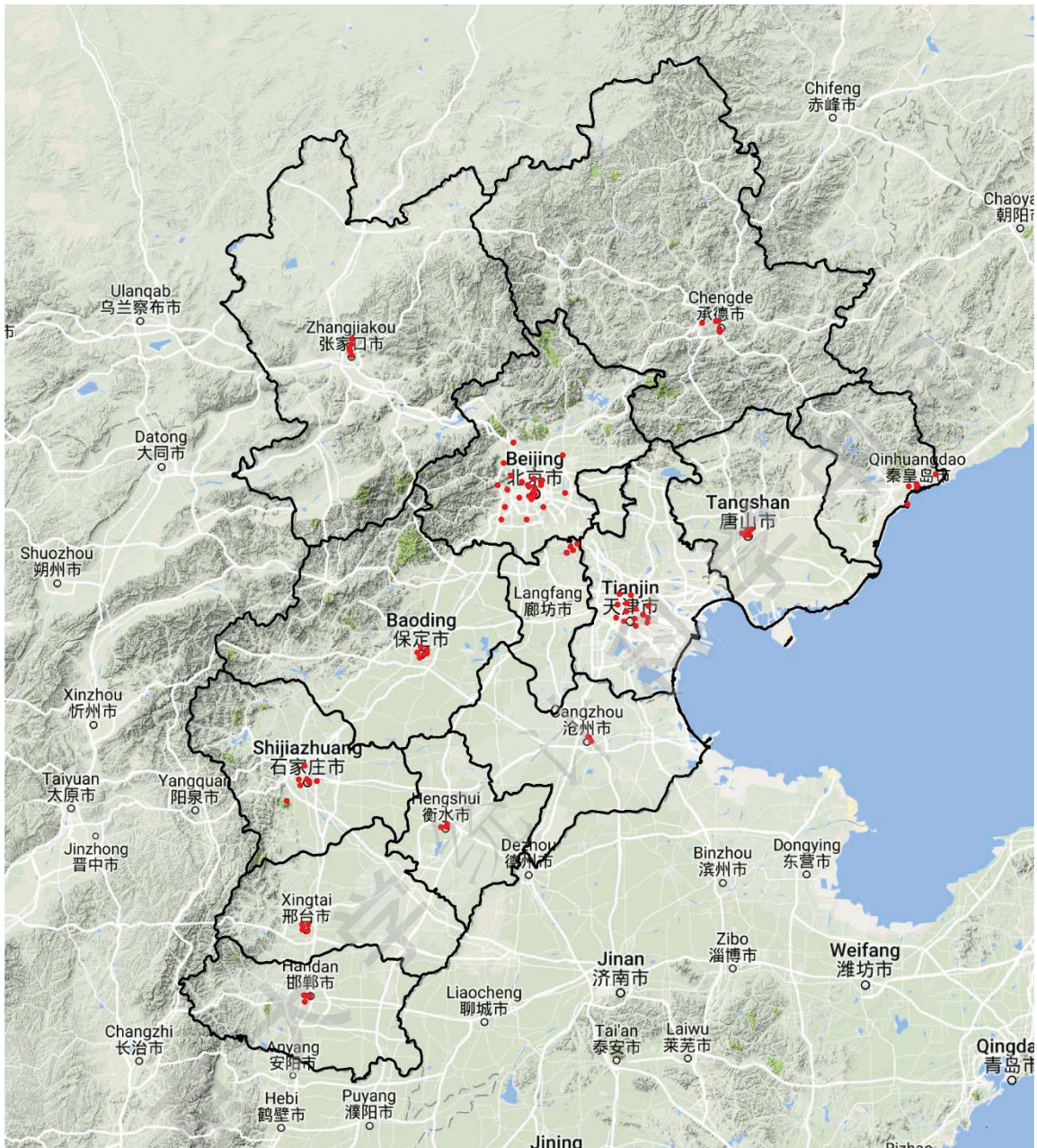


图 1: 京津冀 13 个城市及其空气质量监测站点分布 (• 红点代表空气质量监测站点)

由于 2013 年 1 月和 2 月京津冀地区站点的空气污染物数据有较高比例的缺失，数据质量不高，所以本报告选取的数据时段为 2013 年 3 月到 2017 年 5 月。因此，本报告使用的“年”并非自然年，而是一年的 3 月份到下一年 2 月份的“季节年”，涵盖一个完整的四季。这同之前发布的第三份报告一致。我们的空气质量评估以季节为基本时间单元，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。本报告将分析六种空气质量常规污染物： $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、二氧化氮(NO_2)、二氧化硫(SO_2)、一氧化碳(CO)和臭氧(O_3)。

由于空气质量状况受气象条件的影响很大，为了得出并比较某一季节不同年份的空气质量数据，本报告沿用前三个报告的方法，对污染物浓度进行气象调整，剔除了气象因素对空气质量的影响。具体来说，我们基于 2010 年 3 月到 2017 年 5 月累计超过七年的小时气象数据，对京津冀 13 个城市分别构造了基准气象条件。之后，在此基准气象条件下计算各季度空气污染物的浓度。其中，河北省 11 个地级市的气象数据来源于对应城市的气象站点；北京市的气象数据来源于朝阳、海淀、丰台、通州、大兴、昌平、顺义、房山、石景山、门头沟和南郊观象台共 11 个气象站点；天津市中心城区的气象数据来源于天津城区（市内六区）、北辰区和东丽区共 3 个气象站点。

三、空气质量基本描述

我们首先利用每个城市的 $PM_{2.5}$ 数据来初步描述京津冀 13 个地级以上城市空气质量的基本状况。

本报告将空气质量按照 $PM_{2.5}$ 浓度划分成六个等级，其中括号内为对应的中国空气质量等级划分：

- “优良空气”（优）： $PM_{2.5}$ 浓度小于或等于 35 微克/立方米
- “轻度污染”（良）： $PM_{2.5}$ 浓度介于 35 和 75 微克/立方米之间
- “中度污染”（轻度污染）： $PM_{2.5}$ 浓度介于 75 和 115 微克/立方米之间
- “污染”（中度污染）： $PM_{2.5}$ 浓度介于 115 和 150 微克/立方米之间
- “重度污染”（重度污染）： $PM_{2.5}$ 浓度介于 150 和 250 微克/立方米之间
- “严重污染”（严重污染）： $PM_{2.5}$ 浓度大于 250 微克/立方米。

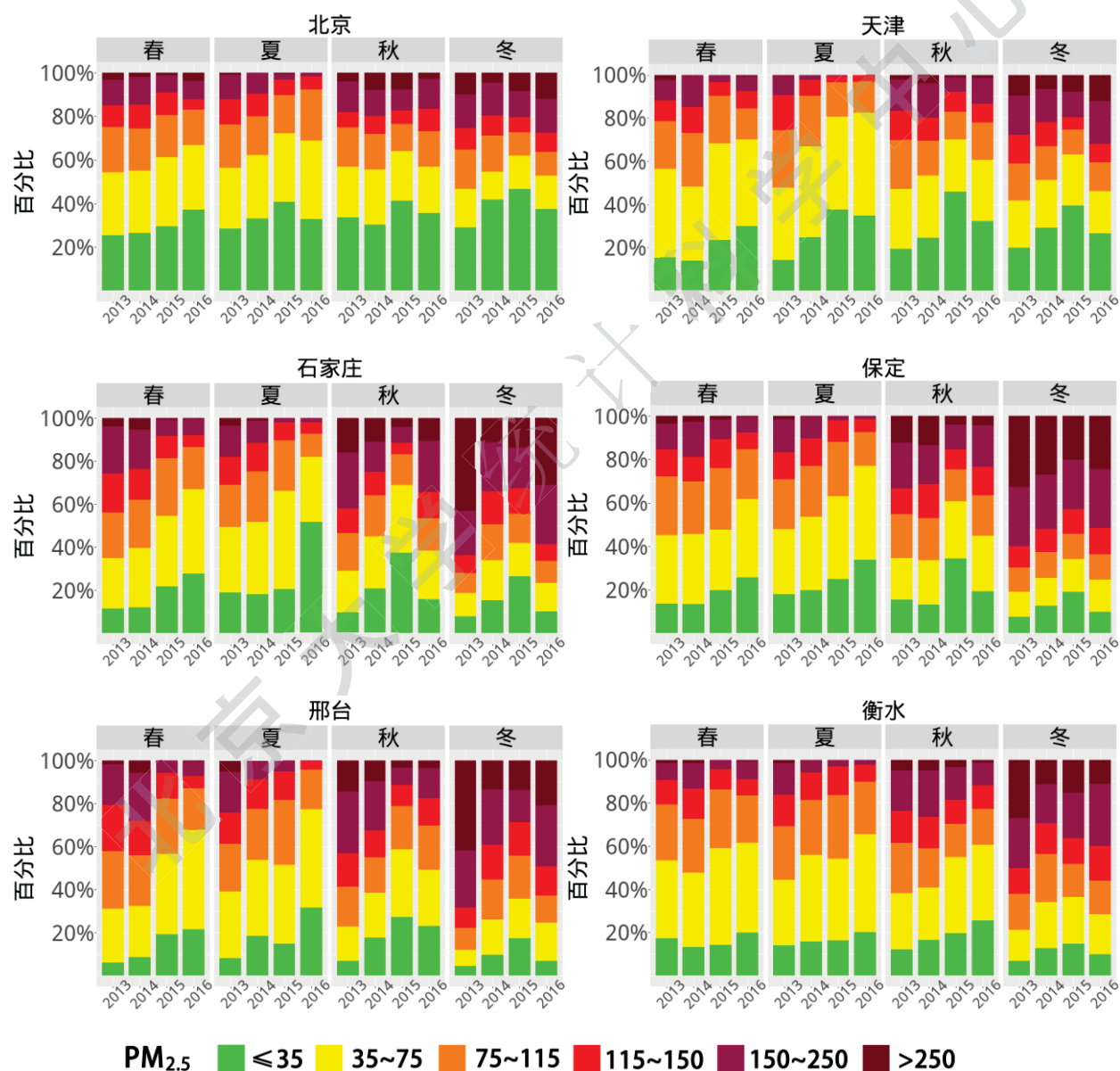
目前我国以 75 微克/立方米作为二十四小时“优良空气” $PM_{2.5}$ 浓度的最高值，这是世界卫生组织（以下简称 WHO）所建议的空气质量准则中“过渡时期”的初级指标[5]。从图 2 我们可以看到，按照这个标准，京津冀很多城市已经有超过 50%的时间达到“优良空气”标准。根据“国十条”给北京市设定的 2017 年目标，同时考虑到近几年我国空气质量的改善情况，我们认为继续使用 75 微克/立方米作为“优良空气”的上界已过于宽松，应对该标准进行适当上调。

本报告使用 35 微克/立方米作为空气质量“优”的上界。这是因为，流行病学研究发现，长期暴露在 $PM_{2.5}$ 浓度介于 35 微克/立方米和 75 微克/立方米之间的空气中依然会对人体健康造成危害[6]。

因此，我们建议直接使用 35 微克/立方米作为“良”的上限，或者使用 WHO “过渡时期”第二级指标所给定的 50 微克/立方米作为“良”的上限。

为了解各城市的空气质量状况，我们首先对当地所有国控站点的原始 PM_{2.5} 小时浓度取平均值作为该城市的平均 PM_{2.5} 小时浓度。基于所得到的平均 PM_{2.5} 小时浓度数据，我们计算各个城市六种空气质量等级在每个季节所占比例，绘制成图 2。

* 此处需要说明的是，北京的定陵站点和石家庄封龙山站点因设置在城郊山上，是背景站，因此未纳入这两个城市的统计之中。



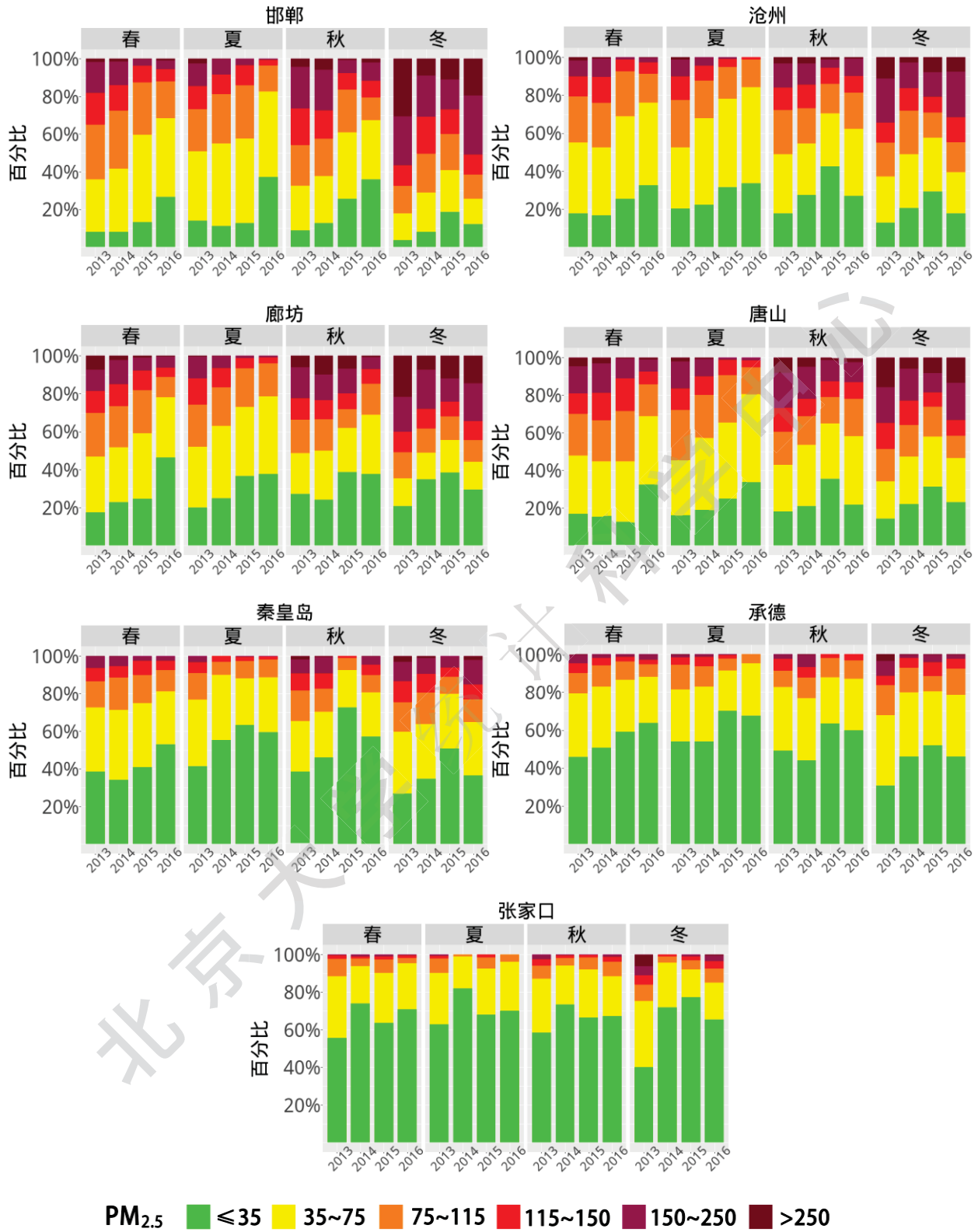


图 2: 京津冀地区 13 市空气质量六个状态时间占比

图 2 展示了京津冀地区 13 个城市基于 PM_{2.5} 浓度划分的空气质量六种状态时间占比。从该图中，我们可以直观地看到该地区空气质量的一些特征：

1. 区域差异显著

京津冀地区 PM_{2.5} 浓度呈现出北部城市最低、沿太行山城市最高、环渤海区域介于中间的明显地理特征。北部三城市（张家口、承德和秦皇岛）空气质量明显好于其它城市。张家口是京津冀地区 PM_{2.5} 浓度最低的城市，其优良空气比例基本保持在 60% 以上。承德和秦皇岛空气质量略微低于张家口。而沿太行山的石家庄、保定、邢台、邯郸和衡水的优良空气比例令人堪忧：夏季优良比例处于 20% 至 40% 之间，冬季优良比例一般不足 20%，最严重时不足 10%，而重污染比例最高超过了 60%。

2. 季节特征明显

不同季节，各个空气质量等级的时间占比有明显差异。这种特征在重污染状态的比例上尤其显著。冬季重污染最多，其比例明显高于其它三个季节。在沿太行山的保定和邢台等城市的一些年份，冬季重污染比例可以超过 60%。夏季重污染鲜有发生，主要以优良和轻度污染为主。春秋两季空气质量介于夏冬之间，且秋季的空气质量低于春季。这些季节特征在沿太行山的石家庄和保定等城市尤为明显。

3. 年际变化：2013 年至 2015 年持续改善，2016 年秋冬季有恶化迹象

从 2013 年至 2015 年，京津冀地区 13 个城市空气质量均有不同程度的改善，主要体现在各个季节的优良比例持续增加、重污染比例大幅减少。其中，重污染比例在冬季的减少十分明显。对于沿太行山的城市石家庄、保定、邢台、衡水和邯郸，冬季重污染比例从 2013 年的 50% ~ 60% 减至 40% 以下甚至更低。到 2016 年，京津冀 13 个城市夏季基本没有重污染过程，转而以优良及轻度污染为主。

然而，在 2016 年秋冬季节，空气质量有所恶化。这主要表现在重污染天气比例迅速增加，增加幅度在沿太行山的石家庄、保定、邢台和邯郸尤为明显。比如石家庄冬季的重污染比例由 2015 年的 33% 上升至 2016 年的 59%，这一比例仅低于 2013 年冬季。

表 1 统计了 2013 和 2016 年度各城市空气质量处于污染和重度及以上污染状态的时间占比。我们可以直观地感受到京津冀空气污染形势的严峻和近年来的改善。

表 1：京津冀 13 市 2013 和 2016 年(自然年)重度以上污染状态*和污染状态**时间占比统计

排名	2013 年		2016 年	
	重度以上 污染状态占比	污染状态 占比	重度以上 污染状态占比	污染状态 占比
1	邢台 40.4%	邢台 94.1%	石家庄 21.2%	衡水 80.7%
2	石家庄 39.0%	邯郸 91.7%	保定 17.8%	邢台 77.6%
3	保定 32.9%	石家庄 88.5%	衡水 14.0%	保定 76.0%
4	邯郸 31.6%	衡水 88.1%	邢台 13.9%	邯郸 71.2%
5	衡水 27.4%	保定 86.6%	邯郸 13.0%	石家庄 70.9%
6	唐山 26.4%	唐山 84.3%	北京 12.1%	唐山 70.8%
7	廊坊 25.8%	天津 83.8%	天津 10.7%	沧州 70.3%
8	天津 18.9%	沧州 82.6%	唐山 10.5%	天津 66.5%
9	沧州 16.6%	廊坊 79.5%	廊坊 9.5%	北京 61.9%
10	北京 15.2%	北京 70.0%	沧州 8.7%	廊坊 59.8%
11	秦皇岛 9.0%	秦皇岛 63.9%	秦皇岛 4.2%	秦皇岛 45.0%
12	承德 3.9%	承德 54.4%	承德 1.2%	承德 39.1%
13	张家口 1.9%	张家口 45.1%	张家口 0.8%	张家口 29.0%
京津冀	22.2%	80.0%	10.6%	63.0%

* 重度以上污染状态指 PM_{2.5} 浓度高于 150 微克/立方米

** 污染状态指 PM_{2.5} 浓度高于 35 微克/立方米

2013 年到 2016 年，污染和重度以上污染时间占比前 5 名的城市均处在沿太行山脉，而空气质量最好的三个城市均在北部；6 至 10 名为环渤海的城市及北京和廊坊。由此可见，正如之前描述的情况，地理因素对空气质量的影响比较明显。

2013 年，京津冀 13 个城市，除了北部城市张家口，其余 12 个城市空气质量处于污染状态（PM_{2.5} 浓度高于 35 微克/立方米）的时间占比都超过了 50%，且有 8 个城市超过 80%，邢台和邯郸两个城市更是超过了 90%。在 2013 年，京津冀 13 个城市中，**邢台市的空气质量以污染状态比例超 94%、重度以上污染状态比例超 40%的“成绩”垫底。**对于同处于环渤海的唐山和天津，唐山的空气质量明显差于天津，特别是重污染占比远高于天津。2013 年北京的空气质量也不乐观，优良空气（PM_{2.5} 浓度低于 35 微克/立方米）的时间占比仅为 30%，有超过 15%的时间处于重度以上污染，但其空气质量仅次于京津冀北部的秦皇岛、承德和张家口三市。

同 2013 年相比，京津冀地区 2016 年空气处于污染状态的时间平均减少了 17%，降至 63%，改善非常明显。重度以上污染的时间比例在 13 个城市都有大幅下降，平均从 2013 年的 22.2% 降至 2016 年的 10.6%，降幅超过一半。2016 年，衡水以 80.7% 的比例取代邢台，成为京津冀污染占比最高的城市，而这一比例较 2013 年的 88.1% (第 4 位) 降低了 7.4%。石家庄以 21.2% 的重度以上污染占比成为京津冀最高，但这一比例远低于 2013 年最严重的邢台 (40.4%)。邢台市 2016 年的重度以上污染占比下降至第 4 位。北京和天津 2013 至 2016 年重度以上污染时间占比下降的比例不如河北省的城市大，北京 2016 年重度以上污染的时间位居第 6，天津居第 7 位。虽然北京的重污染比例高于很多河北省的城市，但是，北京的污染时间比例却居第 9 位，好于河北的大部分城市。由于不利的地形条件，北京重污染的情况可能受河北省的影响比较大。

虽然图 2 和表 1 所汇总的六种空气质量时间占比在一定程度上反映了京津冀地区污染的状况，但是它们不能全面刻画 $PM_{2.5}$ 在各个季节的污染水平，也不能提供 $PM_{2.5}$ 在各个季节的浓度分布情况。这是由于时间占比统计并不能完全反映空气污染的严重程度。比如，在某个季节，保定和衡水的严重污染状态占比都是 10%，但是保定有更多的时间浓度都是处于 300 微克/立方米以上，而衡水的 $PM_{2.5}$ 多分布在 150-200 微克/立方米之间。显然，在这个季节，衡水的空气污染并没有保定严重，但时间占比统计并不能反映出这一差异。另外，时间占比统计也不能体现每年气象因素影响造成的差异。因此，我们需要使用更全面、更精确的统计度量指标来反映一个城市和区域的污染水平，为大气污染状态的评估提供科学依据。

四、六大常规空气污染物评估

为了剔除气象因素对空气质量数据的影响，本报告沿用前三个空气质量报告所使用的统计学气象调整方法，计算京津冀地区各个城市在可比气象条件下各污染物的平均值浓度和 90% 分位数浓度，并对其进行比较和分析（具体方法见 [2]）。污染物的平均值浓度反映了一个城市空气质量的平均水平，而其 90% 分位数浓度则刻画了该城市最严重的 10% 的极端污染状况。

附图 4 和图 5 给出 13 个城市分别基于原始数据和经过气象调整方法计算的 $PM_{2.5}$ 季节年度变化比率图。我们可以看到，尽管两种算法所得到的变化比率有相同的趋势，但是仍有部分城市的一些季节经过气象调整后所得到的变化率与基于原始数据的变化率差异很大。关于气象调整的统计学原理，感兴趣的读者可以参看 [9]。

(一) PM_{2.5}

本节将给出京津冀地区 13 个城市从 2013 年 3 月到 2017 年 5 月经过气象调整，以季节为单位的 PM_{2.5} 季节均值和 90% 分位数浓度，并以此来分析京津冀地区 PM_{2.5} 的情况。

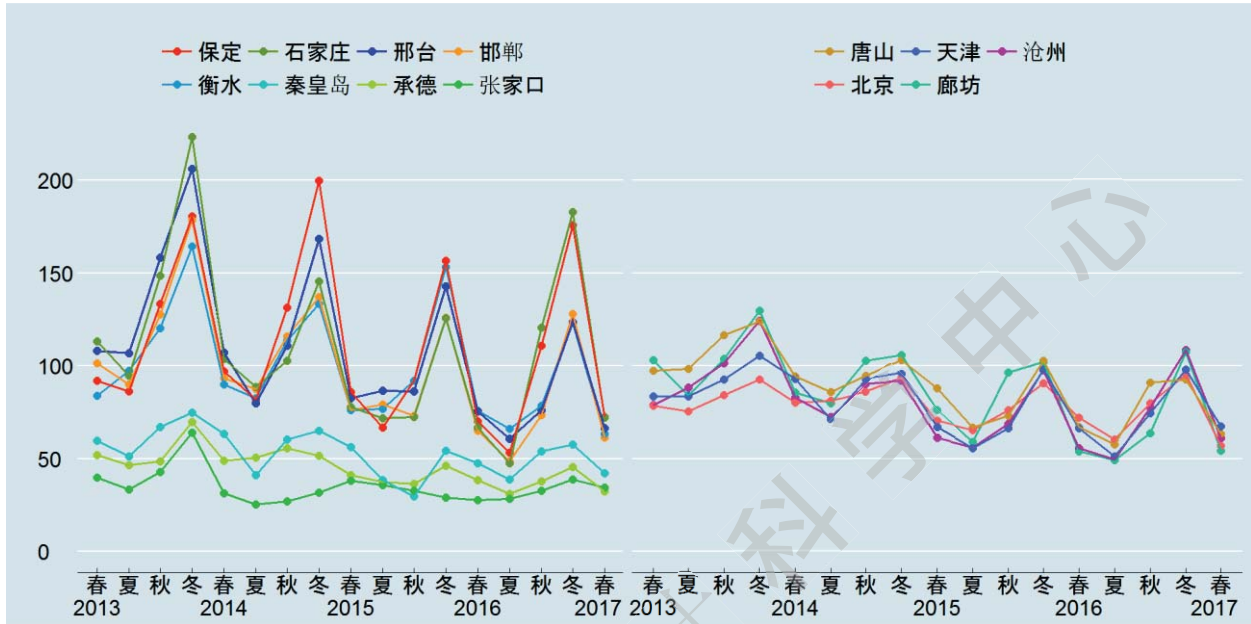


图 3 京津冀 13 市气象调整后 PM_{2.5} 季节平均值浓度时间序列 (微克/立方米)



