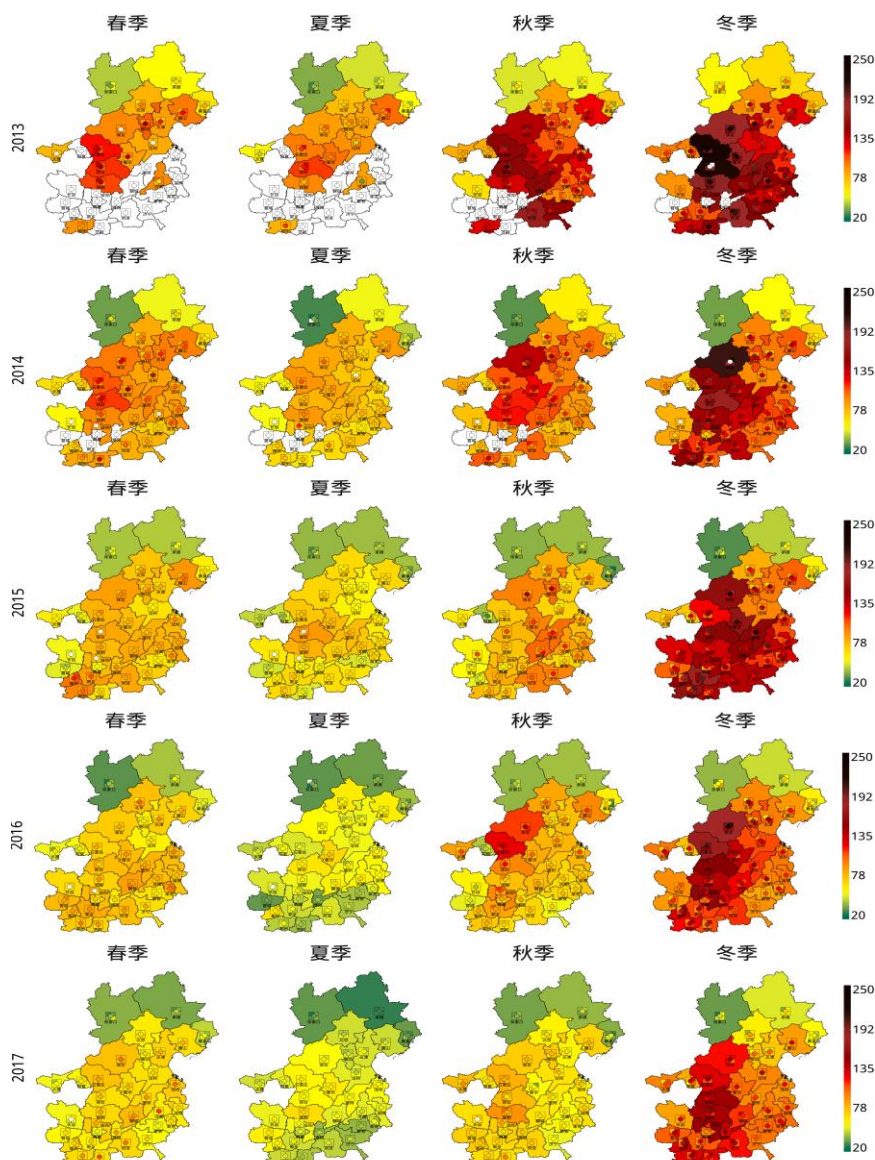


空气质量评估报告（五）

“2+31”城市 2013-2017 年区域污染状况评估

为了重获蓝天

让我们用数据解读污染



北京大学统计科学中心

北京大学光华管理学院

二零一八年四月

前言

本报告是本环境统计团队完成的第五份空气质量评估报告。前四份报告分别发布于 2015 年、2016 年、2017 年的 3 月份和 2017 年的 8 月份。第一份报告[1]分析了北京城区 2010 年至 2014 年基于单站点（美国大使馆）的 $PM_{2.5}$ 污染状况；第二份报告[2]通过研究中国五城市 2013 年至 2015 年美国使领馆和相邻环保部站点的 $PM_{2.5}$ 数据，对比了两个数据源的数据质量和一致性，也度量和分析了这五个城市的 $PM_{2.5}$ 浓度变化趋势；第三份报告[3]集中研究了北京市全部（36 个）空气质量监测站点 2013 年至 2016 年的空气质量变化情况，量化了 APEC 会议、大阅兵和冬季供暖期间所采取的污染管控措施对空气质量的影响，并且研究的污染物从单一 $PM_{2.5}$ 增加到六种常规污染物；第四份报告[4]通过分析京津冀地区 13 个城市 73 个国家控空气质量监测站点 2013 年 3 月至 2017 年 5 月六种常规污染物的数据，总结了京津冀地区空气质量的状况和变化趋势。

2017 年 3 月环保部协同有关部门和省市制定了《京津冀及周边地区 2017 年大气污染防治工作方案》[5]。该方案的实施范围为“京津冀大气污染传输通道”，包括北京、天津，河北省位于华北平原的 8 个地级市，毗邻京津冀的山西省 4 城市、山东省 7 城市、河南省 7 城市，即“2+26”城市。为了综合评估京津冀周边城市的污染状况，我们在此基础上，又保留了去年发布的京津冀报告[4]中的河北省北部 3 个地级市，另外加上同山东省济南接壤的泰安、莱芜 2 市。所以本报告覆盖的是“2+31”城市。

本报告将基于这 33 个城市 172 个国家控空气质量监测站点 2013 年 3 月至 2018 年 2 月污染物监测数据和 43 个气象站点过去七年的气象数据（数据总量超过 1 亿 2000 万条），综合评估“2+31”城市过去五年空气质量实际状态和变化趋势。

本报告的具体目标如下：

- 描述过去五年“2+31”城市六种常规污染物去除气象因素影响后的时间和空间分布特征；
- 分析京津冀及周边晋鲁豫地区每个城市、每个省份和整个地区六种常规污染物的浓度变化趋势，科学计算该区域“国十条”[6]第一阶段目标的实现情况；
- 对“2+31”城市空气质量情况做出整体总结，为京津冀及周边晋鲁豫地区空气治理提出切实可行的建议。

目录

一、背景介绍.....	3
二、采用数据说明.....	5
三、空气质量基本描述.....	7
四、六大常规空气污染物变化趋势	16
五、区域煤炭消耗与工业运行数据分析	62
六、总结与建议.....	67
参考文献.....	76
附录	77
致谢.....	80

北京大學統計科學中心

一、背景介绍

2013年9月，国务院发布《大气污染防治行动计划》[6]（简称“国十条”）。同时期，为贯彻落实“国十条”，加快京津冀及周边地区（包括北京市、天津市、河北省、山西省、内蒙古自治区、山东省）大气污染综合治理，环保部会同其他有关单位，制定了《京津冀及周边地区落实大气污染防治行动计划实施细则》[7]。细则指出，在2012年的基础上，京津冀PM_{2.5}浓度在2017年下降25%，山西省、山东省下降20%，其中北京市年平均浓度控制在60微克/立方米左右。

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，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产能。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，如在不风高湿的静稳天气下，过量的排放极易导致京津冀地区经受持续的极端大气污染。

2017年是“国十条”第一阶段目标的收官之年，为了顺利完成“国十条”制定的目标任务，2017年3月环保部协同有关部门和省市制定了《京津冀及周边地区2017年大气污染防治工作方案》[5]。该方案的实施范围为“京津冀大气污染传输通道”，包括北京，天津，河北省的石家庄、唐山、廊坊、保定、沧州、衡水、邢台、邯郸市；山西省的太原、阳泉、长治、晋城市；山东省的济南、淄博、济宁、德州、聊城、滨州、菏泽市；河南省的郑州、开封、安阳、鹤壁、新乡、焦作、濮阳市；即“2+26”城市。为了综合评估京津冀周边城市的污染状况，我们在“2+26”城市的基础上，考虑保留2017年发布的京津冀报告中已经研究的河北省北部的张家口、承德、秦皇岛市。另外为了使山东省济南和济宁之间没有“空隙”，我们又加上了山东省泰安、莱芜市二个城市，这样总共有“2+31”个城市。

“京津冀大气污染传输通道”中位于山西省的城市有太原、阳泉、长治和晋城市，其地形条件不利于污染物的扩散。太原市位于太原盆地的北端，东有太行山阻隔，西有吕梁山作屏障。阳泉市多河谷及盆地等低凹地形，市区建筑群被煤炭开采所遗留的煤矸石山所圈闭。长治市和晋城市分别地处上党盆地和泽州盆地。在工业特点上，太原市经济增长严重依赖原材料、高耗能、粗加工的重工业行业的发展，大气环境属典型的烟煤型污染特征。阳泉市也多资源型工业企业，煤矸石开采和山城机动车尾气是重要污染源。长治市是以采煤、化工、电力、钢铁、冶炼等行业为主的重工业城市。晋城市以煤炭、电力、煤化工、钢铁等工业为主。在气象特点上，太原，阳泉，

晋城的静风频率高，扩散条件不利，长治市由于其特殊的地理位置，小风、静风频率较低，在水平方向上有一定的扩散强度，但由于长治市地处盆地，容易形成逆温天气，一旦遇到静稳天气，污染物极易累积。

山东 9 城市多位于山东省的西北、西南部，而山东省中部山地突起，西南、西北低洼平坦，不利于污染物的扩散。其中，济宁市是山东省经济发展最快的地区之一，城市化、工业化的迅猛发展使该地区具有典型的煤烟型污染特征。德州市夏季炎热、雨多湿度大，冬季严寒干燥、雨雪少，导致冬季污染物扩散条件较差。菏泽市位于太行山与泰沂山之间南北走向的狭道上，夏秋季空气对流扩散能力相对较强，空气中污染物不易聚集，加之降水对空气污染物有一定的淋洗作用，空气污染物浓度相对较低；冬季风速较小，逆温现象出现几率较大，空气对流扩散差，易造成空气中污染物浓度增高。淄博市位于鲁中山地和华北平原的过渡地带，地形较为复杂；随着淄博城区的扩张，工厂与居民区混杂，再加上地处三面环山的箕状盆地之中，空气流动缓慢，不利于污染空气的扩散；淄博历年最多风向为西南风和南风，而有大型工矿区（南定工业区）恰好处在张店城区的上风向，这令淄博的雾霾境况“雪上加霜”。此外，莱芜市以“工业立市”为经济发展准则，污染排放量也很大。

河南省地势西高东低，北、西、南三面临太行山、伏牛山、桐柏山、大别山，沿省界呈半环形分布。其中，安阳市位于河南省最北部、京津冀经济圈的边缘，近年来，已初步形成了冶金、电子、化工、机械等工业体系，污染物排放量加大，同时受特殊地形和不利气象条件的影响，使得安阳地区空气质量面临严峻问题。焦作市位于河南省的西北部，逆温现象出现频率较高，不利于大气扩散，且焦作地区资源以煤炭为主，还有铝、锌、铜、铁、磷、石英、大理石等 40 余种矿产资源，多种工业以煤炭为主要能源，产生大量烟尘、粉尘以及其他气体排放。郑州市是全国重要的冶金建材工业基地，濮阳市是依托中原油田油气资源勘探开发而发展起来的典型资源型城市。河南省的郑州、开封、鹤壁、新乡 4 市已入围 2017 年中央财政支持北方地区冬季清洁取暖试点城市。

2013 年 1 月 1 日，环保部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（ $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、二氧化氮、二氧化硫、臭氧和一氧化碳）的浓度。为了顺利完成“国十条”制定的 2017 年各项目标任务，2017 年 3 月环保部协同有关部门和省市制定了《京津冀及周边地区 2017 年大气污染防治工作方案》[5]，并制定了本地 2017 年达到空气质量目标的细化新阶段方案。如今，2017 年的考核年刚刚过去，人们普遍关心的问题是“近年来，京津冀及周边地区空气质量是否有所好转，如有好转，改善幅度是多少”，“大气‘国十条’所规定的大气污染防治目标是否实现了”。在本报告中，我们将通过分析上述提到的“1 亿 2 千万”条的大数据集科学地回答这些问题。

二、采用数据说明

本报告所使用的污染物数据来自于环保部所属的国控站，共 172 个监测站点。按照省市口径有：

- 北京市：11 个国控空气质量监测站（不包括定陵背景站）
- 天津市：位于中心城区的 11 个国控空气质量监测站
- 河北省：石家庄及其他 10 个地级市共 52 个国控空气质量监测站
（不包含石家庄封龙山背景站）
- 山西省：4 个城市（太原、阳泉、长治、晋城）共 25 个国控空气质量监测站
（不包含太原上兰、晋城白马寺背景站）
- 山东省：9 个城市（济南、淄博、济宁、德州、聊城、滨州、菏泽、泰安、莱芜）共 39 个国控空气质量监测站
- 河南省：7 个城市（郑州、开封、安阳、鹤壁、新乡、焦作、濮阳）共 34 个国控空气质量监测站（不包含郑州岗李水库、安阳棉研所、焦作影视城背景站）

由于 2013 年 1 月和 2 月京津冀及周边晋鲁豫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 2018 年 2 月。其中，山西、山东和河南省有些城市的污染物在 2013 年 3 月份并未开始监测，因此这些城市从开始监测的时刻算起，比如山东省除了济南外的八个城市的污染物从 2013 年 9 月份开始监测。即使如此，我们发现这些城市在开始监测时所处的季度，污染数据缺失比例仍然较高。**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。**这同我们之前发布的第三和第四份报告一致。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)。

由于气象条件对观测到的空气质量浓度的影响很大，本报告沿用前四个报告的统计学方法，对污染物浓度进行气象调整，从而剔除气象因素对空气质量的影响。具体来说，我们基于 2011 年 3 月到 2018 年 2 月累计七年的小时气象数据，对京津冀及周边晋鲁豫地区 33 个城市分别构造基准气象条件。我们之所以用了 7 年的气象数据（比污染数据多 2 年），是想构造更稳定的基准气象条件。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、山西、山东和河南省 31 个地级市的气象数据来源于对应城市的气象站点，共 31 个；北京市的气象数据来源于朝阳、海淀、丰台、昌平、顺义、怀柔、石景山、门头沟和南郊观象台共 9 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。

图 1 给出了这 172 个污染物监测站点加 7 个背景站（红色圆点）和 43 个气象站点（蓝色三角形）的位置。总体可以看出，污染物监测站点与气象站点地理位置比较相近，匹配度高。从图 1 中我们也可以看到目前的国控空气质量监测站点过于集中在城市中心，分散度不高。

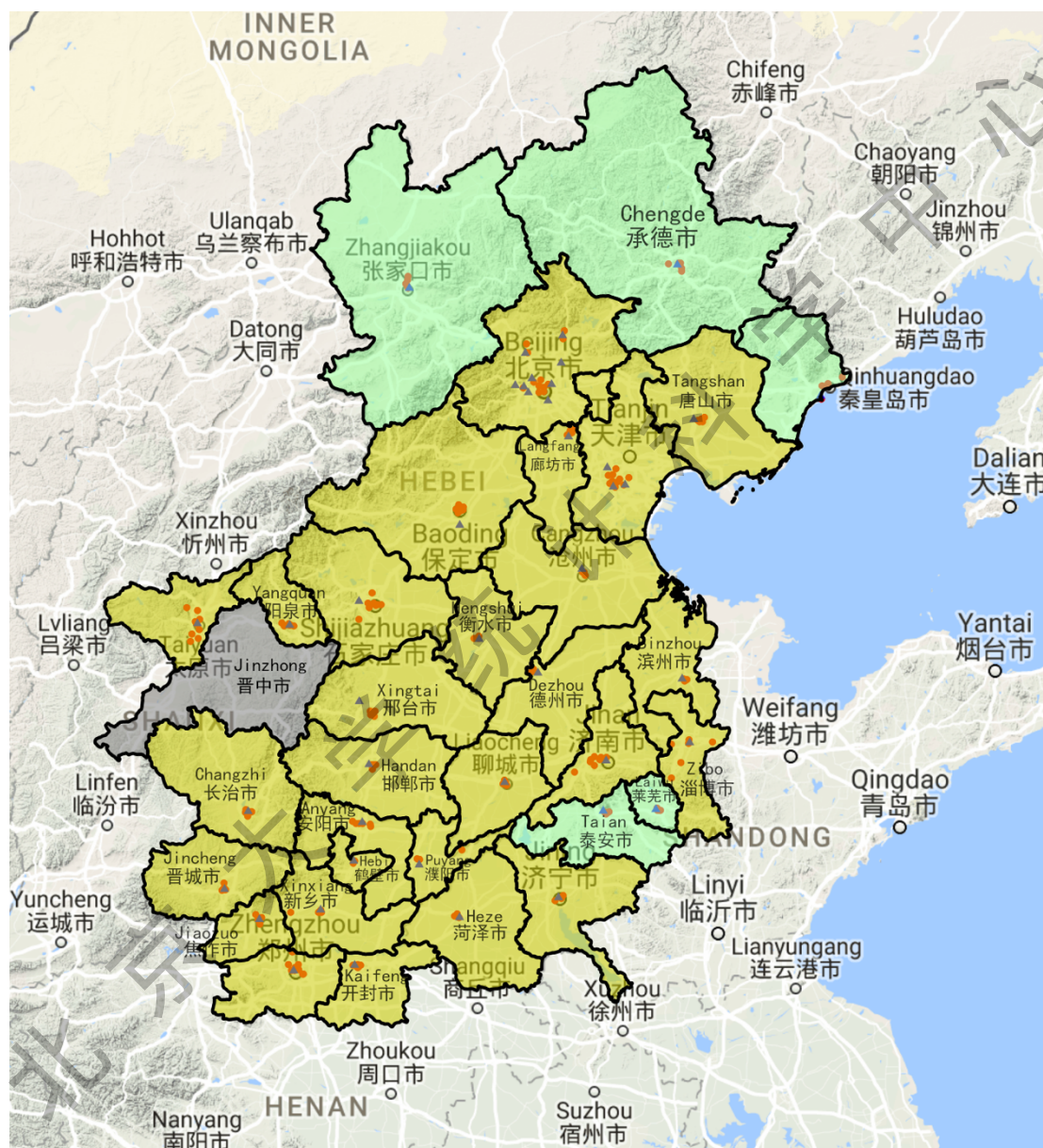


图 1：京津冀及周边晋鲁豫 33 个城市区划及其站点分布（●代表空气质量监测站点，▲代表气象站点）
 （图中黄色区域为“2+26”城市范围，绿色区域为本报告加上的 5 个城市，灰色区域的晋中市是我们建议加上的 1 个城市）

三、空气质量基本描述

首先，我们用每个城市的 $PM_{2.5}$ 小时浓度数据来初步描述“2+31”城市空气质量的基本状况。这一研究并没有去除气象的混杂影响，除去气象因素的污染评估见下一节。

我们延续之前报告的设定，将空气质量按照 $PM_{2.5}$ 浓度划分成六个等级，其中括号内为中国目前使用的空气质量等级划分：

- “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）在 2005 年所建议的空气质量准则中给出的“过渡时期”的初级指标[8]。通过图 2 至图 6，我们发现，按照这个标准，“2+31”城市中很多城市已经有超过 50%的时间达到“优良空气”标准。除此之外，根据“国十条”给北京市设定的 2017 年目标（60 微克/立方米），以及考虑到近几年我国空气质量的改善情况，我们认为以 75 微克/立方米作为二十四小时“优良空气”的上界已过于宽松，应对该标准进行调整。我们建议使用 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。这也为下一步的大气污染防治提供新的目标和动能。

本报告使用 35 微克/立方米作为空气质量“优良”的上界。这一标准是有流行病学依据的。因为研究发现，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[9]。

为了获得一个城市的空气质量状况，目前普遍的分析方法是对该城市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，计算各个城市六种空气质量等级在每个季节所占比例。用这种方法，我们可以绘制成图 2 至图 6 的时间占比图。

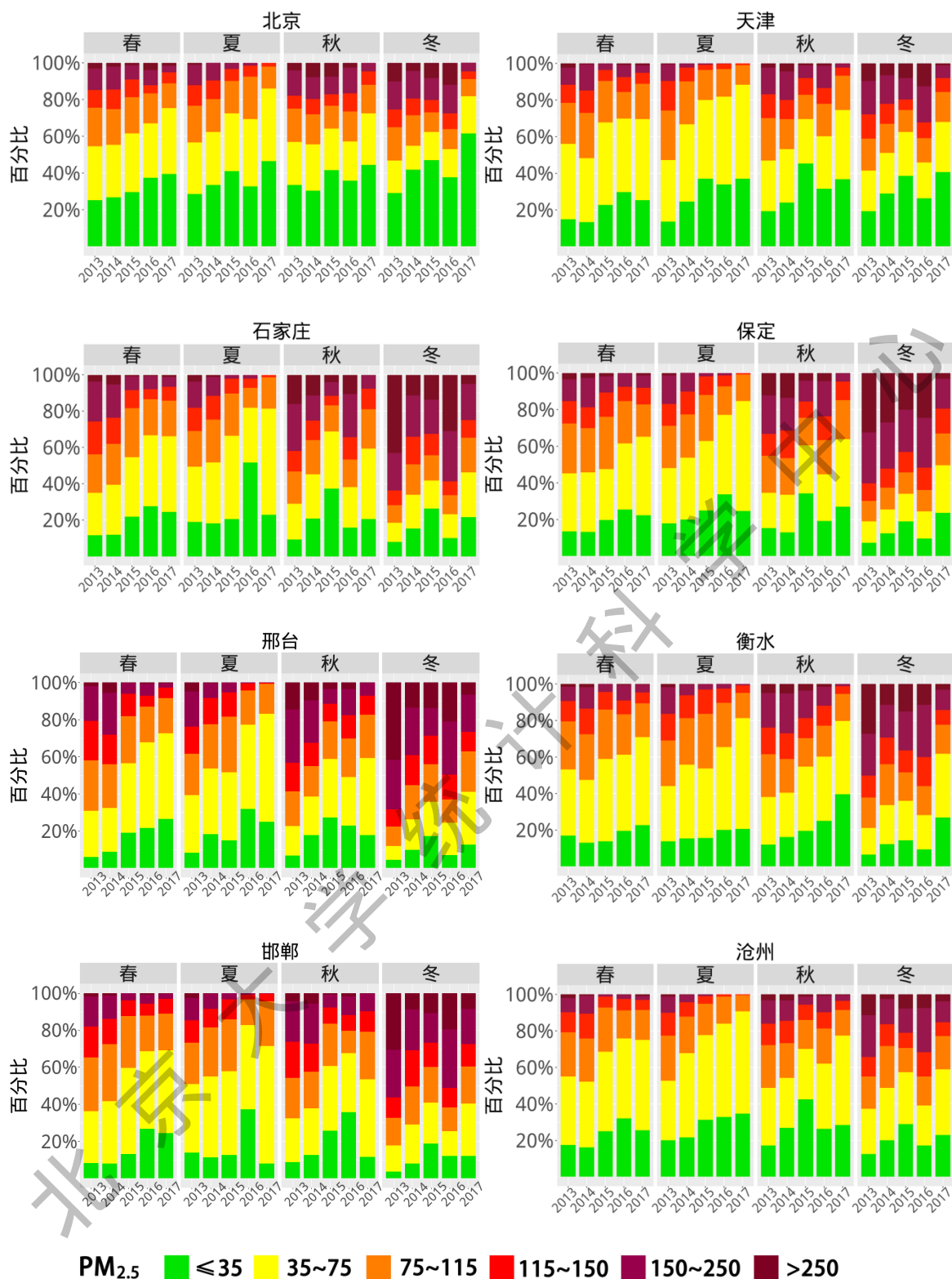


图 2：北京、天津市和河北省 6 市 2013 年至 2017 年空气质量六个状态时间占比图

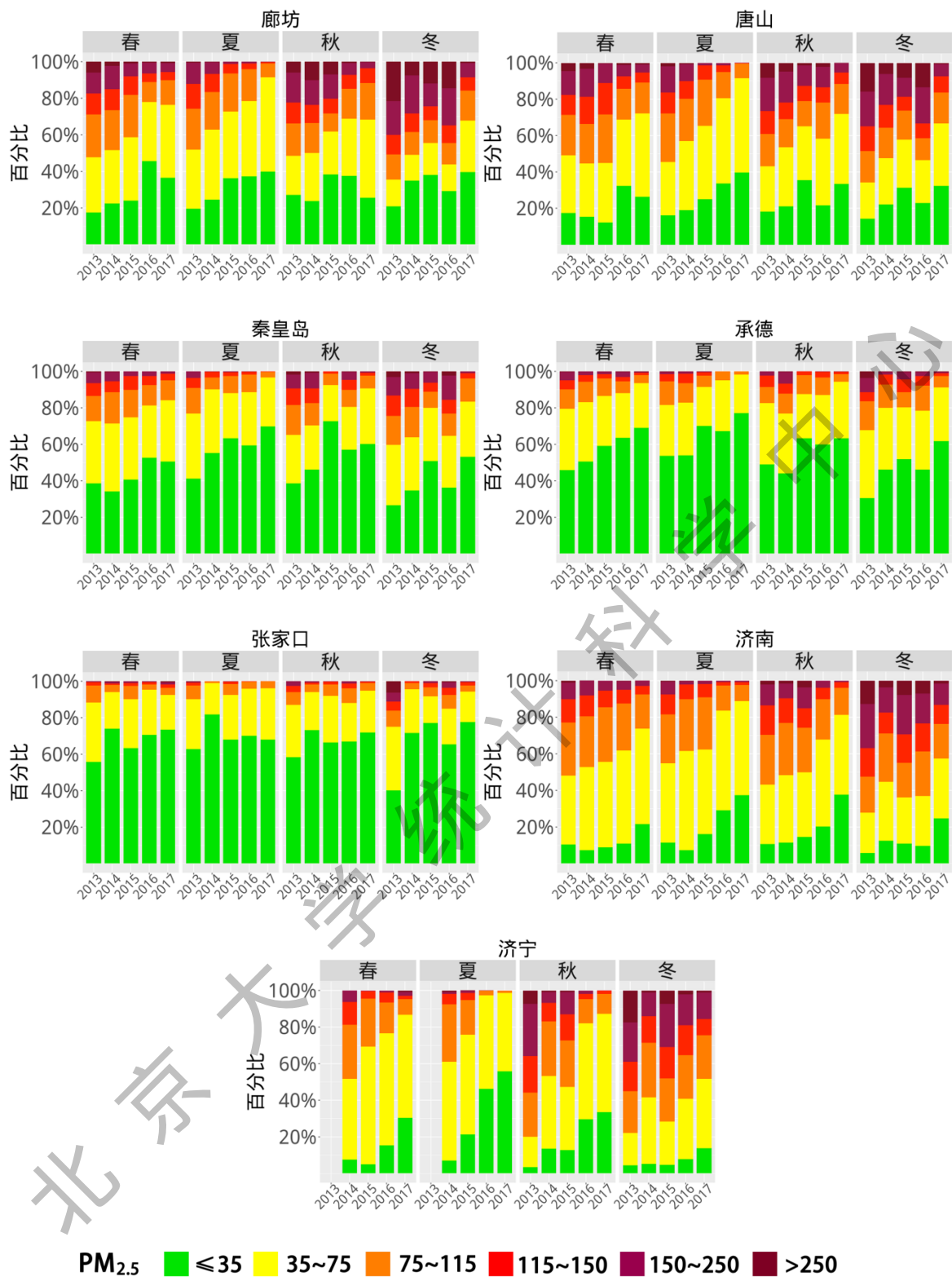


图 3：河北省 5 市和山东省 2 市 2013 年至 2017 年空气质量六个状态时间占比图

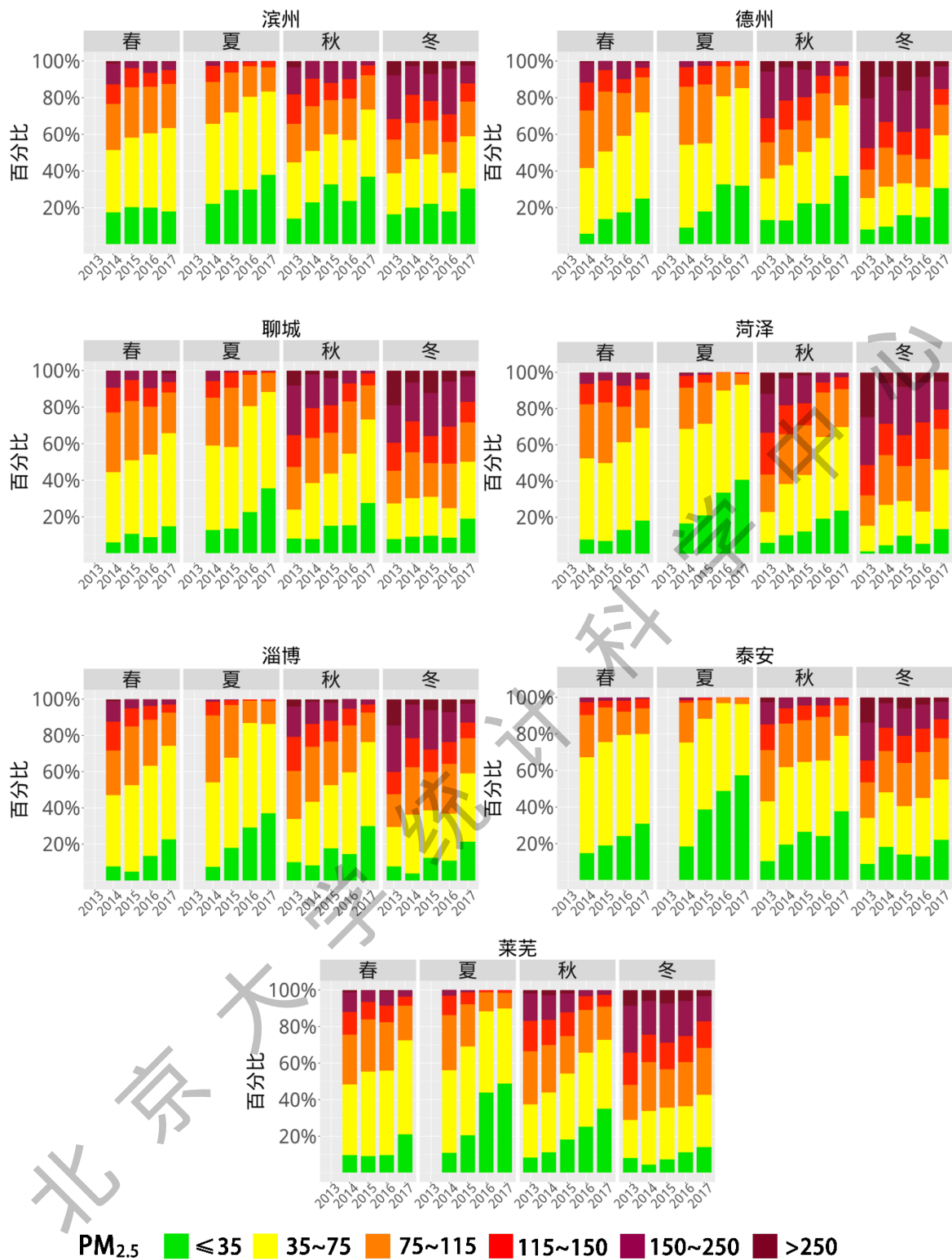


图4: 山东省7市2013年至2017年空气质量六个状态时间占比图

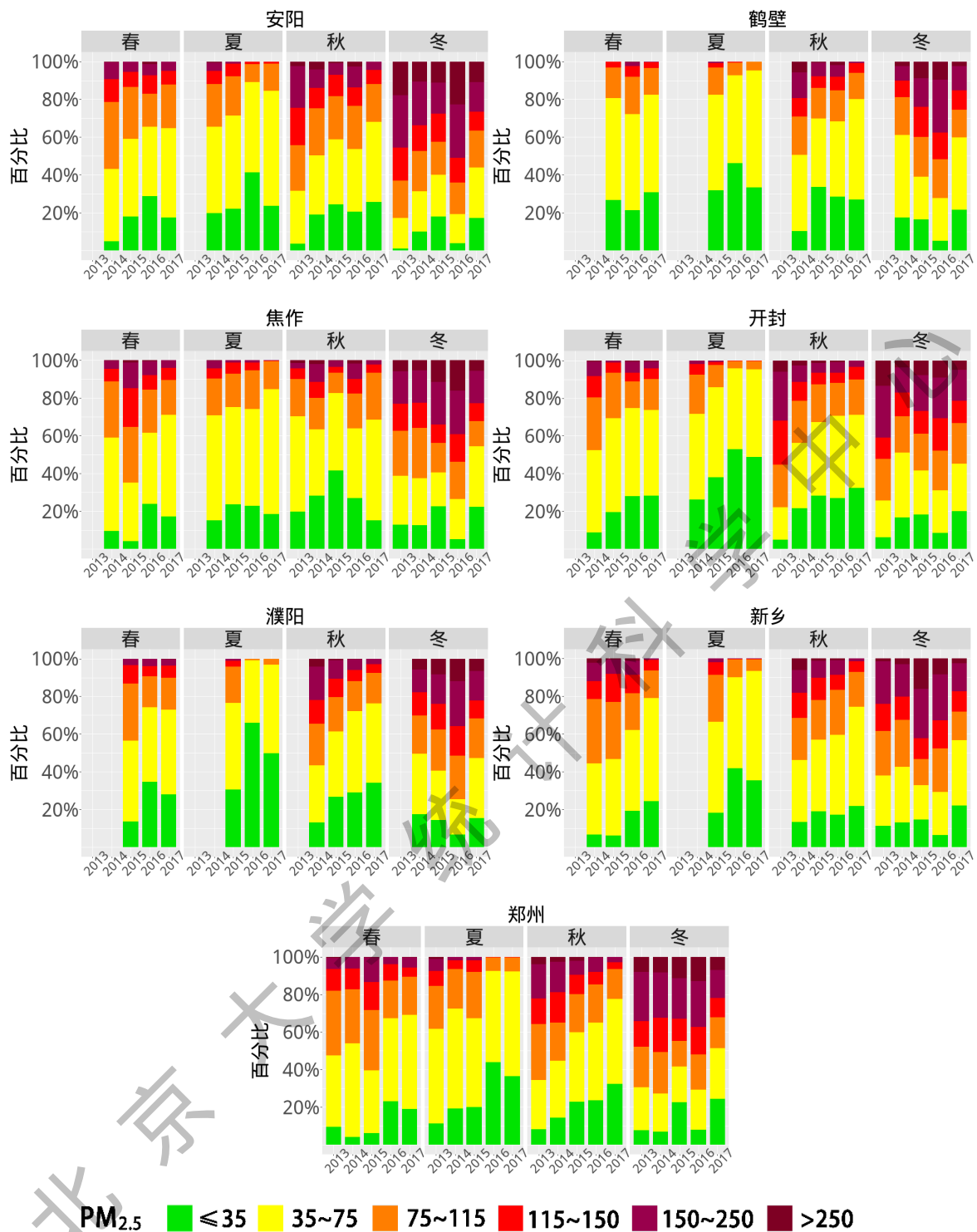


图 5: 河南省 7 市 2013 年至 2017 年空气质量六个状态时间占比图

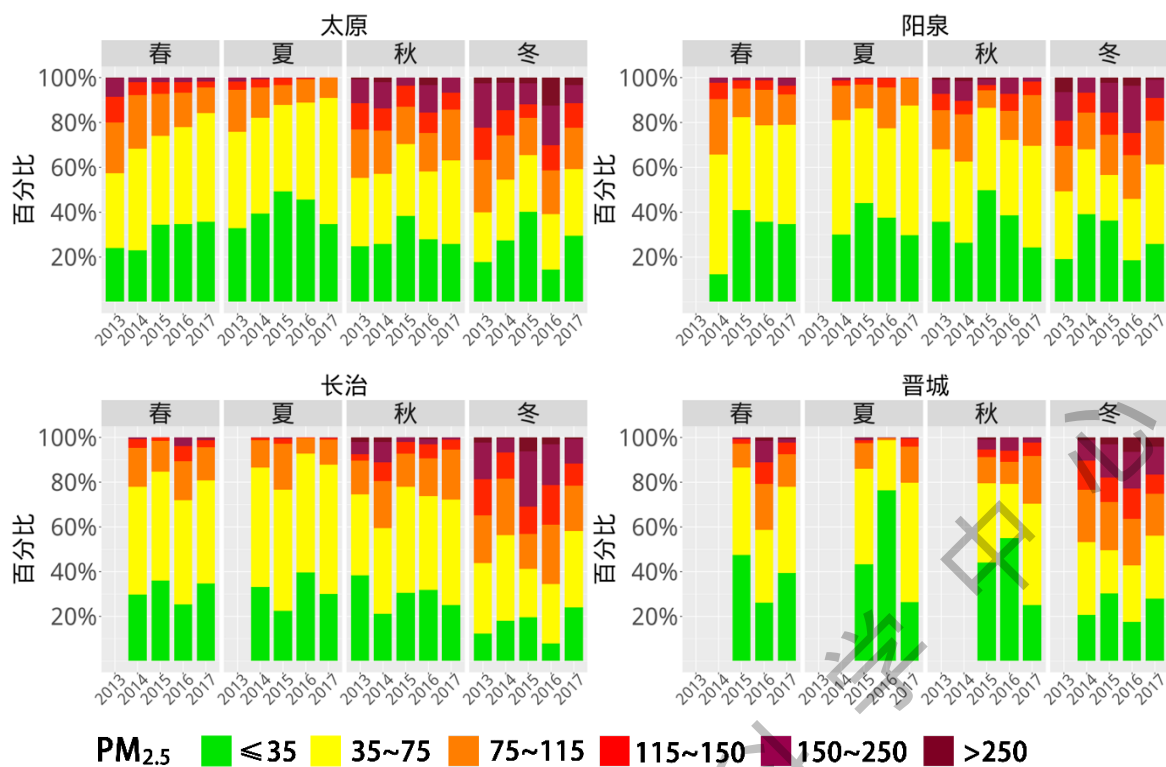


图6：山西省4市2013年至2017年空气质量六个状态时间占比图

从图2至图6中，我们可以直观地看到“2+31”城市空气质量的一些特征：

1. 区域特征

京津冀及周边晋鲁豫地区PM_{2.5}浓度呈现出较为明显的分区现象。河北北部三城市（张家口、承德和秦皇岛）空气质量明显好于其它城市。对于“优良空气”（PM_{2.5}≤35微克/立方米）占比，河北沿太行山五城市（石家庄、保定、邢台、邯郸和衡水）和山东整体最低，环渤海五城市（沧州、廊坊、唐山、北京和天津）、河南和山西次之，河北北部三城市占比最高。对于冬季的重污染（PM_{2.5}>150微克/立方米）占比，河北沿太行山五城市最高，在2013年能达到60%，环渤海五城市、山东和河南次之，达到40%，山西在20%左右。对于山东省我们增加的泰安和莱芜市，空气质量并没有明显优于山东省其他的7个城市，而是与其他7个城市的空气质量情况基本相同。

2. 季节特征明显

不同季节具有明显不同的空气质量等级占比，尤其体现在重污染状态的比例上。冬季的重污染状态最多，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，冬季重污染比例在2013年可以超过60%，而2017年冬季下降明显。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，其中河南省春季和秋季的差异与其他省份相比要小。

3. 年际变化

2013 年至 2014 年持续改善，2015 或 2016 年秋冬季有恶化迹象，2017 年改善明显。从 2013 年至 2014 年，京津冀及周边晋鲁豫地区 33 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。在 2015 和 2016 年秋冬季节，部分城市空气质量有所恶化。其中京津冀 13 个城市、山西太原、河南安阳和郑州在 2016 年出现恶化，其余城市在 2015 年空气恶化。而除了山西阳泉和河北张家口在 2017 年重污染比例较 2016 年略有增加外，其余城市的重污染比例在 2017 年均有减少。

表 1 和表 2 分别统计了 2015 至 2017 年度各城市空气质量处于重度及以上污染状态（ $PM_{2.5}$ 浓度高于 150 微克/立方米）、污染状态（ $PM_{2.5}$ 浓度高于 35 微克/立方米）的时间占比。通过对表 1 和表 2 的分析，我们可以直观地感受到“2+31”城市空气污染形势的严峻和近年来的改善。

2015 年至 2017 年重度及以上污染状态（ $PM_{2.5} > 150$ 微克/立方米）占比排名前五的城市均以沿太行山脉的河北城市为主，而污染状态（ $PM_{2.5} > 35$ 微克/立方米）占比前四名则由 2015 年和 2016 年的山东省的城市转移到以沿太行山脉的河北、河南城市。空气质量最好的三个城市承德、张家口、秦皇岛均在河北省北部。由此可见，地理因素和每个城市的排放水平对空气质量有很大的影响。

虽然图 2 至图 6、表 1 及表 2 所展示的六种空气质量时间占比在一定程度上可以反映“2+31”城市空气污染状况，但是仅靠该单一衡量指标并不能全面刻画 $PM_{2.5}$ 在各个季度下的污染水平和浓度分布情况。一方面，时间占比统计并不能完全客观地反映空气污染的严重程度。比如，山东德州在 2014 年冬季和 2016 年冬季的严重污染状态占比都是 9%，但是分析这两组数据的严重污染（ $PM_{2.5} > 250$ 微克/立方米）的分布，我们发现 2016 年冬季有更多的时间浓度高于 325 微克/立方米，而 2014 年冬季则更多地分布在 250-325 微克/立方米之间。显然，2016 年冬季的严重污染程度高于 2014 年冬季，但是时间占比统计并不能反映出这一差异。另一方面，时间占比统计受某年气象因素的影响很大。不同年的气象条件不尽相同，使得比较不能公平。我们发现表 1 和表 2 中的城市排名与经过气象调整得到的图 13 和 15 的城市排名有相当出入。这意味着，我们需要依靠更精确的统计指标来反映某个城市去除气象影响后的污染水平，为空气污染状态的评估提供更加科学的依据，这也是我们在之后几节要做的。

表 1：“2+31”城市 2015 至 2017 年(季节年)重度及以上污染状态(PM_{2.5}>150 微克/立方米)时间所占百分比

排名	重度及以上污染状态占比		
	2015 年	2016 年	2017 年
1	河北·保定 17.7%	河北·石家庄 25.6%	河北·邯郸 10.2%
2	山东·德州 16.4%	河北·保定 20.9%	河北·石家庄 9.7%
3	河北·衡水 15.6%	河北·邢台 18.4%	河北·邢台 9.1%
4	河南·新乡 15.6%	河南·安阳 17.9%	河南·安阳 9.0%
5	山东·聊城 15.2%	河北·邯郸 17.2%	河北·保定 8.1%
6	河南·郑州 14.5%	河北·衡水 15.7%	河南·郑州 7.6%
7	山东·菏泽 14.4%	河南·焦作 14.4%	河南·开封 7.2%
8	河北·石家庄 13.6%	北京·北京 14.4%	河南·焦作 7.1%
9	河南·焦作 13.4%	河北·唐山 13.9%	河南·濮阳 7.1%
10	河北·廊坊 13.4%	山东·德州 13.7%	山东·菏泽 6.8%
11	山东·济南 12.9%	天津·天津 13.2%	山东·聊城 6.2%
12	河北·邢台 12.8%	河南·新乡 12.4%	山东·莱芜 5.8%
13	北京·北京 12.5%	河南·郑州 12.2%	河北·沧州 5.4%
14	山东·莱芜 12.2%	河北·廊坊 12.2%	山东·德州 5.4%
15	山东·淄博 11.4%	山东·聊城 11.9%	山西·晋城 5.4%
16	山东·济宁 11.3%	山西·太原 11.9%	河北·衡水 5.3%
17	河北·唐山 10.9%	山东·滨州 11.4%	山西·长治 4.9%
18	河北·邯郸 10.4%	河南·鹤壁 11.3%	山东·滨州 4.8%
19	河南·安阳 10.3%	河南·濮阳 11.3%	河南·新乡 4.8%
20	河南·濮阳 9.7%	河北·沧州 10.9%	山东·淄博 4.7%
21	山东·滨州 9.6%	河南·开封 10.8%	河北·唐山 4.6%
22	河南·开封 8.8%	山东·菏泽 10.1%	山东·济宁 4.6%
23	山西·太原 8.3%	山西·阳泉 10.0%	河北·廊坊 4.4%
24	河南·鹤壁 8.1%	山东·莱芜 9.2%	山东·济南 4.4%
25	天津·天津 7.9%	山西·晋城 8.3%	河南·鹤壁 4.1%
26	河北·沧州 7.1%	山东·济南 8.3%	天津·天津 3.9%
27	山东·泰安 6.8%	山东·淄博 8.1%	北京·北京 3.7%
28	山西·长治 6.2%	山西·长治 7.0%	山西·太原 3.6%
29	山西·阳泉 5.1%	山东·泰安 5.8%	山西·阳泉 3.5%
30	山西·晋城 4.4%	河北·秦皇岛 5.7%	山东·泰安 3.3%
31	河北·承德 2.3%	山东·济宁 5.5%	河北·张家口 0.8%
32	河北·秦皇岛 1.6%	河北·承德 1.4%	河北·秦皇岛 0.7%
33	河北·张家口 0.6%	河北·张家口 1.4%	河北·承德 0.4%

表 2: “2+31”城市 2015 至 2017 年(季节年)污染状态(PM_{2.5}>35 微克/立方米)时间所占百分比

排名	污染状态占比		
	2015 年	2016 年	2017 年
1	山东·济宁 89.0%	山东·聊城 86.1%	河北·邯郸 86.0%
2	山东·聊城 87.7%	山东·淄博 82.9%	河南·焦作 81.6%
3	山东·菏泽 87.6%	山东·济南 82.5%	河北·邢台 79.5%
4	山东·济南 87.4%	山东·菏泽 82.1%	河南·安阳 78.9%
5	山东·淄博 86.8%	河北·衡水 81.4%	河北·石家庄 77.6%
6	山东·莱芜 86.1%	河南·焦作 80.2%	山东·菏泽 75.9%
7	河南·新乡 85.4%	河北·邢台 79.1%	山东·聊城 75.7%
8	河北·衡水 84.1%	河南·新乡 78.7%	河北·保定 75.5%
9	河北·邯郸 82.5%	山东·德州 78.2%	河南·新乡 74.0%
10	山东·德州 82.5%	河北·保定 77.8%	河北·衡水 72.5%
11	河南·郑州 82.0%	山东·莱芜 77.4%	山东·淄博 72.2%
12	河北·邢台 80.4%	山东·滨州 77.0%	河北·沧州 72.1%
13	河南·安阳 79.4%	河南·安阳 76.3%	河南·郑州 71.9%
14	河南·濮阳 78.7%	河南·郑州 75.2%	河南·鹤壁 71.7%
15	河南·焦作 77.0%	山东·济宁 75.1%	山西·阳泉 71.5%
16	河北·保定 75.5%	河南·鹤壁 74.6%	山西·太原 71.3%
17	山东·泰安 75.4%	山西·长治 73.7%	山西·晋城 70.2%
18	河北·唐山 74.1%	河北·石家庄 73.6%	山东·莱芜 70.1%
19	河南·开封 74.0%	河北·沧州 72.8%	山东·济南 69.6%
20	山东·滨州 73.8%	河北·唐山 72.3%	山东·滨州 69.1%
21	河北·石家庄 73.5%	山东·泰安 72.3%	山东·德州 68.8%
22	山西·太原 72.8%	河北·邯郸 72.0%	山西·长治 68.5%
23	河南·鹤壁 72.8%	河南·开封 70.8%	河南·濮阳 68.0%
24	河北·沧州 68.1%	天津·天津 69.6%	河南·开封 67.6%
25	河北·廊坊 65.8%	山西·太原 69.2%	河北·唐山 67.1%
26	天津·天津 64.0%	山西·晋城 67.3%	山东·济宁 66.5%
27	北京·北京 60.2%	河南·濮阳 65.8%	天津·天津 65.0%
28	山西·晋城 59.4%	北京·北京 64.1%	河北·廊坊 64.5%
29	山西·长治 58.7%	河北·廊坊 62.5%	山东·泰安 62.8%
30	山西·阳泉 57.3%	山西·阳泉 56.2%	北京·北京 52.1%
31	河北·承德 43.2%	河北·秦皇岛 48.5%	河北·张家口 41.5%
32	河北·秦皇岛 38.8%	河北·张家口 40.7%	河北·承德 32.1%
33	河北·张家口 31.3%	河北·承德 31.7%	河北·秦皇岛 27.2%

四、六大常规空气污染物变化趋势

为了客观和公平地评价空气质量情况，需要剔除气象因素对空气质量数据的影响。本报告沿用前四个空气质量报告所使用的统计学气象调整方法。我们也对该方法进行了一些调整，主要是提高了气象因素在不同年的可比程度，该改进将在之后单独表述。计算京津冀及周边晋鲁豫地区各个城市在可比气象条件下各污染物的平均值浓度（反映一个城市空气质量的平均水平），并对其进行比较和分析（具体方法见[9], [10], [11]）。