图 4 京津冀 13 市气象调整后 PM_{2.5} 季节 90% 分位数浓度的时间序列 (微克/立方米)

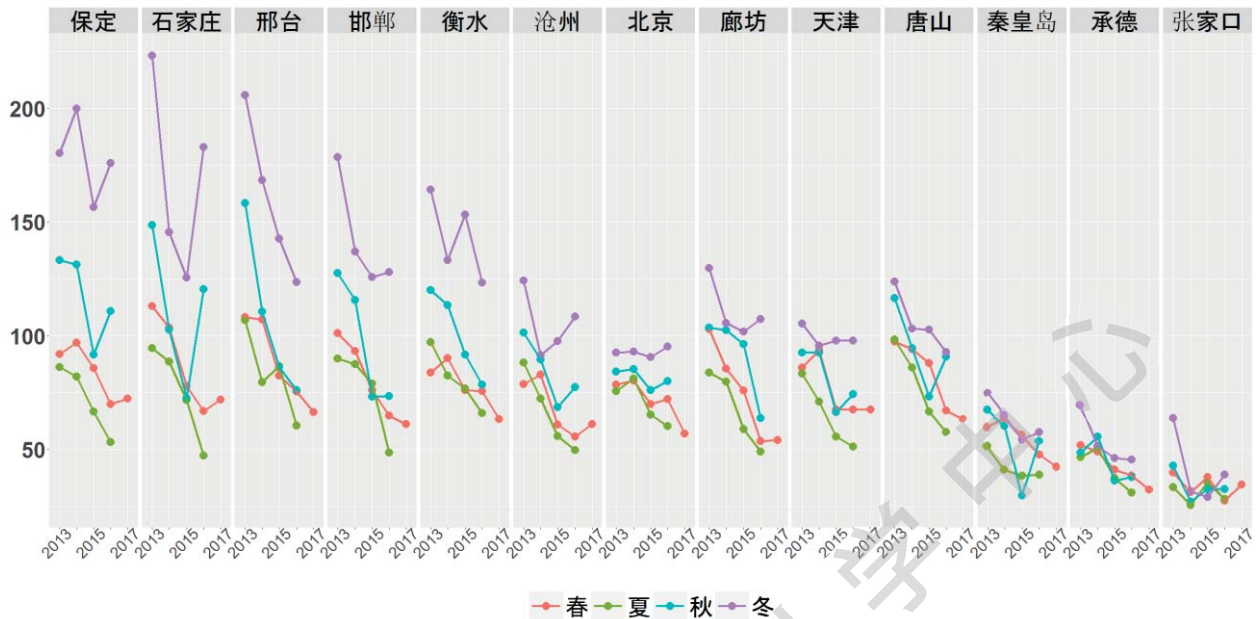


图 5 京津冀 13 市气象调整后 PM_{2.5} 季节平均浓度的变化序列（微克/立方米）

图 3 和图 4 分别展示了京津冀 13 个城市过去 17 个季节（2013 年春季至 2017 年春季）经气象调整的 PM_{2.5} 均值浓度和 90% 分位数浓度随时间变化的情况，图 5 展示了各城市调整均值在每个给定季节的时间序列。从图 3、图 4 和图 5，我们可以总结出京津冀地区过去四年 PM_{2.5} 浓度如下几个特征：

• 区域特征

从京津冀 13 市 PM_{2.5} 浓度的季节变化趋势和浓度水平，我们可以清晰地将其划分为三个区域，每个区域内城市间具有相近的 PM_{2.5} 浓度水平和相似的季节分布特征：（1）**沿太行山脉**的保定、石家庄、邢台、邯郸和衡水；（2）**环渤海**的唐山、天津、沧州，外加北京和廊坊；（3）**北部**的张家口、承德和秦皇岛。

三个区域 PM_{2.5} 污染程度由重到轻分别是**沿太行山脉**的五个城市、**环渤海**的五个城市和**北部的三个城市**。京津冀西依太行山脉，在太行山脚下容易形成污染物的累积，加上城市自身的高排放，会产生较高的 PM_{2.5}。环渤海三市唐山、天津和沧州，地处华北平原中部或东部，远离太行山脉，临近渤海，因而扩散条件较为有利，这导致虽然有城市污染排放较大（如唐山），但扩散容易，因此其 PM_{2.5} 浓度比沿太行山的城市要低。北京虽然依太行山、燕山而居，但其工业

排放较低，北部无重污染源，因而 PM_{2.5} 浓度水平和季节规律更相似于环渤海城市。廊坊地处北京和天津之间，图 3 和图 5 也都表明其污染形态与北京市和天津市相似，而不同于南面相邻的保定市。北部三个城市 PM_{2.5} 浓度最低。张家口、承德自身污染排放低，且远离高污染区域，受周边城市污染传输的影响较小。而秦皇岛东临渤海，污染物扩散条件好，且其北面 and 东面均没有高污染源，因而其细颗粒物浓度形态更接近于张家口和承德，故我们将这三个城市归为“北部”区域。

- **季节效应**

京津冀 13 个城市中，除张家口外，其余 12 个城市的 PM_{2.5} 浓度均有比较明显的季节特征，即 PM_{2.5} 浓度在**冬季最高，秋季次之，春季较好，夏季最轻**。这一季节特征在沿太行山的五个城市（保、石、邢、邯和衡）尤为明显。这五个城市冬季的 PM_{2.5} 平均浓度一般是夏季的 2 到 3 倍。如石家庄 2013 年冬季的浓度（218.6 微克/立方米）是夏季（94.4 微克/立方米）的 2.3 倍。相比之下，环渤海区域的五个城市季节变化要明显小于沿太行山的五个城市，它们冬夏季的浓度比一般介于 1 到 2 之间。北部城市的季节特征更加微弱。

值得一提的是，在 PM_{2.5} 浓度最低的夏季，平原上的 10 个城市（除了北部三市）夏季 PM_{2.5} 浓度在 2013 年均高于 75 微克/立方米，平均为 90.4 微克/立方米，处于中度污染的水平。在 2016 年，京津冀 13 个城市夏季的 PM_{2.5} 浓度已全部低于 75 微克/立方米，平均为 54.4 微克/立方米，相比 2013 年下降了 39.8%，这反映了区域内空气质量的显著改善。

- **极端污染**

图 4 中的 90%分位数浓度刻画了各个季节的极端污染情况，代表着在这个季节内只有 10%的时间 PM_{2.5} 浓度高于该浓度。我们发现，除了北部个别城市之外，沿太行山和环渤海城市的极端污染在冬季最严重。其中，2013 年和 2016 年冬季最严重的城市是石家庄（90%分位数分别是 489 微克/立方米和 402 微克/立方米），2014 和 2015 年冬季最严重的是保定（90%分位数分别是 382 微克/立方米和 340 微克/立方米）。由图 4 也可以看出，2013-2015 年，京津冀地区的极端污染严重程度也在不断下降，但是在 2016 年有所反弹。而对北京的计算结果显示，其冬季 90%分位数浓度从 2013 年的 240 微克/立方米下降到 2015 年的 229 微克/立方米，但在 2016 年又上升至 261 微克/立方米。

- 总体下降趋势明显，2016 年秋冬反弹

图 5 给出了经气象调整后，在一个给定季节下，PM_{2.5}浓度的季均值过去四年的变化。图 6 展示了京津冀 13 个城市 2013 年至 2016 年，经气象调整后的年均值。从图 5 和图 6 可以明显地发现，2013 年至 2016 年，京津冀 13 个城市 PM_{2.5}的平均浓度有明显下降趋势。这一下降在沿太行山的五个城市尤为明显。

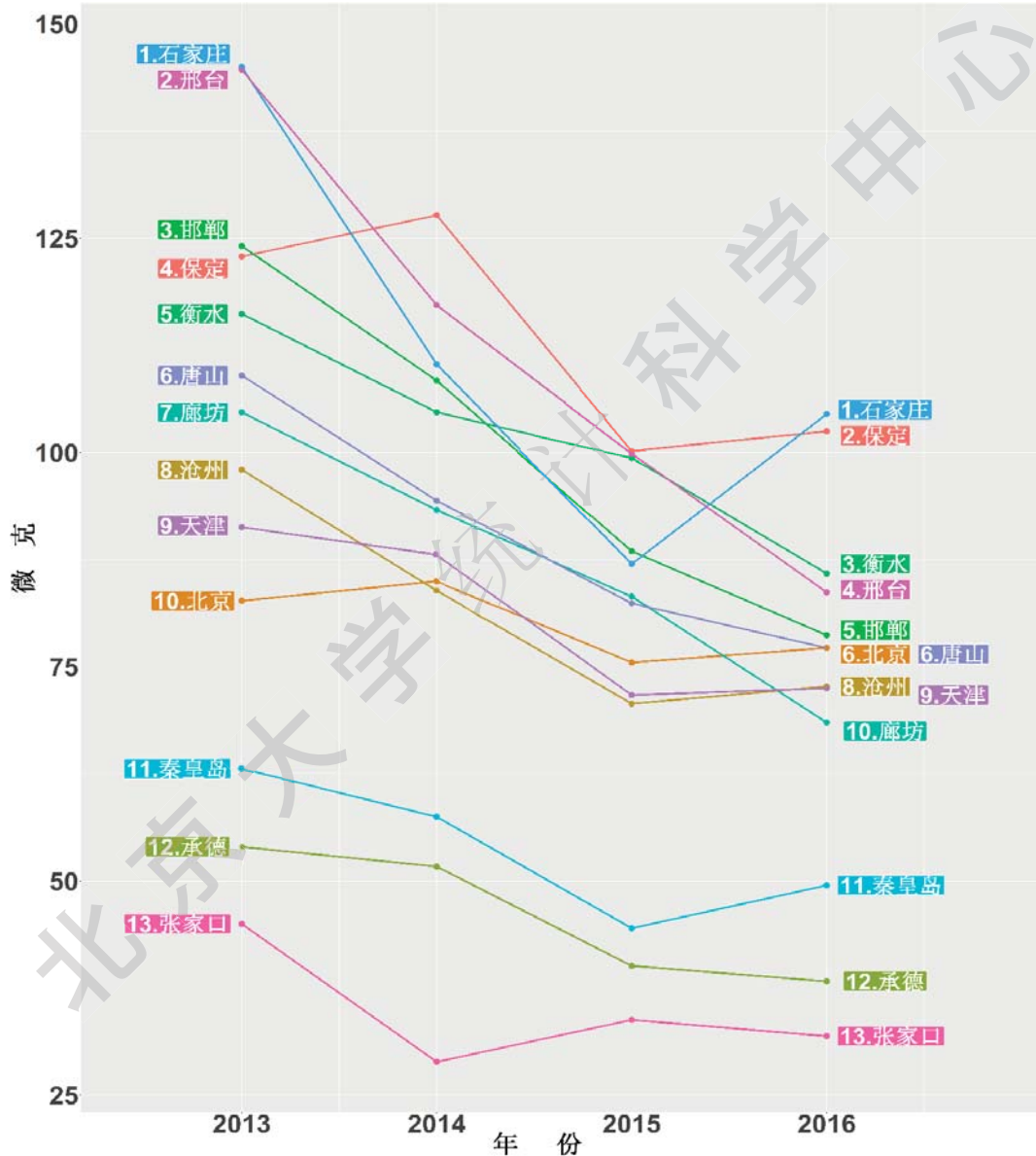


图 6 京津冀 13 市气象调整后 PM_{2.5}年平均浓度变化序列（微克/立方米）

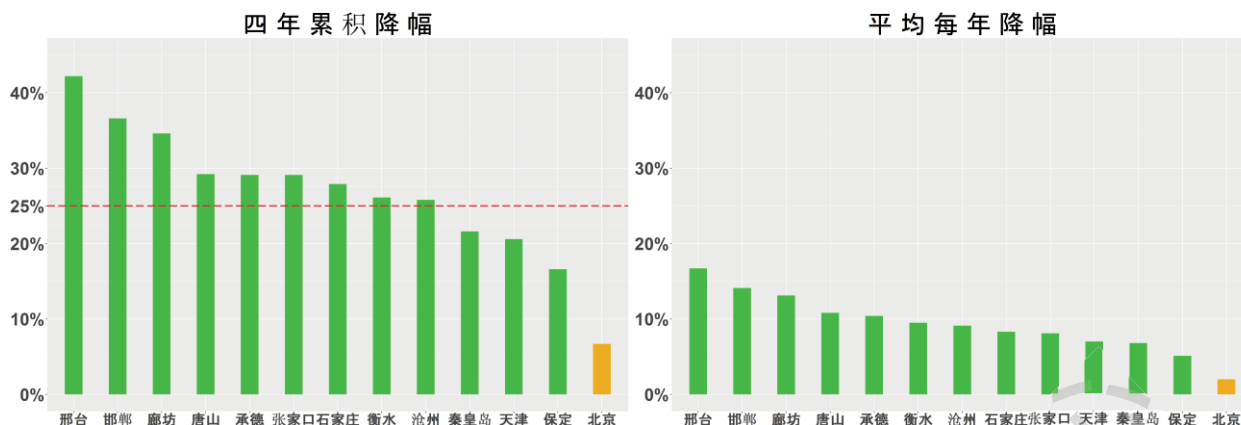


图7 京津冀13市气象调整后PM_{2.5}四年(季节年)累计降幅及年平均降幅

从图5我们也发现，四年来，PM_{2.5}浓度在每个季度平均同比都有一定下降，年均值浓度的下降得益于整体浓度下降，而非某一个季节的贡献，但**下降幅度在2016年有所减缓，部分城市不降反升**。相比于2015年，沿太行和环渤海城市平均分别只下降了3.9微克/立方米和3.1微克/立方米，而北部城市上升0.4微克/立方米。这主要是由于2016年秋季和冬季PM_{2.5}浓度的大幅升高。例如，保定2016年秋冬季节PM_{2.5}浓度较2015年分别上升了19.1微克/立方米和19.4微克/立方米，涨幅分别为20.8%和12.4%。石家庄2016年秋冬季节PM_{2.5}的浓度与2015年相比，更是上升了47.9微克/立方米和57.4微克/立方米，涨幅分别达到66%和46%，远高于2014年水平。

图6表明过去四年，京津冀地区的PM_{2.5}浓度总体有显著降低，13个城市的年平均浓度从2013年的100.1微克/立方米下降到2016年的72.5微克/立方米，降幅超过27%。其中沿太行区域五个城市（保、石、邢、邯、衡）的PM_{2.5}平均浓度从2013年的130.6微克/立方米降至2016年的91.1微克/立方米，降幅达30.3%，超过京津冀的平均降幅。环渤海区域的五个城市（唐、津、京、廊、沧）PM_{2.5}平均浓度从2013年的97.1微克/立方米降至2016年的73.6微克/立方米，降幅为24.2%，略低于京津冀的平均降幅。而北部区域的三个城市（张、承、秦）的PM_{2.5}年平均浓度从2013年的54微克/立方米降至2016年的39.9微克/立方米，降幅26.2%，基本与京津冀的平均降幅持平。分城市来看（图6所示），石家庄、邢台、邯郸、唐山、廊坊、承德、张家口的降幅均超过了27%，其中，邢台降幅最大，累积降幅超过了40%；秦皇岛、天津、保定的降幅介于10%与20%之间；北京四年累计降幅最低，仅为6.7%，这导致北京的PM_{2.5}浓度由2013年在13个城市中排名第10上升至2016年的第6名。在13个城市中，石家庄虽然累积降幅为27%左右，但其2013年和2016年的PM_{2.5}调整浓度均居13市之首。

(二) PM₁₀

PM₁₀是指悬浮在空气中当量直径小于或等于10微米的可吸入颗粒物。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，同时是官员考核指标。到2013年，PM_{2.5}才取代PM₁₀成为大气污染的主要指标。2013年，京津冀13个城市的PM₁₀数据有相当多的缺失。在北京，它的缺失比例是六个常规污染物中最高的。2014年及以后，缺失比例有所下降。PM₁₀数据缺失高的一个原因是PM_{2.5}和PM₁₀数值可能会发生“倒挂”，所谓“倒挂”是指PM₁₀的观测值低于PM_{2.5}的观测值。因为PM_{2.5}是PM₁₀的重要组成部分，理论上，PM₁₀的浓度值应该大于PM_{2.5}，但在实际观测数据中，由于观测误差，会出现这种倒挂现象。一种处理数据倒挂的方法是用PM_{2.5}的观测浓度对PM₁₀的缺失进行插补，这样做虽然仍会低估PM₁₀浓度，但比直接将倒挂的PM₁₀观测设为缺失的计算误差要小。本报告将使用这一种方法¹。

我国目前PM₁₀的年平均浓度标准为：一级标准40微克/立方米，二级标准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。美国环境保护署关于PM₁₀的一、二级标准均是24小时平均浓度150微克/立方米，但其明确规定3年内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。

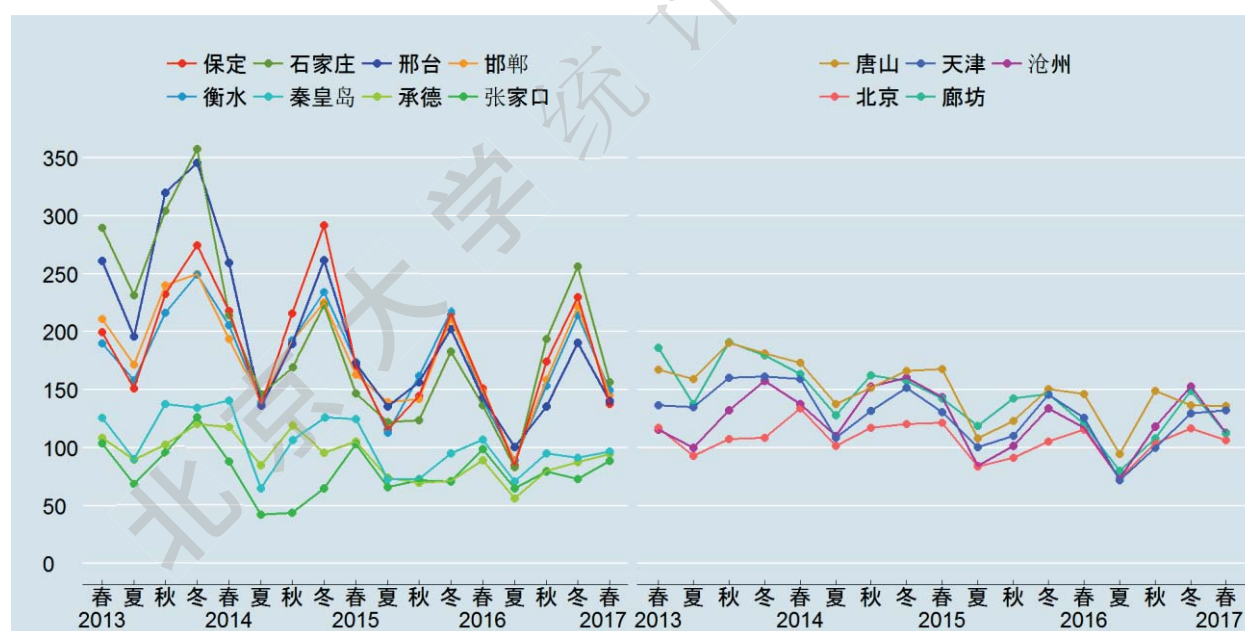


图8 京津冀13市气象调整后PM₁₀季平均浓度时间序列(微克/立方米)

¹因为倒挂在统计上能够解释观测误差。我们建议环保部门保留原始数据，对倒挂的PM₁₀观测不作缺失处理。

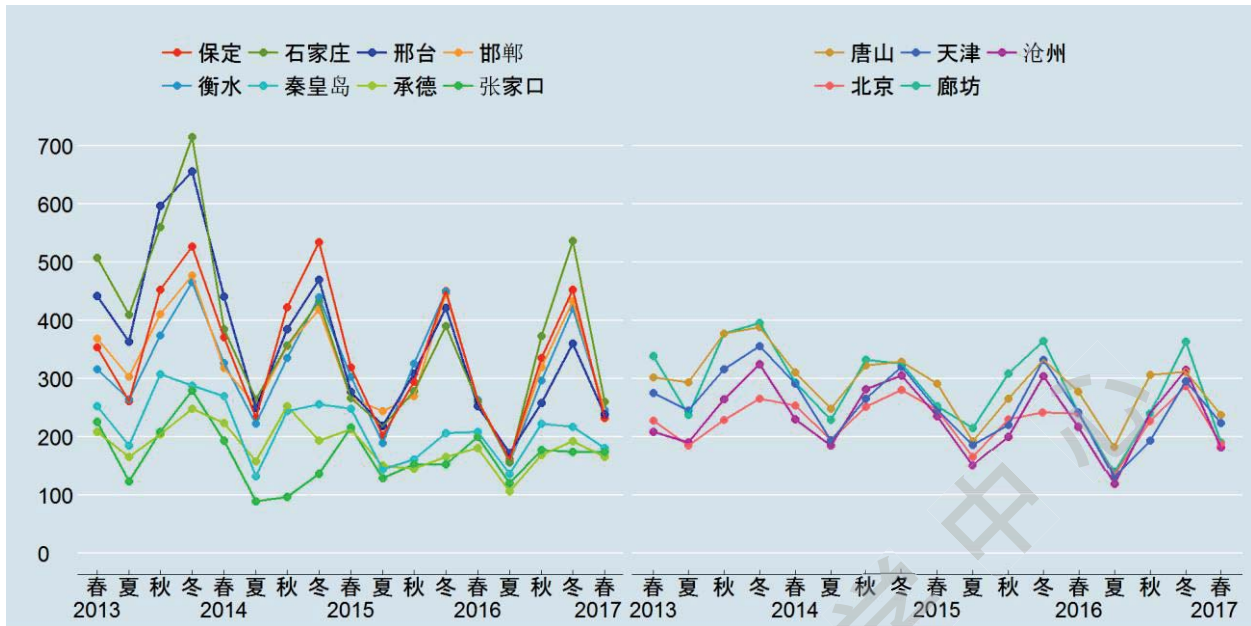


图9 京津冀13市气象调整后PM₁₀季节90%分位数浓度的时间序列（微克/立方米）



图10 京津冀13市气象调整后PM₁₀季平均浓度的年度变化序列（微克/立方米）

图8和图9分别给出了13市气象调整后PM₁₀季平均浓度和90%分位数浓度的时间序列，图10和图11分别给出了分季节和年的PM₁₀平均浓度序列，结合上述各图，我们发现PM₁₀污染具有以下特征：

- **和 PM_{2.5} 相同的区域特征**

京津冀 13 个城市的 PM₁₀ 浓度也明显地表现出与 PM_{2.5} 相同的区域特征，也可以被分为同 PM_{2.5} 一样的三个区：（1）沿太行山的保定、石家庄、邢台、邯郸和衡水；（2）环渤海的沧州、天津、唐山、北京和廊坊；（3）北部的张家口、承德和秦皇岛。

从空间分布看，太行山脉附近城市的 PM₁₀ 浓度均明显高于其它城市。这同 PM_{2.5} 一样，受本地排放和太行山脉阻碍的双重作用，PM₁₀ 在太行山前很难扩散，导致污染物堆积。与 PM_{2.5} 一样，唐山的 PM₁₀ 浓度也是环渤海区域最高的，并且一年四季的变化幅度不大，这与唐山市一年四季的高排放相一致。对于北部城市张家口，尽管它的 PM_{2.5} 比京津冀其他城市浓度都要低很多，但其 PM₁₀ 的浓度在一些季节却高于承德。这与张家口正处于沙尘传输通道上，比承德更易受沙尘影响有关。2016 年，承德 PM₁₀ 的年平均浓度已经低于张家口，成为京津冀地区 PM₁₀ 浓度最低的城市。尽管北部城市更易受到沙尘影响，但是它们的 PM₁₀ 浓度仍远低于沿太行山的五个城市和唐山，这说明沿太行山脉及环渤海城市的高 PM₁₀ 污染主要来自于本地排放。

- **季节效应和地理差异**

PM₁₀ 也具有明显的季节效应，浓度最低的季节是夏季。其季节效应具有同 PM_{2.5} 一样的地理差异：沿太行山脉城市季节效应最为明显，其次是环渤海，最后是北部城市。但是，**京津冀 PM₁₀ 污染也有独特的、不同于 PM_{2.5} 的特征**。PM₁₀ 浓度最高的季节与城市的地理位置密切相关。京津冀南部的石家庄、保定、邢台、衡水、邯郸和沧州，冬季的 PM₁₀ 浓度最高。而北部的北京、唐山、秦皇岛、承德和张家口，PM₁₀ 浓度最高的季节多是春季，其次才是冬季。这说明，春季沙尘传输对北部城市的影响大于南部城市。

- **极端污染情况**

与平均浓度变化趋势类似，沿太行山和环渤海城市 PM₁₀ 的 90% 分位数浓度所反映的极端污染在冬季最严重。由图 9 可以看出，在 2013 和 2016 年，冬季最严重的城市是石家庄（90% 分位数分别是 714 微克/立方米和 536 微克/立方米），2014 和 2015 年冬季最严重的是保定（90% 分位数分别是 534 微克/立方米和 450 微克/立方米）。2013-2015 年，京津冀地区的极端污染程度有不同程度下降，其中石家庄下降最为显著，降幅超过 45%。但是在 2016 年秋冬二季又有所反弹。石家庄反弹最为严重，从 2015 年冬季的 390 微克/立方米上升至 2016 年冬季的 536 微克/立方米，上升了 37.5%。至于北京，其冬季 90% 分位数从 2013 年的 265 微克/立方米下降到 2015 年的 241 微克/立方米，但是在 2016 年冬季又上升至 287 微克/立方米，反而超过了 2013 年水平。