为什么要做气象调整？讲个故事。1960年代，关于吸烟是否对人体健康有影响是一个热议的问题。有三个国家（加拿大、英国、美国）的研究各选了一组抽烟袋、一组抽卷烟的烟民和一组不吸烟的被试者进行对照实验，看哪组人群的死亡率高。通过跟踪两组人群若干年后，计算出每个组的死亡率，结果发现三个国家的抽烟袋组的死亡率远远高于抽烟卷组和不吸烟者，另外吸卷烟者同不吸烟者的死亡率相差不多，有时吸卷烟者的死亡率甚至低于不吸烟者。也就得到结论：抽烟袋更有害，抽烟卷无害。但是统计学家 Willian Cochran 在[14]中对该数据的进一步分析发现烟袋组的年龄高于卷烟组，烟卷组年龄又低于不抽烟组。这里吸烟引起的死亡和由于年龄老化的自然死亡混杂在一起了，死亡率高的部分原因是由于年龄造成的，为了去除年龄老化引起的混杂影响，Cochran 在每个年龄段上对比三组人群的死亡率，最后得到相反的结论。这个故事告诉我们，当我们研究吸烟对健康的影响时，要控制年龄的因素。同理，在我们研究大气污染的年际变化时也要去除气象因素的影响。

附图 1 至附图 3 给出了“2+31”城市分别基于原始数据和经过气象调整方法计算的 $PM_{2.5}$ 季节浓度年度变化比率图。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计算的变化率差异较大。关于气象调整的统计学原理，感兴趣的读者可以参看[9], [10], [11]。

（一） $PM_{2.5}$

$PM_{2.5}$ 是指悬浮在空气中空气动力学当量直径小于或等于 2.5 微米的颗粒物，又称细颗粒物。直径为 0.5-5 微米的粒子可以直接到达肺部或进入肺泡内，并可能进入血液通往全身。长期以来，大量流行病学研究发现：颗粒物浓度和发病率及死亡率的增加有明显联系，尤其是细粒子与心肺疾病的相关性更为明显。一次颗粒物是天然污染源和人为污染源直接排放的颗粒物；二次颗粒物是大气中某些污染气体（如二氧化硫，氮氧化物，碳氢化合物等）之间，或这些气体与大气中的常规组分（如氧气）之间通过化学/光化学反应形成的颗粒物。我国目前的 $PM_{2.5}$ 平均浓度标准如下表：

表 3：我国目前 PM_{2.5} 平均浓度标准

污染物项目	平均时间	浓度限值		单位
		一级	二级	
PM _{2.5}	年平均	15	35	微克/立方米
	24 小时平均	35	75	

本节将给出“2+31”城市从 2013 年 3 月到 2018 年 2 月经过气象调整得到的以季度为单位的 PM_{2.5} 季度均值浓度，并以此来分析京津冀及周边晋鲁豫地区 PM_{2.5} 的变化情况。

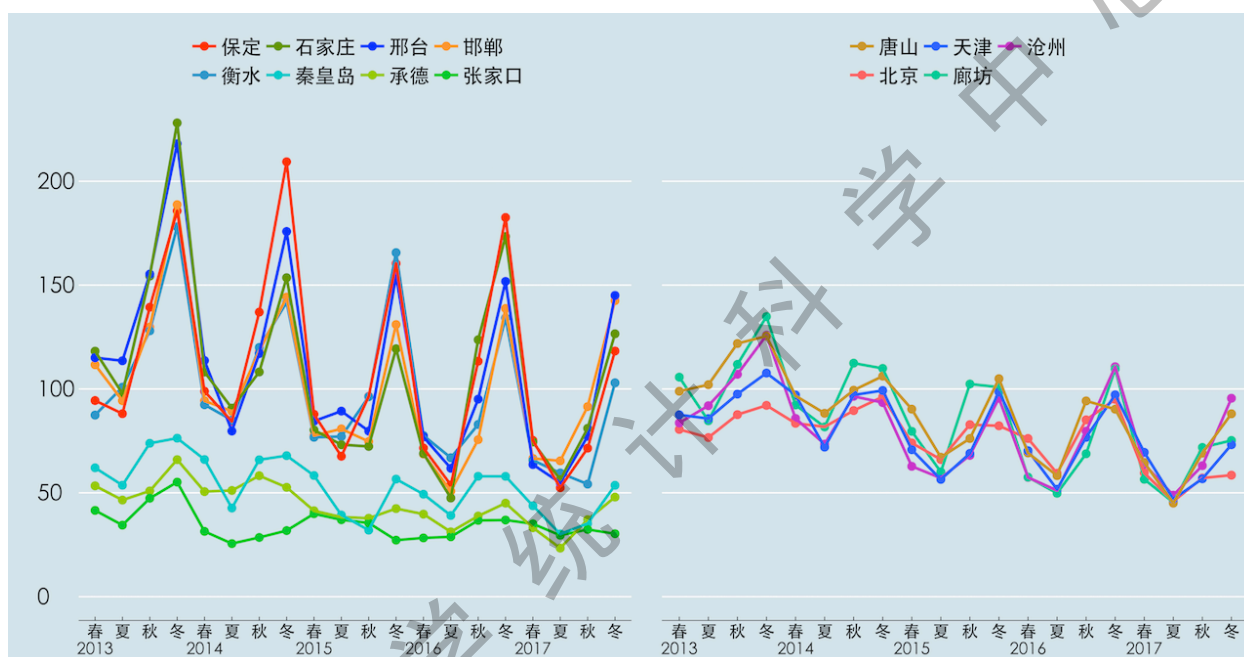


图 7：京津冀 13 市气象调整后 2013 年至 2017 年 PM_{2.5} 季节平均值浓度(微克/立方米)时间序列图

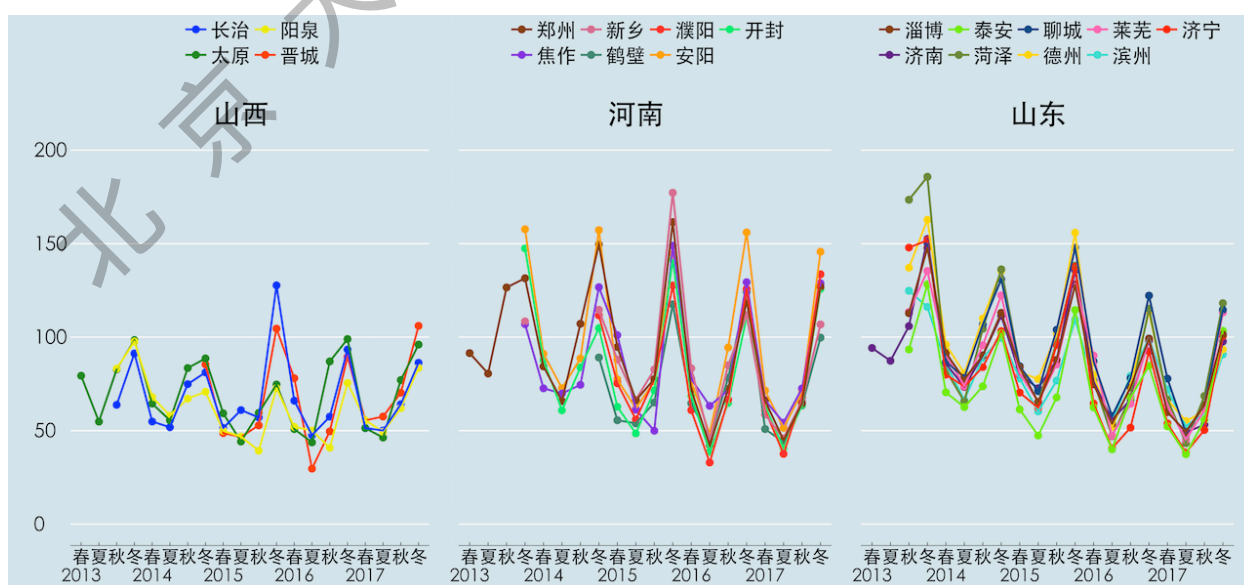


图 8：京津冀周边晋鲁豫 20 市气象调整后 2013 年至 2017 年 PM_{2.5} 季节平均值浓度(微克/立方米)时间序列图

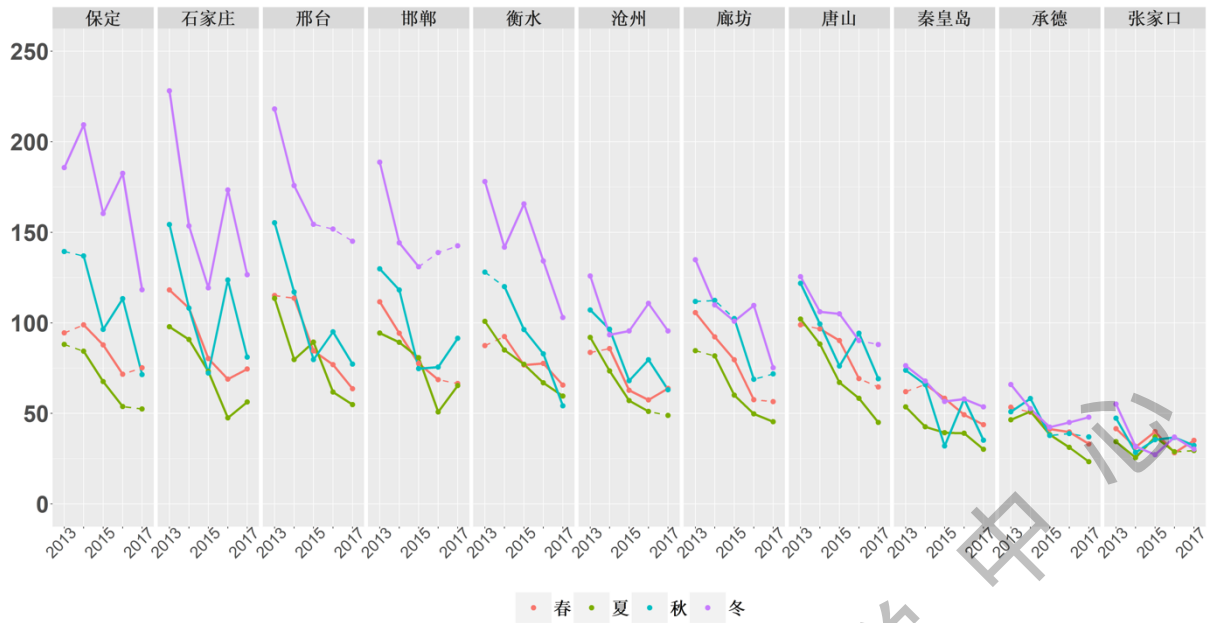


图9：河北省11市气象调整后2013年至2017年PM_{2.5}季节平均浓度(微克/立方米)的变化序列图
(实线(虚线)代表在5%统计学显著水平比上年有(无)显著增加或减少)

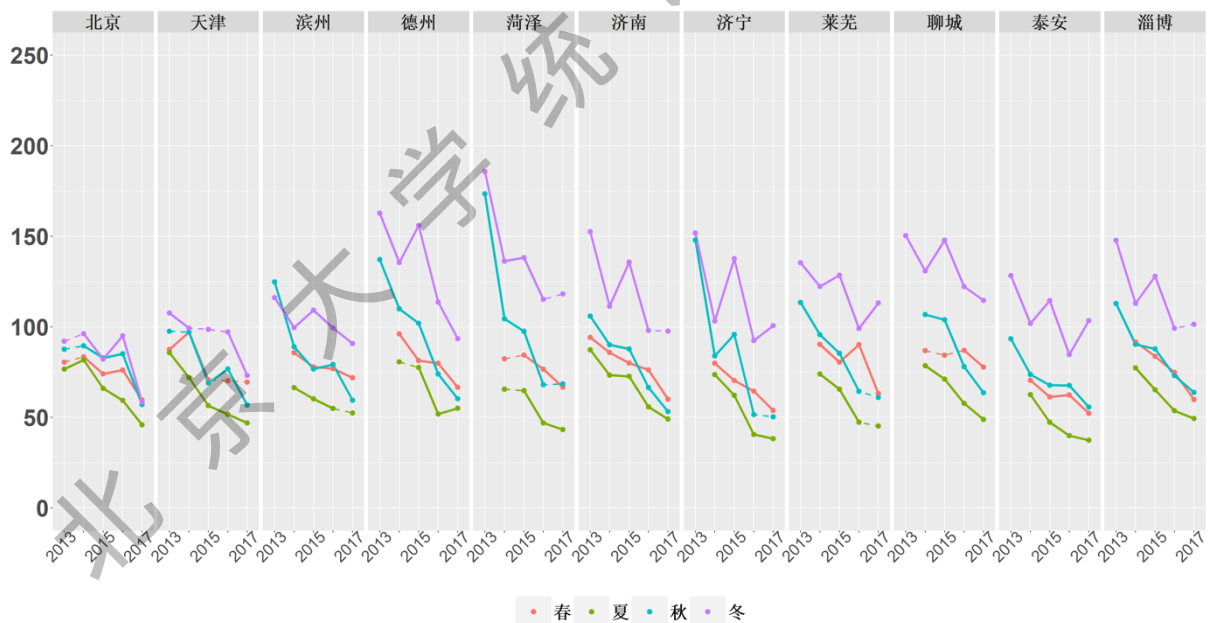


图10：北京、天津和山东省9市气象调整后2013年至2017年PM_{2.5}季节平均浓度(微克/立方米)的变化序列图
(实线(虚线)代表在5%统计学显著水平比上年有(无)显著增加或减少)



图 11：山西省 4 市和河南省 7 市气象调整后 2013 年至 2017 年 $PM_{2.5}$ 季节平均浓度(微克/立方米)的变化序列图
(实线(虚线)代表在 5% 统计学显著水平比上年有(无)显著增加或减少)

图 7 和图 8 分别展示了“2+31”城市过去 20 个季节(2013 年春季至 2017 年冬季)经气象调整的 $PM_{2.5}$ 均值浓度随时间变化的情况，图 9 至图 11 展示了这 33 个城市调整均值在每个给定季节的时间序列。从图 7 至图 11，我们可以总结出过去五年 $PM_{2.5}$ 浓度如下几个特征：

33 城 $PM_{2.5}$ 浓度具有明显的季节和区域特征。太行山东侧从保定向南到河南北部和山东西部为 $PM_{2.5}$ 高浓度区域，尤其在污染最严重的秋冬两季。这一高浓度区域的 $PM_{2.5}$ 水平在过去四年呈下降趋势，其中河北省的下降主要发生在 2015 和 2017 年，而河南北部和山东西部发生在 2016 年和 2017 年。山西省过去四年的 $PM_{2.5}$ 改善甚微。

• 区域特征

从图 7 京津冀 13 市 $PM_{2.5}$ 浓度水平和图 9、10 的季节变化趋势，我们可以清晰地京津冀 13 市划分为三个区域，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。

从图 8、10 和 11，晋鲁豫 20 市可以按照省份分为三个区域，每个区域具有其独特的特征，其中山东和河南污染水平相近，山西 4 城市的浓度水平低于山东和河南。在 2013 年至 2017 年冬季，山东 9 城市的空气质量在 2013 年至 2014 年改善，2015 年恶化，2016 年又改善。但 2017 年 4 个城市(滨州、德州、济南和聊城)改善、5 个城市恶化；同样比较近五年的

冬季，河南 7 城市除开封和安阳外，各城市在 2013 年至 2015 年 $PM_{2.5}$ 浓度不断升高；并且除了鹤壁市外，其他城市 2016 年浓度均有降低；在 2017 年，除开封、濮阳和郑州外，其余 4 城市浓度降低。

- **季节效应**

“2+31”城市中，除承德、张家口外，其余 31 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**，然而**河南省 7 城市春季和秋季的差异并不明显**。以上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 1.5 到 4 倍。如石家庄 2016 年冬季的浓度（173.4 微克/立方米）是夏季（47.5 微克/立方米）的 3.65 倍。对于 $PM_{2.5}$ 浓度最低的夏季，除山西省 4 城市外，其余 29 个城市近五年浓度明显下降。而山西省 4 城市的夏季 $PM_{2.5}$ 浓度水平维持在一个较低水平，即在 50 微克/立方米附近波动。

- **五种风向下的平均污染浓度：不同城市有利减轻污染的风向不同**

本报告首次计算了五个主要风向下的污染物气象调整浓度，这可以让我们窥视各城市的污染输入和输出方向。图 12 中 2013 年和 2014 年晋鲁豫三省有一些城市有“空白区”，这是由于小时数据缺失超过 50%造成的。通过图 12（需要放大看 pdf 版），发现静风条件下 $PM_{2.5}$ 由于不易扩散，在各个季节静风下的浓度都显著高于其它风向。对于北京和张家口、承德、唐山、廊坊这些河北北部城市来说，西北风普遍最有利于 $PM_{2.5}$ 的扩散，东南风普遍较为不利。对于东部沿海城市来说，天津东部临海，东北风普遍较好，西北风在冬季最有利于 $PM_{2.5}$ 的扩散；秦皇岛东南临海，东北风、东南风较西风更有利于 $PM_{2.5}$ 的扩散；沧州、滨州东北临海，东北风普遍最有利于 $PM_{2.5}$ 的减少。

对于山东西部、河北东部城市来说，有利风向随季节变动较大，其中衡水、德州、聊城、淄博春夏季节西风普遍较好，而秋冬季节东北风、东南风更好；莱芜春夏季节西南风普遍较好，而秋冬季节东北风最有利于 $PM_{2.5}$ 的扩散；泰安北风普遍较南风更为有利；济南、济宁西南风普遍更有利于 $PM_{2.5}$ 的扩散。

对处于沿太行山东侧的城市来说，保定春夏季节北风更好，而秋冬季节南风更有利于 $PM_{2.5}$ 的扩散；石家庄、邢台、邯郸、安阳、鹤壁、新乡，西南风、东南风普遍较北风更有利于 $PM_{2.5}$ 的扩散。对于太行山西侧城市来说，太原、长治、晋城，西南风、西北风普遍较为有利，东北风普遍不利于 $PM_{2.5}$ 的减少。

对于太行山以南的河南东南部城市，濮阳冬春季节西南风更好，而夏秋季节东北风更有利于 $PM_{2.5}$ 的扩散；焦作西南风普遍最有利于 $PM_{2.5}$ 的扩散；菏泽、开封、郑州，西南风、东南风普遍较北风更有利于 $PM_{2.5}$ 的扩散。

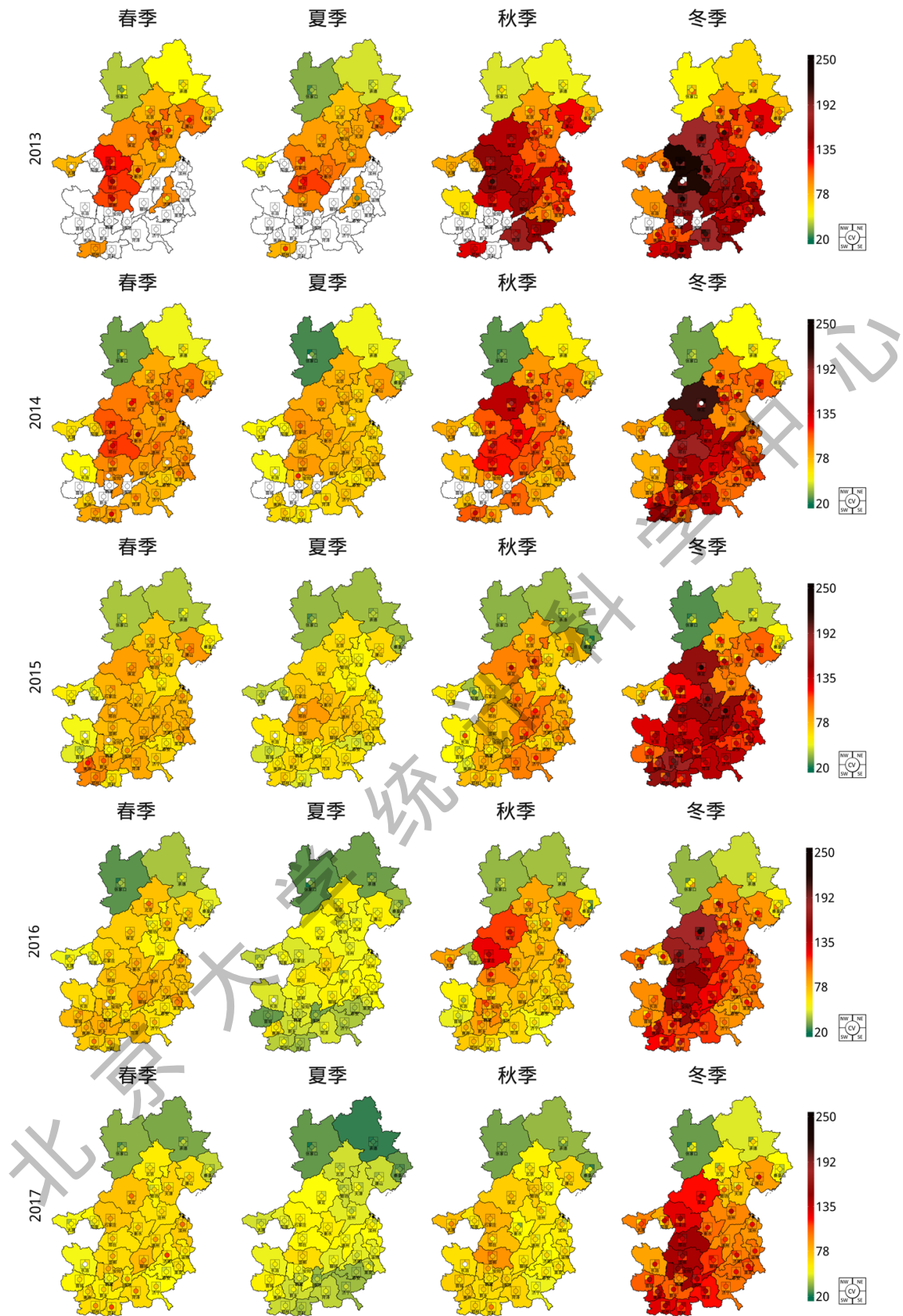


图 12: 京津冀及周边晋鲁豫地区 33 市 2013 年到 2017 年气象调整后 PM_{2.5} 季节平均浓度 (微克/立方米) 地图

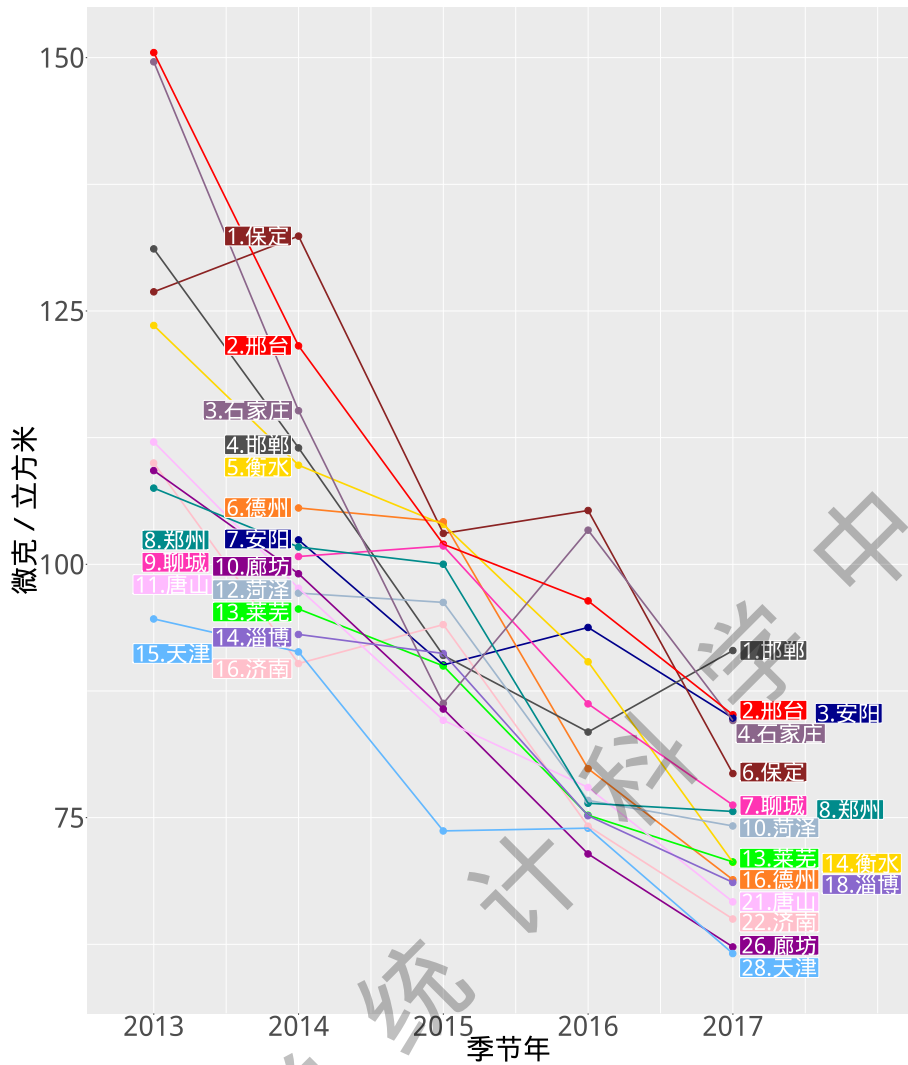


图 13: 京津冀及周边晋鲁豫地区 33 市前 16 名城市气象调整后 $PM_{2.5}$ 季节年平均浓度(微克/立方米)年际变化图
(2014、2017 季节年的排名均以当年浓度为基准)

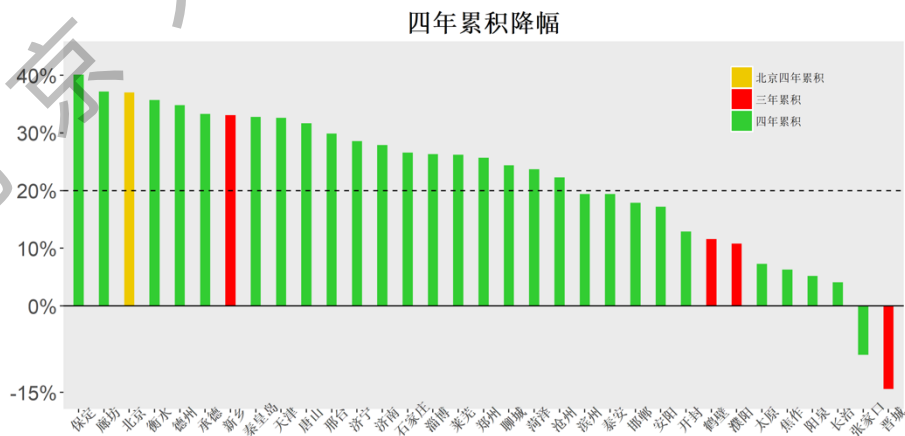


图 14: 京津冀及周边晋鲁豫地区 33 市气象调整后季节年 $PM_{2.5}$ 四年(绿色)或三年(红色)累积降幅图
(用红色柱表示的新乡、鹤壁、濮阳和晋城因 2014 年部分季度数据缺失而计算的三年累积降幅)

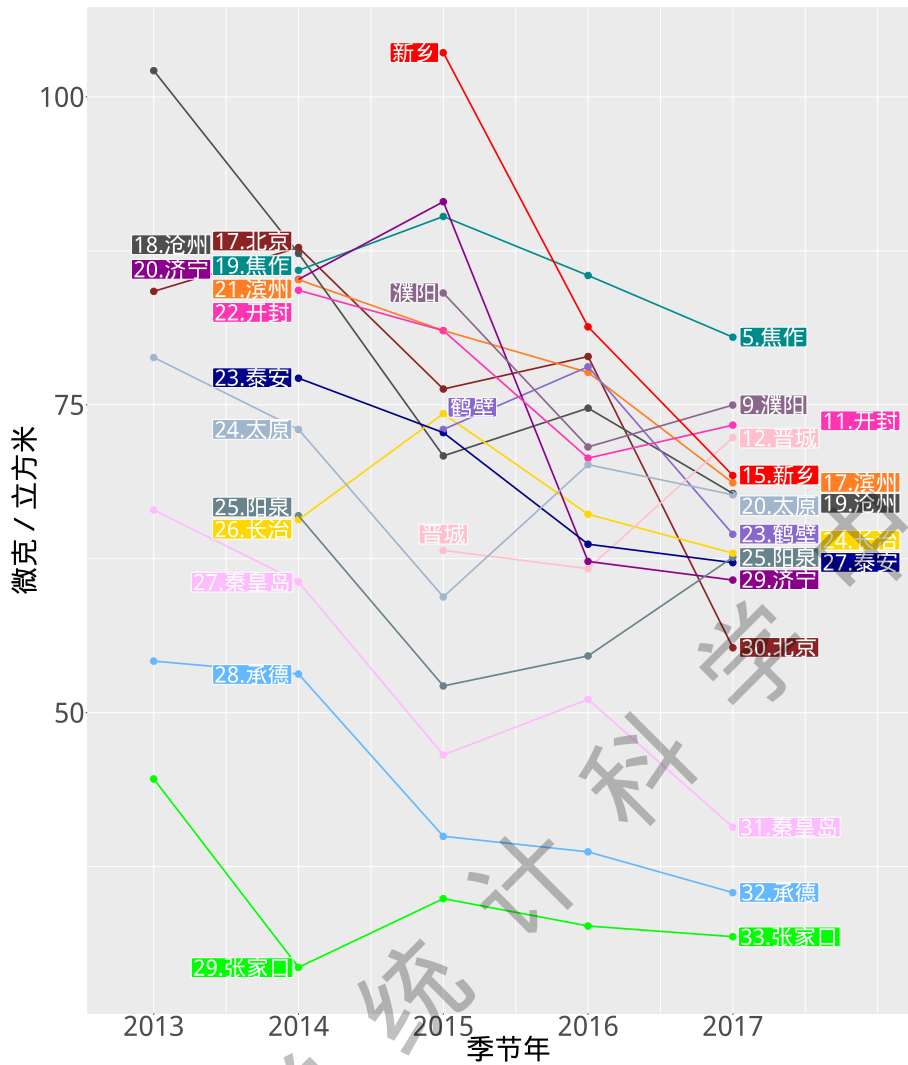


图 15：京津冀及周边晋鲁豫地区 33 市后 17 个城市气象调整后 PM_{2.5} 季节年平均浓度(微克/立方米) 年际变化图
 (新乡、濮阳、鹤壁和晋城 4 个城市因为 2014 年某些季度数据缺失而仅给出 2015 年至 2017 年平均浓度)

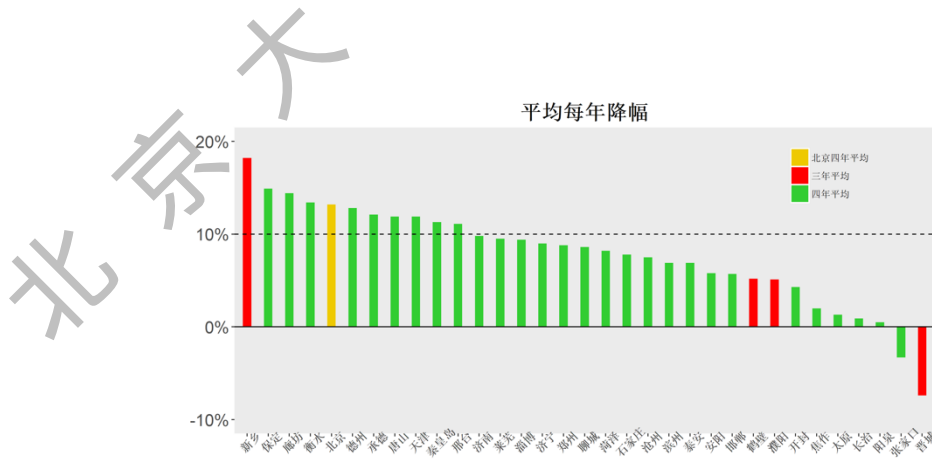


图 16：京津冀及周边晋鲁豫地区 33 市气象调整后季节年 PM_{2.5} 四年（绿色）或三年（红色）平均降幅图
 (用红色柱表示的新乡、鹤壁、濮阳和晋城因 2014 年部分季度数据缺失而计算的三年平均降幅。图 14 和图 16 的计算方法不同：四年累积降幅是 2017 年相较于 2014 年的降幅，平均每年降幅是每一年相较于前一年的降幅取平均。)

- **除张家口、晋城外，总体下降趋势明显**

通过图 13、15 “2+31” 城市气象调整后 $PM_{2.5}$ 季节年平均浓度发现，从整体上看，除张家口、晋城外，其余城市的 $PM_{2.5}$ 浓度从 2014 年至 2017 年整体上呈现下降趋势。张家口由于申办冬奥会准备 2014 年浓度偏低，这也是其 2014 年到 2017 年 $PM_{2.5}$ 降幅为负的一个原因。

从排名上看，廊坊、天津和北京的排名下降（改善）幅度最大，其中廊坊和天津在 2017 年退出最严重 16 强行列，北京更是从第 17 名下降至第 30 名，达到了“国十条”设立的 2017 年年均值 60 微克/立方米的目標。在 2017 年退出最严重 16 强行列的城市除廊坊和天津外，还有淄博、唐山和济南，它们分别从 2014 年的第 14、11、16 名下降至第 18、21、22 名。相比之下，焦作（从第 19 名上升至第 5 名）和开封（从第 22 名上升至第 11 名）的排名上升幅度最大。2017 年加入前 16 名的还有濮阳、晋城和新乡，这些城市由于 2015 年之前数据缺失严重，它们的 $PM_{2.5}$ 年均浓度是从 2015 年开始的。

从图 14 四年累积降幅看，除张家口、晋城外的所有城市在 2017 年的浓度均小于 2014 年的浓度，且大部分城市都是远远小于，其中鹤壁、濮阳、新乡和晋城比较的是 2017 年同 2015 年的变化情况。保定市降幅最多，但是由于其在 2014 年的 $PM_{2.5}$ 浓度过高，导致其在排名下降程度上没有体现。从图 16 平均每年降幅来看，张家口和晋城依旧为负。北京市的平均降幅位居第五位，新乡市的平均降幅遥遥领先。

（二） PM_{10}

PM_{10} 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。在 2013 年之前， PM_{10} 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，也是官员考核指标。2013 年， $PM_{2.5}$ 取代 PM_{10} 成为大气污染的主要指标。2013 年，“2+31” 城市的 PM_{10} 数据有相当多的缺失，尤其是在晋鲁豫城市 2013 年春夏两季，缺失比例超过 50%，以致于我们的气象调整算法不能提供有效的调整浓度，故在图 22 中有大片的“空白区”。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。 PM_{10} 数据缺失高的一个原因是 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 数值可能会发生“倒挂”，所谓“倒挂”是指 PM_{10} 的观测值低于 $PM_{2.5}$ 的观测值。因为 $PM_{2.5}$ 是 PM_{10} 的重要组成部分，理论上， PM_{10} 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 PM_{10} 的缺失进行插补，这样做虽然仍会低估 PM_{10} 浓度，但比直接将倒挂的 PM_{10} 观测设为缺失的计算误差小。本报告将使用这一种方法¹。

我国目前的 PM_{10} 平均浓度标准如下表 4，美国环境保护署关于 PM_{10} 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。

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 PM_{10} 观测不作缺失处理。

表 4: 我国目前 PM₁₀ 平均浓度标准

污染物项目	平均时间	浓度限值		单位
		一级	二级	
PM ₁₀	年平均	40	70	微克/立方米
	24 小时平均	50	150	

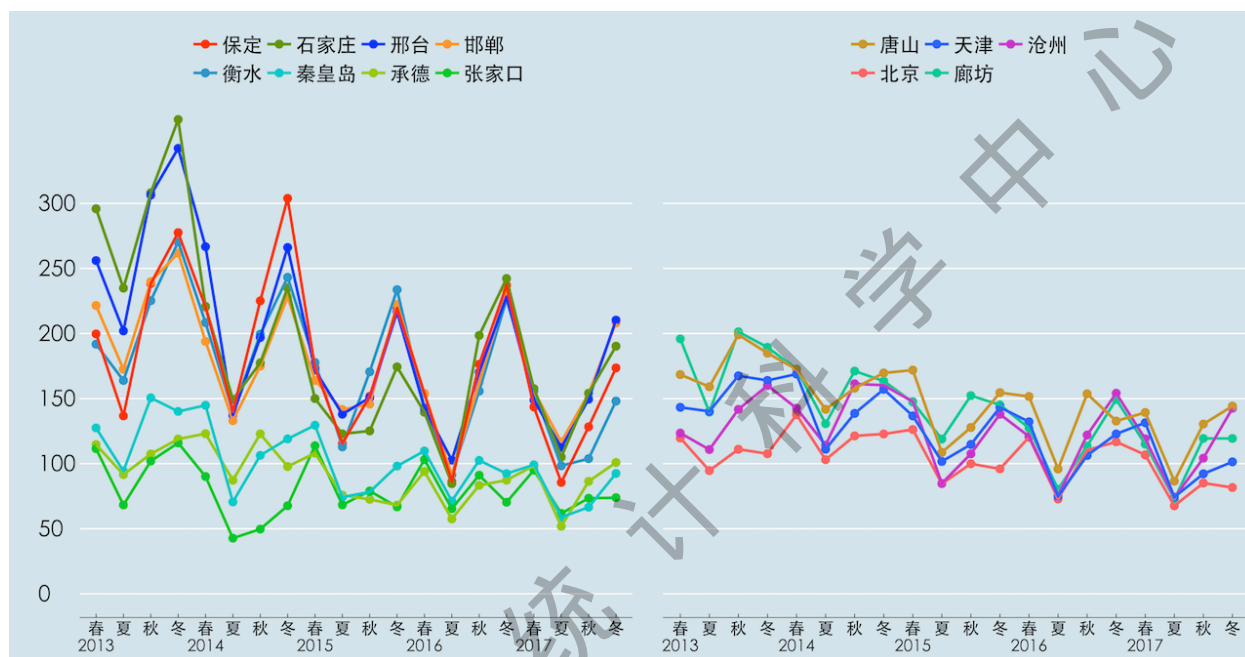


图 17: 京津冀 13 市气象调整后 2013 年至 2017 年 PM₁₀ 季节平均值浓度 (微克/立方米) 时间序列图

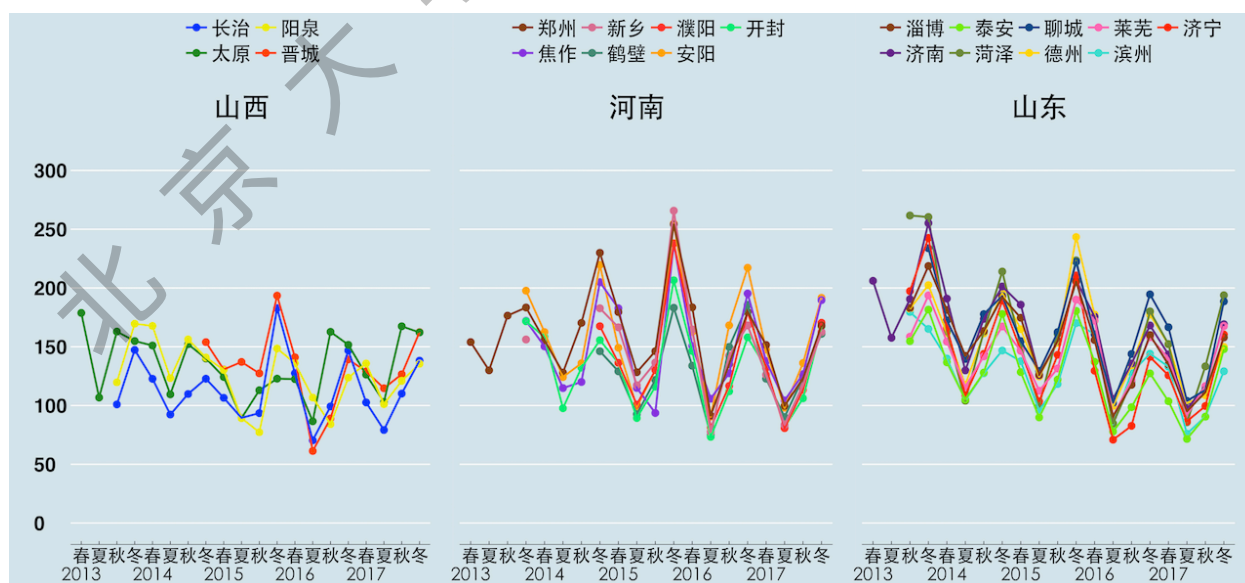


图 18: 京津冀周边晋鲁豫 20 市气象调整后 2013 年至 2017 年 PM₁₀ 季节平均值浓度 (微克/立方米) 时间序列图

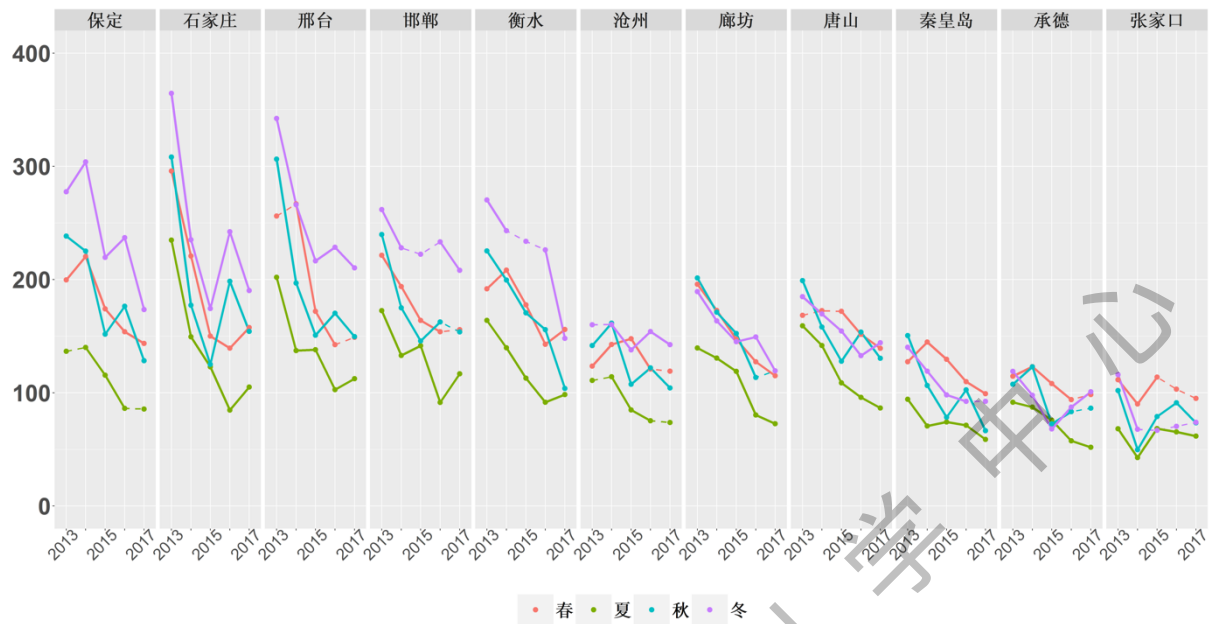


图 19：河北省 11 市气象调整后 2013 年至 2017 年 PM_{10} 季节平均浓度(微克/立方米)的变化序列图
 (实线(虚线)代表在 5% 统计学显著水平比上年有(无)显著增加或减少)

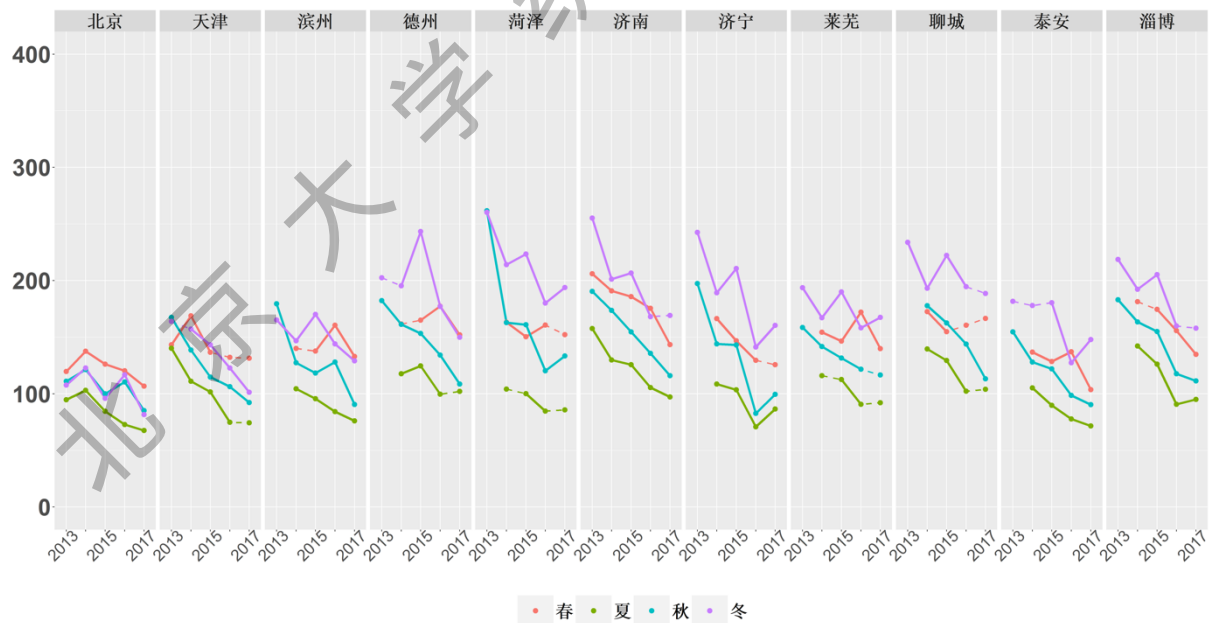


图 20：北京、天津和山东省 9 市气象调整后 2013 年至 2017 年 PM_{10} 季节平均浓度(微克/立方米)的变化序列图
 (实线(虚线)代表在 5% 统计学显著水平比上年有(无)显著增加或减少)

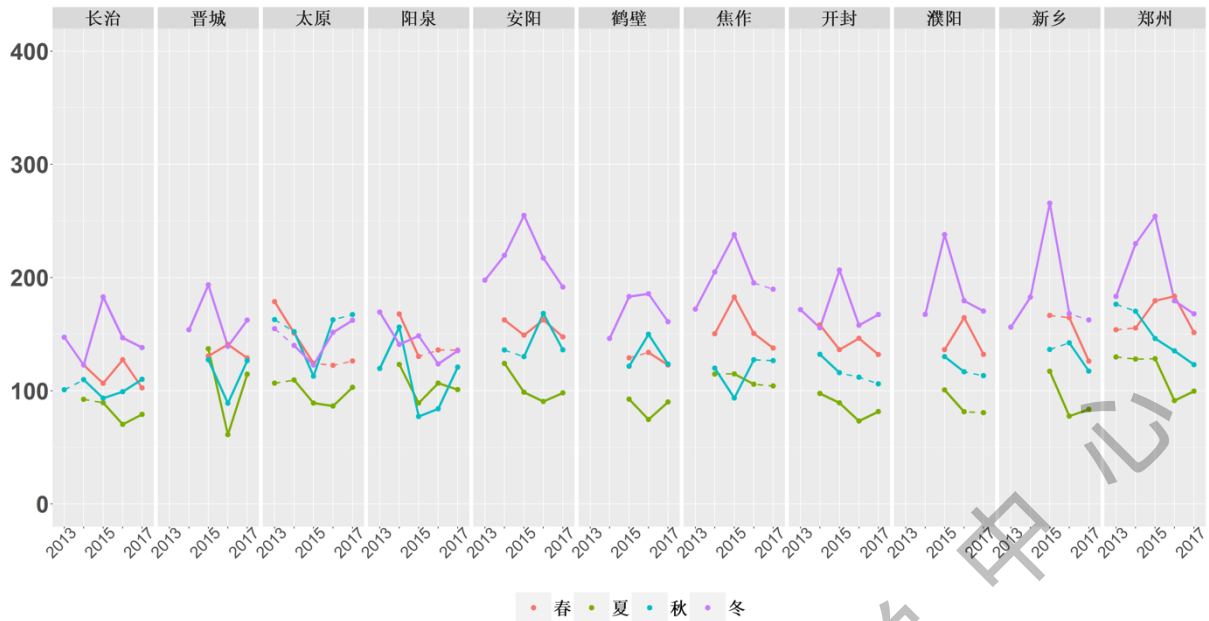


图 21：山西省 4 市和河南省 7 市气象调整后 2013 年至 2017 年 PM_{10} 季节平均浓度(微克/立方米)的变化序列图
(实线(虚线)代表在 5% 统计学显著水平比上年有(无)显著增加或减少)

图 17 至图 21 展示了“2+31”城市过去 20 个季节经气象调整的 PM_{10} 均值浓度随时间变化的情况和调整均值在每个给定季节的时间序列。通过图 17 至图 21，我们发现过去五年 PM_{10} 浓度有如下几个特征：

- **和 $PM_{2.5}$ 相同的区域特征**

京津冀 13 市的 PM_{10} 浓度与 $PM_{2.5}$ 具有相同的地域特征，即可以将其划分为同 $PM_{2.5}$ 一样的三个区域：（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、北京和廊坊；（3）北部的张家口、承德和秦皇岛。从空间分布上，太行山脉附近的城市 PM_{10} 浓度明显高于其他城市。这与 $PM_{2.5}$ 一样，受本地排放和太行山脉阻碍的双重作用， PM_{10} 在太行山前很难扩散，导致污染物堆积。尽管北部城市更易受到沙尘的影响，但是其 PM_{10} 浓度却远低于沿太行山城市和环渤海的唐山，这说明沿太行山脉及环渤海城市的高 PM_{10} 污染主要来自于平原地区的排放。