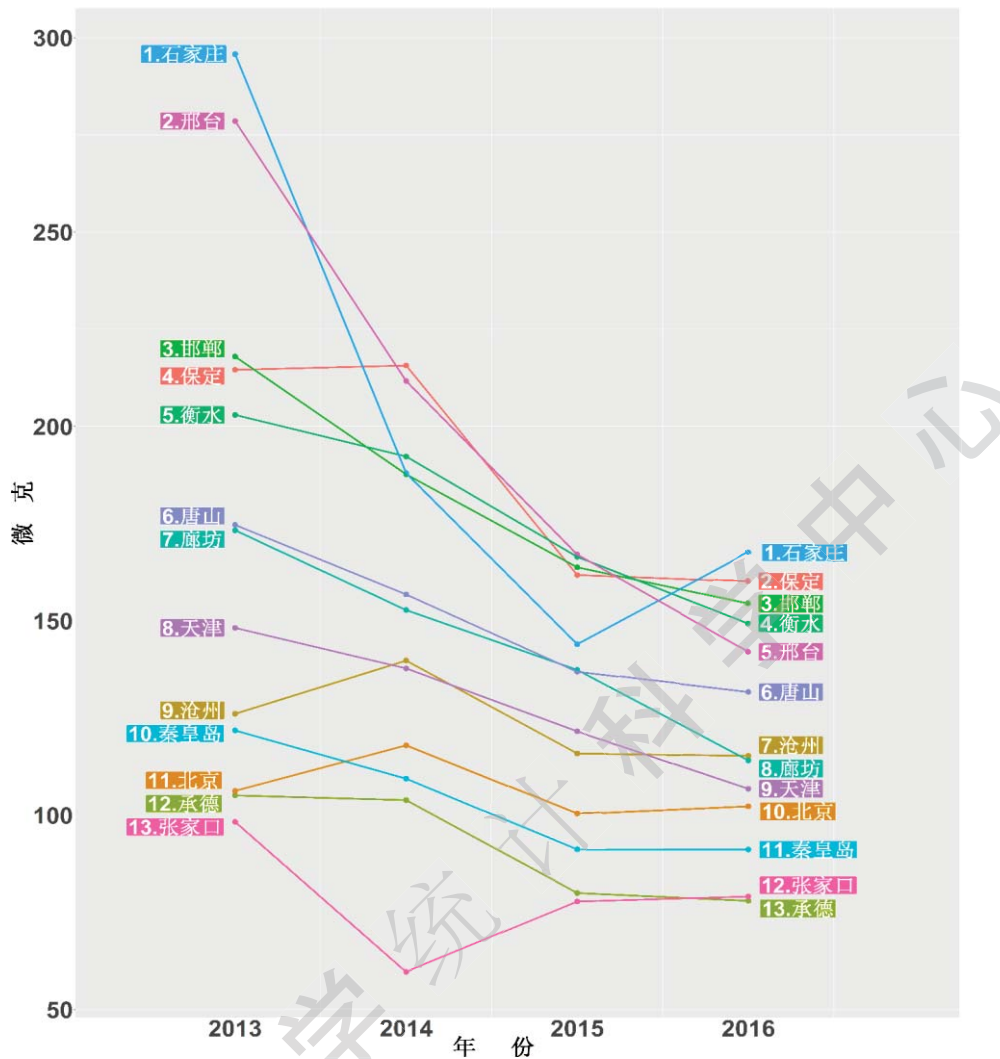


图 11 京津冀 13 市 2013 年到 2016 年气象调整后 PM₁₀ 年平均浓度变化序列 (微克/立方米)

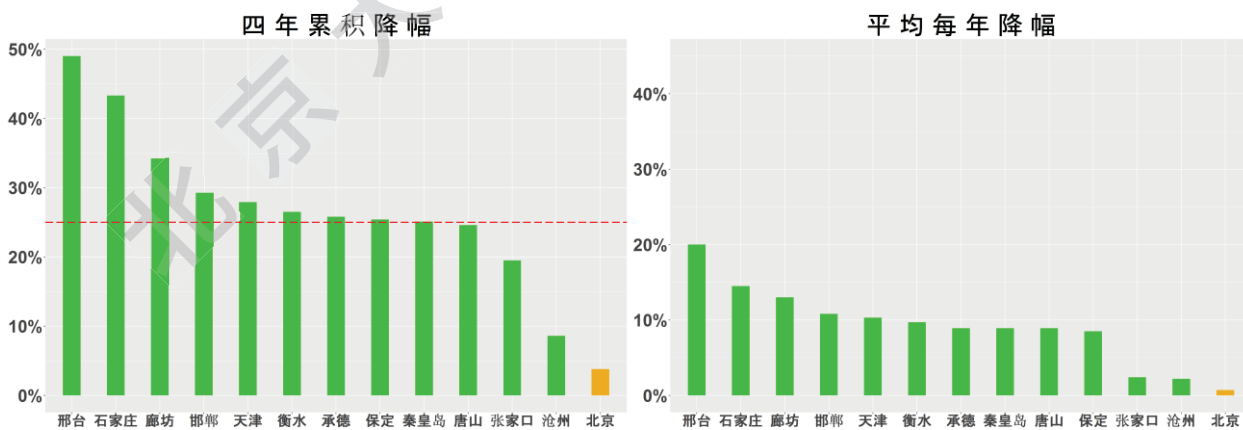


图 12 京津冀 13 市气象调整后 PM₁₀ 四年累积降幅及年平均降幅

- **京津冀 PM₁₀ 平均浓度下降显著**

2013 年到 2016 年，京津冀地区 PM₁₀ 下降显著。在 PM₁₀ 浓度最高的冬季，石家庄和邢台 2013 年冬季 PM₁₀ 的季均值在 350 微克/立方米左右，超过国家二级标准的 4 倍。到了 2016 年，这两个城市冬季的 PM₁₀ 季平均浓度分别降至 256.3 微克/立方米和 190.4 微克/立方米，降幅分别为 28% 和 45%。沿太行山脉的石家庄、保定、邢台、邯郸、衡水，2015 年冬季浓度曾降至 200 微克/立方米左右，是四年冬季里最低的。进入 2016 年秋冬季，只有邢台、衡水和天津 3 个城市依旧保持下降，但降幅已经减缓。北京、石家庄、保定等京津冀共七个城市的 PM₁₀ 浓度在这两个季节升高，其中，石家庄的上升幅度最大，秋冬二季的 PM₁₀ 浓度分别从 2015 年的 123.7 微克/立方米和 182.8 微克/立方米上升至 2016 年的 194 微克/立方米和 256.3 微克/立方米，涨幅分别为 56.8% 和 40.2%。

- **治理效果显著，北京仍需发力**

2013 年至 2016 年的四年间，京津冀地区 PM₁₀ 浓度降幅明显，13 市年平均浓度从 2013 年的 182.7 微克/立方米下降至 125.7 微克/立方米，降幅达 31.2%。除唐山、沧州、北京和张家口外，其余 9 个城市四年累计降幅超过 25%，其中，邢台 PM₁₀ 浓度四年累计下降了约 50%，领跑京津冀降幅榜。天津降幅也很大，接近 30%。到 2016 年，天津年平均浓度已接近 100 微克/立方米。北京 PM₁₀ 四年累计降幅最低，仅下降 4 微克/立方米，累计降幅 4.1%。这说明在治理 PM₁₀ 层面上，北京还应探索出更加有效的办法，这一结论同我们今年三月份发布的《空气质量报告（三）》一致。

(三) 二氧化硫

二氧化硫 (SO₂) 是一种无色、具有强烈刺激性气味的气体，它会直接导致酸雨，也严重影响人体健康。它参与大气中的氧化还原反应，生成二次颗粒物。煤的燃烧，尤其是高硫煤的燃烧，是大气中二氧化硫的主要来源，汽油、柴油的使用也会释放一定量的二氧化硫。

在“十一五计划”（2006-2010 年）期间，我国已经开始将二氧化硫的总量减排任务单独列出。2013 年 9 月，国务院印发的《大气污染防治行动计划》[6]（简称《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”、“加快重点行业脱硫、脱硝、除尘改造工程建设”。北京市从 2014 年开始大力推行“煤改气”，到 2015 年，市中心区冬季供暖已全部改为燃烧天然气。天

津市和河北省也相继开始推行“煤改气”，减少煤炭消耗。这些均是降低大气中二氧化硫浓度的重要举措。

中国目前二氧化硫年平均浓度的限值标准为：一级标准 20 微克/立方米，二级标准 60 微克/立方米；24 小时平均浓度的限值标准为：一级标准 50 微克/立方米，二级标准 150 微克/立方米；1 小时平均浓度的限值标准为：一级标准 150 微克/立方米，二级标准 500 微克/立方米。美国环境保护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 197 微克/立方米），其标准实施形式为三年间此小时浓度的 99%分位数平均值不能超过该浓度限值，二级标准为 3 小时平均浓度 0.5ppm（约为 1310 微克/立方米），要求每年超过此浓度限值的次数不能多于一次。



图 13 京津冀 13 市气象调整后二氧化硫季平均浓度时间序列 (微克/立方米)

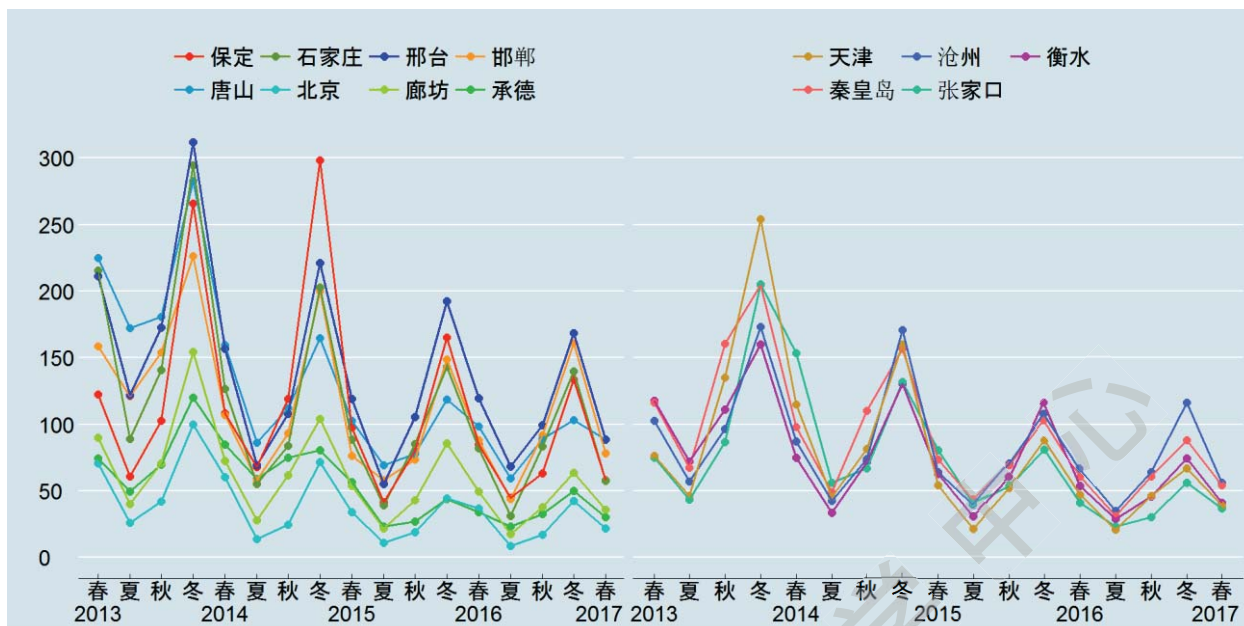


图 14 京津冀 13 市气象调整后二氧化硫季节 90%分位数浓度的时间序列（微克/立方米）

图 13 和 14 分别展示了京津冀 13 个城市经气象调整的二氧化硫均值浓度和 90%分位数浓度随时间变化的情况。图 15 和 16 展示了各个城市调整均值的季节和年度变化情况。

• 区域特征

相对于 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} ，同样的区域划分对二氧化硫不再适用，仅按地理因素已不能够完全解释京津冀二氧化硫的空间分布特征。根据图 13 和图 14，京津冀 13 个城市可以被划分为新的三个区：（1）沿太行山的保定、石家庄、邢台、邯郸，外加环渤海的唐山市，二氧化硫的浓度相对较高，尤其在冬季。冬夏季的浓度差异也最大。（2）位于北部的张家口、承德、廊坊和北京，二氧化硫浓度相对较低。（3）环渤海的沧州、天津、秦皇岛，外加衡水市，二氧化硫浓度和季节特征介于前两个区域之间。

值得注意的是，不同于 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} ，钢都唐山二氧化硫的水平已非常不同于环渤海的其它城市。它与沿太行山的城市处于一个水平。从 2013 年至 2016 年，唐山市二氧化硫的年平均浓度始终居京津冀前三名（见图 16），考虑到唐山有利的大气扩散条件，其二氧化硫仍能达到如此高的水平，且远高于环渤海的其它城市，这充分反映了其巨大的二氧化硫排放量（主要来自炼钢和炼焦）。另外，秦皇岛也明显区别于北部的张家口和承德，二氧化硫浓度已处于京津冀的中等

水平。张家口、承德和北京的二氧化硫水平是京津冀区域最低的。但是，它们与污染相对较重的城市已经不再具有像 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 那样大的差距（见图 13 和图 14）。



图 15 京津冀 13 市气象调整后二氧化硫季平均浓度的年度变化序列（微克/立方米）

- **季节效应**

京津冀 13 市具有相似的、明显的季节效应。冬季二氧化硫浓度最高，春秋两季次之，夏季最轻。与 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 相比，二氧化硫浓度的季节效应更加明显，冬季浓度与夏季浓度之间的差异最大。二氧化硫浓度的冬夏季比例最高可以超过 4 倍。冬季二氧化硫浓度高的一个原因是供暖，在燃煤较多的唐山市，其二氧化硫的季平均浓度常年处于高位，冬夏季浓度比例只在 1.5 到 2 之间。即使在浓度最低的夏季，其二氧化硫的平均浓度也能维持在 40 微克/立方米左右。

- **极端污染**

不同于 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 极端污染浓度先降后升的情形，二氧化硫的极端污染浓度从 2013 年到 2016 年一直处在改善的进程中。沿太行山的城市 2013 年冬季二氧化硫的 90%分位数浓度从 300 微克/立方米附近一直降至 2016 年的 150 微克/立方米左右。环渤海的天津、沧州、秦皇岛以及衡水、张家口的 90%分位数浓度也从 150~200 微克/立方米下降至 50~115 微克/立方米。北京二氧化硫的 90%分位数浓度是京津冀最低的，到 2016 年，其冬季二氧化硫的 90%分位数浓度也能控制在 40 微克/立方米左右。

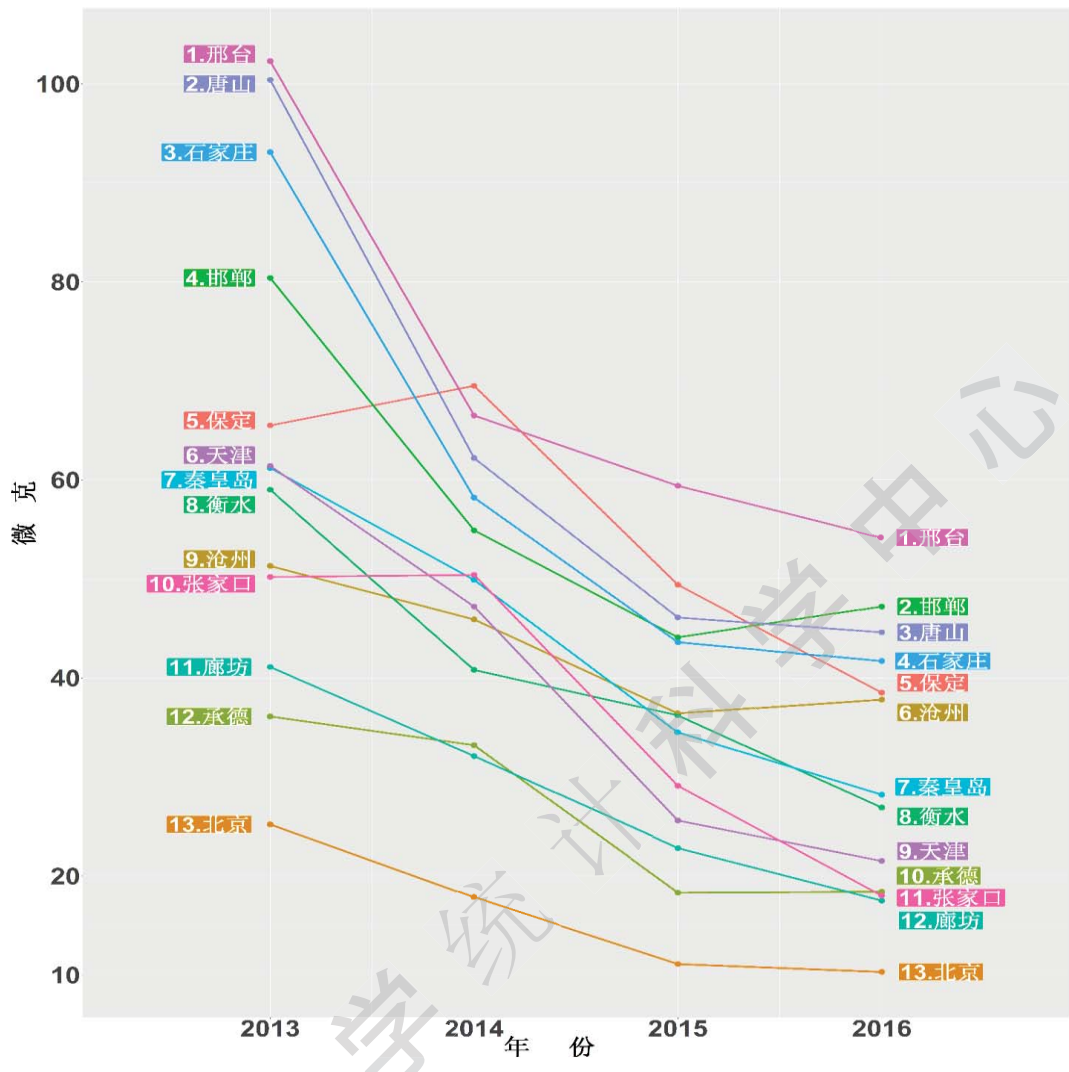


图 16 京津冀 13 市气象调整后二氧化硫年平均浓度变化序列 (微克/立方米)

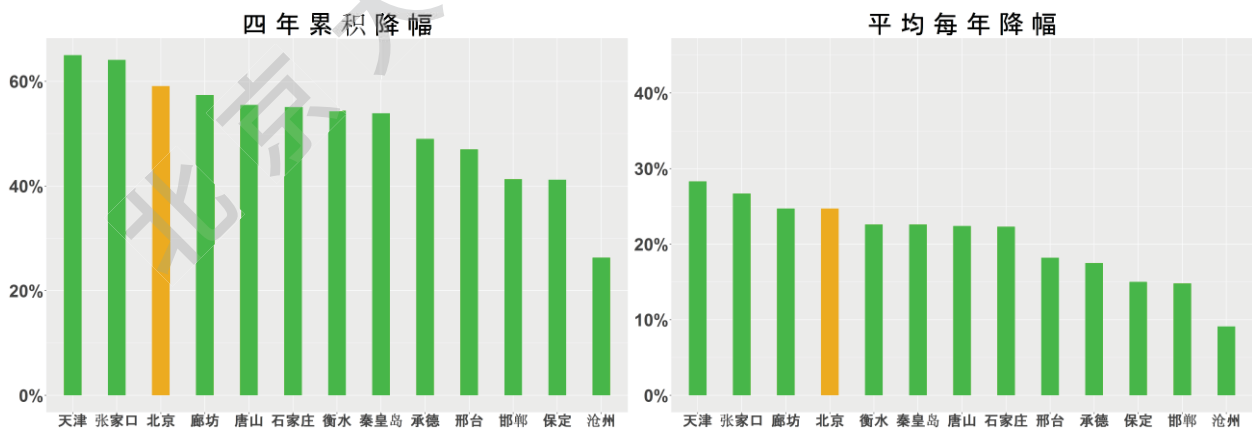


图 17 京津冀 13 市气象调整后二氧化硫四年累积降幅及年平均降幅

- **京津冀地区二氧化硫浓度下降显著**

2013 年到 2016 年，京津冀地区二氧化硫浓度下降是显著的。13 个城市中，除沧州 26% 的降幅外，其余 12 个城市四年的累计降幅均超过 40%。由图 15 我们可以发现，冬季二氧化硫浓度下降比其它三个季节明显，邯郸和沧州两城市冬季二氧化硫四年累计下降约 20%，而剩余 11 个城市冬季二氧化硫的累计降幅均超过了 50%。在 2013 年，只有北京和承德两个城市冬季的二氧化硫季平均浓度低于 60 微克/立方米；但是到了 2016 年，这样的城市已经增加到八个，并且全部城市冬季二氧化硫季平均浓度都低于 100 微克/立方米。另外，北京 2016 年夏季和秋季二氧化硫浓度的平均浓度已经低于 7 微克/立方米，率先进入个位时代，其 2016 年二氧化硫浓度的年平均浓度也仅为 10.3 微克/立方米。

冬季的大幅改善对整个京津冀地区二氧化硫浓度的下降起到了主导作用，这与京津冀近年来积极推动燃煤锅炉的淘汰、改进及“煤改气”等措施密不可分。二氧化硫浓度的显著下降是京津冀大气污染防治的最大亮点，对该区域 PM_{2.5} 浓度的下降也起到了促进作用。

需要特别注意的是，2016 年二氧化硫的下降速度出现放缓。石家庄、保定、沧州、廊坊北京、天津的二氧化硫浓度虽然保持减少态势，不过与前几年相比，速度已经放缓。而邯郸、沧州和承德三个城市已经出现了小幅回升。

- **四年治理效果**

2013 年至 2016 年，京津冀地区各城市陆续开始实施“煤改气”、脱硫等措施。得益于此，京津冀 13 个城市二氧化硫浓度的平均水平从 2013 年的 63.6 微克/立方米降至 2016 年的 31.1 微克/立方米，累计降幅达到 51%。除沧州外，其它城市四年累计降幅均超过 40%，其中，天津和张家口下降最多，超过了 60%，北京四年累计降幅位列第三。京津冀地区二氧化硫浓度最低的城市一直是北京，如上所述其 2016 年的年平均浓度仅为 10.3 微克/立方米。这反映了北京“煤改气”、“煤改电”、降低煤炭消耗等措施的成效，可以为其它城市治理二氧化硫气体污染提供借鉴。

(四) 二氧化氮

二氧化氮(NO₂)是一种重要的空气污染物，是硝酸盐的前体物。硝酸盐是 PM_{2.5} 的重要组成部分之一。同时，二氧化氮在光照下使氧气转化为臭氧，所以它也是臭氧污染的主要“帮凶”。二氧化氮还可伤害呼吸道，直接影响人的身体健康。二氧化氮主要来源于汽车尾气排放，燃煤、工炼钢、工业挥发性有机物以及农村秸秆燃烧也会生成。我国从“十二五”(2011-2015 年)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了五年。二氧化氮在大气中的“存活”时间是本报告所考虑的四中气体

(SO₂, NO₂, CO 和 O₃) 中最短的, 一般在几个小时到二天之间, 所以它的空间传输距离很短, 基本反映了本地排放。

中国目前关于二氧化氮浓度限值的一级、二级标准都是年平均浓度 40 微克/立方米, 而美国环境保护署的一级和二级标准为: 年平均浓度 53ppb (约为 100 微克/立方米)。

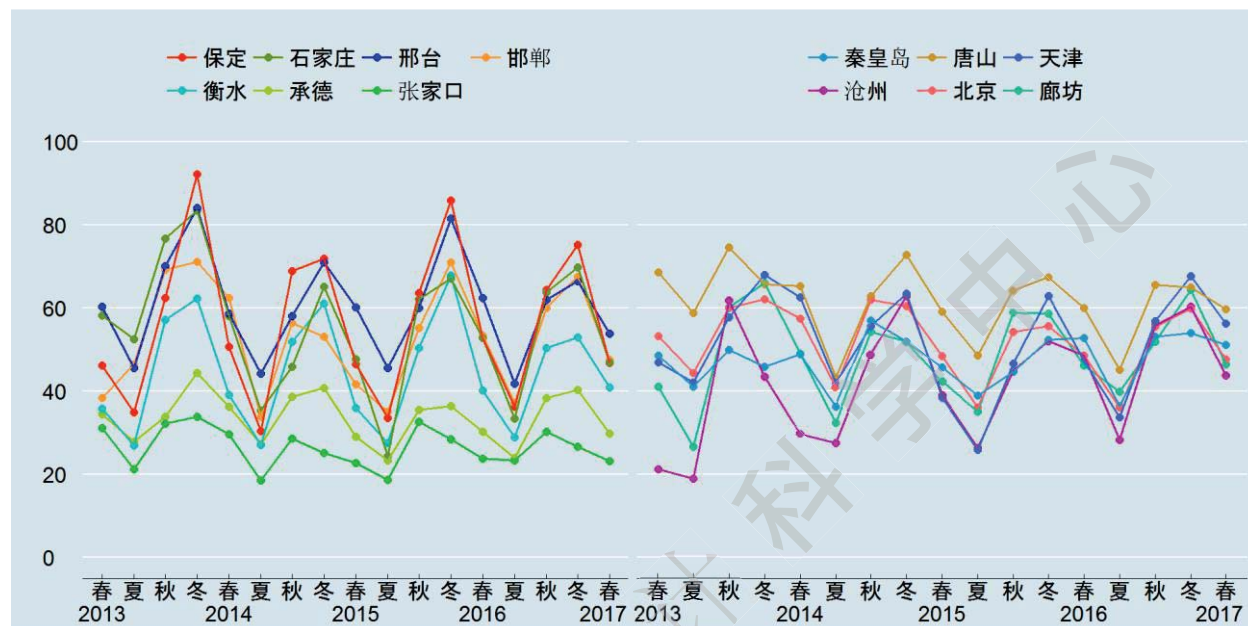


图 18 京津冀 13 市气象调整后二氧化氮季平均浓度时间序列 (微克/立方米)

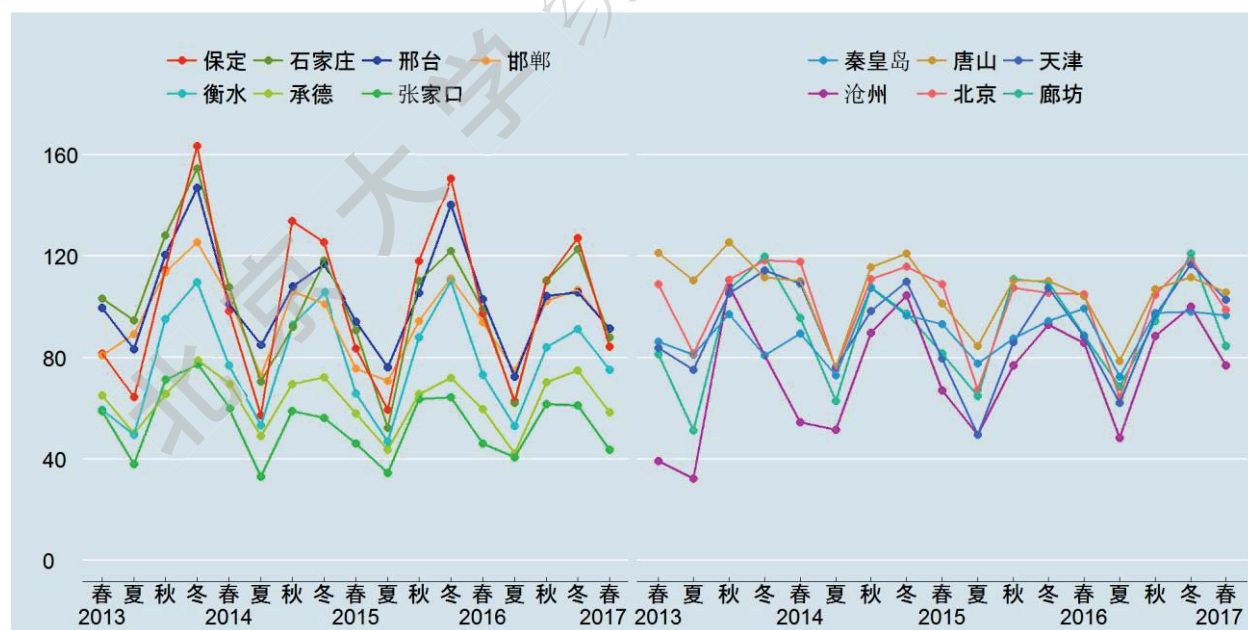


图 19 京津冀 13 市气象调整后二氧化氮季节 90%分位数浓度的时间序列 (微克/立方米)

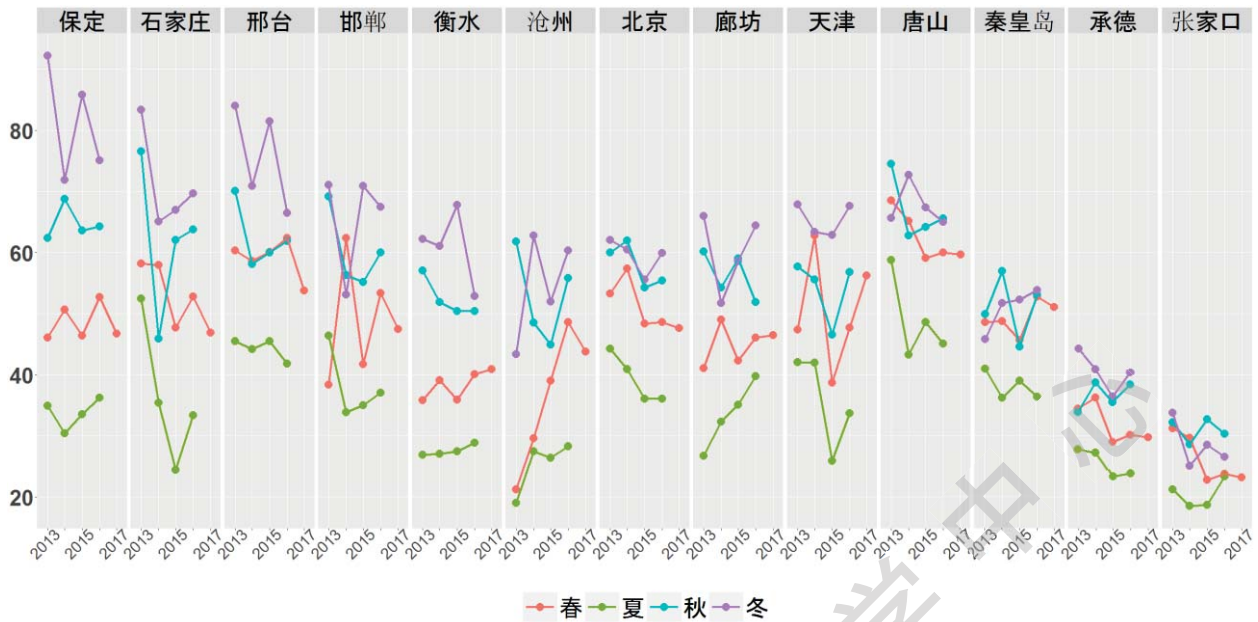


图 20 京津冀 13 市气象调整后二氧化氮季平均浓度的年度变化序列（微克/立方米）

图 18 和 19 分别展示了京津冀 13 个城市经气象调整的二氧化氮均值浓度和 90%分位数浓度随时间变化的情况。图 20 和 21 展示了调整均值的季节和年度变化情况。我们发现二氧化氮污染有以下特征：

- **季节效应明显，秋冬浓度高，夏季最低**

京津冀 13 个城市的二氧化氮也具有明显的季节特征。**二氧化氮浓度秋冬两季最高，夏季最低。**除北部张家口和承德外，其它 11 个城市冬季二氧化氮的浓度一般在 50~80 微克/立方米，夏季一般在 20~50 微克/立方米，且各城市间夏季浓度的差异相对较小。张家口和承德的二氧化氮浓度是 13 个城市中最低的，也具有明显的季节效应。

- **地理差异不再明显**

由图 18 和图 19，我们可以看到，除城市自身排放较低的张家口和承德市之外，京津冀其它 11 个城市的二氧化氮浓度并没有明显的分区，这一点同之前的 PM_{2.5}，PM₁₀ 和二氧化硫很不一样。比如，沿太行山脉的邯郸和环渤海的沧州，它们的二氧化氮浓度相差不大，并没有明显的区分。各城市二氧化氮的浓度主要是受各个城市自身排放的影响，这是由于二氧化氮在大气中的生命周期较短，空间传输较短所致。

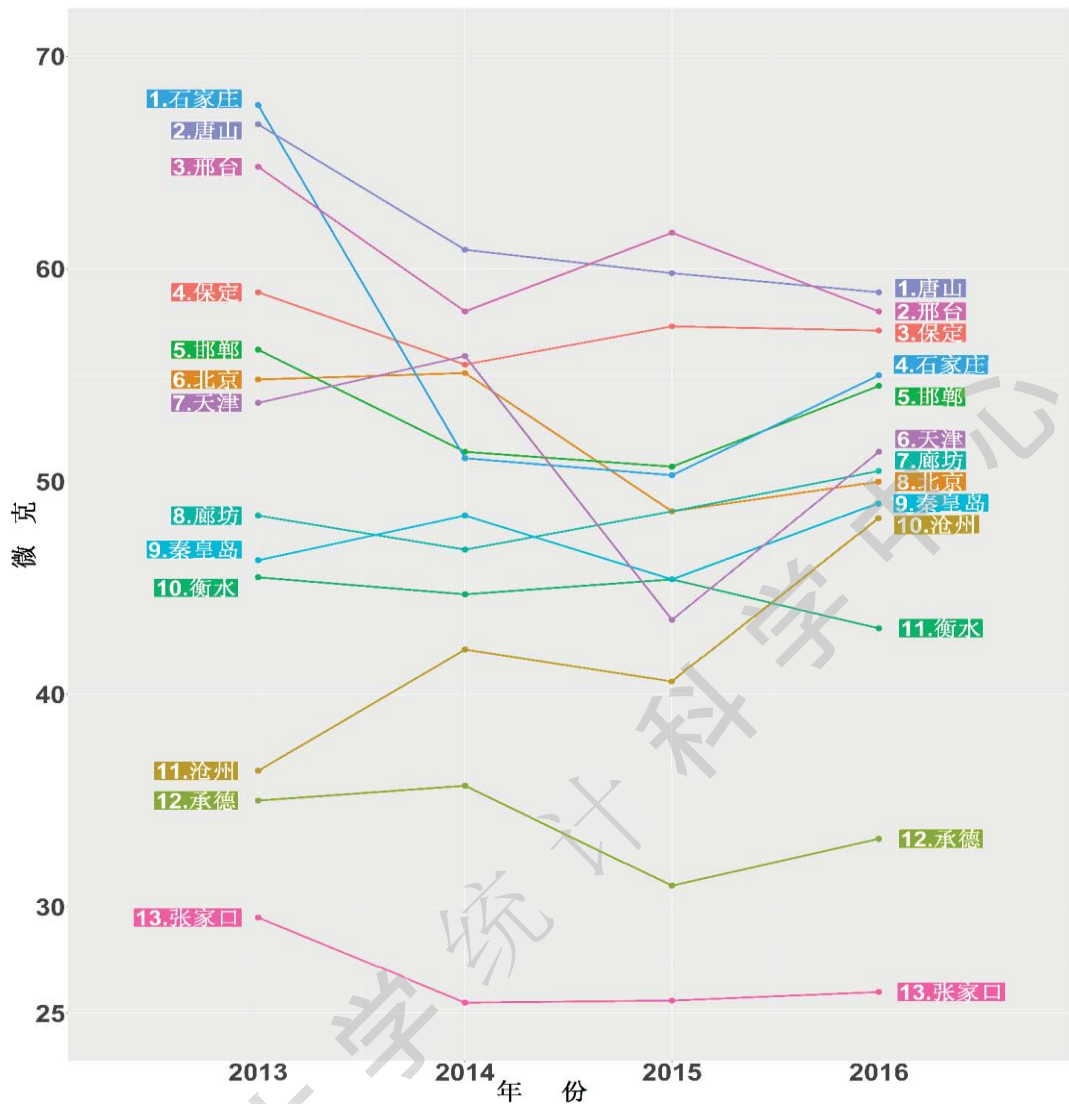


图 21 京津冀 13 市气象调整后二氧化氮年平均浓度变化序列 (微克/立方米)

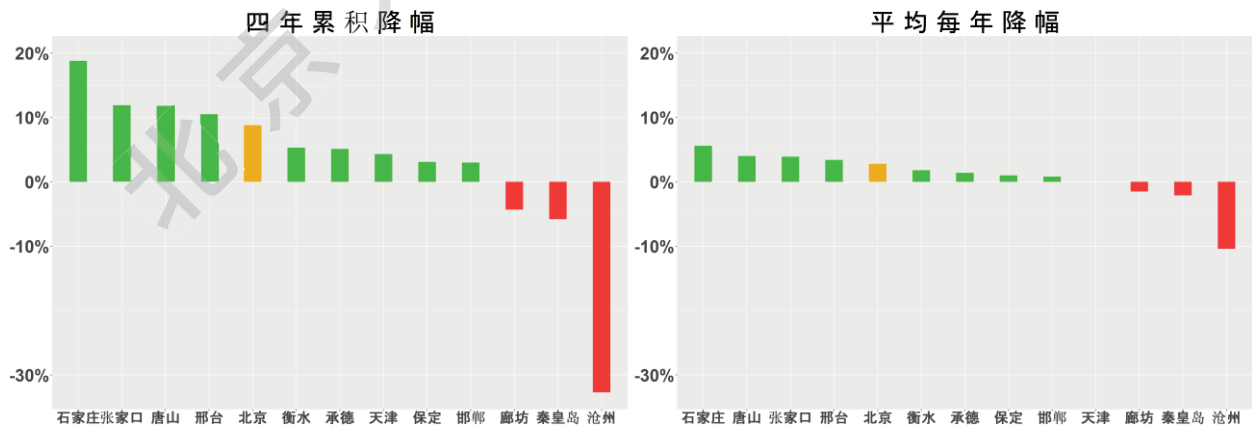


图 22 京津冀 13 市气象调整后二氧化氮四年累计降幅及年平均降幅

- **治理效果不及 PM_{2.5}、PM₁₀ 和二氧化硫，多数城市改善甚微，部分城市不降反升**

从 2013 年到 2016 年，京津冀地区整体二氧化氮浓度下降不大，平均浓度从 2013 年的 51.1 微克/立方米下降至 2016 年的 48.8 微克/立方米，全区域四年累计下降只有 2.3 微克/立方米，累计降幅仅为 4.5%，远不及 PM_{2.5}、PM₁₀ 和二氧化硫的改善程度。

分城市来看，京津冀大多数城市二氧化氮浓度均有不同程度的下降，也有少数城市升高。其中，石家庄是京津冀二氧化氮浓度下降最快的城市。四年里，其二氧化氮浓度累计下降了 18.9%，从 2013 年二氧化氮浓度最高的城市降至 2016 年的第四。张家口（11.9%）、邢台（11.1%）和唐山（9.9%）二氧化氮的浓度也有较大幅度下降。北京二氧化氮浓度四年累计下降 4.9 微克/立方米，以累计降幅 8.8% 居京津冀第五名。衡水、承德、天津、保定和邯郸二氧化氮污染改善甚微，四年累计降幅都不超过 5%。而廊坊、秦皇岛和沧州，这四年来二氧化氮浓度反而升高，其中，沧州累计升高了 32.4%，达到 48.2 微克/立方米。

(五) 一氧化碳

一氧化碳 (CO) 是一种无色、无味、有剧毒的气体，难溶于水，它是一种对血液和神经系统毒性很强的污染物。较高浓度的一氧化碳容易造成身体组织缺氧（俗称煤气中毒），造成眩晕、头痛等现象，同时危害人体的神经系统和心脏。一氧化碳主要是由于含碳化合物的不完全燃烧而产生，大气中的一氧化碳主要来源是炼钢和炼铁、锅炉中化石燃料的燃烧和汽车尾气。此外，自然和人为的燃烧（如焚烧秸秆）也会产生一氧化碳。一氧化碳是一种直接的大气污染物，同时，它也是重要的光化学反应的前体物，可以参与二次反应。一氧化碳在大气中的“存活”时间为一到两个月，所以它可以在区域内长距离的传输。

中国一氧化碳的一级和二级限值标准分别为：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。美国环境保护署的标准以 8 小时平均浓度为 9ppm（约 10 毫克/立方米）；1 小时平均浓度 35ppm（约 40 毫克/立方米）为限值，并规定每年超过以上标准限值的次数不能多于一次。

图 23 和 24 分别展示了京津冀 13 个城市经气象调整的一氧化碳均值浓度和 90% 分位数浓度随时间变化的情况。由此，我们可以发现京津冀地区一氧化碳污染的一些特征：

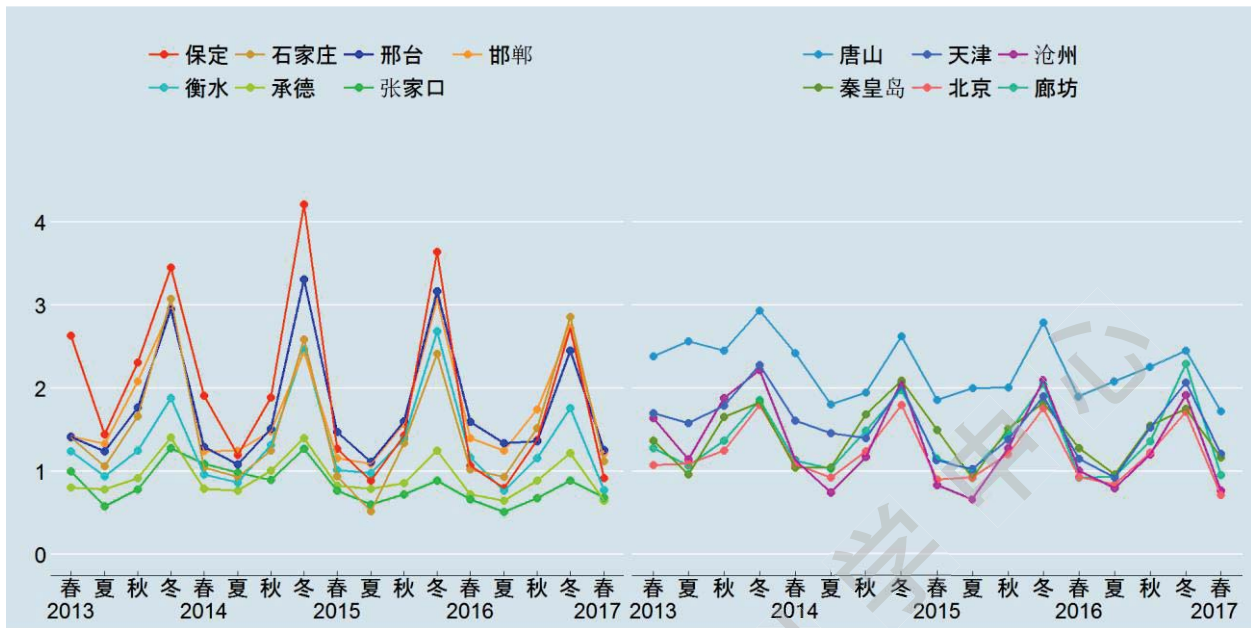


图 23 京津冀 13 市气象调整后一氧化碳季平均浓度时间序列（毫克/立方米）

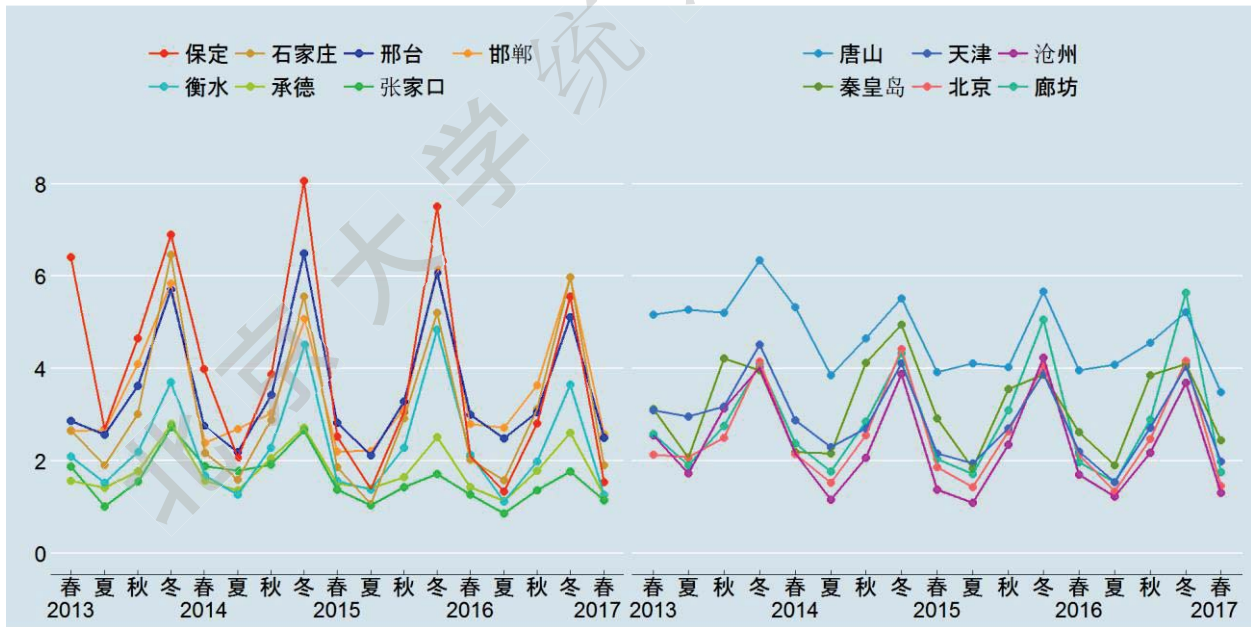


图 24 京津冀 13 市气象调整后一氧化碳季节 90%分位数浓度的时间序列（毫克/立方米）

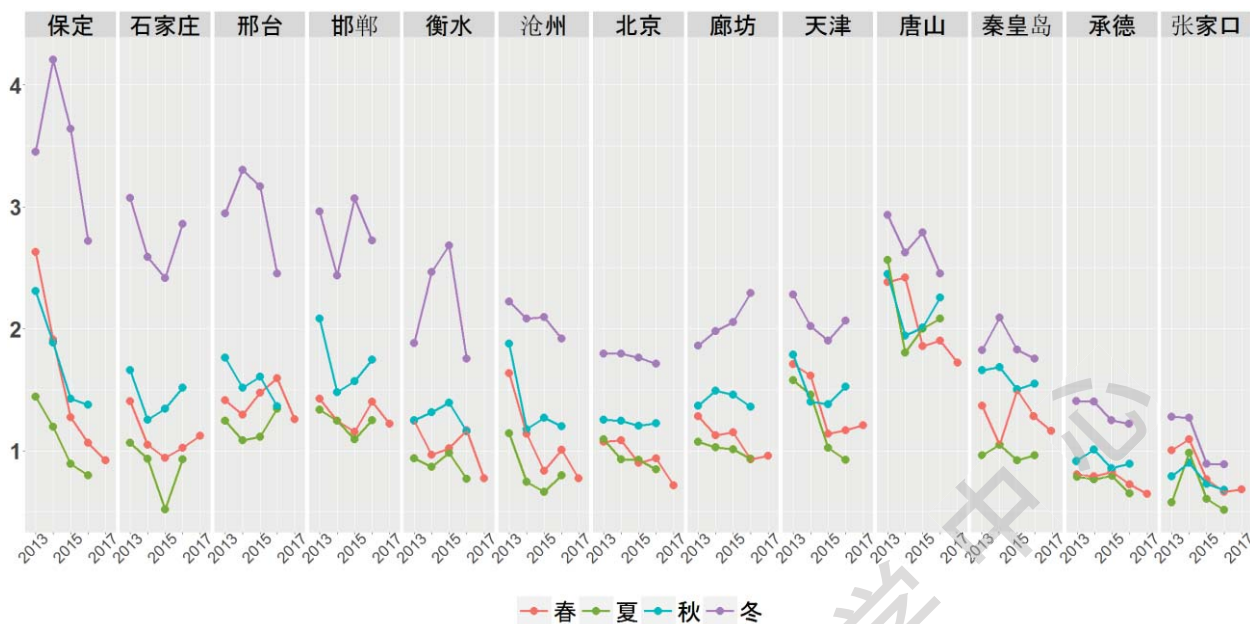


图 25 京津冀 13 市气象调整后一氧化碳季平均浓度的年度变化序列（毫克/立方米）

• 季节特征

从图 23、图 24 和图 25，我们可以明显地发现：一氧化碳季节分布的主要特征是冬季浓度最高，春秋季节次之，夏季浓度最低，这个特征与 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、二氧化硫和二氧化氮相一致。

此外，不同季节间的浓度差异也有比较明显的地理特征，这主要表现在冬季与其它季节浓度的差异上。沿太行山城市（保定、石家庄、邢台、邯郸、衡水）冬季一氧化碳的浓度比其它三个季节的浓度约高出 1~2 毫克/立方米。北京和除唐山外的环渤海城市（沧州、天津、秦皇岛），冬季一氧化碳的浓度差不多比其它季节高出 0.5 毫克/立方米。承德和张家口的一氧化碳浓度全年处于较低水平，四季差异不大。

• 四个分区，唐山自成一区

由图 23，我们可以根据冬夏两个季节一氧化碳的浓度差异，将京津冀 13 个城市分为四个区域：

（1）沿太行山的保定、石家庄、邢台、邯郸和衡水五个城市，它们冬季与夏季一氧化碳浓度的比值在 2 到 3 之间；（2）环渤海的沧州、天津、秦皇岛和北京、廊坊，它们冬季与夏季一氧化碳浓度的比值在 1 到 2 之间；（3）承德与张家口，它们一年四季一氧化碳的浓度都比较低，而且变化不大。（4）唐山自成一区。它一年四季一氧化碳的浓度差异并不大，但是整体水平却都很高。其春、夏季一氧化碳的浓度是京津冀中最高的，大约在 2 毫克/立方米，比其它城市高出一倍左右。