晋鲁豫地区 20 市的 PM_{10} 浓度与 $PM_{2.5}$ 也具有相同的地域特征，仍可以按照省份分为三个区域，并且每个区域具有和 $PM_{2.5}$ 污染情况相似的特征。山西省 4 城市的浓度水平低于山东省和河南省；在 2013 年至 2017 年的冬季，山东省 9 城市的空气质量在 2013 年至 2014 年有所改善、但在 2015 年恶化，又在 2016 年改善，而在 2017 年滨州、德州、聊城和淄博改善，其余 5 城市有所恶化。河南省 7 城市除开封外，各城市在 2013 年至 2015 年 PM_{10} 浓度

呈上升趋势（尤其在冬季）。除了鹤壁市外，其他城市在 2016 年浓度降低，而且除郑州、开封和濮阳外，其余城市在 2017 年冬季浓度也有所降低。

- **季节效应和地理差异**

PM₁₀ 浓度也有比较明显的季节特征，夏季污染最轻。其季节效应具有地理差异：沿太行山脉城市季节效应最为明显，其次是山东、河南和环渤海，最后是山西和河北北部城市。此外，“2+31”城市 PM₁₀ 污染还有独特的、不同于 PM_{2.5} 的特征。一方面，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、邯郸、衡水、沧州，山东除滨州外的 8 市，山西的长治、晋城以及河南各市，冬季的 PM₁₀ 浓度最高。然而北部的北京、秦皇岛、承德、唐山、张家口则是春季浓度最高。这说明，春季沙尘传输对北部城市的影响大于南部城市。另一方面，“2+31”城市 PM₁₀ 春季浓度要高于秋季。这说明春季的沙尘对 PM₁₀ 浓度影响很大。

- **PM_{2.5} 占 PM₁₀ 的比例随年份和季节变动明显**

通过图 23 对 33 个城市 2013 年至 2017 年各季度 PM_{2.5} 占 PM₁₀ 的比例分析，发现 PM_{2.5} 占 PM₁₀ 的比例随季节变动明显，其中春季占比最低，平均值为 48.3%；夏季、秋季较高，平均值分别为 57.4%和 58.3%；冬季占比最高，平均值达 65.1%。从年际变化来看，从 2013 年至 2017 年，PM_{2.5} 占 PM₁₀ 的比例逐年降低，2013 年平均值为 61.3%，2014 年平均值为 58.9%，到 2017 年逐年下降至 54.7%，其中春、夏、秋三个季度降幅均在 10.5%左右，而冬季降幅不明显，仅为 3.6%。从地理分布来看，河北北部城市，张家口、承德，PM_{2.5} 占比在所有地区中最低，全年平均在 44%~48%左右；而环渤海地区城市，包括北京、天津、唐山、秦皇岛、廊坊、沧州，整体 PM_{2.5} 占比在所有地区中最高，全年平均值在 60%左右，其中北京在 33 个城市中 5 年 PM_{2.5} 占比均值最高，为 73.8%，但 2017 年下降较明显，降至 65.6%。太行山以东、华北平原地区，整体 PM_{2.5} 占比较高，全年平均值在 57%~60%左右，其中河北地区以保定、衡水占比最高，山东地区以滨州、德州、莱芜占比最高，河南地区以开封、郑州、安阳、新乡、濮阳占比最高。太行山以西的山西地区，整体 PM_{2.5} 占比较低，其中阳泉、太原、晋城占比全年均值为 50%左右，而长治则较高，全年均值为 60.1%。

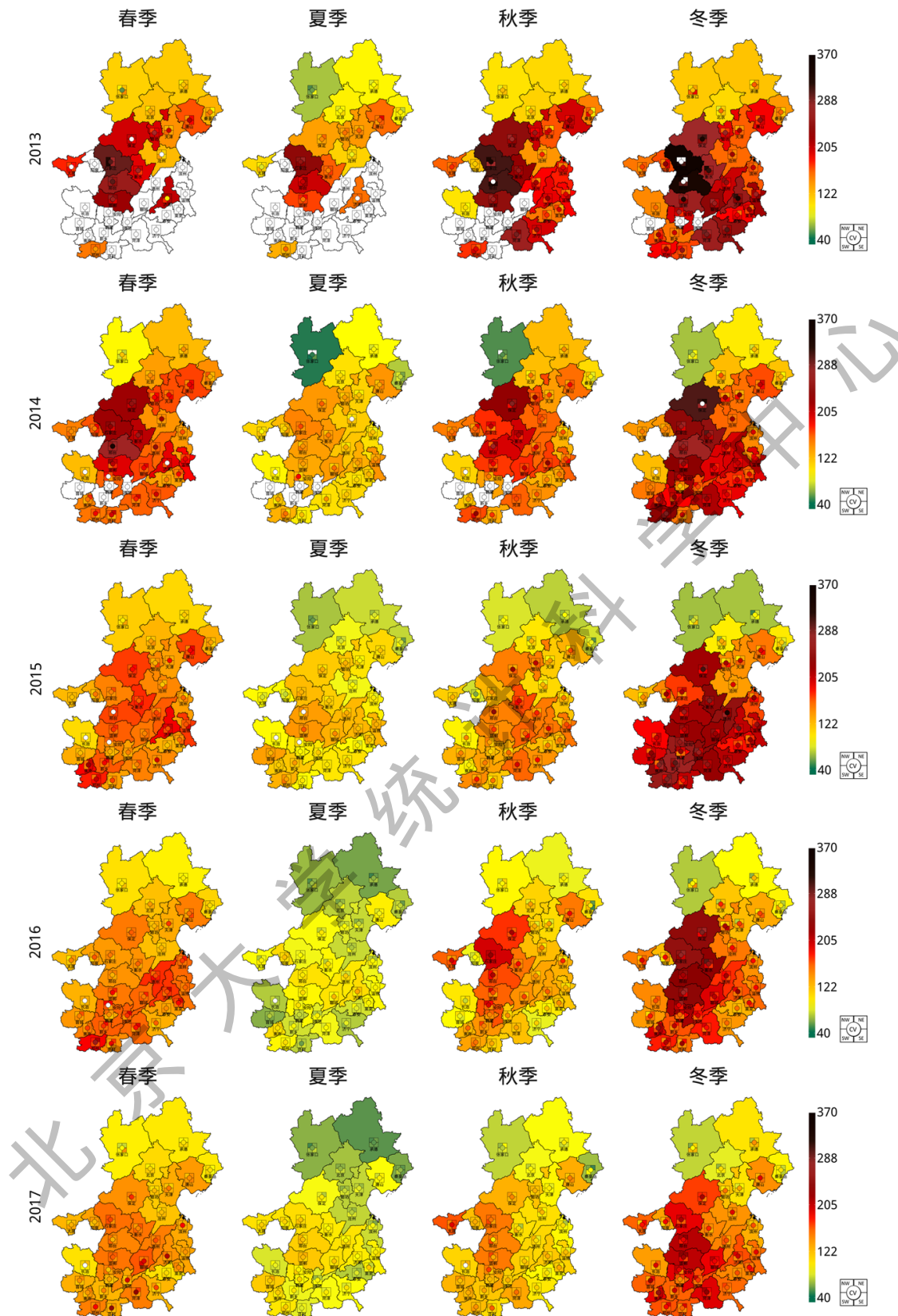


图 22: 京津冀及周边晋鲁豫地区 33 市 2013 年到 2017 年气象调整后 PM₁₀ 季节平均浓度(微克/立方米)地图

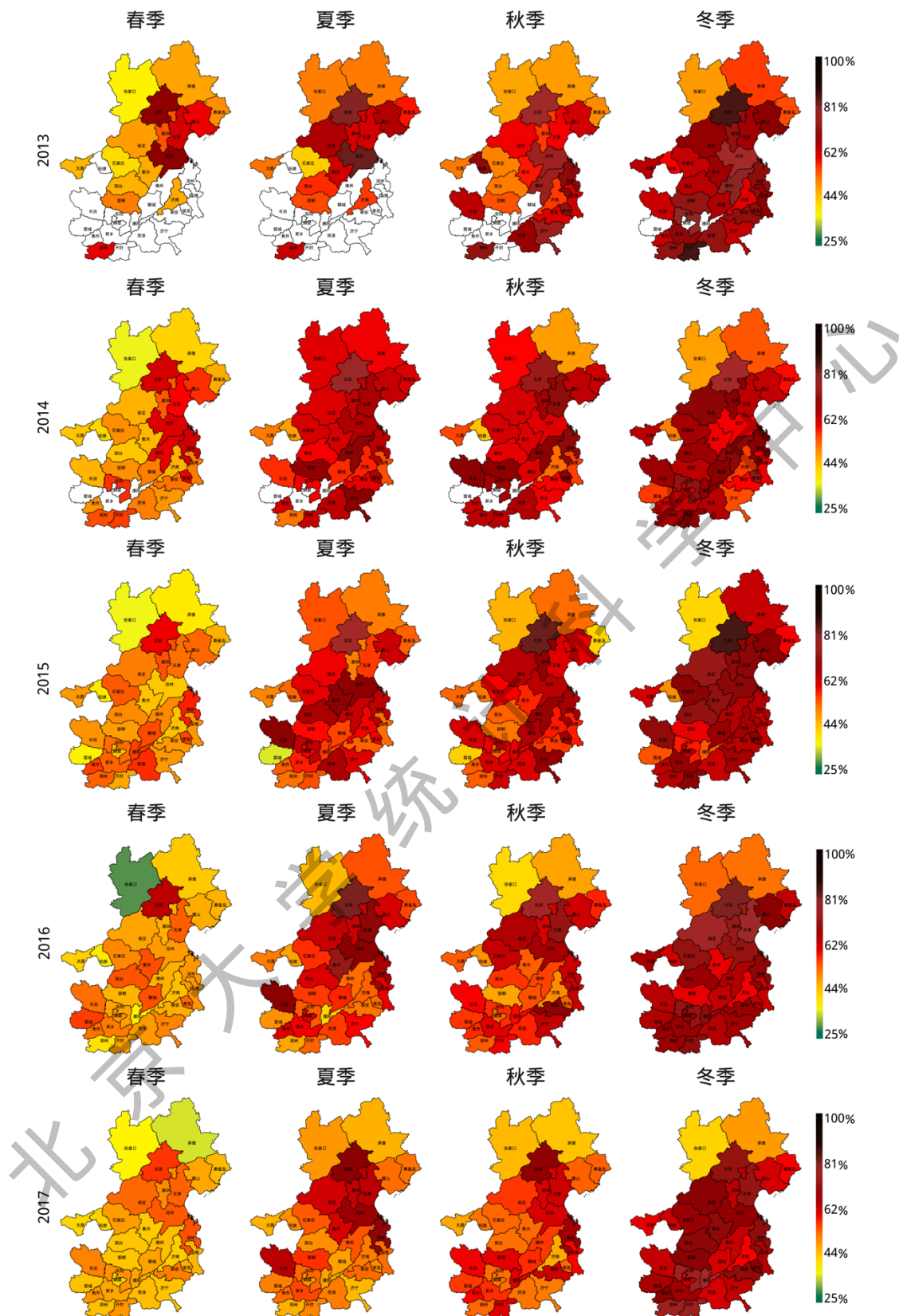


图 23: 京津冀及周边鲁豫地区 33 市 2013 至 2017 年 (季节年) 气象调整后 PM_{2.5} 占 PM₁₀ 的比例地图

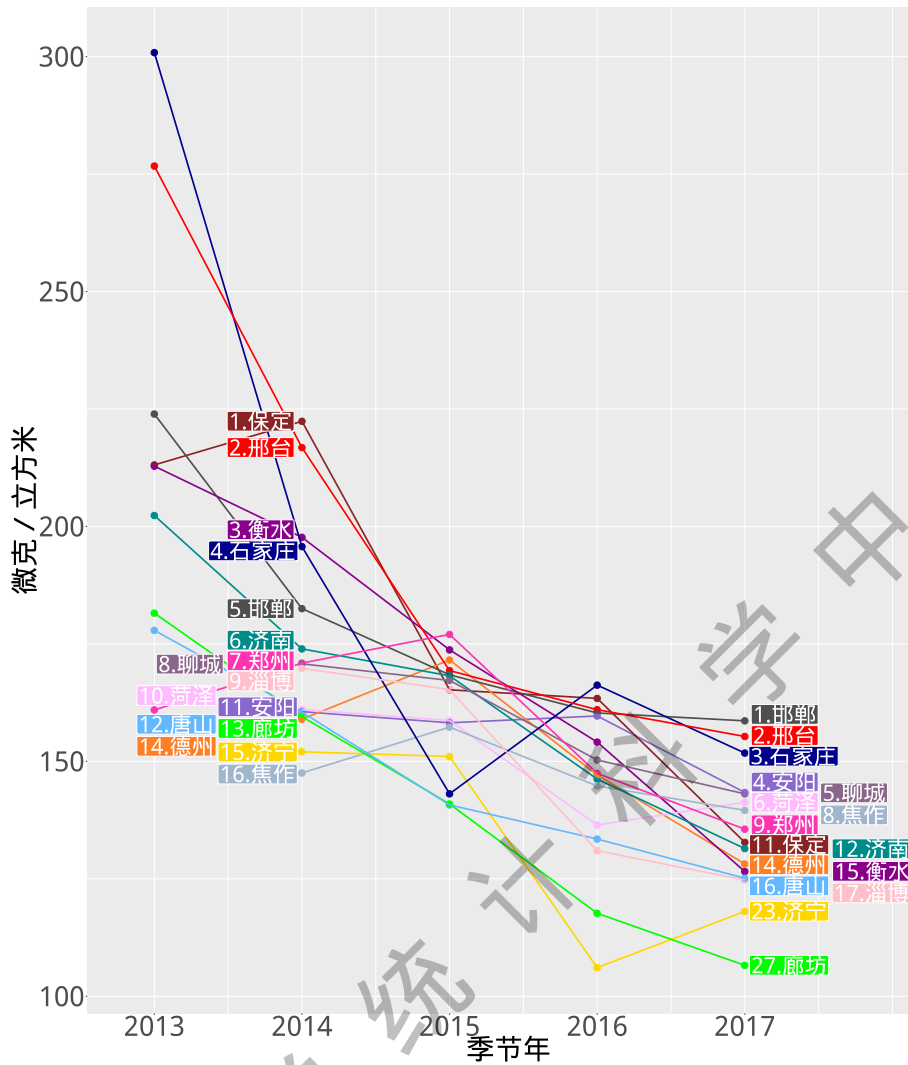


图 24：京津冀及周边晋鲁豫地区 33 市前 16 名城市气象调整后 PM₁₀ 季节年平均浓度(微克/立方米) 年际变化图
(2014、2017 季节年的排名均以当年浓度为基准)

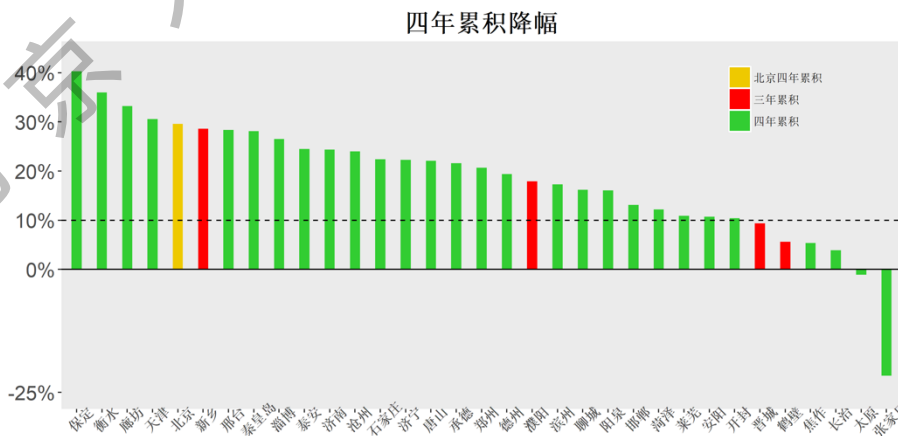


图 25：京津冀及周边晋鲁豫地区 33 市气象调整后季节年 PM₁₀ 四年（绿色）或三年（红色）累积降幅图
(用红色柱表示的新乡、鹤壁、濮阳和晋城因 2014 年部分季度数据缺失而计算的三年累积降幅)

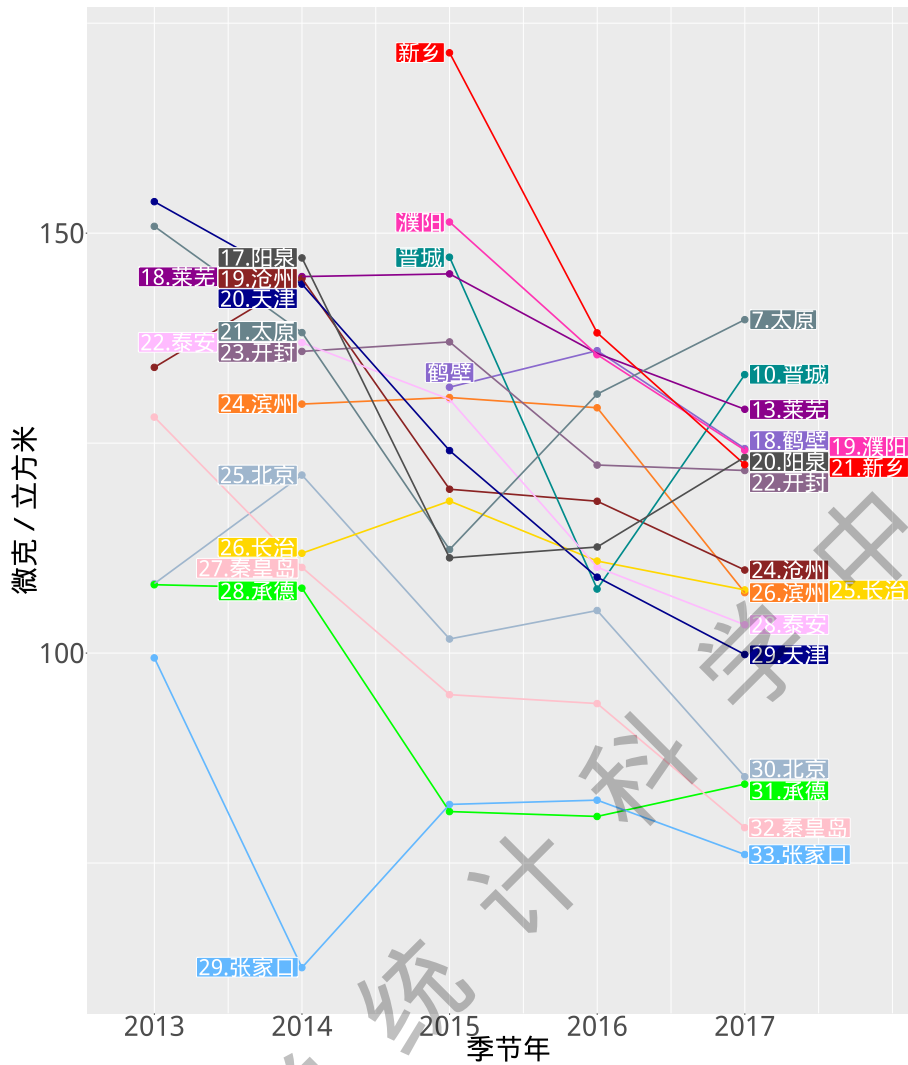


图 26: 京津冀及周边晋鲁豫地区 33 市后 17 个城市气象调整后 PM₁₀ 季节年平均浓度(微克/立方米) 年际变化图 (新乡、濮阳、鹤壁和晋城 4 个城市因为 2014 年某些季度数据缺失而仅给出 2015 年至 2017 年平均浓度)

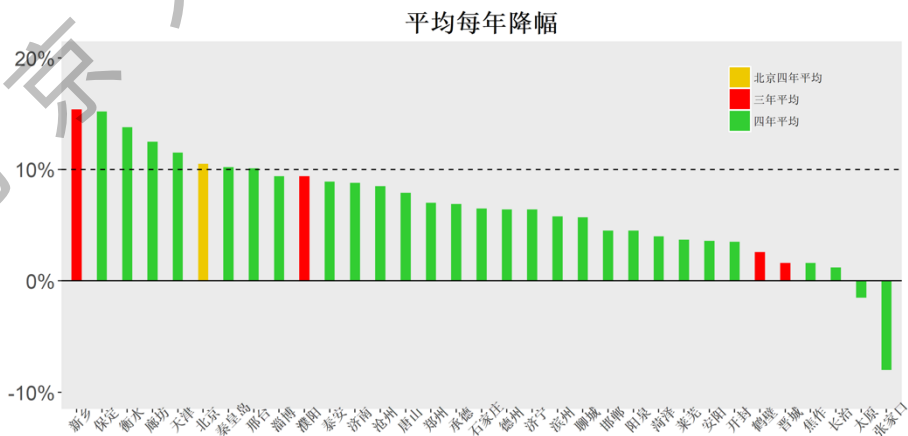


图 27: 京津冀及周边晋鲁豫地区 33 市气象调整后季节年 PM₁₀ 四年(绿色)或三年(红色)平均降幅图 (用红色柱表示的新乡、鹤壁、濮阳和晋城因 2014 年部分季度数据缺失而计算的三年平均降幅)

- **不同城市 2014 年至 2017 年浓度变化差异大**

通过图 24 和图 26 的 33 个城市气象调整后 PM_{10} 在 2014 年至 2017 年季节年的城市排序，可以发现在 2017 年退出最严重 16 强的城市有淄博、济宁和廊坊，它们分别从第 9、15、13 名下降至第 17、23、27 名。而也有三个城市在 2017 年新加入最严重 16 强行列，它们是太原、晋城和莱芜，其中太原更是从第 21 名上升为第 7 名。

除张家口、太原外的其他城市比起 2014 年，均在 2017 年有一定降幅，且累积降幅大部分集中于 10%到 40%之间。平均每年降幅大部分集中在 10%以内。累积降幅与平均降幅范围的差异也说明了有些城市的污染物浓度在大的下降趋势下有小的增长波动。

(三) 二氧化硫

二氧化硫 (SO_2) 是一种无色、有刺激性气味的气体，一般认为无毒或者毒性不大，但是二氧化硫在大气中易被氧化形成 SO_3 ，再与水分子结合生成硫酸分子，经过均相或非均相成核作用，形成硫酸气溶胶，并同时发生化学反应生成硫酸盐。硫酸和硫酸盐可形成硫酸烟雾和酸性降水，造成较大的危害。二氧化硫之所以被认为是重要的大气污染物，原因就在于它参与了硫酸烟雾和酸雨的形成[12]。大气中二氧化硫半数由人为源产生。人为源中，燃煤约占排放的 60%，尤其是高硫煤的燃烧，是大气中二氧化硫的主要来源。其次，燃油、工业排放也有一定贡献。

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“国十条”，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（2017 年由于天然气短缺，部分区域热电又改回燃煤）。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。

中国目前二氧化硫浓度的限值标准如表 5，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。

表 5：我国目前二氧化硫平均浓度标准

污染物项目	平均时间	浓度限值		单位
		一级	二级	
二氧化硫	年平均	20	60	微克/立方米
	24 小时平均	50	150	
	1 小时平均	150	500	