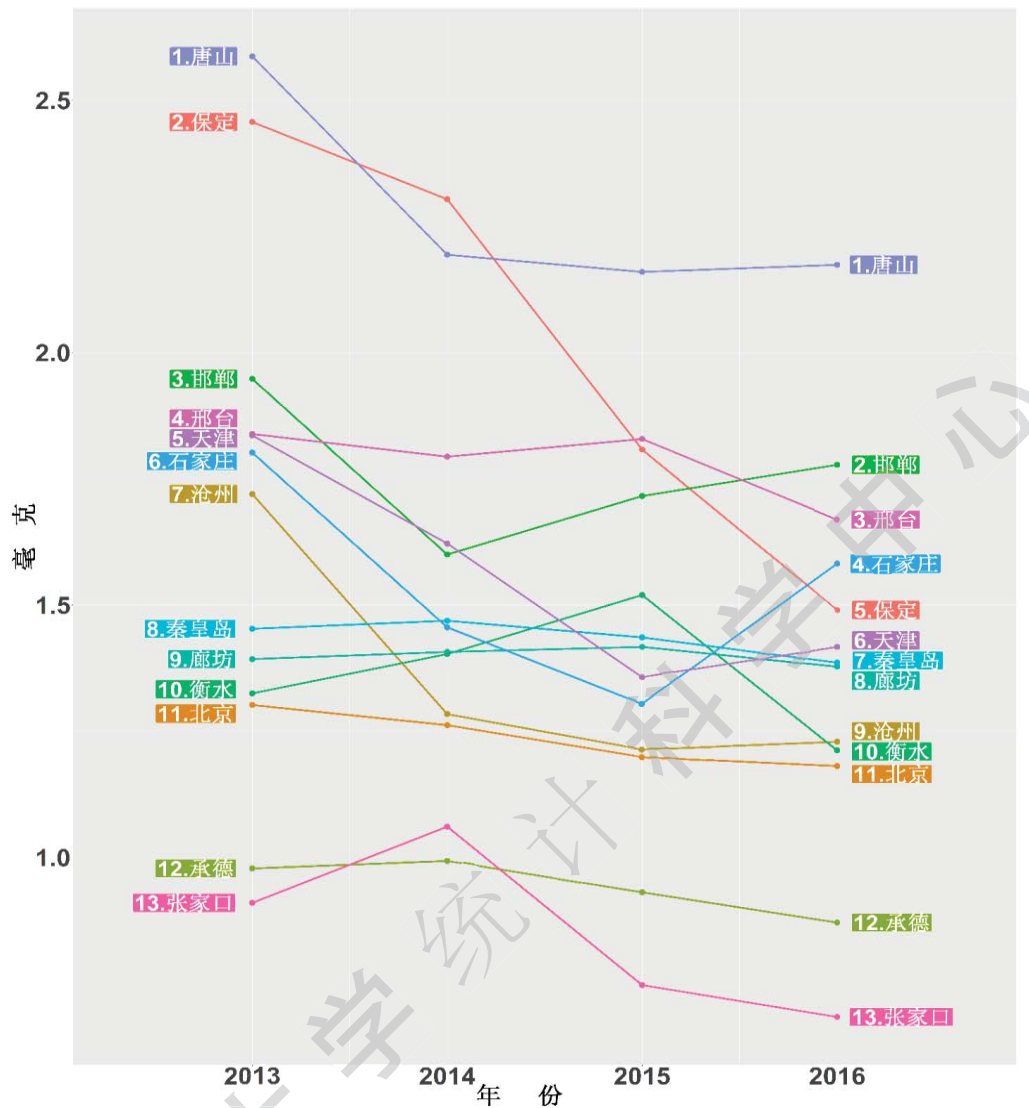


图 26 京津冀 13 市气象调整后一氧化碳年平均浓度变化序列（毫克/立方米）

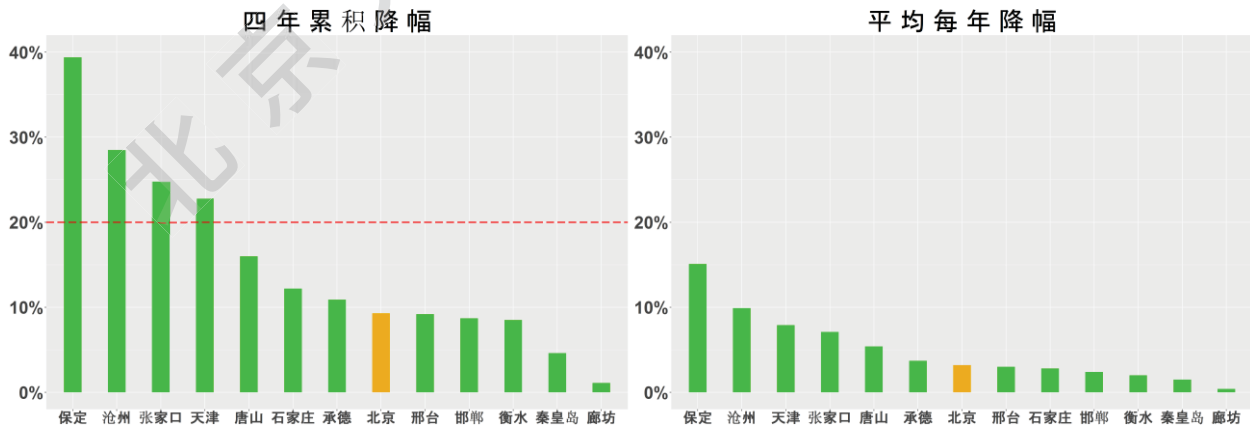


图 27 京津冀 13 市气象调整后一氧化碳四年累计降幅及年平均降幅

- 四年累计改善情况

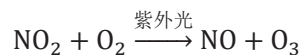
图 25, 图 26 和图 27 给出了四年来京津冀各个季节、年度的调整均值和降幅情况。整体来看, 京津冀地区一氧化碳的年平均浓度从 2013 年的 1.69 毫克/立方米下降至 2016 年的 1.39 毫克/立方米, 累计下降了 16%。

分城市来看, 保定、天津、沧州和张家口降幅较大, 四年一氧化碳累计降幅超过 20%。一氧化碳最严重的唐山, 其四年的累计降幅也超过了 15%。保定一氧化碳浓度的下降最大, 四年累计下降 39%。2013 年, 它的一氧化碳浓度名列第二, 仅次于唐山, 2016 年已经降至第五名, 与天津、廊坊处于一个水平。北京、邢台、邯郸、衡水的四年累计降幅在 8%~ 9%之间。北京一氧化碳浓度从 2013 年 1.302 毫克/立方米降至 2016 年的 1.181 毫克/立方米, 降幅为 9%, 主要得益于春夏季节浓度的降低, 而秋冬季节降幅微弱。秦皇岛和廊坊降幅最小, 四年累计降幅不超过 5%。同时我们发现**廊坊是京津冀唯一冬季一氧化碳浓度持续上升的城市**, 累计上升了 23%, 这使得廊坊四年一氧化碳累计降幅仅为 1%, 居京津冀末位。

(六) 臭氧

臭氧 (O₃) 是一种有强氧化性的气体。距离地面约 30 公里的高空臭氧层, 能够吸收紫外线、X 射线、伽马射线等短波射线, 因此被称为地球的“保护伞”。但近地面的臭氧则是一种大气污染气体, 它主要来源于人类的生产和生活, 产生于氮氧化物和挥发性有机物之间的光化学反应。低空臭氧会严重影响人类健康, 它会影响人体呼吸系统和神经系统。此外, 由于臭氧是氧化性极强的催化剂, 对金属、材料等均会产生腐蚀作用, 还会降低植物光合作用, 造成农作物减产。同时, 臭氧可促使空气中的大量气体污染物转化为颗粒物, 进而转化为 PM_{2.5}。因此, 近地面臭氧浓度超标, 其危害程度不亚于 PM_{2.5} 超标。发达国家的大气问题目前主要是臭氧污染, 如美国洛杉矶的光化学污染。中国这几年臭氧污染问题日益突出, 臭氧和 PM_{2.5} 已成为中国大气污染的两个首要污染物。

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途径是二氧化氮经过光照生成臭氧和一氧化氮的反应:



这一反应说明二氧化氮在白天光照下会促进臭氧生成，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，上述反应还伴有逆反应：



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，二氧化氮是臭氧的重要前体物，而一氧化氮又能中和部分臭氧。

我国关于臭氧的标准基于最高的 8 小时平均浓度。其中，一级标准限值是 100 微克/立方米，二级是 160 微克/立方米。美国环境保护署关于臭氧的限值标准为 0.07ppm（约为 140 微克/立方米），但要求一年间第四高的最大 8 小时平均浓度值的三年平均不超过以上限值，这实际上是非常严格的。

基于上述因素，对于臭氧污染的分析，我们除了考虑 24 小时臭氧浓度之外，还考虑了 8 小时高浓度期（中午 12 时至傍晚 8 时）的臭氧浓度。

(I) 24 小时臭氧

针对 24 小时臭氧，图 28、图 29 和图 30 分别展示了 13 个城市经气象调整后其均值浓度和 90% 分位数浓度随时间变化的情况，以及季平均浓度的年度变化序列；图 31 体现了该区域经气象调整后 24 小时臭氧的年平均浓度变化；而从图 32，可以看到此浓度四年来的累计降幅及年平均降幅。

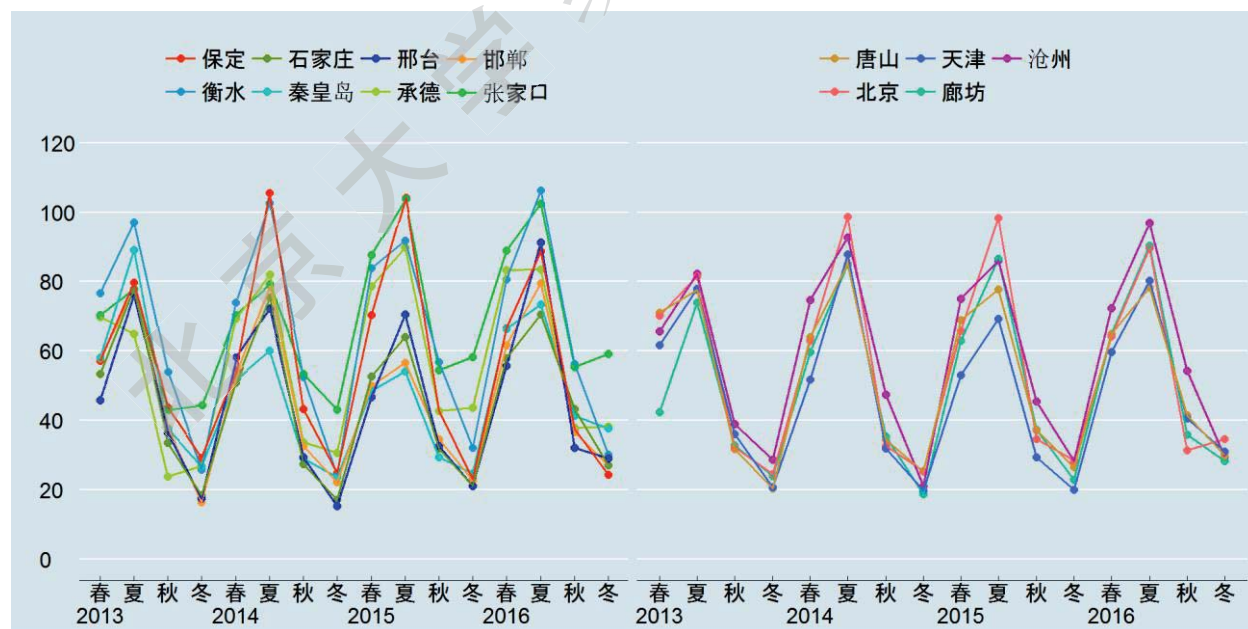


图 28 京津冀 13 市气象调整后 24 小时臭氧季平均浓度时间序列（微克/立方米）

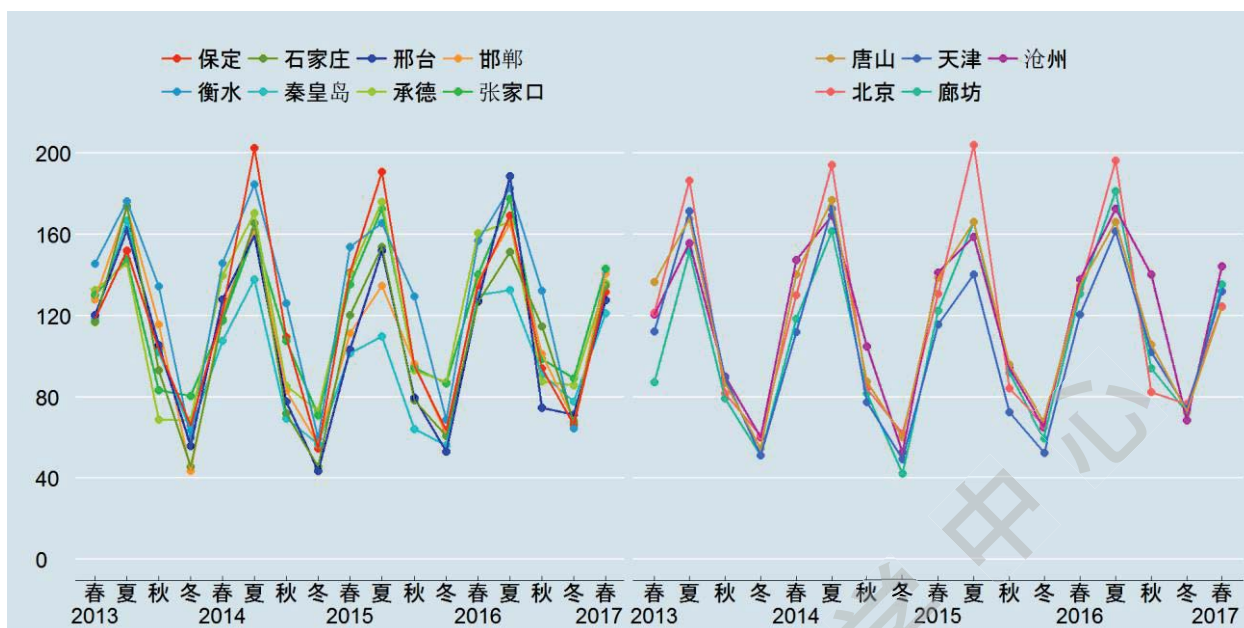


图 29 京津冀 13 市气象调整后 24 小时臭氧浓度 90% 分位数的时间序列 (微克/立方米)

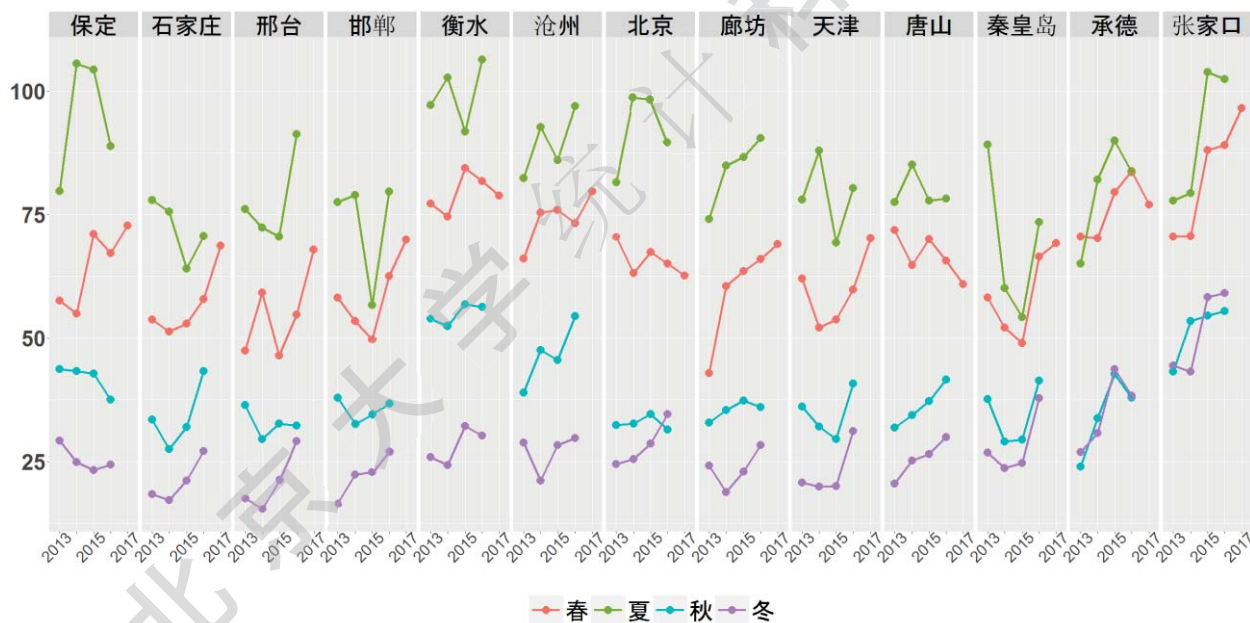


图 30 京津冀 13 市气象调整后 24 小时臭氧季平均浓度的年度变化序列 (微克/立方米)

由这五幅图，我们可以发现京津冀地区臭氧污染具有如下特征：

- 季节效应

从图 28 和 29 可以看出，臭氧同样具有明显的季节效应，但与前五种污染物不同的是，其在夏

季浓度最高，冬季最低。这是由于夏天光照强，而臭氧的产生与光照强度高度相关造成的。夏季臭氧的浓度一般是冬季的 2 到 4 倍，这可以从图 30 直观的看到。24 小时夏季臭氧的季平均值，除了保定、衡水和张家口外其他城市都未超过 100 微克/立方米的限值标准。但是，对于极端污染情况，即从臭氧的 90%分位数浓度来看，绝大部分城市夏季的 90%分位数浓度都高于 160 微克/立方米的二级限值标准，这揭示了京津冀最高八小时臭氧污染的严重性。

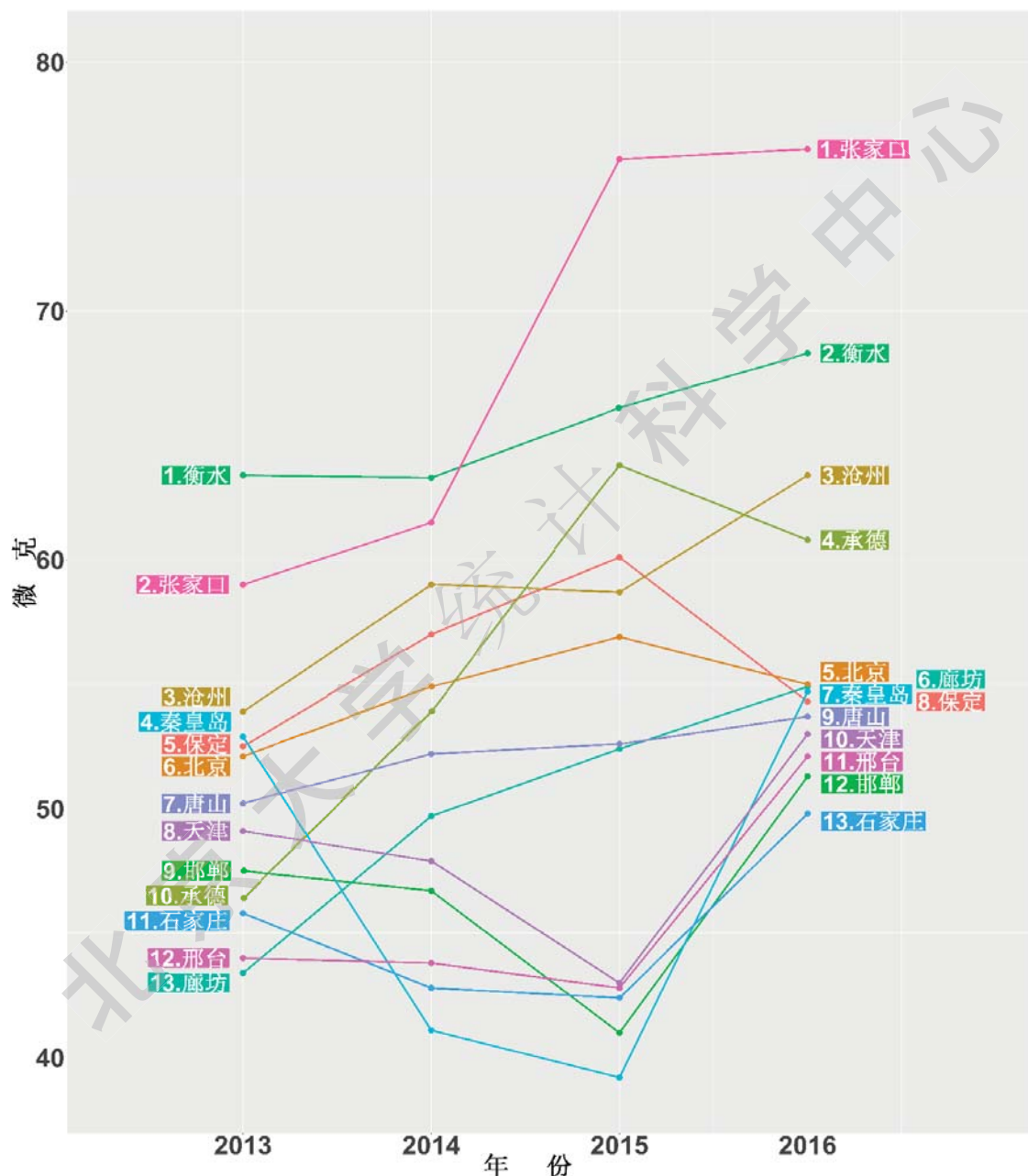


图 31 京津冀 13 市气象调整后 24 小时臭氧年平均浓度变化序列 (微克/立方米)

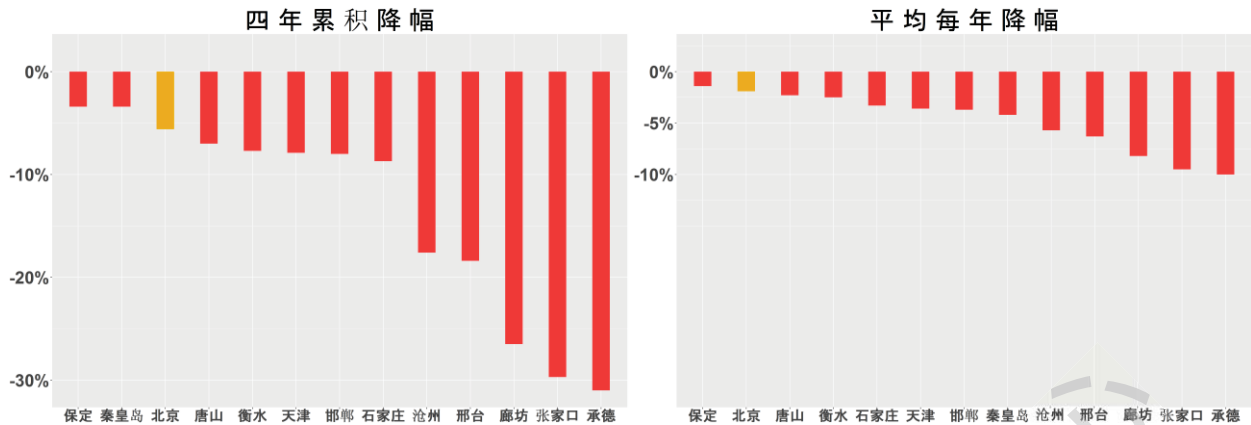


图 32 京津冀 13 市气象调整后 24 小时臭氧四年累计降幅及年平均降幅

• 区域特征

北部的张家口和承德两城市，臭氧污染恶化最严重。张家口臭氧浓度从 2013 年的 59 微克/立方米上升至 76 微克/立方米，升幅为 29%，24 小时臭氧平均浓度最高，远超过京津冀其它城市。承德臭氧从 2013 年的 46 微克/立方米上升至 61 微克/立方米，从京津冀第四好的城市变为第四差的城市。北京 2016 年臭氧浓度的年平均值为 55 微克/立方米，四年来小幅上升 2.9 微克/立方米，升幅为 5.7%。与北京邻近的廊坊，四年来，臭氧浓度大幅上升，升幅超过 25%。此外，虽然石家庄是 PM_{2.5} 污染最严重的几个城市之一，但是其臭氧浓度在 2016 年却是 13 个城市中最低的，这应该是由高浓度颗粒物影响了光照强度，阻碍了臭氧的生成。需要特别注意的是，如图 31 所示，从 2015 年到 2016 年，秦皇岛、天津、邢台、邯郸和石家庄五个城市臭氧浓度呈现一条陡峭的上升直线，上升明显，平均增加了 10 微克/立方米。

• 整体臭氧浓度上升显著，升幅 13.3%

不同于前五种污染物多少有所改善的情况，京津冀地区 13 个城市四年来臭氧浓度降幅均为负值，从 2013 年 2016 年，每个城市的臭氧年平均浓度均有不同幅度上升，四年来该区域总体臭氧浓度上升了 6.7 微克/立方米，升幅 13.3%。部分城市臭氧污染恶化势头明显，如图 32 所示，沧州、邢台、廊坊、张家口、承德四年累计升幅超过 10%，年均升幅超过 5%，

(II) 8 小时臭氧

臭氧的生成极易受到光照影响，光照越强，臭氧浓度越高。因此，一天 24 小时中，各个小时的臭氧浓度不同且差异很大。如下午 3 时一般是一天中臭氧浓度最高点，而凌晨 3 时是最低的，两者可以相差 2 到 3 倍。由于人们的活动主要集中在光照较强的白天，因而若只分析包含夜间时段的 24 小时浓

度，则会低估臭氧对人体健康的影响。考虑到国家标准是基于臭氧最高 8 小时的浓度，因此，我们这里分析中午 12 时到傍晚 20 时共 8 小时的臭氧浓度数据，并计算其气象调整后的平均浓度。