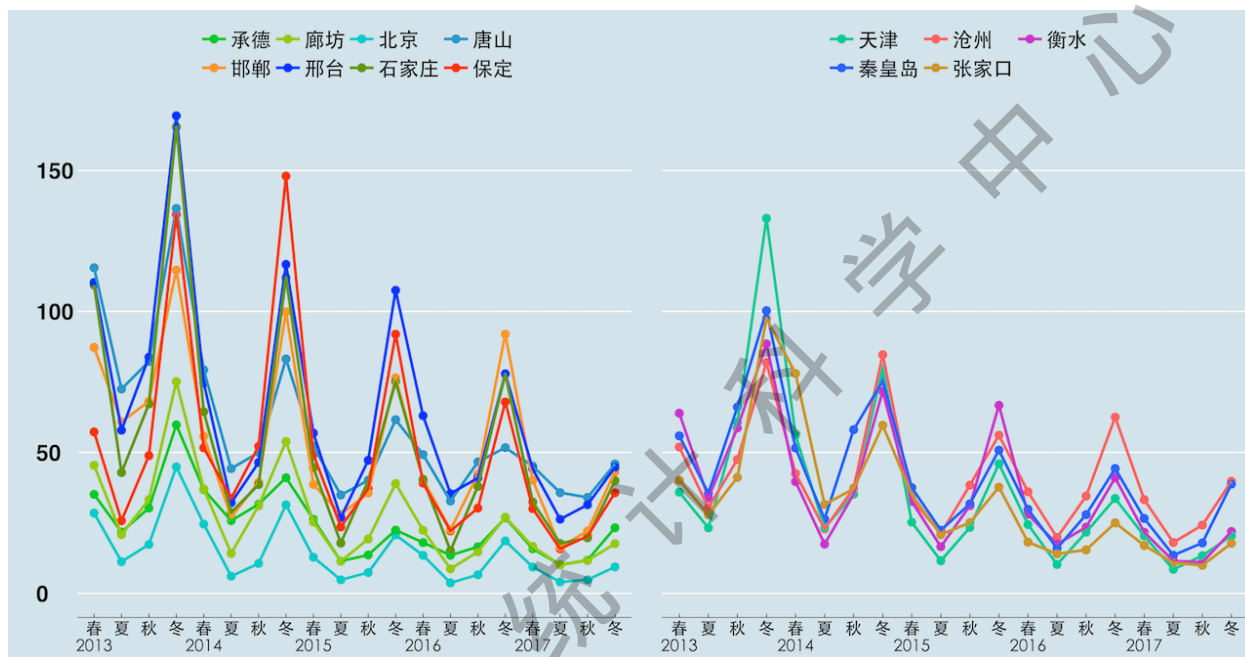


图 28：京津冀 13 市气象调整后 2013 年至 2017 年二氧化硫季节平均值浓度(微克/立方米)时间序列图

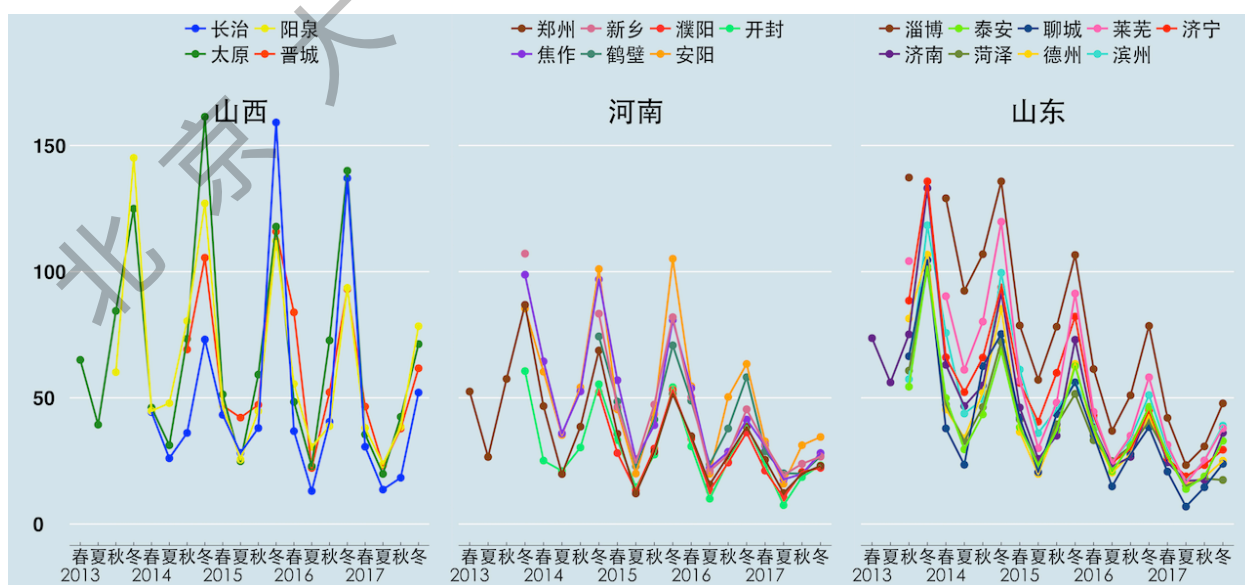


图 29：京津冀周边晋鲁豫 20 市气象调整后 2013 年至 2017 年二氧化硫季节平均值浓度(微克/立方米)时间序列图

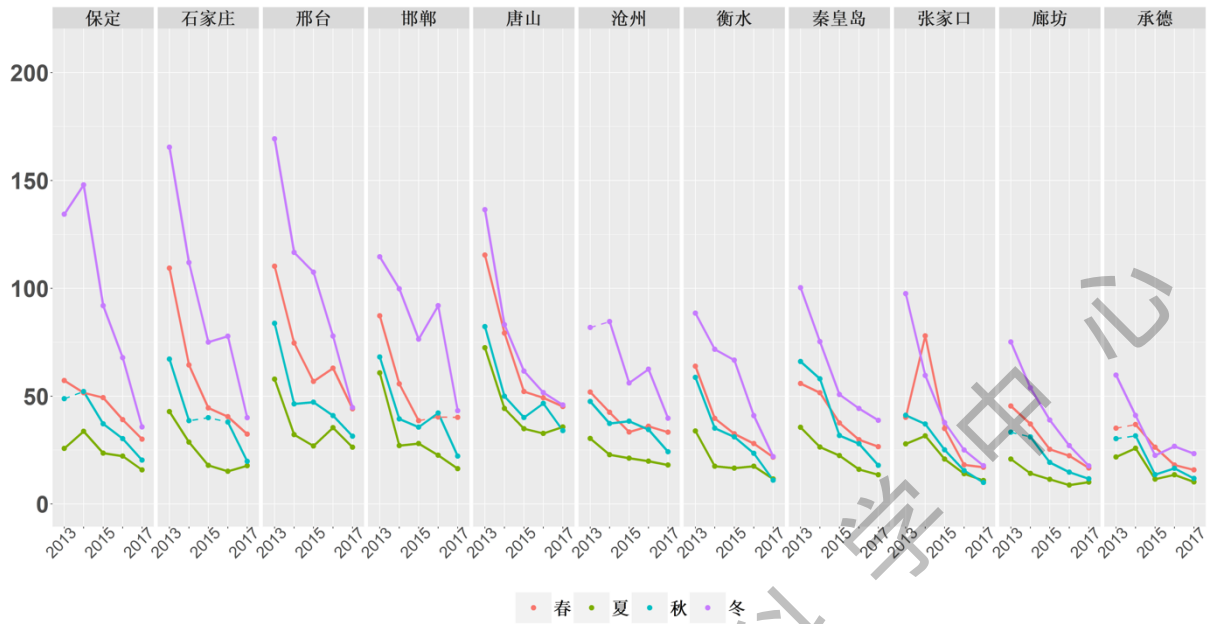


图 30: 河北省 11 市气象调整后 2013 年至 2017 年二氧化硫季节平均浓度(微克/立方米)的变化序列图
(实线(虚线)代表在 5% 统计学显著水平比上年有(无)显著增加或减少)

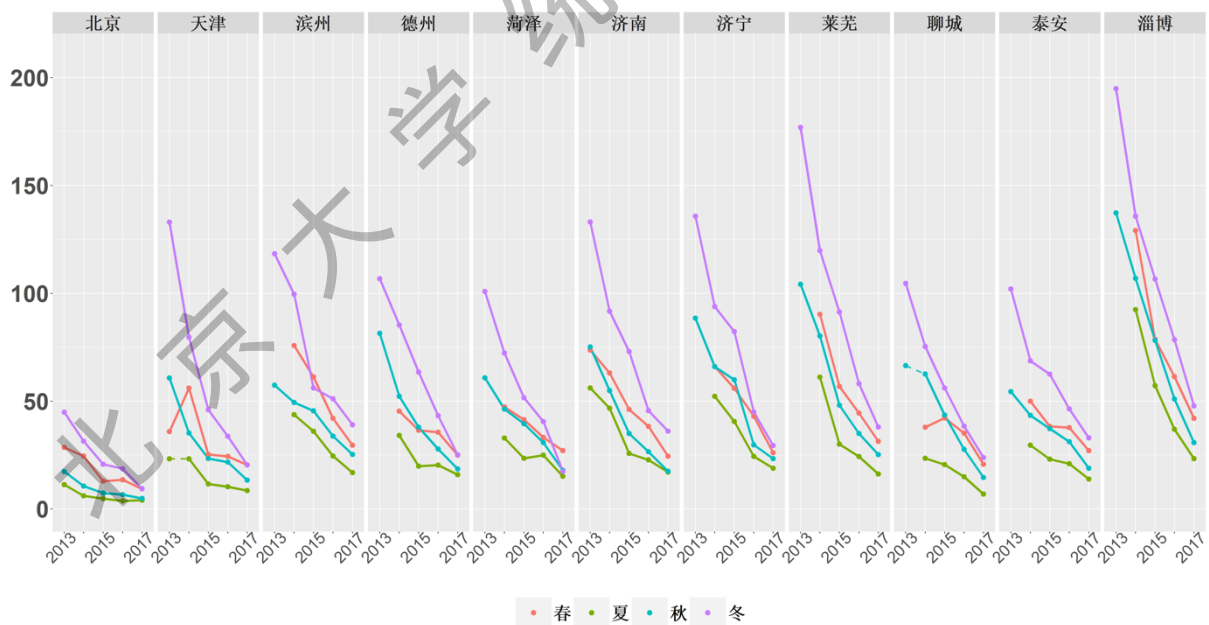


图 31: 北京、天津和山东省 9 市气象调整后 2013 年至 2017 年二氧化硫季节平均浓度(微克/立方米)的变化序列图
(实线(虚线)代表在 5% 统计学显著水平比上年有(无)显著增加或减少)



图 32: 山西省 4 市和河南省 7 市气象调整后 2013 年至 2017 年二氧化硫季节平均浓度(微克/立方米)的变化序列图
(实线(虚线)代表在 5% 统计学显著水平比上年有(无)显著增加或减少)

- 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 28, 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, 外加衡水市和北部的张家口, 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, 而与沿太行山的城市处于一个水平。考虑到唐山有利的大气扩散条件, 其二氧化硫仍能达到高的水平, 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承德和张家口, 二氧化硫浓度已处于京津冀的中等水平。廊坊、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 PM_{10} 那样大的差距。

晋鲁豫 20 市二氧化硫浓度虽然仍可以按照省份分为三个区域, 但是三个区域间浓度的差异已经不同于两种颗粒物。河南省 7 城市的浓度水平低于山东省和山西省, 山西省 4 城市的二氧化硫水平达到了沿太行山 5 城市(京津冀二氧化硫分区(1))的水平。但同沿太行山五市在近几年的显著下降不同, 山西四市在 2015 至 2017 年下降的不多。在 2013 年至 2017 年的冬季, 山东省 9 城市、河南除安阳和濮阳外的 5 城市的二氧化硫有明显的逐年改善;

山西省 4 城市季节波动幅度较大，且除阳泉外，各城市在 2013 年至 2014 年二氧化硫浓度不断升高，并且长治和晋城在 2015 年继续升高，在 2016 年浓度降低，而山西四城市在 2017 年冬季浓度均明显下降。

同样需要注意的是不属于“2+26”城市范围的山东省莱芜市，通过图 29 可以发现，该市二氧化硫浓度很高，并且大多数时间浓度水平排在山东省 9 市中第二位（第一位是淄博）。莱芜市，也名为钢城，是中国重要的冶铁中心，也是山东钢铁生产和深加工基地。而在钢铁生产中会产生大量的废气，其中包含二氧化硫。因此，我们建议将**莱芜也加入到污染传输通道中**。

- **季节效应**

京津冀 13 市和晋鲁豫 20 市具有相似的、明显的季节效应，且山西省和沿太行山脉五市的季节差异最大，北部城市北京、承德等则差异较小。**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 PM_{10} 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更大。二氧化硫浓度的冬夏季比例最高可以超过 5 倍，长治 2016 年的冬（137.0 微克/立方米）夏（13.1 微克/立方米）季比例甚至达到了 10.5 倍（This is alarming and amazing!）。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 1.3 到 2 之间。

- **“2+31”城市二氧化硫浓度下降显著**

二氧化硫的排名与 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 的排名出入较大。唐山市的颗粒物浓度较低，但是二氧化硫浓度在 2017 年位居第四位。非常明显的是，北京市的二氧化硫情况从 2014 年到 2017 年在所有城市中排名最末，即浓度最低，张家口、莱芜、济宁、济南市二氧化硫排名也下降显著。

对于二氧化硫的排名，2017 年较 2014 年退出最严重 16 强城市有秦皇岛、焦作、济南和德州。进入最严重 16 强城市有晋城、沧州、长治和新乡，其中沧州和长治也是所有 33 个城市中排名上升最多的城市，均上升了 14 名，分别从第 22 名上升至第 8 名、从第 23 名上升至第 9 名。

二氧化硫的四年累积降幅较高，大都集中在 40%~80%之间，平均降幅也大多集中在 10%~30%之间，张家口在 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 两种污染物上，均没有表现出明显的好转，但是在二氧化硫上降幅明显。

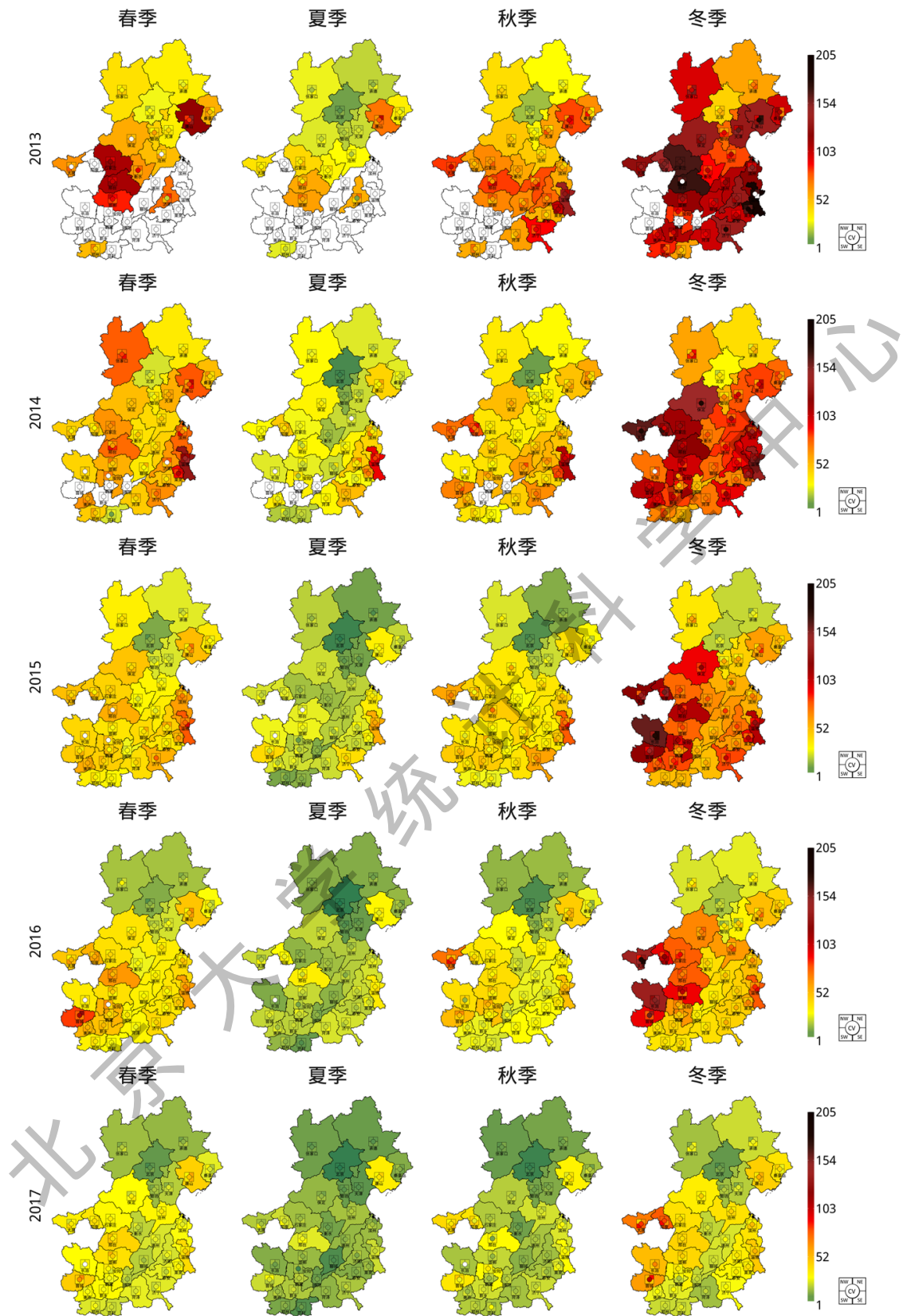


图 33: 京津冀及周边鲁豫地区 33 市 2013 年到 2017 年气象调整后二氧化硫季节平均浓度(微克/立方米)地图

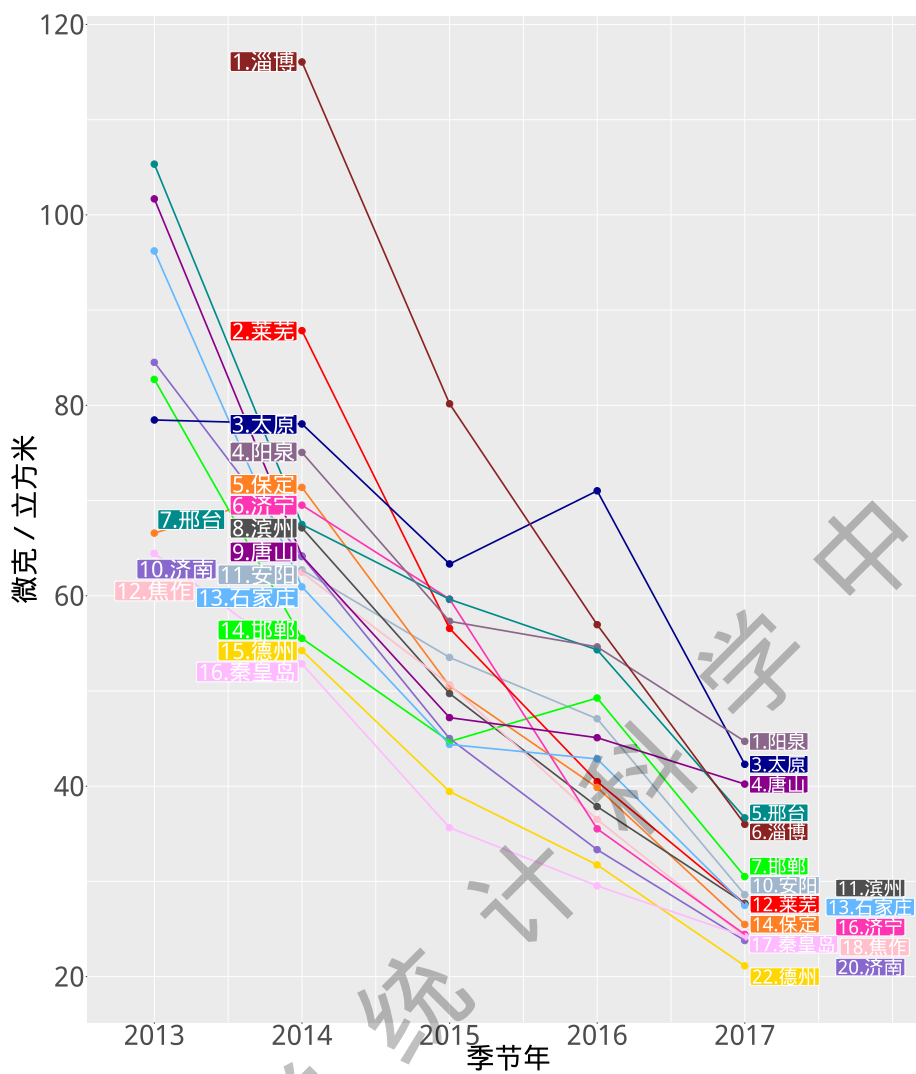


图 34: 京津冀及周边晋鲁豫地区 33 市前 16 名城市气象调整后二氧化硫季节年平均浓度(微克/立方米)年际变化图 (2014、2017 季节年的排名均以当年浓度为基准)

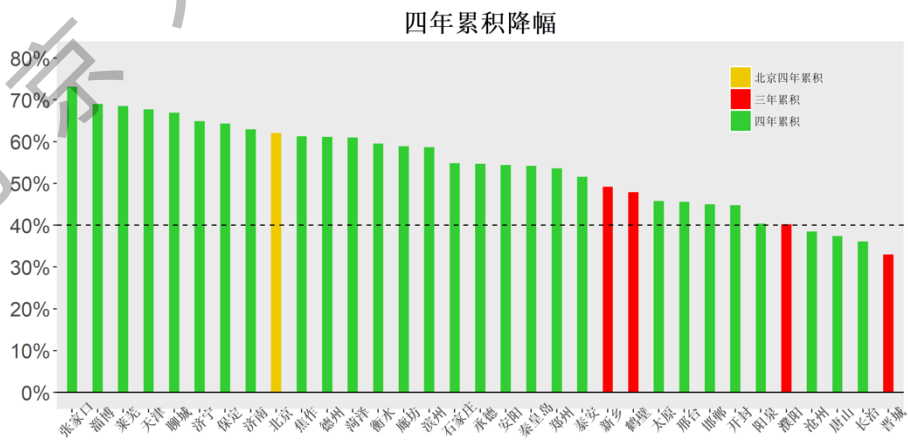


图 35: 京津冀及周边晋鲁豫地区 33 市气象调整后季节年二氧化硫四年(绿色)或三年(红色)累积降幅图 (用红色柱表示的新乡、鹤壁、濮阳和晋城因 2014 年部分季度数据缺失而计算的三年累积降幅)

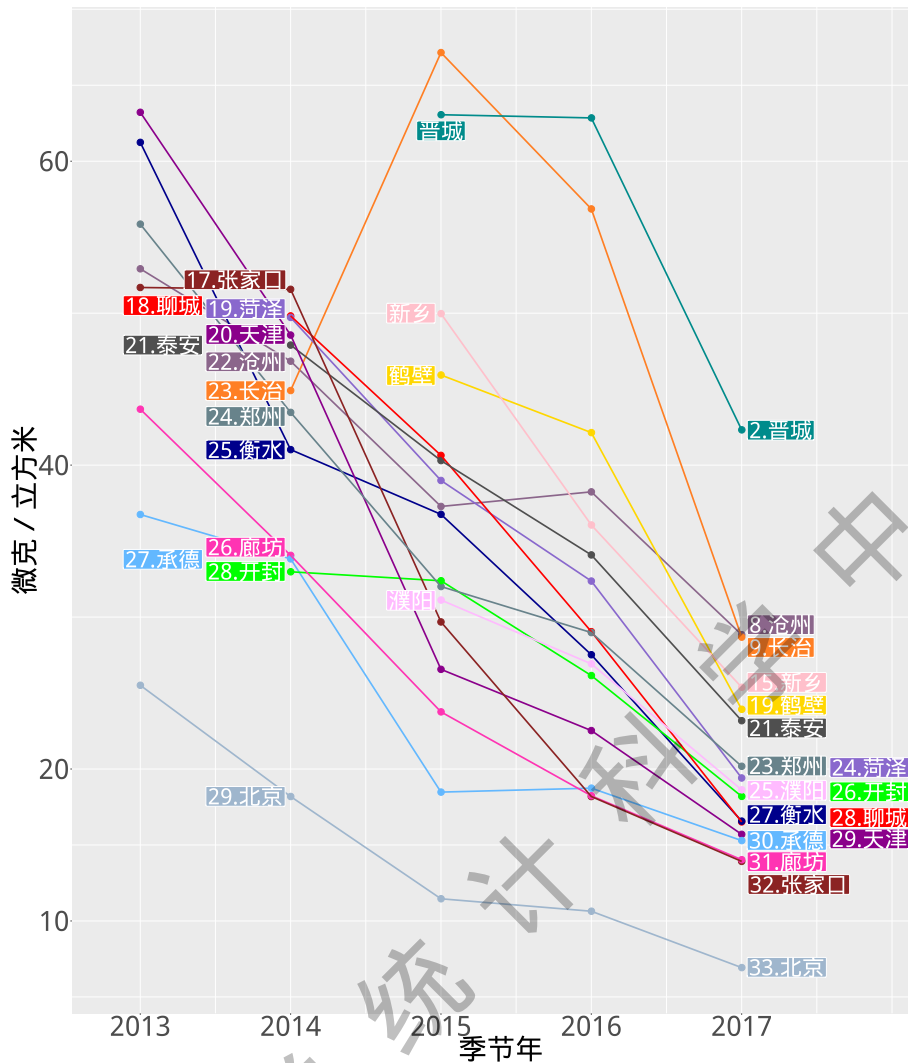


图 36：京津冀及周边晋鲁豫地区 33 市后 17 名城市气象调整后二氧化硫季节年平均浓度(微克/立方米)年际变化图
 (新乡、濮阳、鹤壁和晋城 4 个城市因为 2014 年某些季度数据缺失而仅给出 2015 年至 2017 年平均浓度)

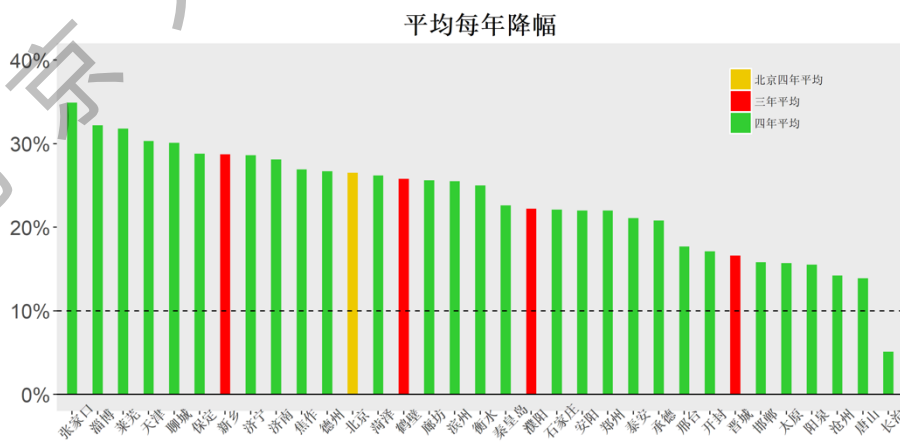


图 37：京津冀及周边晋鲁豫地区 33 市气象调整后季节年二氧化硫四年（绿色）或三年（红色）平均降幅图
 (用红色柱表示的新乡、鹤壁、濮阳和晋城因 2014 年部分季度数据缺失而计算的三年平均降幅)

(四) 二氧化氮

氮氧化物 (NO_x) 主要来源于高温燃烧, 在燃烧过程中, 天然存在的 N_2 和 O_2 化合形成 NO 直接排放, NO 在空气中进一步氧化形成二氧化氮 (NO_2)。由于存在产生 NO_2 的其他途径, 冬季的 NO_2 污染会比较严重, 如 NO 与雾滴表面的催化氧化形成 NO_2 , 以及逆温气象条件下使上空已形成的 NO_2 下沉到地面等。

二氧化氮 (NO_2) 是一种重要的空气污染物, 主要来自于车辆尾气排放和工业生产过程, 是硝酸盐的前体物。硝酸盐是 $\text{PM}_{2.5}$ 的重要组成部分之一。同时, 二氧化氮在光照下氧气可以转化为臭氧, 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。

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种气体 (SO_2 , NO_2 , CO 和 O_3) 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的浓度限值如下表, 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)。

表 6: 我国目前二氧化氮平均浓度标准

污染物项目	平均时间	浓度限值		单位
		一级	二级	
二氧化氮	年平均	40	40	微克/立方米
	24 小时平均	80	80	
	1 小时平均	200	200	

- **京津冀 13 市地理差异不再明显, 山西省 4 市浓度整体低于山东和河南省**

由图 38, 我们可以看到, 除城市自身排放较低的张家口和承德市外, 京津冀其它 11 个城市二氧化氮浓度并没有明显的分区, 这一点同之前的 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 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。通过图 39, 发现晋鲁豫 20 市二氧化氮浓度山西省整体低于山东省和河南省, 但在 2016 年和 2017 年两年, 太原和阳泉有很强劲的增长趋势。

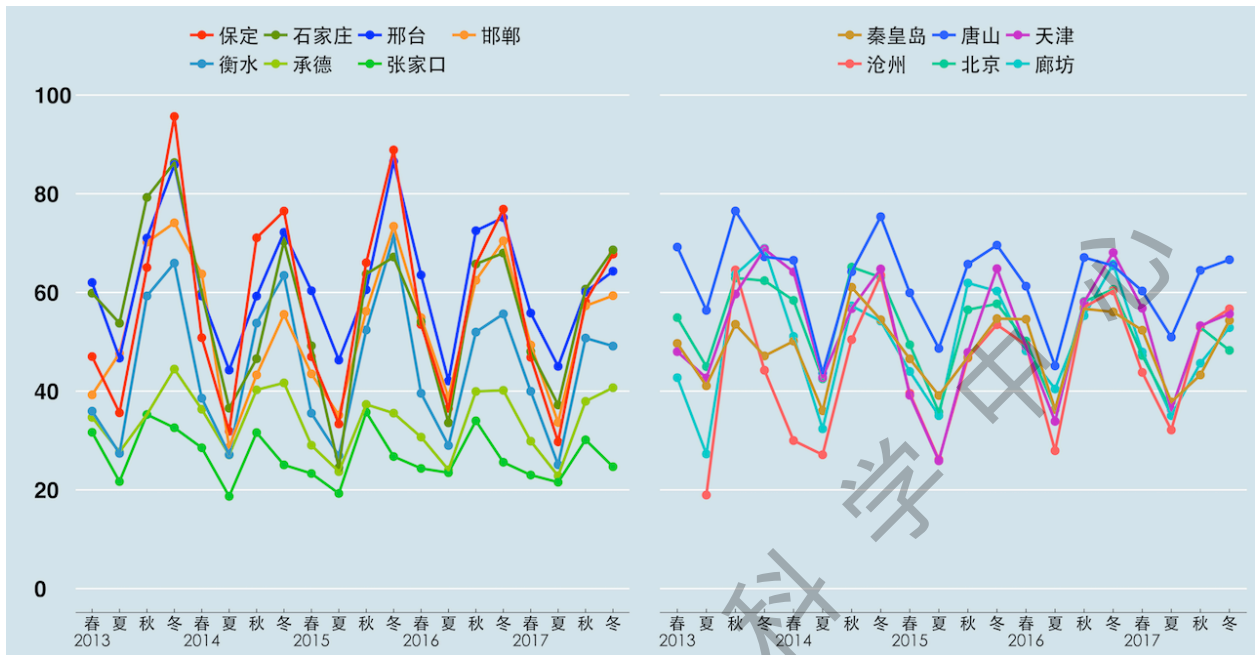


图 38: 京津冀 13 市气象调整后 2013 年至 2017 年二氧化氮季节平均值浓度(微克/立方米)时间序列图

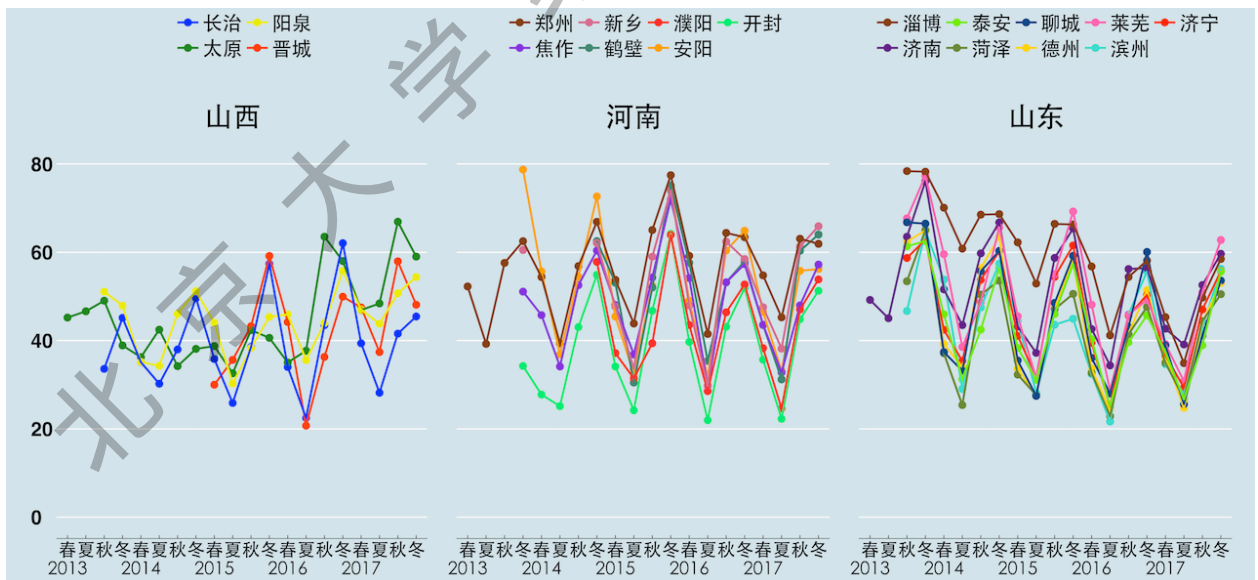


图 39: 京津冀周边晋鲁豫 20 市气象调整后 2013 年至 2017 年二氧化氮季节平均值浓度(微克/立方米)时间序列图

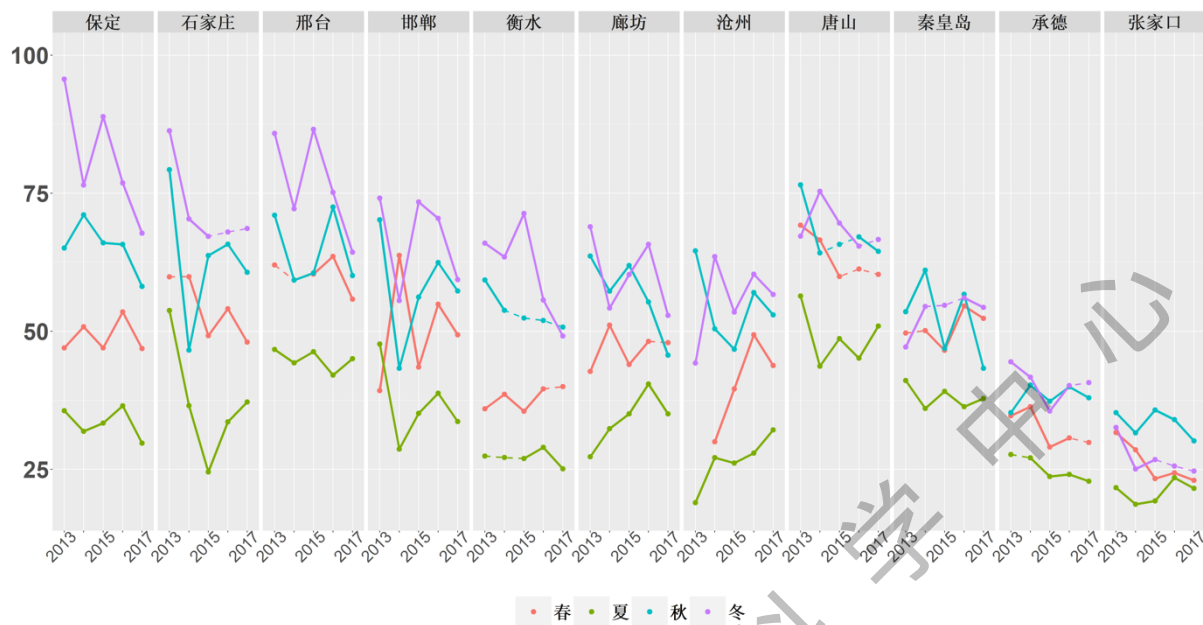


图 40: 河北省 11 市气象调整后 2013 年至 2017 年二氧化氮季节平均浓度(微克/立方米)的变化序列图
(实线(虚线)代表在 5% 统计学显著水平比上年有(无)显著增加或减少)

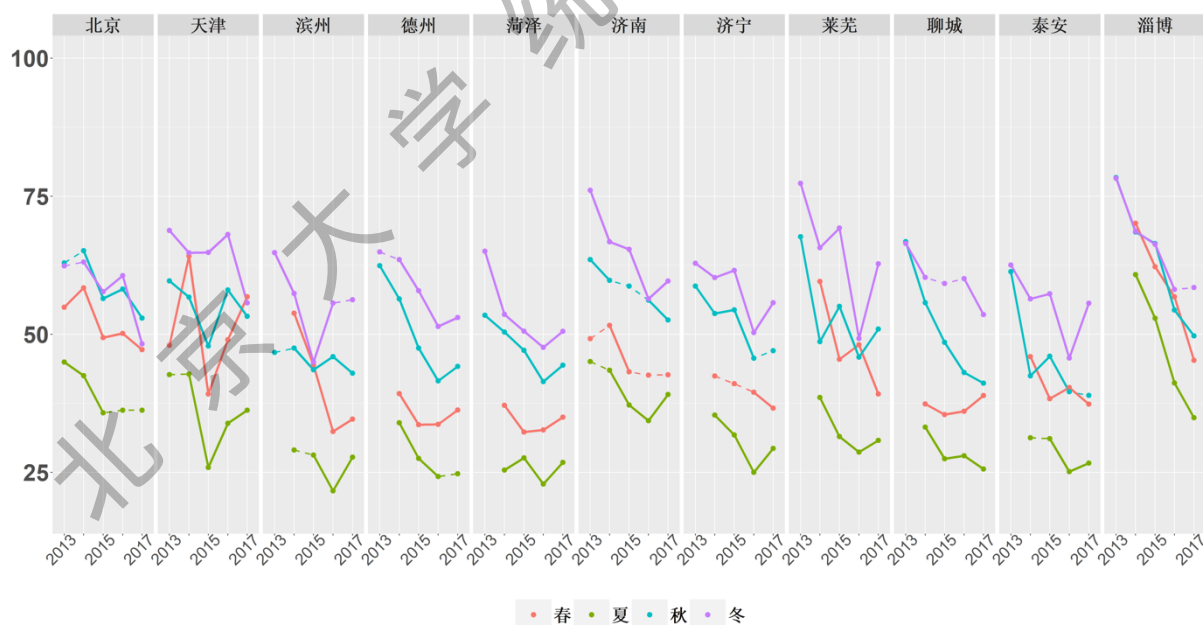


图 41: 北京、天津和山东省 9 市气象调整后 2013 年至 2017 年二氧化氮季节平均浓度(微克/立方米)的变化序列图
(实线(虚线)代表在 5% 统计学显著水平比上年有(无)显著增加或减少)

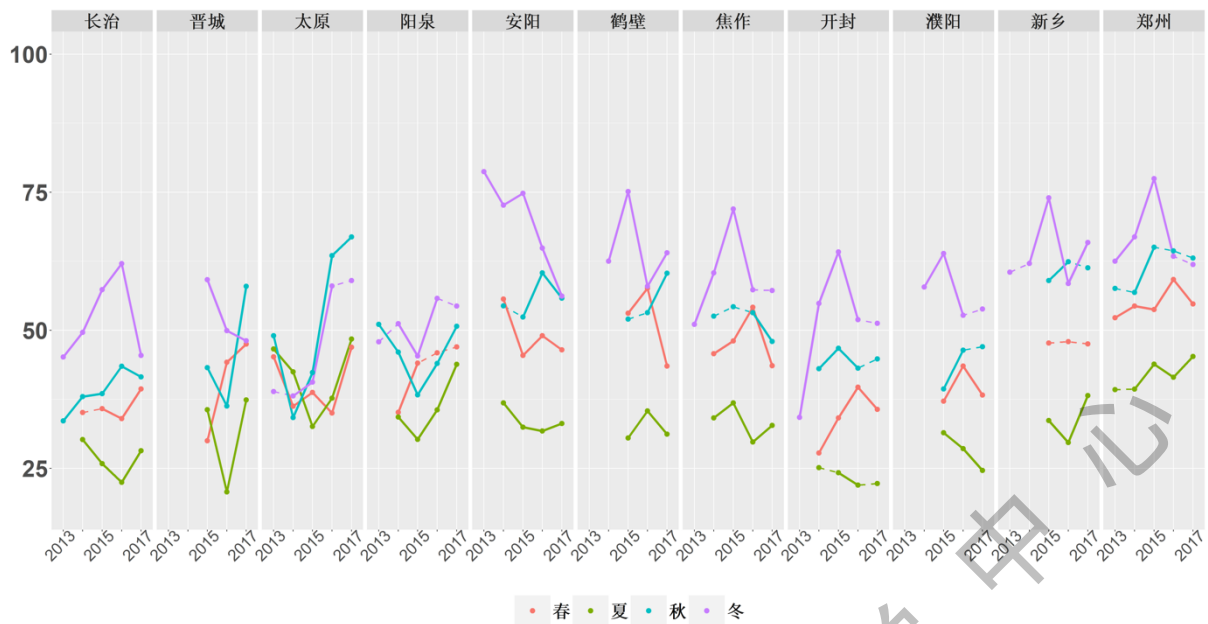


图 42: 山西省 4 市和河南省 7 市气象调整后 2013 年至 2017 年二氧化氮季节平均浓度(微克/立方米)的变化序列图
(实线(虚线)代表在 5% 统计学显著水平比上年有(无)显著增加或减少)

- **季节效应明显，秋冬浓度高，夏季最低**

京津冀 13 个城市和晋鲁豫 20 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。**京津冀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京津冀 13 个城市中最低的，也具有明显的季节效应。山西的季节效应不如山东和河南省各城市的季节效应明显。山东除了济南、莱芜和淄博外，其余 6 城市的冬季二氧化氮浓度在 50~65 微克/立方米，而这三个城市冬季会超过 75 微克/立方米。山东除了济南和淄博外，夏季二氧化氮浓度均低于 40 微克/立方米。河南 7 城市冬季浓度一般在 50~75 微克/立方米，而夏季浓度除了郑州外，均不高于 40 微克/立方米。

- **二氧化氮浓度整体下降不明显**

从二氧化氮的年均浓度变化及城市相对排名来看，太原市是二氧化氮年均浓度逐年递增的唯一城市，浓度的相对排名从 2014 年的第 26 名上升到 2017 年的第 4 名。通过城市排名图，可以发现均有 6 个城市在 2017 年进入最严重 16 城行列和退出最严重 16 城行列。

从累积降幅和年均降幅来看，“2+31”城市中多数地区有所改善，北京市的累积降幅和年均降幅均位列第 2 位，北京的城市排名从第 5 名下降至第 18 名，累积降幅和平均降幅的前六位中除了北京外均在山东省，末三位降幅为负（增加）的城市均位于山西省。仅有 11 个城市累积降幅超过 10%，总体改善不显著，并且降幅远远小于二氧化硫和两个颗粒物的改善程度。

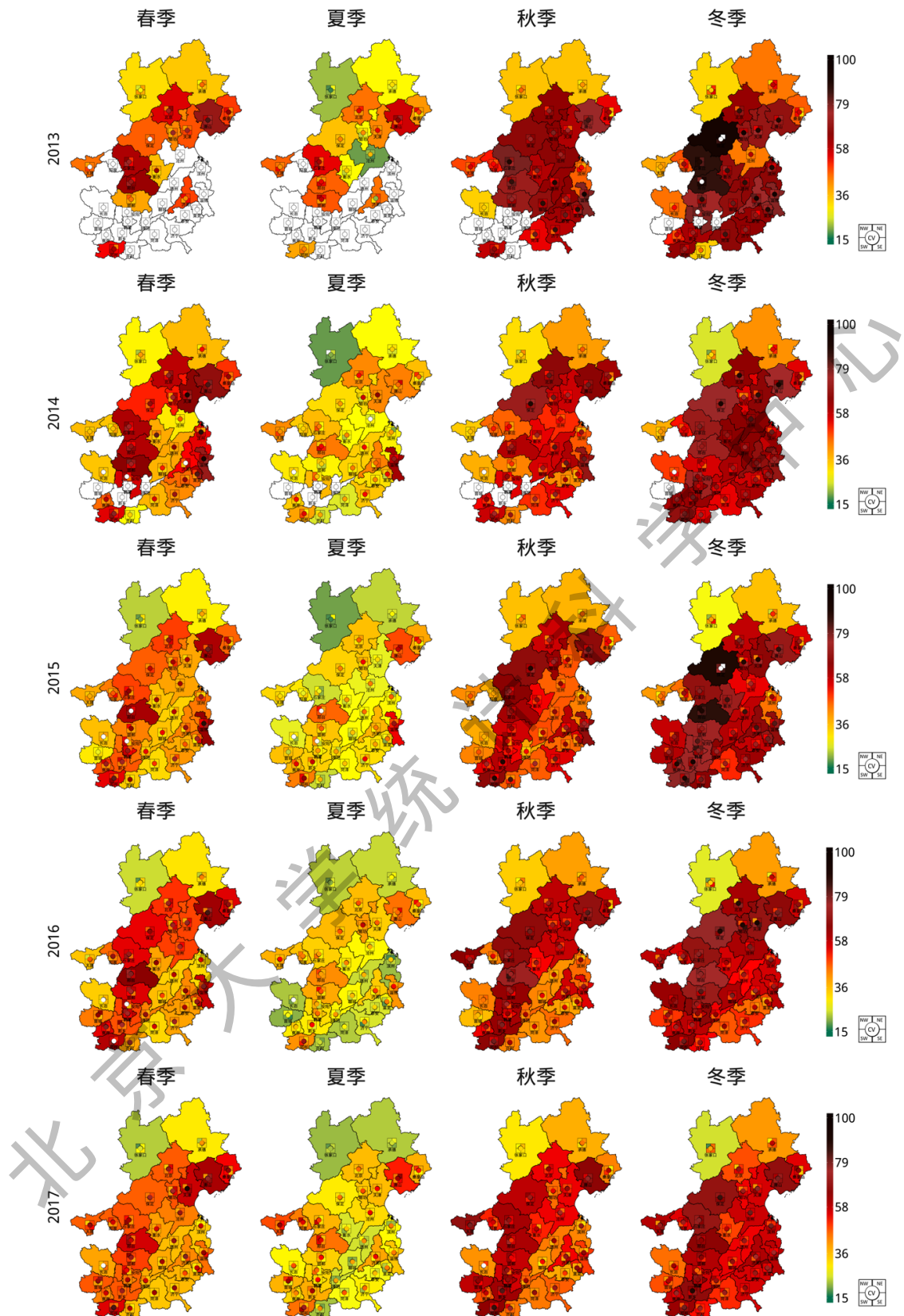


图 43: 京津冀及周边晋鲁豫地区 33 市 2013 年到 2017 年气象调整后二氧化氮季节平均浓度(微克/立方米)地图

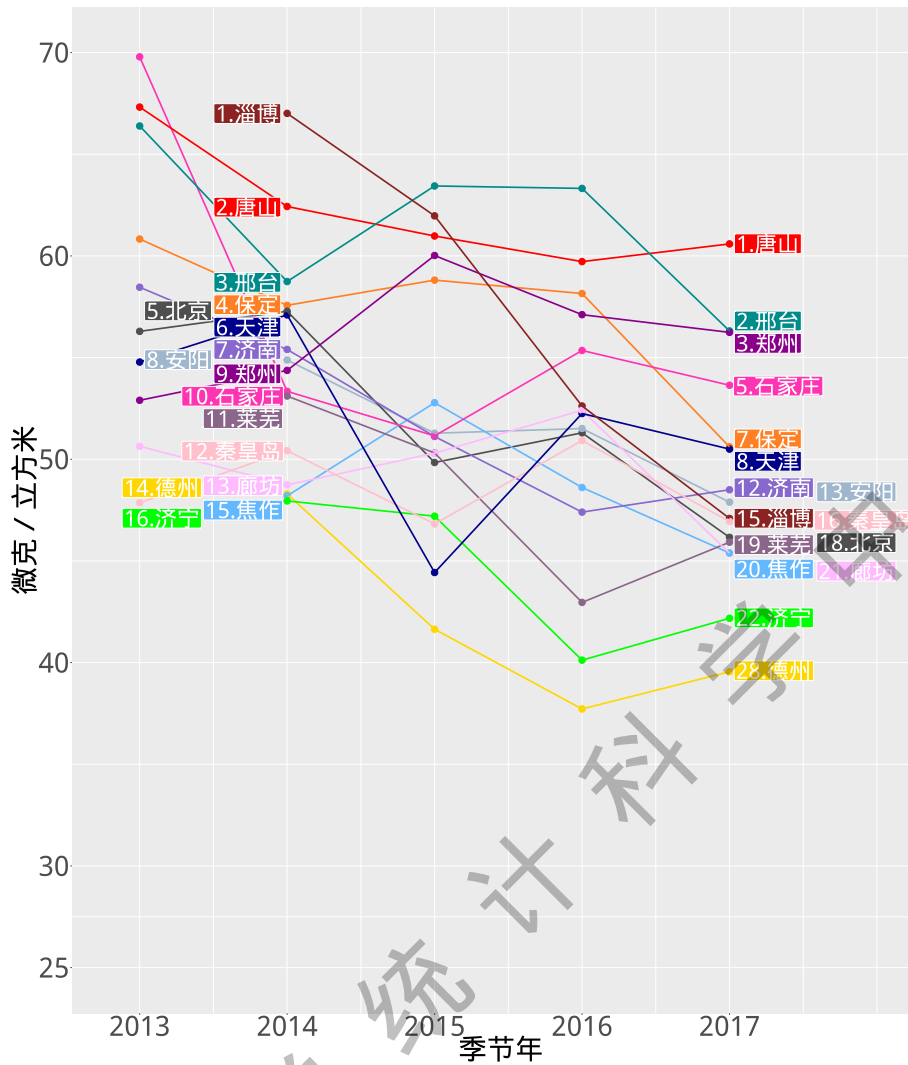


图 44: 京津冀及周边晋鲁豫地区 33 市前 16 名城市气象调整后二氧化氮季节年平均浓度(微克/立方米)年际变化图
(2014、2017 季节年的排名均以当年浓度为基准)