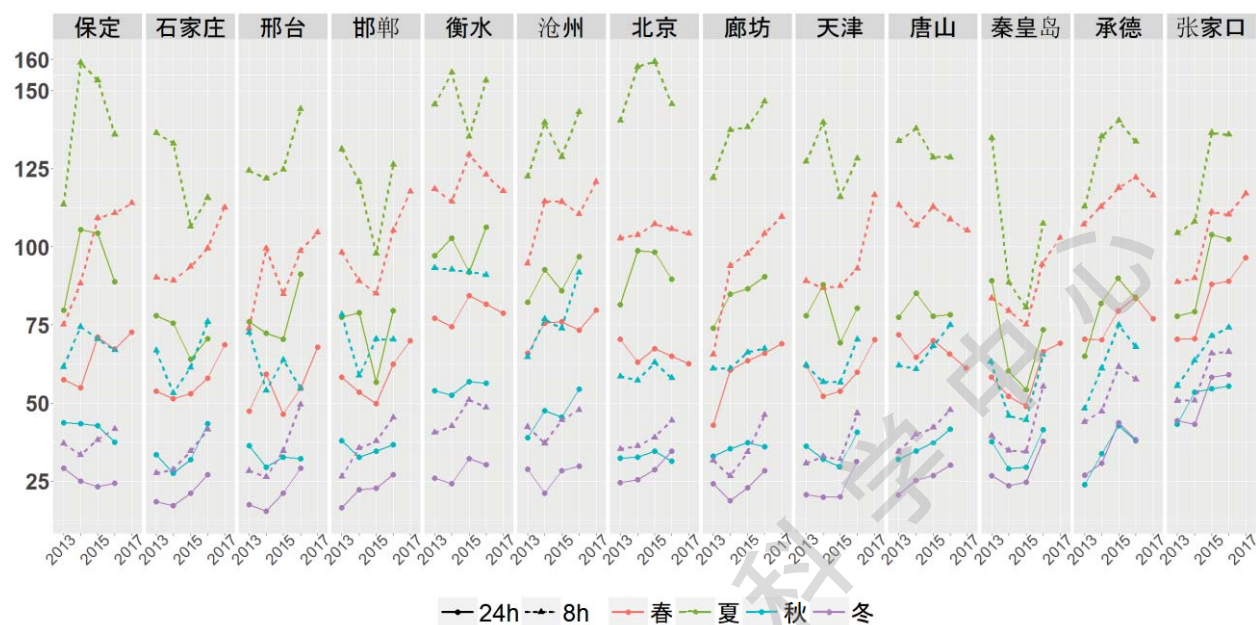


图 33 京津冀 13 市气象调整后 24 小时和 8 小时臭氧季平均浓度的年度变化序列（微克/立方米）

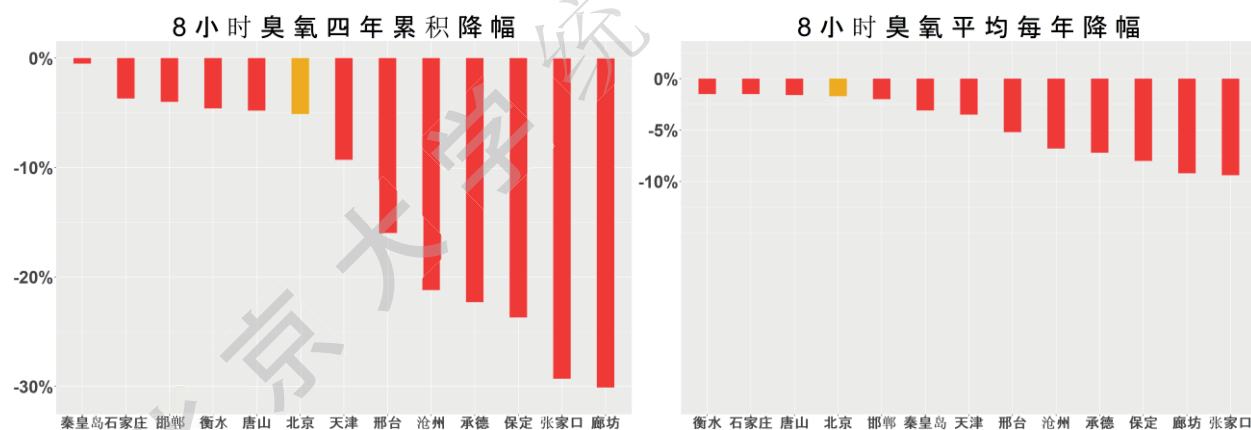


图 34 京津冀 13 市气象调整后 8 小时臭氧四年累计降幅及年平均降幅

图 33 展示了 24 小时（实线）与 8 小时（虚线）的经气象调整的臭氧季平均值。可以明显的看到，基于中午 12 时到傍晚 8 时的臭氧浓度做调整所得的臭氧季平均浓度明显高于基于 24 小时的观测所得的数值。这种差异在冬季较小，一般相差在 10~20 微克/立方米；然而在光照较强的夏季，8 小时的臭

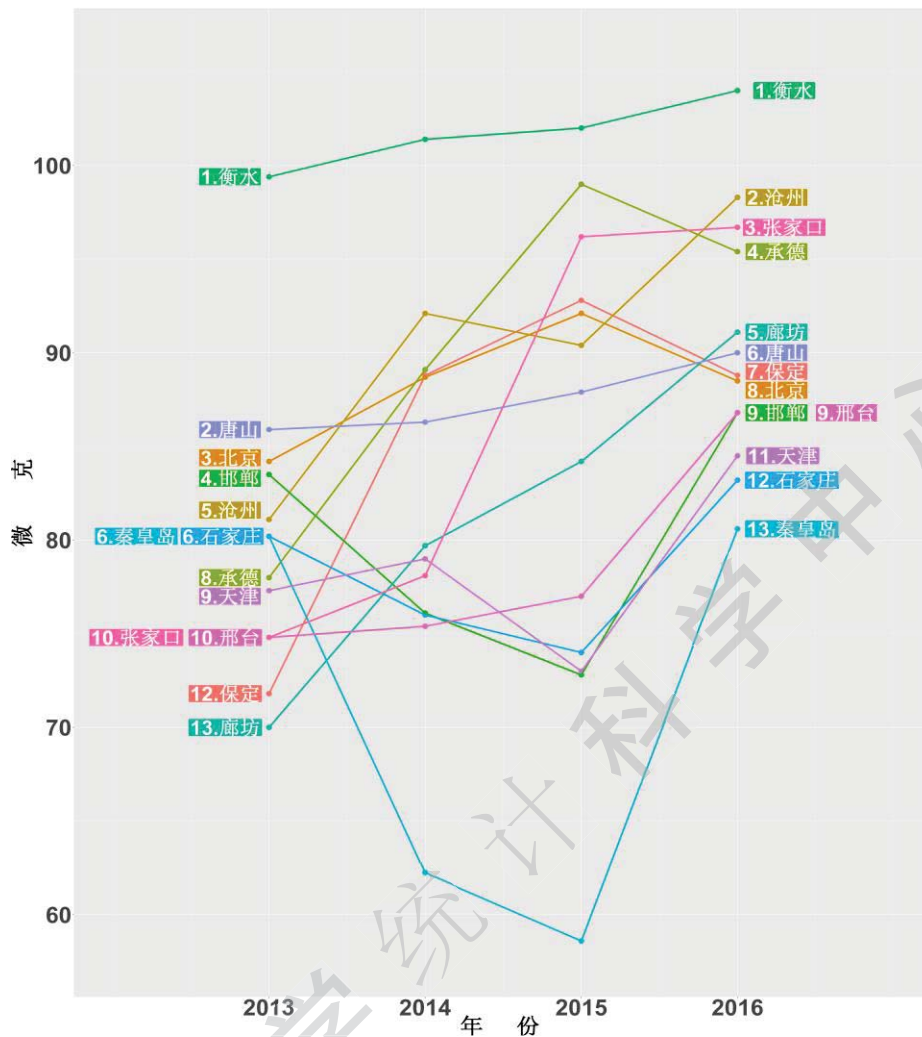


图 35 京津冀 13 市气象调整后 8 小时臭氧年平均浓度变化序列 (微克/立方米)

浓度会明显比 24 小时的平均浓度高出 40~60 微克/立方米。北京、保定、衡水是京津冀地区夏季臭氧污染较重的城市，它们 8 小时臭氧的夏季平均浓度可以超过 150 微克/立方米 (见图 33)。秦皇岛的 8 小时臭氧浓度是 13 个城市中最低的，2014 年和 2015 年夏季的 8 小时臭氧浓度不超过 90 微克/立方米，但是到 2016 年夏季，这一浓度也达到了 107 微克/立方米。由图 33 可以看到，除秦皇岛 2014 年和 2015 年夏季，京津冀地区 8 小时臭氧浓度在 2013 年到 2016 年夏季的平均值都超过了中国和世卫组织 100 微克/立方米的标 准。且近年来，春季的臭氧形势也不在不断恶化，至 2017 年春季，京津冀地区 13 个城市春季的 8 小时臭氧季平均浓度也首次全部超过了 100 微克/立方米。可以说，**春夏季臭氧污染已经成为京津冀大气污染的一个突出问题**。值得警惕的是，近几年京津冀的臭氧污染恶化趋势并没有停止，如图 34、图 35 我们也可以发现，每个城市的 8 小时臭氧浓度近四年来一直在升高。京津冀

13个城市2013年8小时的臭氧浓度大多分布在70~85微克/立方米之间，而到了2016年，大部分城市的年均浓度升高到80~100微克/立方米之间，其中衡水8小时臭氧的年平均浓度一直是京津冀地区最高的。其年平均浓度基本都超过了100微克/立方米。沧州、张家口和承德也处在较高的水平上。

不同于颗粒物，臭氧不降低能见度，因而不容易被察觉。过去4年颗粒物浓度的显著下降和臭氧浓度的大幅升高，也说明我们没有对臭氧污染给予足够的重视。借鉴发达国家的发展历程，颗粒物污染和臭氧污染是城市发展过程中最容易遇到的问题。下一步，我们应该采取更加直接有效的措施来控制京津冀地区臭氧污染。

五、数据质量问题说明

统计研究需要通过严谨科学的分析方法导出结论，也需要可靠的数据来源作为保障基础。本报告所涉及数据高达几千万条，对整个数据集质量的研究不是本报告研究的主要范畴。在本节我们只在分析沧州数据时发现的一些情况进行反映，同时希望能引起各级大气监测部门对数据质量的重视。

沧州市有三个国控监测站：沧县城建局、电视转播站和市环保局。其中电视转播站离市环保局最近，只有1.2公里，沧县城建局距离市环保局稍远，为2.8公里，电视转播站和沧县城建局相距3.4公里。

沧州市空气质量监测站分布图

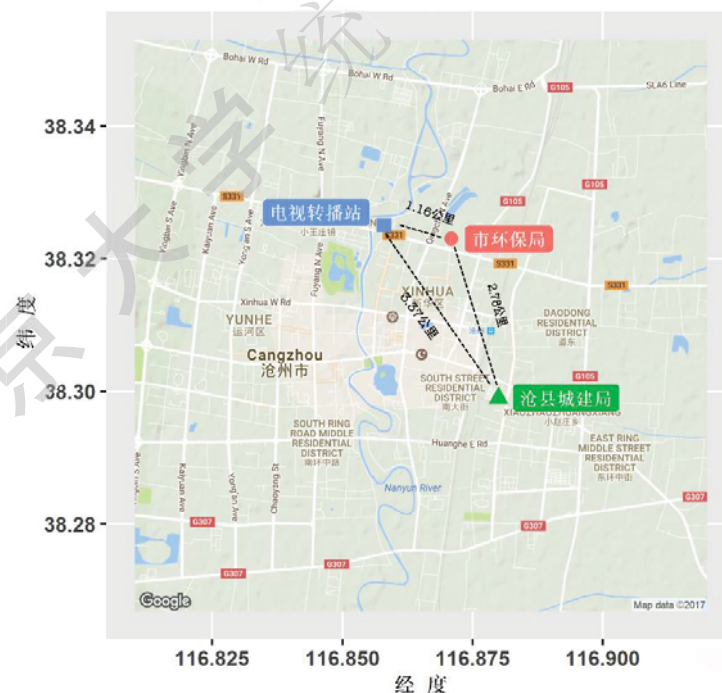


图 36 沧州市空气质量监测站点分布

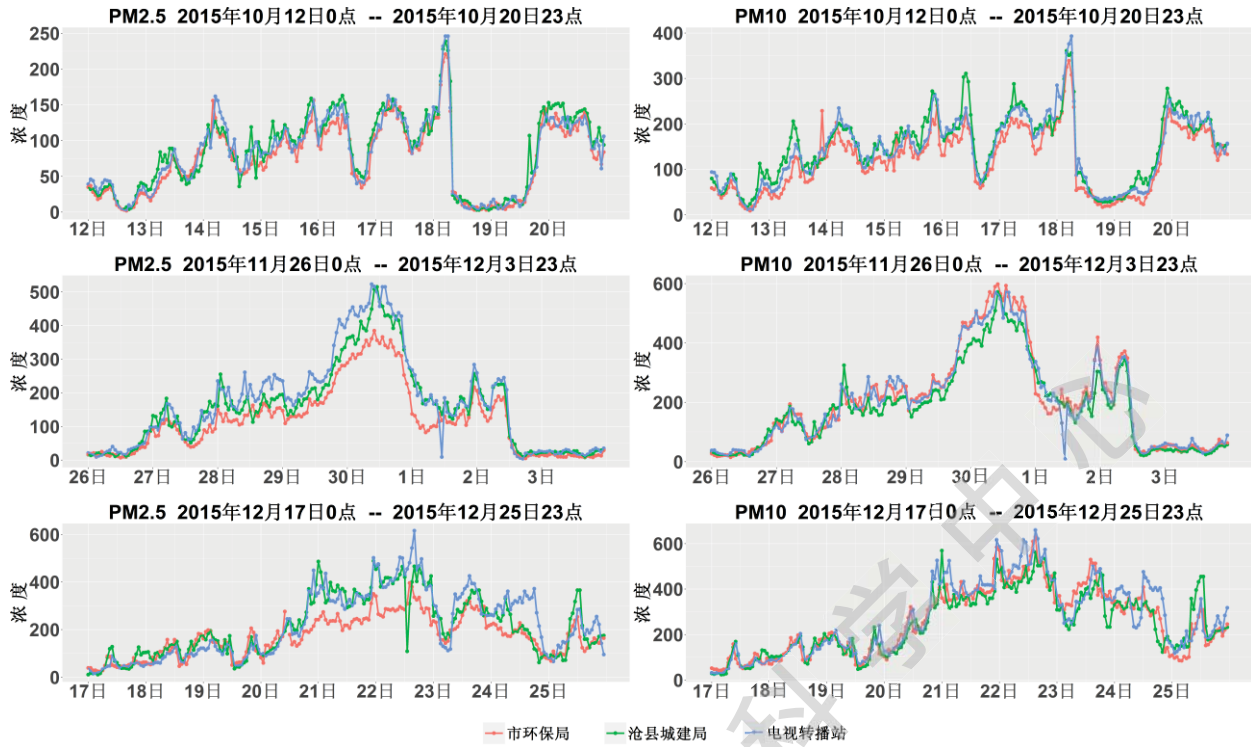


图 37(a) 沧州市 2015 年秋冬三个时间段 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 原始浓度变化图

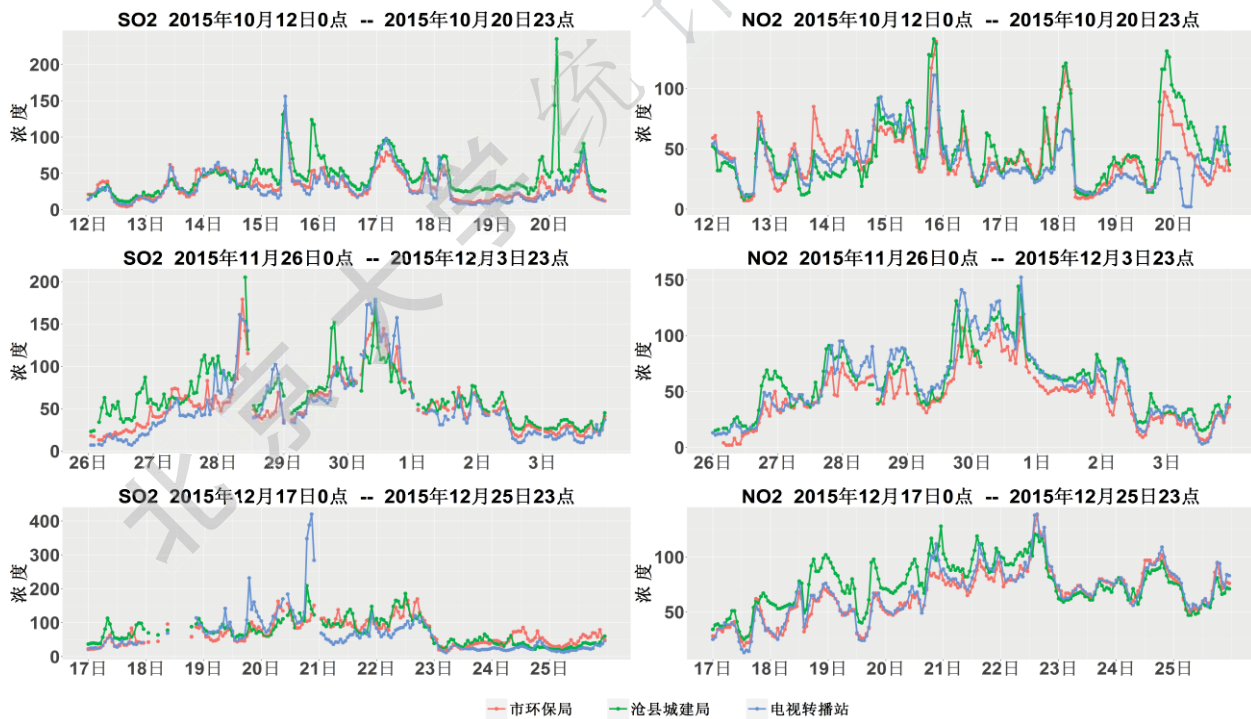


图 37(b) 沧州市 2015 年秋冬三个时间段二氧化硫和二氧化氮原始浓度变化图

我们选取了 2015 年 10 月和 11 月的 3 个时间段，比较这三个站点 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、二氧化硫和二氧化氮浓度变化的一致性和差异。我们选取的三个时间段分别为：（1）2015 年 10 月 12 日 0 点至 2015 年 10 月 20 日 23 点；（2）2015 年 11 月 26 日 0 点至 2015 年 12 月 3 日 23 点；（3）2015 年 12 月 17 日 0 点至 2015 年 12 月 25 日 23 点。四种污染物在这三个时间段的浓度时间序列如图 37(a) 和图 37(b) 所示。

如图 37(a) 左列所示，从 10 月 12 日到 10 月 20 日，沧州市三个国控站 $PM_{2.5}$ 监测数值基本一致，即使在 $PM_{2.5}$ 浓度超过 150 微克/立方米的重污染天气下，也保持十分接近的监测数值。

然而观察 11 月 26 日至 12 月 3 日的 $PM_{2.5}$ 的监测数据，可以发现，在 $PM_{2.5}$ 浓度较低时，三个站点的读数保持一致；但当 $PM_{2.5}$ 浓度升高，超过 200 微克/立方米时，三个站点的监测浓度出现了较大差异。其中，沧县城建局和电视转播站两个站点监测数仍保持一致，而市环保局站点的监测数明显低于其它两个站点，并且浓度越高，差异越大，监测浓度差异最大能超过 100 微克/立方米。当 $PM_{2.5}$ 浓度降低时，三个站点的监测数值又变得一致。

12 月 17 日至 12 月 25 日的监测数据所体现的情况与 11 月 26 日至 12 月 3 日类似。然而，观察 PM_{10} 、二氧化硫、二氧化氮三个污染物在上述三个阶段的浓度时间序列，尤其是 PM_{10} ，并没有出现与 $PM_{2.5}$ 一样的情况。

本报告以一个城市所有站点的平均浓度来计算城市的空气质量水平。这种个别站点的数据异常，将会给空气质量的评估带来不小的偏差。如，沧州 2015 年冬季三个站点气象调整的季平均值分别为：沧县城建局 95.5 微克/立方米，电视转播站 99.8 微克/立方米，市环保局 79.6 微克/立方米。如果只使用沧县城建局和电视转播站两个站点作为依据，沧州市 2015 年的冬季平均浓度为 97.7 微克/立方米，年平均浓度为 70 微克/立方米。但是若包括市环保局站点，则沧州市 2015 年的冬季平均浓度为 91.6 微克/立方米，年平均浓度为 67.3 微克/立方米，季平均浓度和年平均浓度分别相差 6.1 微克/立方米和 2.7 微克/立方米，季平均浓度和年平均浓度分别低了 6.2% 和 3.9%。

六、区域煤炭消耗与工业运行数据分析

大气污染的主要成因是化石类能源的使用超过了大气混合层所能容纳的上限。在本节，我们将分析 2011 年以来京津冀的煤炭消耗数据。同时，由于大气污染物具有很强的区域传输性，我们也考虑了山东，河南和山西的煤炭消费情况。

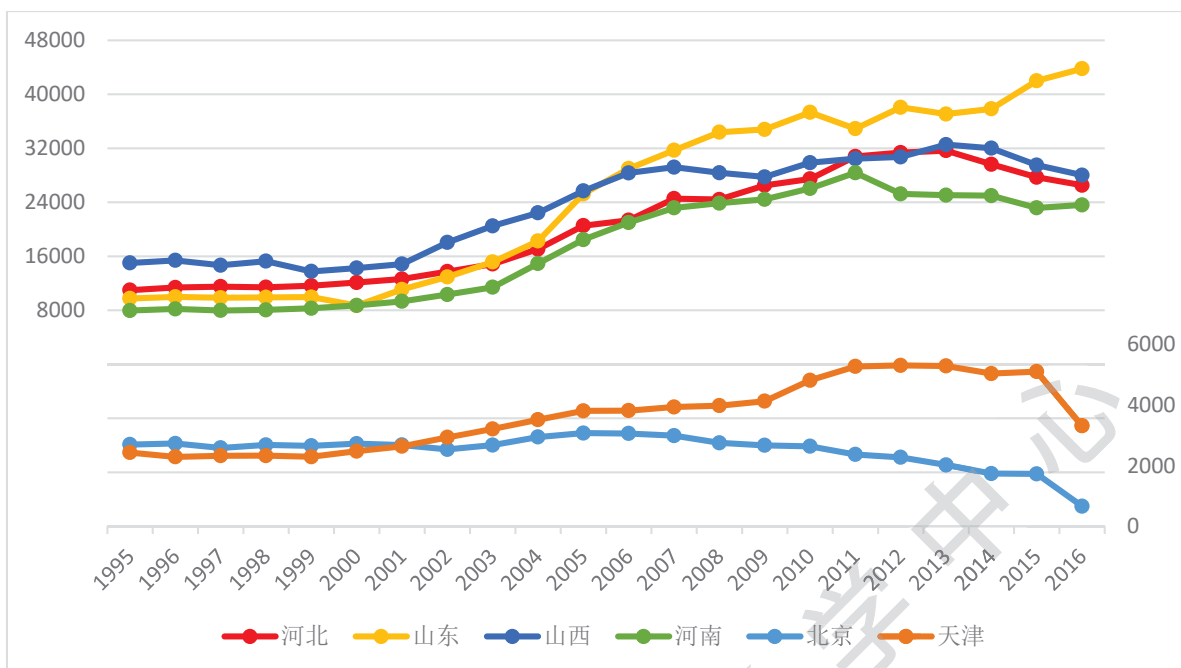


图 38: 京津冀晋鲁豫四省二市年度煤炭消费量(万吨)

(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)

我国主要的煤炭消费行业可以分为以下四个：**电力**（发电和供热）、**冶金**（钢铁等）、**建材**（水泥等）和**化工**（含制药）。这四个行业以外的耗煤量都归入**其它类**，包括民用散煤消费。散煤燃烧的效率最低，有研究表明同燃煤电厂的排放相比，它会造造成多十几倍的污染排放[9]。图 38 给出了京津冀晋鲁豫四省二市 1995-2016 年煤炭消费总量的统计。北京市的煤炭消费量自北京奥运会之前的 2007 年就开始稳步下降，2016 年的消费量仅是 2007 年的 22.1%。河北、天津的煤炭消费从 2001 年（中国加入世贸组织和北京获得奥运主办权）开始保持相当高的增长速度，河北在 2013 年达到三亿二千万吨的峰值，是 2001 年的 2.5 倍；天津的煤炭消费量在 2013 年达到六千万吨，是 2001 年的 2 倍。2013 年到 2016 年，河北省煤炭自然年的年度消费量下降了 16.2%，天津市下降了 37.3%。这一方面是由于大气环境治理及京津冀“煤改气”的缘故，另一方面是由于上一轮的经济放缓，对主要煤耗高的产品如钢铁、水泥的需求降低所致。

图 39、40 给出了河北和天津自 2011 年以来分行业的季度煤炭消耗量。北京的煤耗量很少（2016 年耗煤总量只有天津的五分之一，河北的四分之一），其相应统计数据和在 [3] 中已经单独给出。天津市的煤炭消费量中，电力行业占比最高，占全市总耗煤量的 60-70%。电力煤耗量在冬季最高，这是由于冬季供暖所致。2015 年与 2013 年相比，天津市的各行业耗煤量减少并不多，只在秋季同比下降 9%。但在 2016 年，天津的总耗煤量明显下降，其中下降最多的为电力行业，从 2015 年

的 3752.5 万吨降到 2136.5 万吨，同比下降了 43.1%。其它类在 2016 年为 264.57 万吨，比 2015 年的 407.52 万吨同比下降了 35.1%。这说明天津市的煤耗结构变化主要发生在 2016 年，这同其进行的“煤改气”计划密切相关。

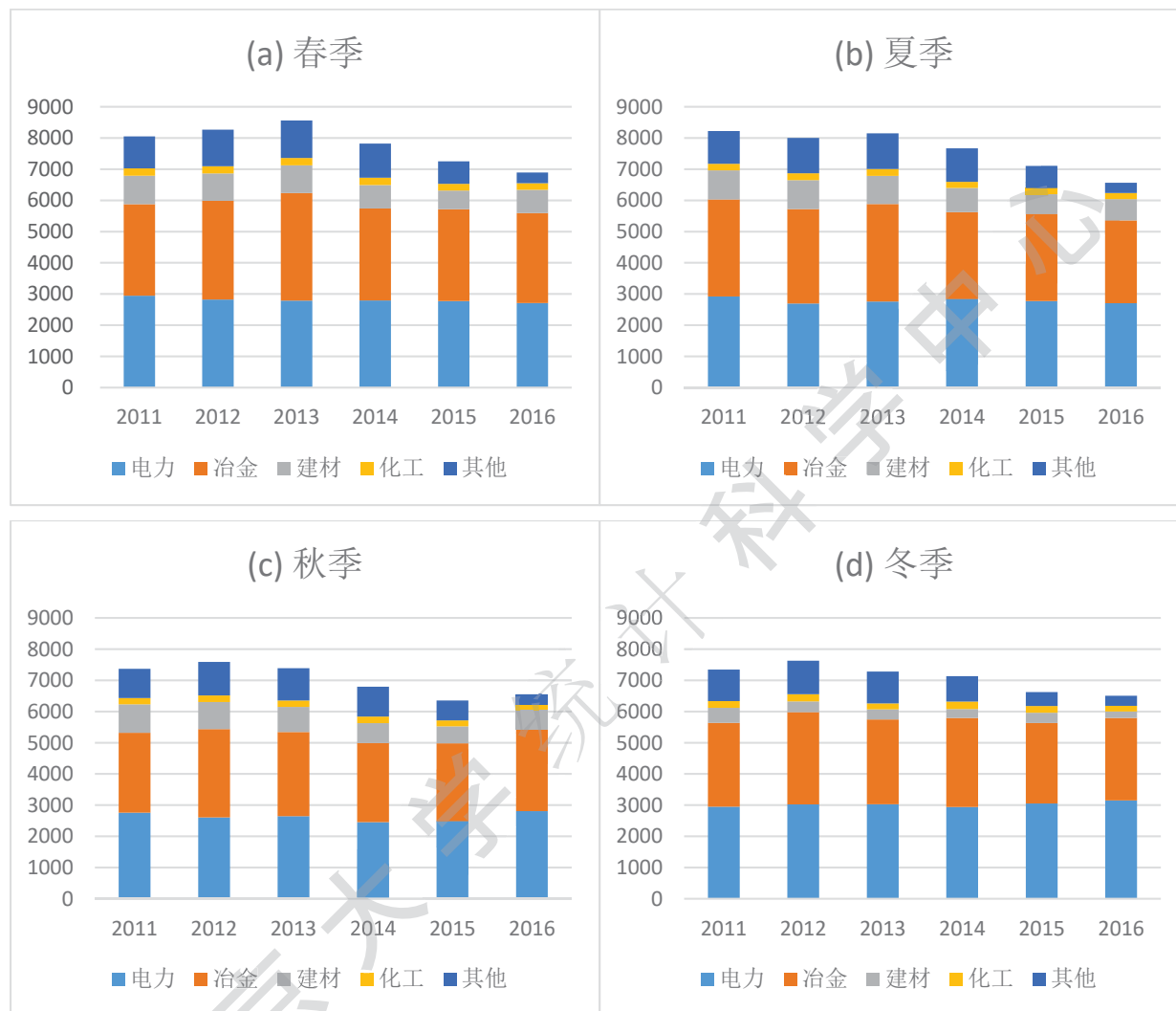


图 39：河北省各行业季度煤炭消耗总量（万吨）

河北省最主要耗煤行业为电力和冶金，这两个行业占了总耗煤量的 70~80%。这是由于河北省的钢铁行业（包括炼焦²）消耗了大量的煤，且发电量的相当一部分也用于冶金（炼钢）。2013 年至

²中国目前年产焦炭 4.5 亿吨，占全世界总产量的三分之二以上。发达国家出于环境考虑一直限制本国焦炭产量，通过从中国进口满足需求。中国生产焦炭有 6%（2 千多万吨）左右用于出口。中国在 2006 年开始对焦炭出口征收 5% 的关税，一年后又将关税提高到 15%，2008 年又上调到 40%。在国内焦煤企业和西方焦炭进口国家的压力下（后者将中国告上 WTO 并胜诉），中国在 2012 年底取消了焦煤出口关税。中国应该禁止这一造成高污染的产品的出口。

2015 年，河北省的自然年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%，其它类下降了 37.6%。在 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%，冶金行业的耗煤量下降了 2.1%和 4.8%，

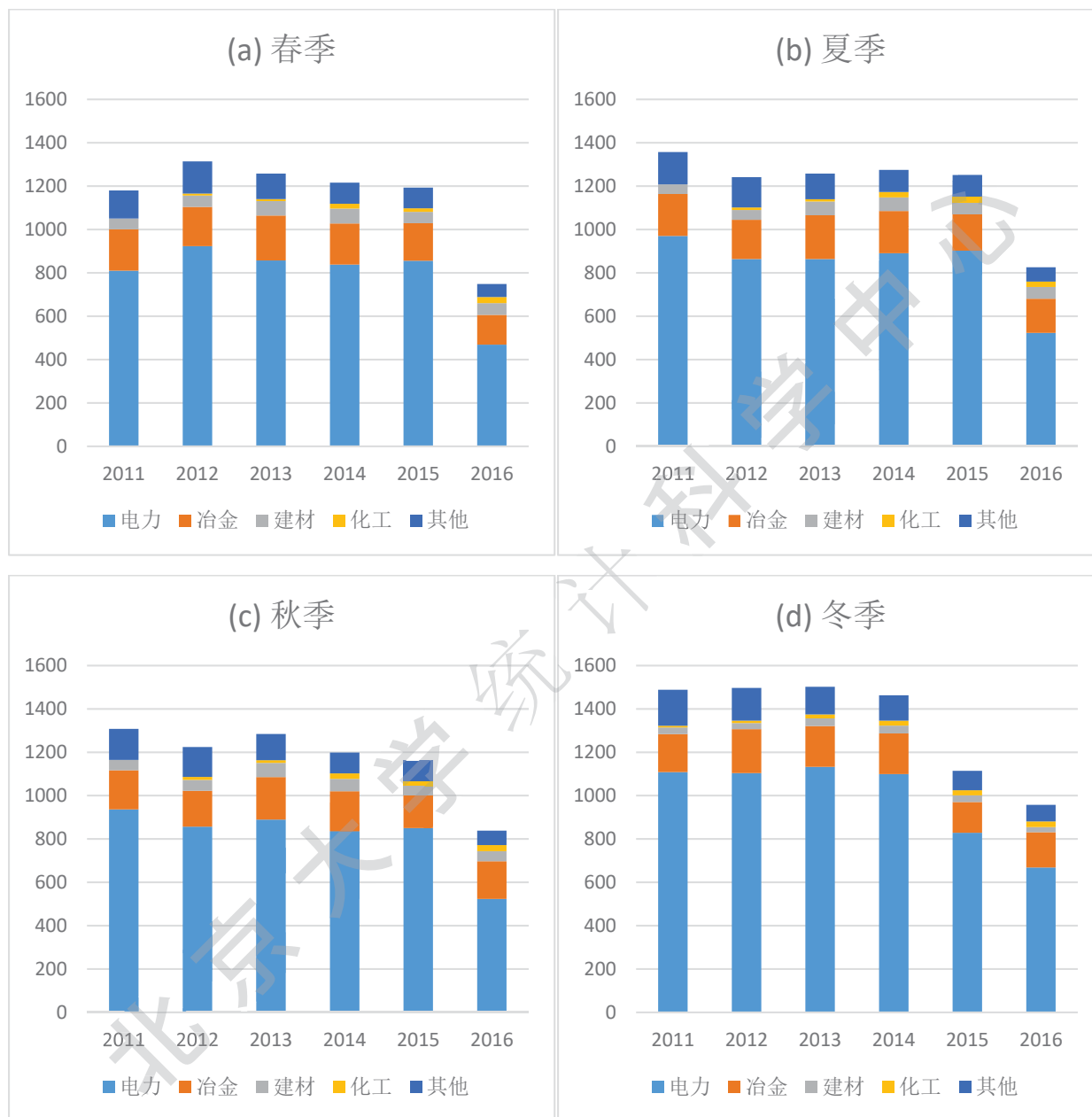


图 40: 天津市各行业季度煤炭消耗总量 (万吨)

其它类耗煤量同比更是下降了 52.5%和 53.8%。但是，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%，这应该是京津冀一些城市的 PM_{2.5} 从 2016 年秋季开始回升的原因。在 2016 年冬季，河北省总耗煤量有所回落，同比下降 1.73%。但是，煤耗最大的电

力行业和冶金行业仍分别同比上升 3.25%和 2.36%。

数据显示 2017 年 3、4 月份³，河北省的总煤耗量与 2016 年同期相比下降了 3.4%，除电力行业煤耗量仍同比上升 2.2%外，其他行业的煤耗量均有不同程度的下降（其中耗煤量最多的冶金行业也同比下降 4.8%）。

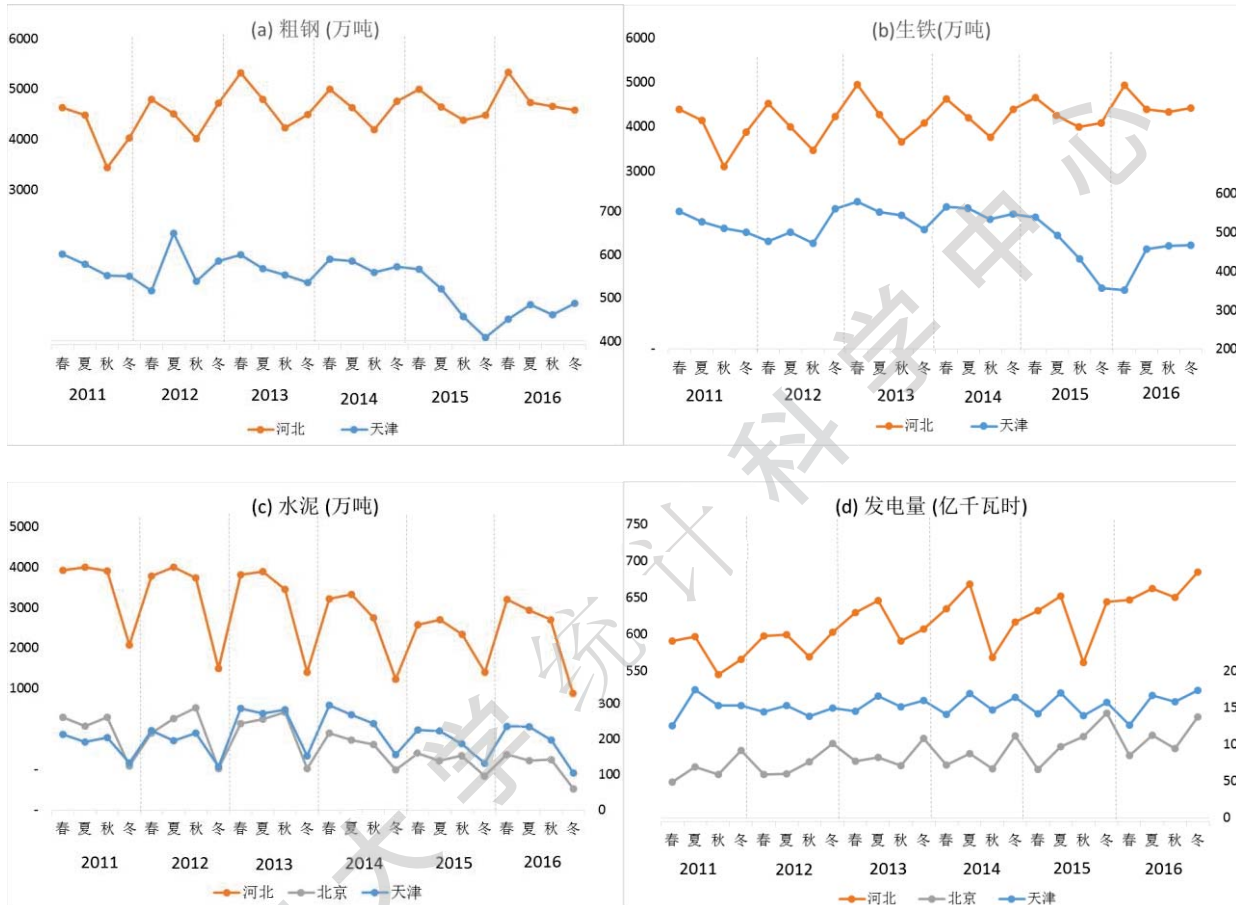


图 41: 京津冀地区耗煤工业产品季度总产量及季度总发电量

为了对京津冀地区各行业的煤耗量变化有更深入的了解，我们在图 41 给出了京津冀地区主要耗煤工业产品季度总产量和总发电量时间趋势图。可以看到，天津市的发电量从 2013 年至 2015 年基本维持平稳，2016 年春季和夏季的发电量分别比 2015 年同期下降 10.9%和 1.5%，秋季和冬季分别同比上升 14%和 10.29%。而天津市 2016 年春、夏、秋、冬四个季度电力行业的耗煤量同比下降了 45.2%、42.1%、38.4%和 19.34%，这验证了天津市的“煤改气”政策在 2016 年得到了进一步落实。

2013 年至 2015 年，河北省生铁的年产量仅上升 0.34%，粗钢和水泥的年产量（季节年）分别下降

³截止目前为止，煤炭消费数据更新至 2017 年 4 月。

了 1.9%和 28.1%⁴，但这三种产品的产量在 2016 年（季节年）比 2015 年分别增加了 3.1%，2.2%和 3.9%，发电量也同比上升了 3%。2016 年秋季和冬季，河北省生铁产量的同比上升幅度比 2016 年春、夏季更高。2016 年春季和夏季生铁产量同比上升了 6.11%和 3.26%，而秋、冬两季分别上升了 8.21%和 8.09%，这导致冶金行业煤耗量同比上升 5.21%和 2.36%。天津市的生铁和粗钢产量在 2016 年秋季也开始同比上升，这点在图 42 的冶金行业耗煤量中也得到了体现。这说明，同 2013-2015 年相比，京津冀地区的工业（经济）在 2016 年已经回暖。值得提出的是，2016 年春季和夏季，河北省的冶金行业耗煤量比上年同期下降了 2.1%和 4.8%，这可能与河北省大量关闭小型钢铁厂的措施有关。因为大型钢铁厂的煤耗效率比较高，所以尽管煤耗量在下降，河北钢铁产量仍在增加。**这些数据也表明河北省近几年推动的“去产能”的效果并没有反映到钢铁产量上。**

河北省 2016 年消耗 2.6 亿吨煤，但它并不是煤炭消费量最多的省。从图 38 中，我们看到晋鲁豫三省也都是煤炭消费大户。山东自 2001 年以来一直保持强劲的增长势头。即使在上一轮经济放缓期间（2013 - 2015 年），山东省的煤炭消耗量仍然保持增长。山东省 2015 年和 2016 年的煤炭消耗量均超过 4 亿吨，其中 2016 年上升到 4.37 亿吨，是河北省的 1.6 倍。中国产煤第一大省山西的消费量略高于河北；河南省略低于河北省。**所以晋鲁豫三省的煤炭年消费总量是京津冀的 3 倍以上。**晋鲁豫京津冀四省二市 2015 年和 2016 年煤炭总消费量分别是 12.9 和 12.6 亿吨，占全国总消耗的 32.4%。而它们 2015 年人口只占全国的 24.8%，GDP 产值占全国 26.4%，土地面积占 7.3%。这些数据均说明**华北地区的煤炭消费量过高**。由于华北地区两面被山脉阻隔，空气扩散条件属于半封闭状态，四省二市每年近 13 亿吨的耗煤（约占全世界消费量的 15%）已远远超过了华北地区大气环境可允许的上限。图 44 给出了冀晋鲁豫四省主要类别的煤耗量统计。

京津冀三省市的煤炭消耗量从 2013 年的 3.9 亿吨下降到 2016 年的 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%。这一降低比率低于全国同期（2013 年 42.2 亿吨，2016 年 39.2 亿吨）7.2%的下降比率。山东省的逆势上升是影响四省二市煤炭下降幅度的主要原因。我们建议将京津冀、山东、河南和山西的煤炭消耗量也纳入大华北地区大气污染防治的重点监测指标。

⁴2013 年河北省生铁产量占全国生铁产量的 23.9%，粗钢产量占 23.2%，水泥产量占 5.3%；2015 年河北省生铁产量占全国生铁产量的 25.1%，粗钢产量占 23.4%，水泥产量占 3.9%。



图 42: 冀晋鲁豫四省分行业年度煤炭消费量 (万吨)

七、结论

综合前面对京津冀地区多种污染物浓度变化及能源消耗的分析，我们对京津冀地区 13 个城市过去四年 17 个季度的空气质量状况得到如下结论：

1. 按照六种污染物的浓度水平和季节特征，我们可以对京津冀 13 市进行分区归类，以便实行针对性的污染治理。关于 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} ，京津冀 13 市可以分为三个区：沿太行山脉的保定、石家庄、邢台、邯郸和衡水；环渤海的唐山、天津、沧州外加北京和廊坊（仍称为环渤海）；北部的张家口、承德和秦皇岛。对二氧化硫，在对调北京和秦皇岛后，可以沿用 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的三个分区。针对一氧化碳可分为四个区域，唐山自成一区，其它城市的区属相同于 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 。对二氧化氮只有两个区域，北部张家口和承德为一区，其它 11 市为一区。对于臭氧而言，13 市均属于一个大区。以上分区可以实施相同的大

气污染防治措施和策略，对症下药，提高京津冀大气污染防治的效率。

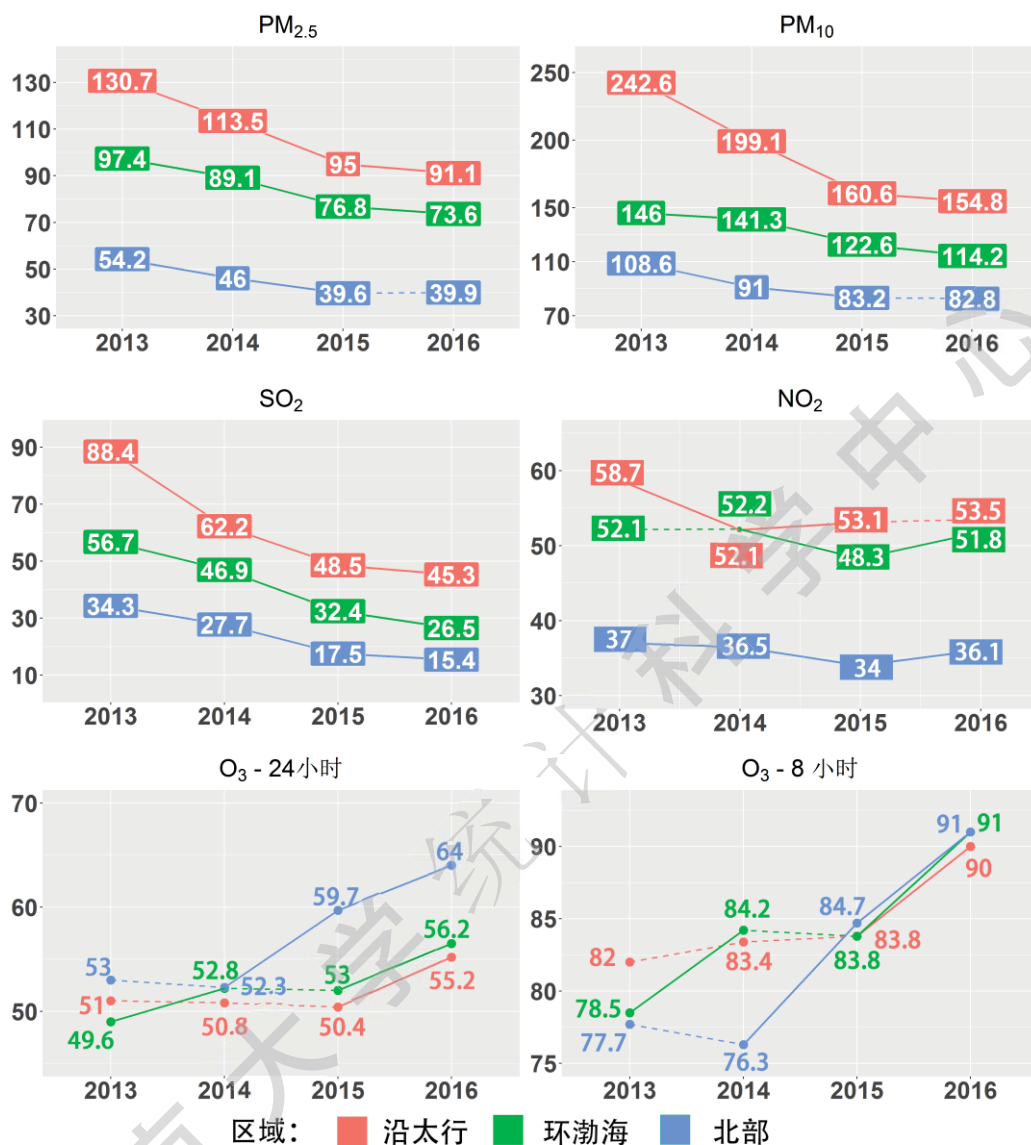


图 43 京津冀三个区域气象调整后五种污染物年平均浓度时间序列（微克/立方）

（虚线表示变化在统计学意义上不显著）

沿太行山脉：保定、石家庄、邢台、邯郸和衡水；**环渤海：**唐山、天津、沧州，北京和廊坊；

北部：张家口、承德和秦皇岛（其中 SO₂ 的分区请参见第四部分（三））

2. 经过四年的治理，京津冀地区 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 污染已经有了明显改善：13 市 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 平均浓度分别从 2013 年的 100.1 微克/立方米和 182.7 微克/立方米下降到 2016 年的 72.5 微克/立方米和 125.7 微克/立方米，降幅达 27% 和 31%。按照 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 污染的三个子区域看，沿太行山脉城市（保定、石家

庄、邢台、邯郸和衡水) $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的四年累计下降比例分别为 30%和 36%，环渤海城市(唐山、天津、沧州，北京和廊坊)为 24%和 22%；北部城市(张家口、承德和秦皇岛)是 26%和 24%。**就整个区域而言，只要 2017 年的颗粒物浓度比 2016 年没有大的反弹，京津冀地区应该可以完成“国十条”所设下降 25%的目标。**

需要强调的是，京津冀 13 市颗粒物污染浓度的改善情况并不均衡。其中北京市 $PM_{2.5}$ 平均浓度从 2013 年的 82.7 微克/立方米下降到 2016 年的 77.2 微克/立方米，降幅仅为 6.7%，距离“国十条”设立的 2017 年 $PM_{2.5}$ 年均值 60 微克/立方米的目標相距还远。尽管 2017 年春季北京 $PM_{2.5}$ 的季平均浓度为 57 微克/立方米，但考虑到 $PM_{2.5}$ 春夏低、秋冬高的季节特征，北京 2017 年达标将面临极大挑战。

京津冀 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染的改善主要出现在 2014 和 2015 年，2016 年 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度降幅明显减缓，部分城市(石家庄，保定，秦皇岛，沧州，北京)不降反升，天津持平。这主要是由于 2016 年秋季污染浓度大幅上升所致。由于我们使用的评估方法已经去除了气象因素波动的影响，这一增加直接反映了污染排放的增加。京津冀煤炭消耗量和钢铁产量数据显示，河北省 2016 年秋季煤炭消耗在经历 3 年下降后首次增加，2016 年河北钢和铁的产量均创出历史新高，这说明经济对污染的影响。

3. 二氧化硫污染改善显著。京津冀各城市自 2013 年起逐渐推行“煤改气”、“煤改电”和燃煤脱硫。得益于此，京津冀二氧化硫的平均水平从 2013 年的 63.6 微克/立方米降至 2016 年的 31.1 微克/立方米，累计降幅达到 51%，天津和张家口甚至超过 60%。北京二氧化硫的浓度一直是京津冀地区最低的，2016 年平均浓度仅为 10.3 微克/立方米。区域性二氧化硫的显著下降是京津冀过去四年大气污染治理的最大亮点，也是区域范围 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 下降的主要推手。

4. 二氧化氮污染情况改善甚微。2013 年到 2016 年，京津冀地区二氧化氮平均浓度从 2013 年的 51.1 微克/立方米下降至 2016 年的 48.8 微克/立方米，四年累计下降降幅仅为 4.5%，远不及 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} ，二氧化硫和一氧化碳。京津冀地区累计改善超过 10%的城市只有四个，三个城市不降反升。三个区域改进也都不明显。由于二氧化氮的传输距离很短，这表明各个城市在控制机动车尾气排放、生物质燃烧等管控方面需要采取更加有效的措施。显著减少二氧化氮浓度无疑是下一步京津冀大气污染防治颗粒物和臭氧污染的关键。

5. 臭氧污染近三年不断加重，须采取有力措施及时遏制臭氧污染增加的趋势。与其它五种污染物的明显减少不同，京津冀地区臭氧污染近三年在不断加重。13 个城市 24 小时臭氧的年平均浓度四年来上升了 6.7 微克/立方米，升幅为 13.3%。其中北部地区浓度水平最高，增加幅度也最快。三个区域全年

8 小时臭氧浓度在 2016 年均超过 90 微克/立方米，其中夏季均超过 125 微克/立方米。京津冀区域 8 小时臭氧平均浓度在 2017 年春季又比 2016 年同期升高了 5.3%，从 106.6 微克/立方米上升到 112.3 微克/立方米。这说明在 PM_{2.5} 相对较低的春夏季，京津冀又开始面临臭氧污染的困局。如何在控制 PM_{2.5} 浓度的同时遏制臭氧的增加，无疑是京津冀大气污染防治的当务之急。我们建议像管控 PM_{2.5} 一样，对京津冀地区乃至全国主要污染区域设定臭氧改善的具体数值目标，以便采取有力措施及时遏制污染趋势、有效降低臭氧浓度。

6. 一氧化碳浓度有所下降，但改善情况不及二氧化硫。近年来京津冀地区煤炭消耗量的减少同样导致京津冀地区一氧化碳的年平均浓度从 2013 年的 1.69 毫克/立方米下降至 2016 年的 1.39 毫克/立方米，累计下降了 16%。其中，沿太行山城市下降 17%，环渤海城市下降 14%，北部城市下降 18%。其降幅要远远小于二氧化硫的降幅，原因在于一氧化碳的排放源不只是燃煤，也包括机动车尾气、冶金工业的排放等。

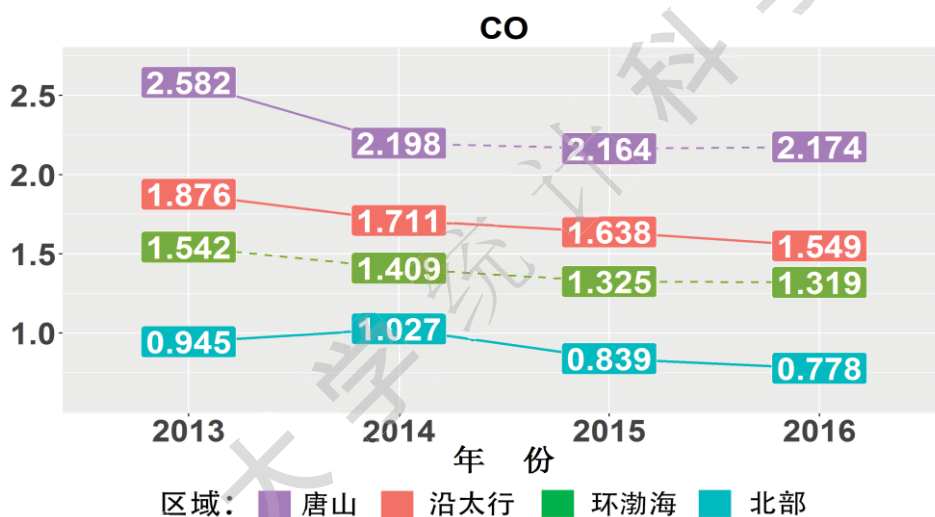


图 44 京津冀四个区域气象调整后一氧化碳年度平均值浓度时间序列 (毫克/立方米)

(虚线表示变化在统计学意义上不显著)

沿太行山脉：保定、石家庄、邢台、邯郸和衡水；环渤海：天津、沧州，秦皇岛，北京和廊坊；

北部：张家口、承德；唐山：独成一区。

7. 2017 年春季五个污染物呈现下降。由于 2017 年是大气“国十条”完成情况的考核年，人们会特别关注 2017 年春季的大气污染情况。我们的计算结果表明，相比 2016 年同期，2017 年春季除了臭氧之外其它五个污染物均呈现可喜的下降。其中 PM_{2.5} 在沿太行山脉，环渤海和北部三个区域分别下降 4%，4.1% 和 5%。但也有 3 个城市的 PM_{2.5} 浓度显著上升，其中张家口上升幅度高达 25%，沧州和石家庄的升幅分别为 9.9% 和 7.8%。对于前三年降幅较大的二氧化硫，2017 年春季进一步改善。沿太行山脉、环

渤海区域和北部三城市分别较去年同期下降了 16.9%，17.7%和 9.2%。一氧化碳的浓度有类似于二氧化硫的降幅，也很明显。相比去年春季，二氧化氮在沿太行山脉区域下降了 9.8%，而环渤海区域有 1.1% 的上升，北部三城市下降了 2.5%。

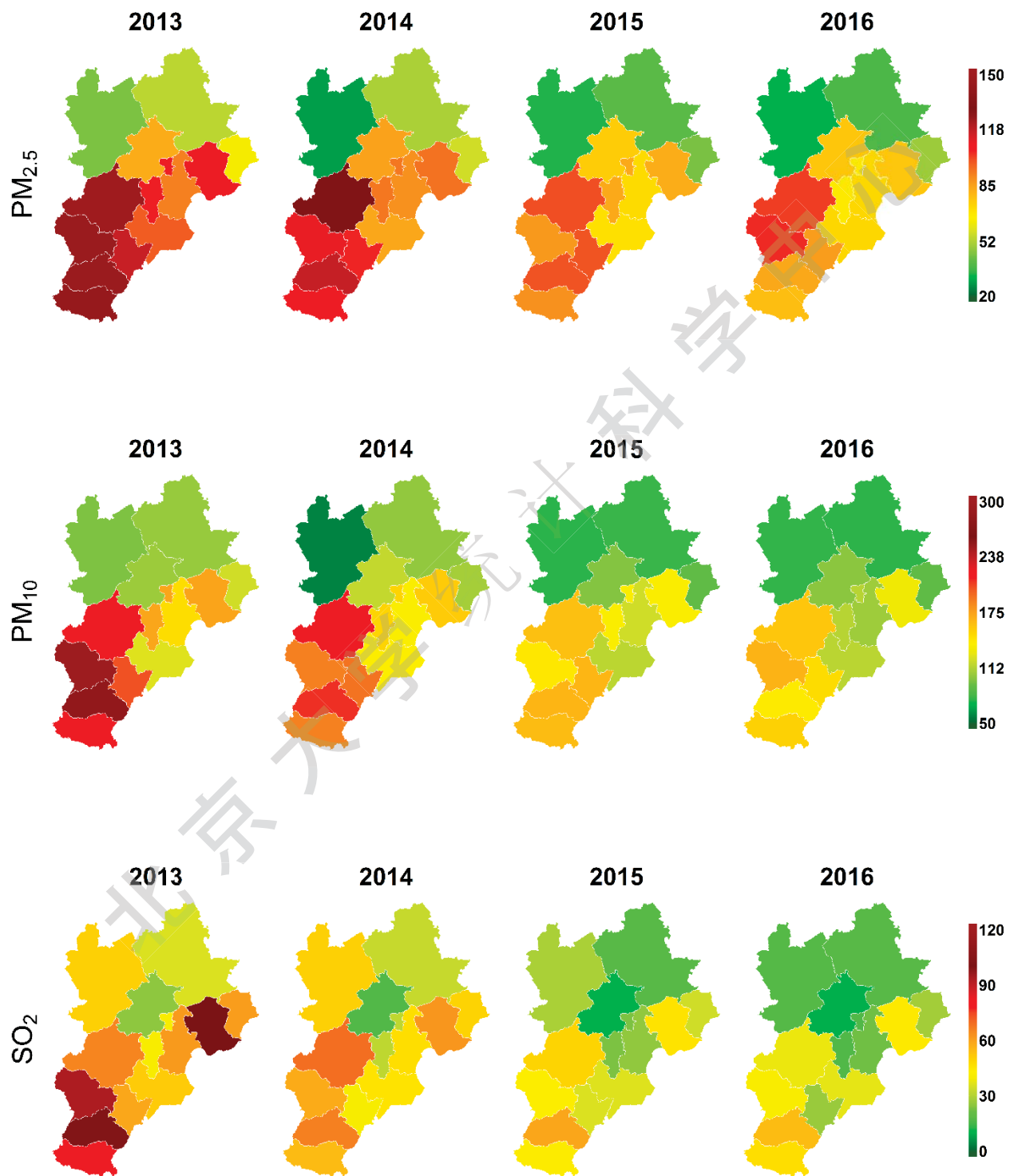
但我们也注意到，2017 年春季五种污染物的下降有一部分是由于“会议蓝”效应所致，包括为了五月份的“一带一路”会议所实行的区域空气质量管控措施。区域管控措施已经反映在 2017 年 3 月和 4 月的经济和能源数据上，河北省的总耗煤量同比下降了 2.73%和 4.16%。“会议蓝”效果的量化已经在我们之前的报告[3]中已有详细讨论。

8. PM_{2.5} 成为北京空气污染“顽疾”，亟需新的机动车减排思路。北京市 PM_{2.5} 平均浓度过去四年仅下降 6.7%，是京津冀 13 市最低的。然而北京过去四年二氧化硫浓度下降超过 40%，浓度水平一直处于京津冀 13 市最低；与此同时，反映北京市机动车排放水平的二氧化氮浓度近四年下降不大。这说明机动车对北京大气污染贡献很大；现有的机动车排放管理措施并不见效。**建议北京市使用经济手段替代行政手段减少道路拥堵和调节车辆的使用量，从而实现二氧化氮浓度的大幅度下降。**这将为北京 PM_{2.5} 下降提供新的途径，同时也能遏制臭氧增加的势头。

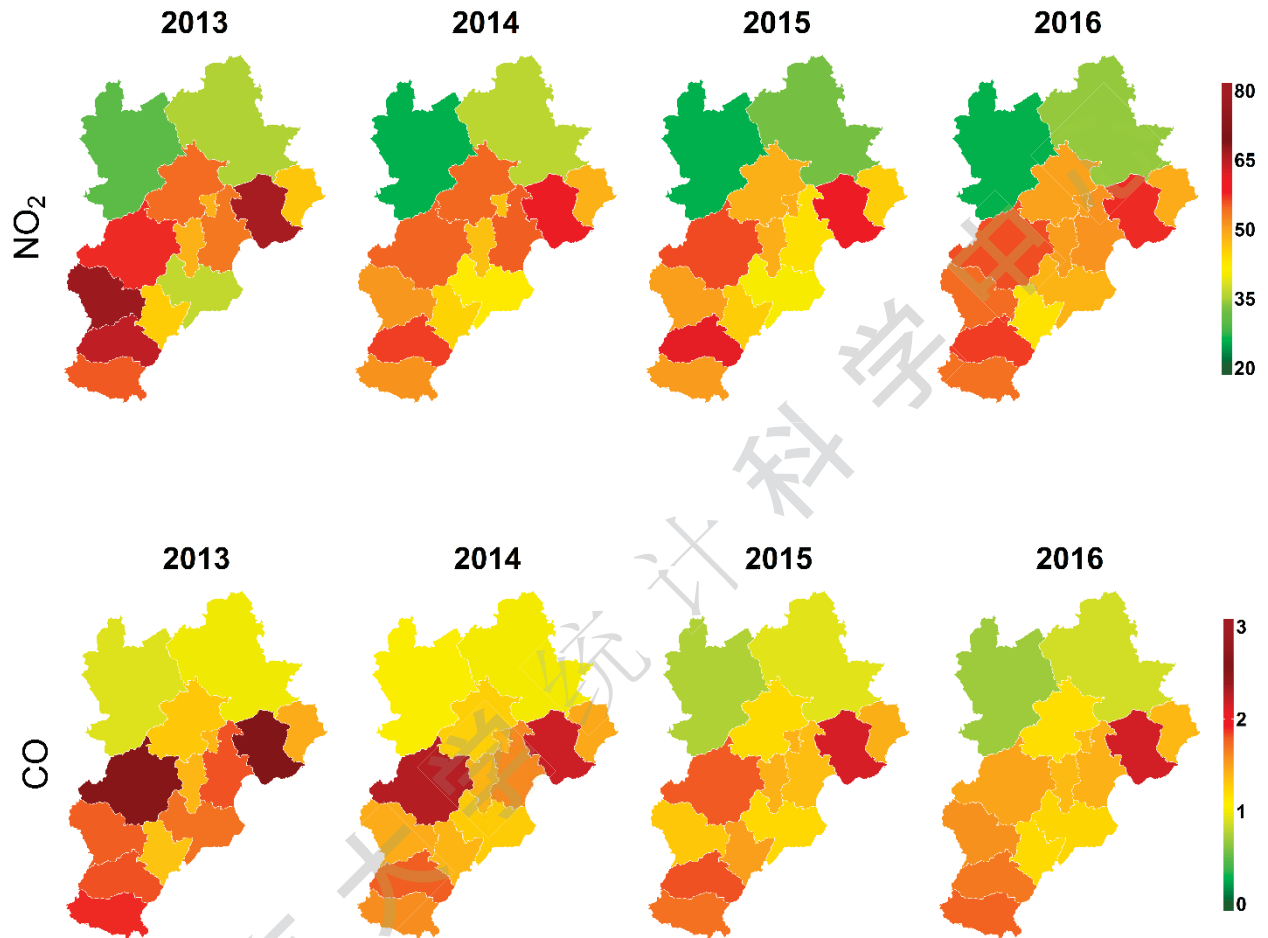
9. 归根结底，大气污染还须从源头预防和治理。得益于京津冀过去四年控制煤炭消耗总量、提高煤炭燃烧效率的措施，排放监管力度的加大和排放标准的提高，PM_{2.5} 和二氧化硫浓度显著下降。然而二氧化氮的下降非常有限，臭氧污染不降反增，这提示了京津冀下一步大气污染防治重点也应放在控制机动车排放和生物质燃烧上；与此同时，秋冬季相对严重的大气污染状况无疑要求进一步减少煤炭消耗。目前，京津冀加上晋鲁豫四省二市每年近 13 亿吨的消耗，远远超过了京津冀这个半封闭区域的大气环境承载上限。**我们建议将山东、山西、河南三省的煤炭消耗减少也列为京津冀大气污染防治的考核、预警指标之一。**

中国在改革开放初期以煤为首要能源，实现了世界上罕见的经济腾飞，创造了巨大的财富。中国在积累了一定的财富之后，为了健康的可持续发展，应该通过经济转型，尽快减少煤在能源中的占比，使煤主要用于发电和其它容易进行排放管控的行业，对不易管控的行业和居民分散消费燃烧，应分阶段全面禁止。中国现在是启动煤退出机制的时候了，这不仅是为了眼下洁净的空气和蓝天，也是为了水、土壤和山川河流。大气环境治理最有效的方法是使用更清洁的能源，从源头减少污染，因为污染一旦产生，清理的代价对社会、对个人都是高昂的。

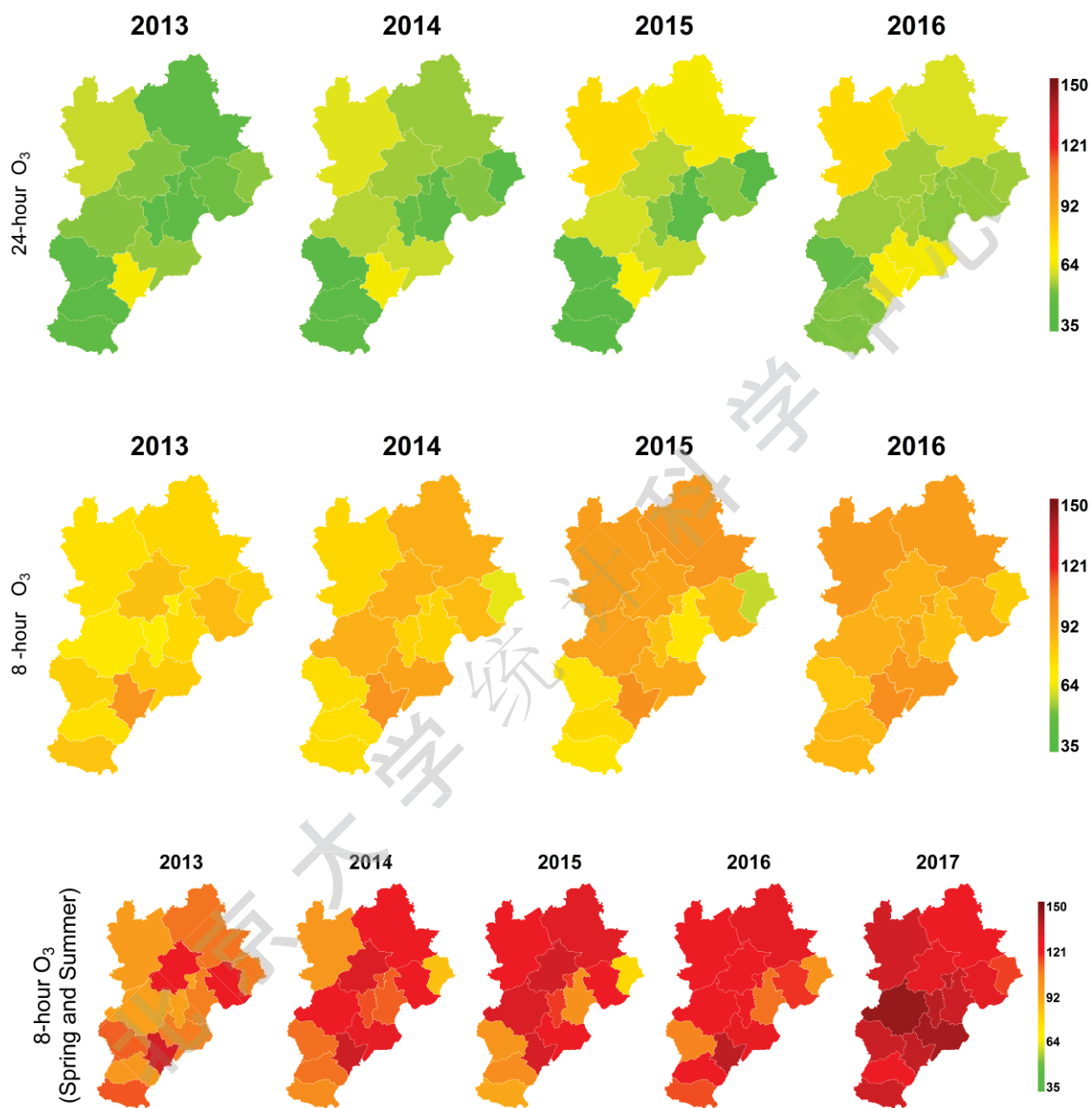
附录



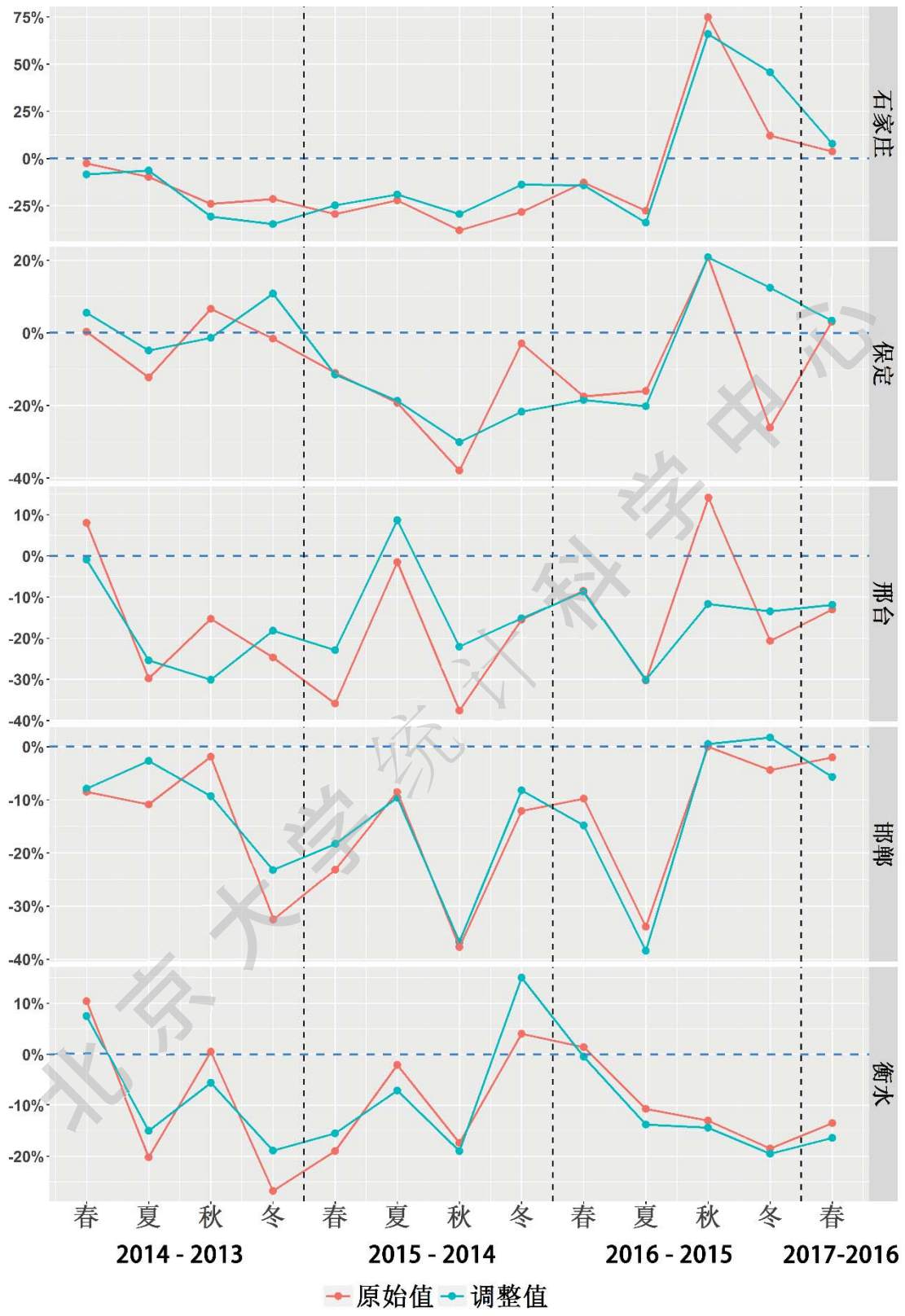
附图 1: 京津冀 13 市 PM_{2.5}、PM₁₀ 和二氧化硫 2013-2016 调整年均值变化图



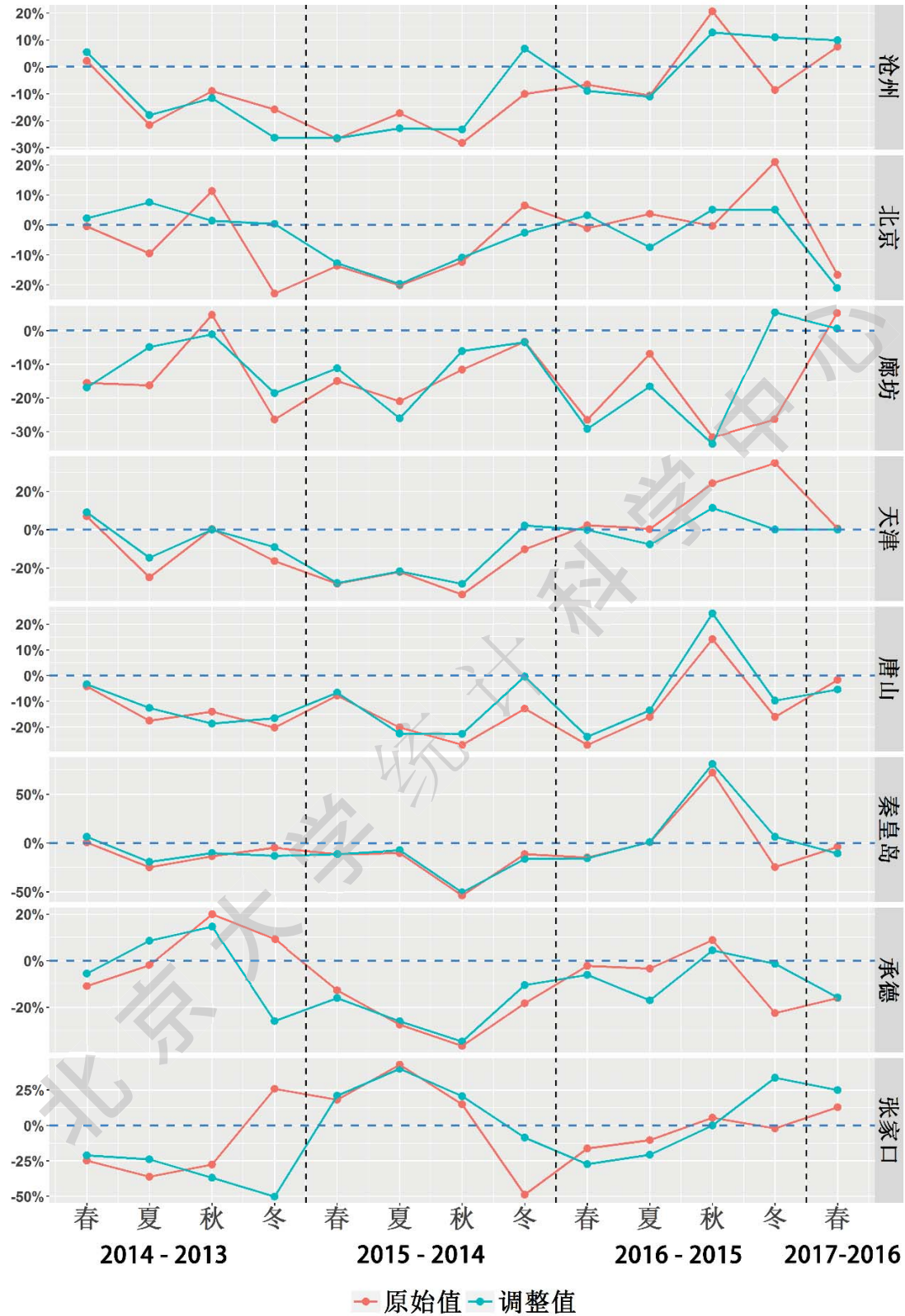
附图 2: 京津冀 13 市二氧化氮和一氧化碳 2013-2016 调整年均值变化图



附图 3: 京津冀 13 市 24 小时臭氧和 8 小时臭氧 2013-2016 调整年均值及 8 小时臭氧 2013-2017 春夏季平均浓度图



附图 4: 沿太行山 5 市 PM_{2.5} 原始季均值与调整季均值同比变化百分比



附图 5：环渤海 5 市和北部 3 市 PM_{2.5} 原始季均值与调整季均值同比变化百分比

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(一): 北京城区 2010-2014 年 PM2.5 污染状况研究, 2015 年 3 月 (http://www.stat-center.pku.edu.cn/Stat/Index/research_show/id/169)
- [2]北京大学统计科学中心环境统计组. 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, 2016 年 3 月。 (http://www.stat-center.pku.edu.cn/Stat/Index/research_show/id/215)
- [3]北京大学统计科学中心环境统计组. 空气质量评估报告(三): 北京 2013-2016 年区域污染状况评估, 2017 年 3 月。
- [4]中国国务院 (2013), 大气污染防治行动计划, 国发 (2013) 37 号。
- [5]世界卫生组织 (2005), 关于颗粒物、臭氧、二氧化氮和二氧化硫的空气质量准则。
- [6]Pope III CA, Burnett RT, Thun MJ, Calle EE, Krewski D, Ito K, Thurston GD. Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortality, and Long-term Exposure to Fine Particulate Air Pollution. *Journal of the American Medical Association*. 2002;287(9):1132-1141.
- [7] Liang, X., Zou, T., Guo, B., Li, S., Zhang, H., Zhang, S., Huang, H., and Chen, S. X. (2015). Assessing Beijing's PM2.5 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>)
- [8] Liang, X., Li, S., Zhang, S., Huang, H., and Chen, S. X. (2016). PM2.5 data reliability, consistency and air quality assessment in five Chinese cities. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121, doi: 10.1002/2016JD024877. (<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2016JD024877/epdf>)
- [9] Zhang, S., Guo, B., Wang, H., Lin, W., and Chen, S. X. (2016, December). Air quality assessment with spatial and temporal adjustment around Beijing. Working Paper, Center for Statistical Science, Peking University.
- [10] Dominici, F., Greenstone, M., and Sunstein, C. R. (2014). Particulate matter matters. *Science*, 344(6181), 257.
- [11] 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.
- [12]中国环境保护部, (2013), 环境空气质量监测点位布设技术规范 (试行) HJ 664-2013 [S].

课题组成员



陈磊，北京大学光华管理学院博士研究生，主要完成人



郭斌，西南财经大学统计学院助理教授，主要完成人



黄家盛，北京大学数学学院博士研究生，主要完成人



张澍一，北京大学光华管理学院博士研究生



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



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、林伟、徐敏亚、涂云东、宋晓军博士，澳洲国立大学邹韬博士，北京大学梁萱、徐子平、董安澜、杨兵、张爽、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。以及王文庆先生在数据库方面提供的协助。北京大学统计科学中心井天景、张卫香、常珂琪的后勤支持与帮助。感谢牟修瑞、庞立春在报告写作过程中提供的中文编辑服务。报告封面设计是张澍一。

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

二零一七年八月