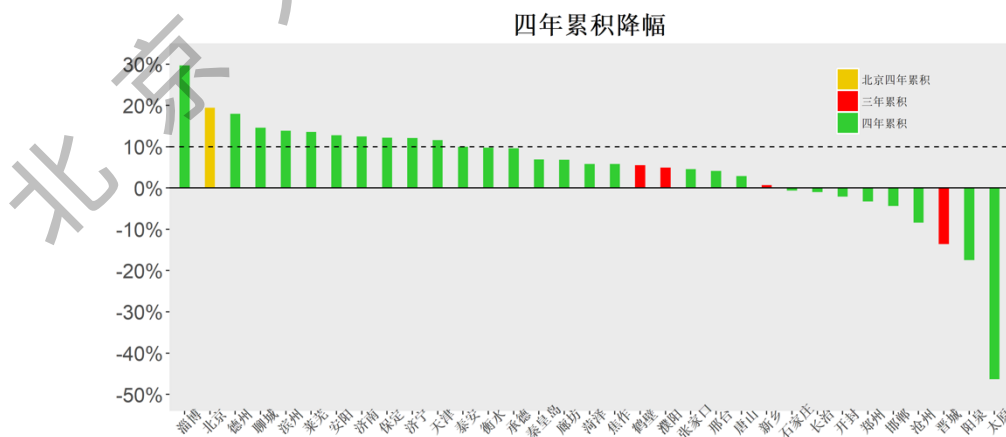


图 45: 京津冀及周边晋鲁豫地区 33 市气象调整后季节年二氧化氮四年(绿色)或三年(红色)累积降幅图
(用红色柱表示的新乡、鹤壁、濮阳和晋城因 2014 年部分季度数据缺失而计算的三年累积降幅)

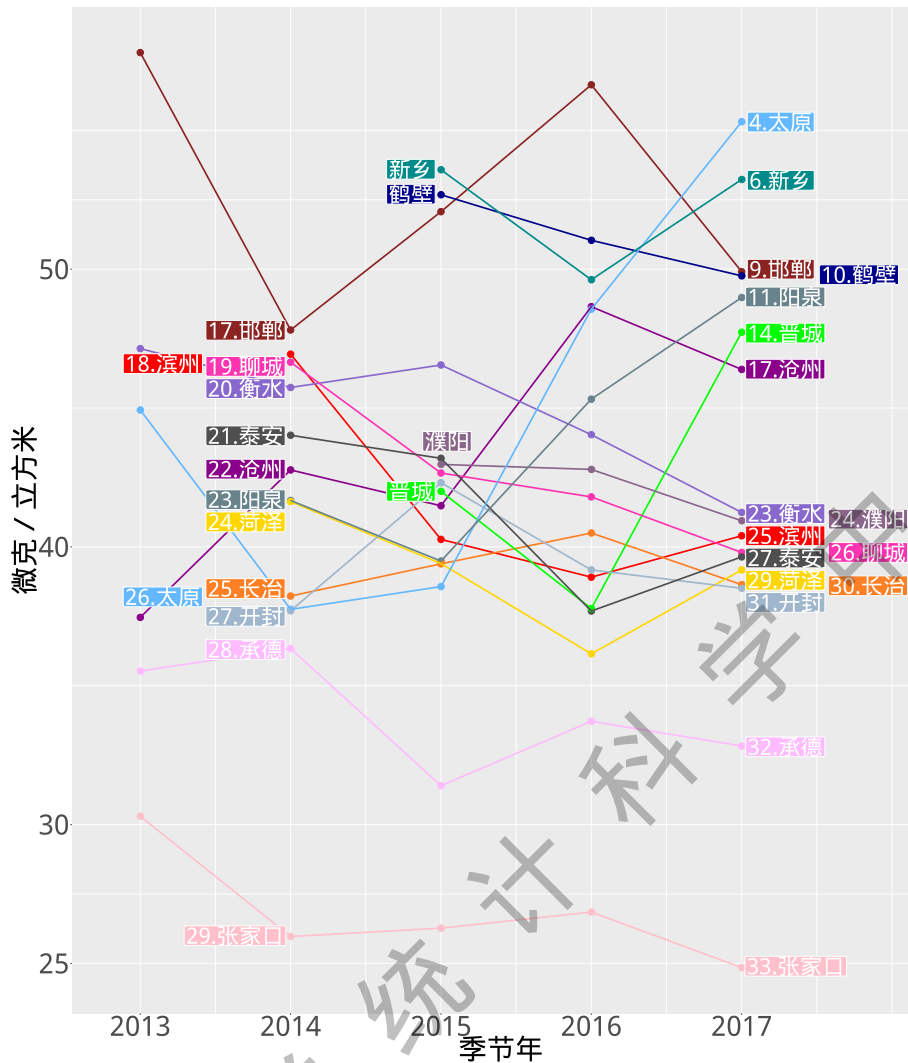


图 46: 京津冀及周边晋鲁豫地区 33 市 17 名城市气象调整后二氧化氮季节年平均浓度(微克/立方米)年际变化图
(新乡、濮阳、鹤壁和晋城 4 城市因为 2014 年某些季度数据缺失而仅给出 2015 年至 2017 年平均浓度)

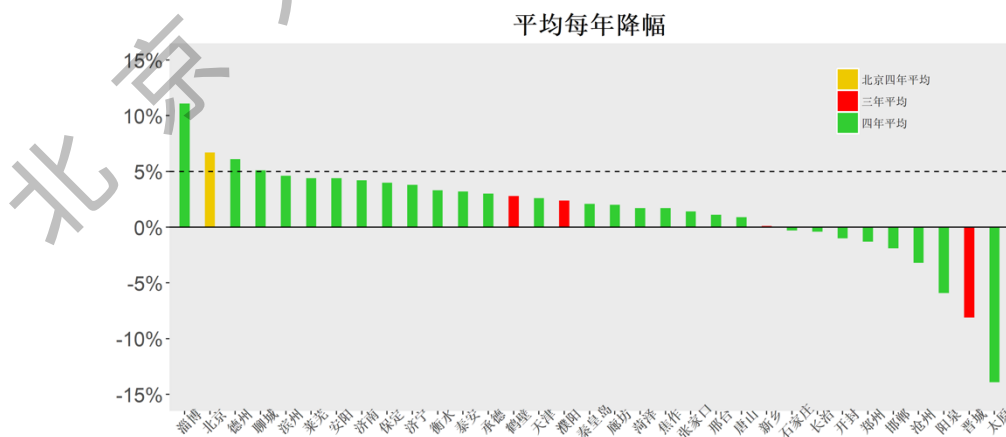


图 47: 京津冀及周边晋鲁豫地区 33 市气象调整后季节年二氧化氮四年(绿色)或三年(红色)平均降幅图
(用红色柱表示的新乡、鹤壁、濮阳和晋城因 2014 年部分季度数据缺失而计算的三年平均降幅)

(五)一氧化碳

一氧化碳(CO)是一种无色、无味、无臭的气体,是主要并且排放量最大的大气污染物之一[12],这也是为什么它的测量单位是毫克/立方米而非微克/立方米。一氧化碳的人为源主要是矿物燃料燃烧过程中的不完全燃烧,其中大部分来自交通工具,是由内燃机炉壁的冷却作用造成的。此外,森林砍伐、草原和废弃物的焚烧也是来源之一。一氧化碳对人体的危害主要是阻碍体内氧气输送,使人体缺氧窒息。作为大气污染物的一氧化碳,其主要危害在于能参与光化学烟雾的形成,以及造成全球性的环境问题。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。

我国目前一氧化碳平均浓度标准如表 7。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。

表 7: 我国目前一氧化碳平均浓度标准

污染物项目	平均时间	浓度限值		单位
		一级	二级	
一氧化碳	24 小时平均	4	4	毫克/立方米
	1 小时平均	10	10	

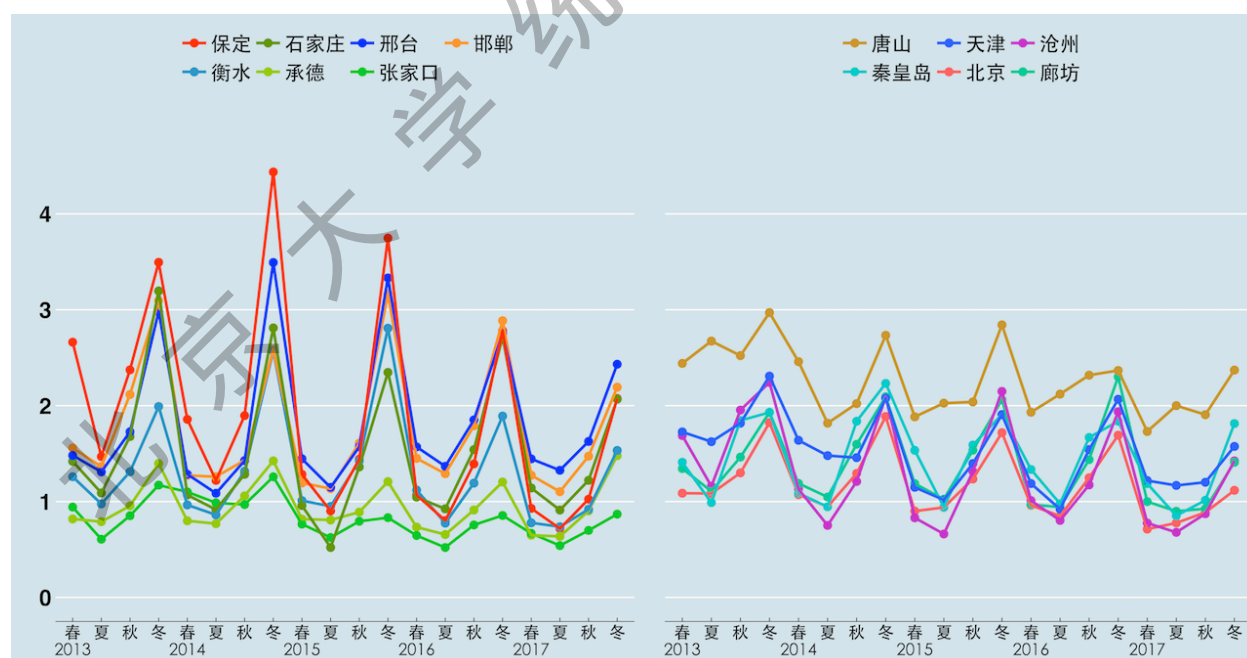


图 48: 京津冀 13 市气象调整后 2013 年至 2017 年一氧化碳季节平均值浓度(毫克/立方米)时间序列图

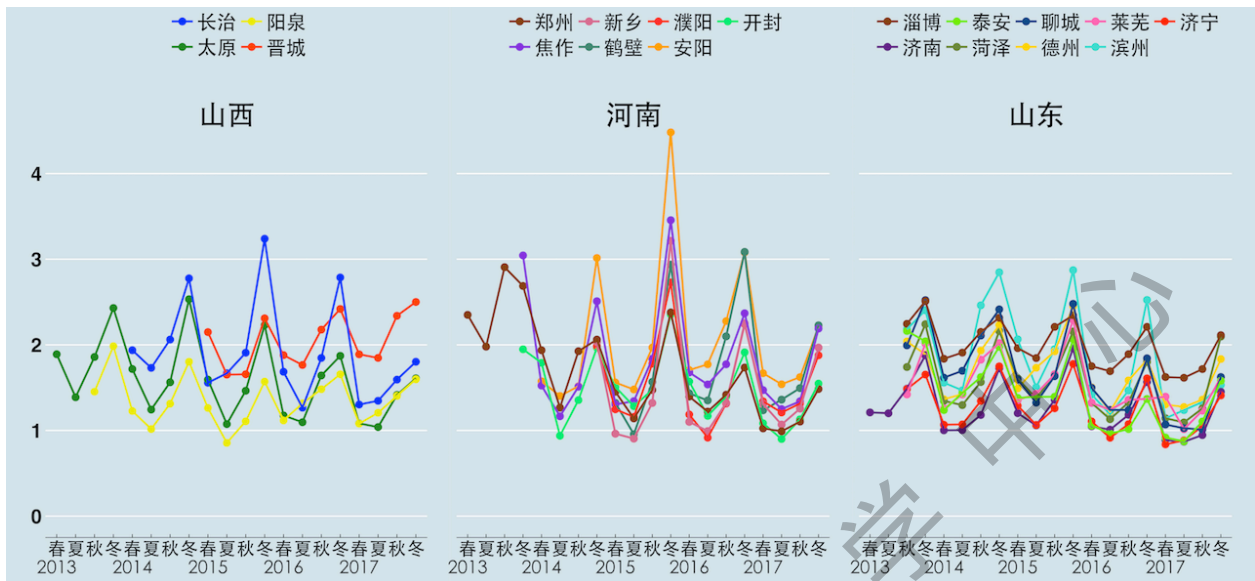


图 49: 京津冀周边晋鲁豫 20 市气象调整后 2013 年至 2017 年一氧化碳季节平均值浓度(毫克/立方米)时间序列图

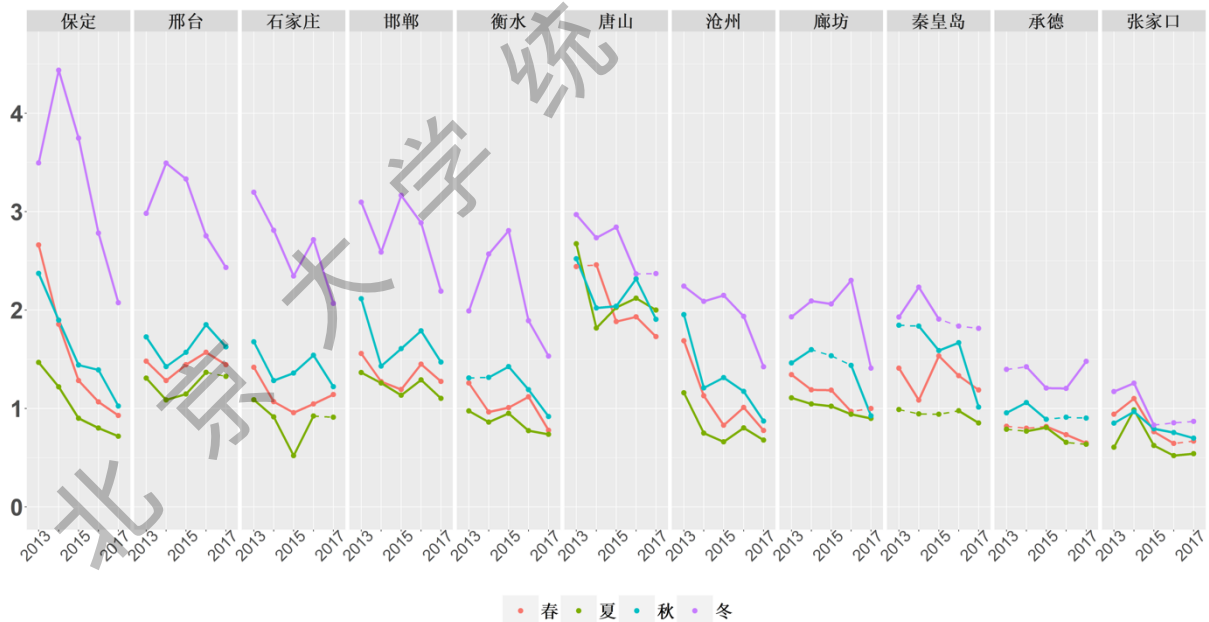


图 50: 河北省 11 市气象调整后 2013 年至 2017 年一氧化碳季节平均浓度(毫克/立方米)的变化序列图
(实线(虚线)代表在 5% 统计学显著水平比上年有(无)显著增加或减少)



图 51: 北京、天津和山东省 9 市气象调整后 2013 年至 2017 年一氧化碳季节平均浓度(毫克/立方米)的变化序列图
(实线(虚线)代表在 5% 统计学显著水平比上年有(无)显著增加或减少)

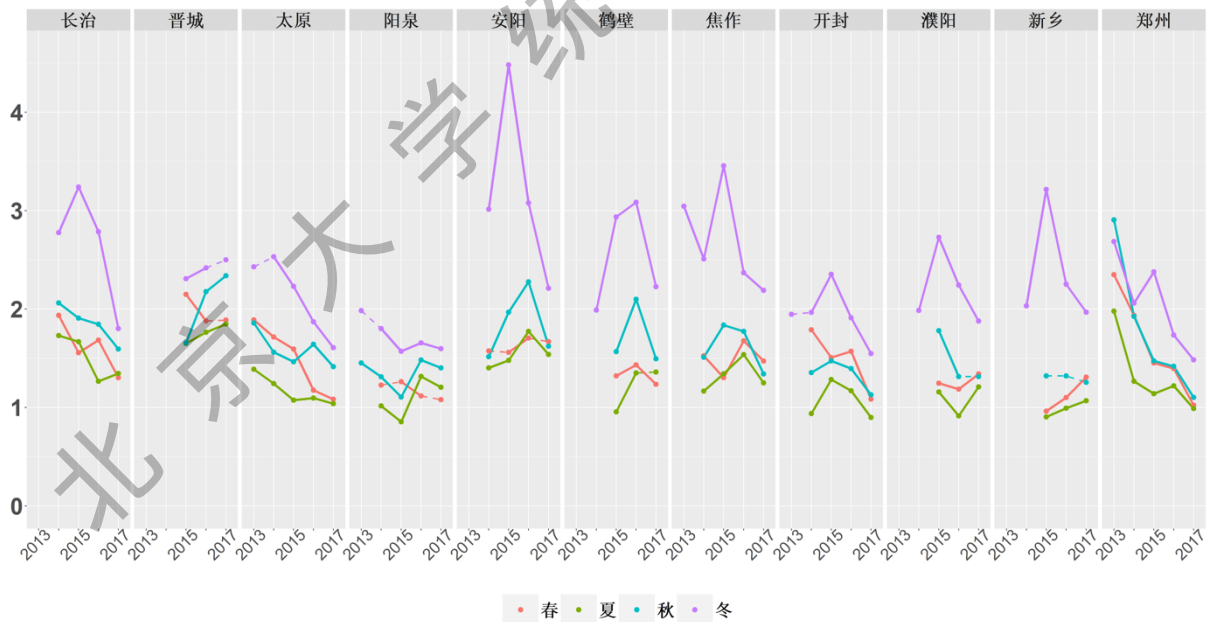


图 52: 山西省 4 市和河南省 7 市气象调整后 2013 年至 2017 年一氧化碳季节平均浓度(毫克/立方米)的变化序列图
(实线(虚线)代表在 5% 统计学显著水平比上年有(无)显著增加或减少)

- **京津冀 13 市四个分区，唐山自成一区**

由图 48，我们可以根据一氧化碳浓度水平和冬夏两个季节一氧化碳的浓度差异，将**京津冀 13 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 4 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 3 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，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，比其它环渤海城市高出一倍左右，这反映了唐山的钢铁产能。

晋鲁豫三省之间一氧化碳浓度整体差异不大，河南要高于山东。河南的季节差异最明显，冬夏季比值为 2 左右。山西和山东变动趋势相似。其中山东淄博与唐山市相似，四季一氧化碳浓度均高。并且通过图 50 至 52，发现一氧化碳冬季居高的城市有保定、淄博、安阳、焦作、鹤壁、新乡、濮阳、滨州和郑州。

- **季节特征**

从图 50 至图 52，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}、PM₁₀、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），河南省除开封、郑州外 5 市，山西省长治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），山东省 9 市，河南省开封、郑州，山西省太原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。山西省晋城、阳泉季节差异不大。

- **治理效果显著，仅晋城年均浓度不降反升，保定降幅尤为明显**

在各城市一氧化碳的年均浓度变化中，就 2017 年最终结果来看，仅晋城市出现年均浓度较初始年份增加的现象，晋城市一氧化碳浓度在 2015 年至 2017 年逐年增加，且在 2017 年以 2.144 毫克/立方米的浓度明显高于其他城市，位居第一位。其余城市的一氧化碳浓度均呈现明显降低，其中保定市的降幅尤为明显，从 2014 年的最高浓度 2.353 毫克/立方米降至 2017 年的 1.187 毫克/立方米，城市相对排名也从第 1 名降至第 21 名（This is amazing）。除了保定外，在 2017 年退出最严重 16 强城市的还有滨州（从第 4 名升至第 17 名）、天津（从第 13 名升至第 18 名）、聊城（从第 6 名升至第 22 名）、郑州（从第 9 名升至第 24 名）和太原（从第 10 名升至第 19 名）。总体来看，一氧化碳的污染状况有显著改善。

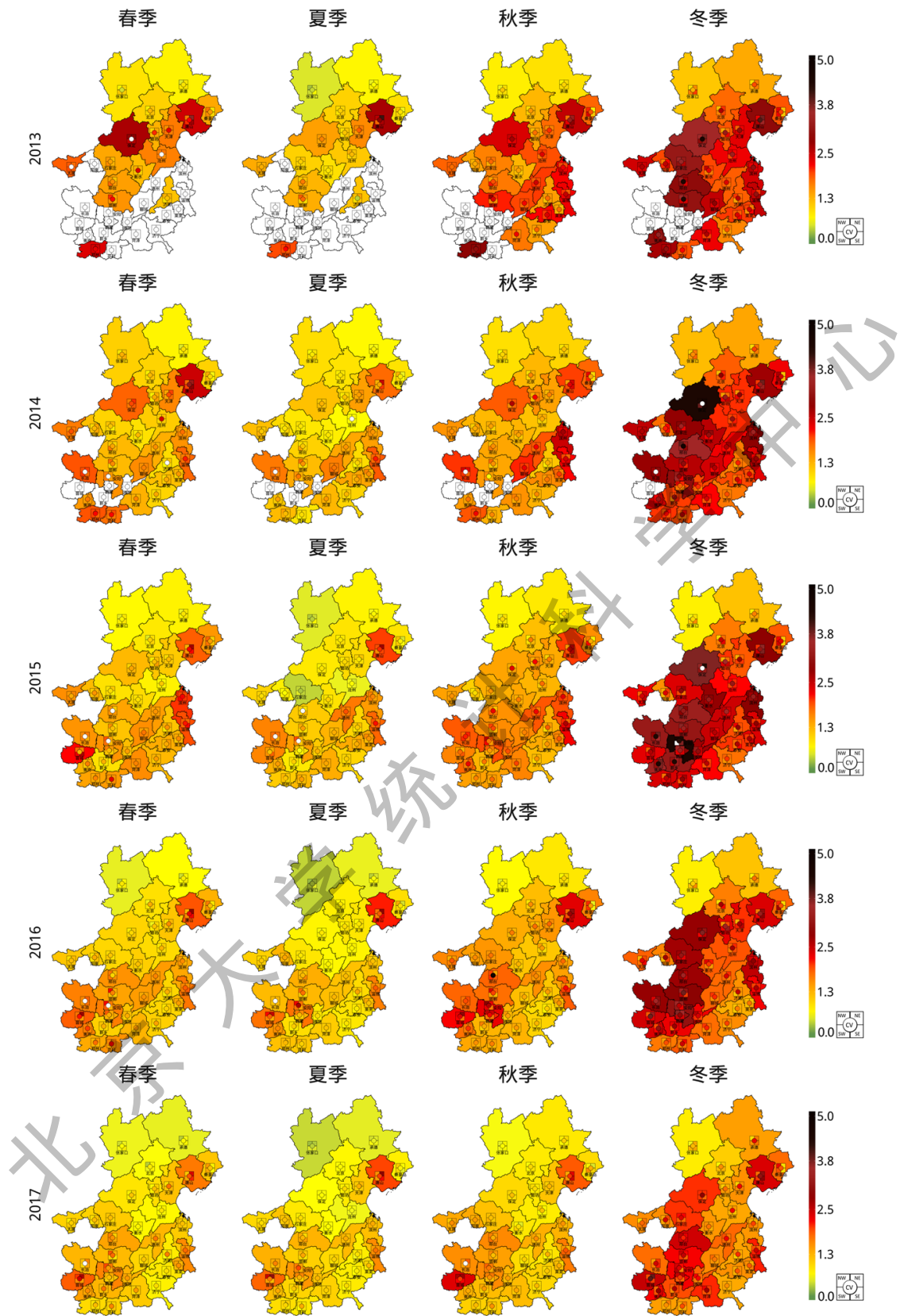


图 53：京津冀及周边晋鲁豫地区 33 市 2013 年到 2017 年气象调整后一氧化碳季节平均浓度(毫克/立方米)地图

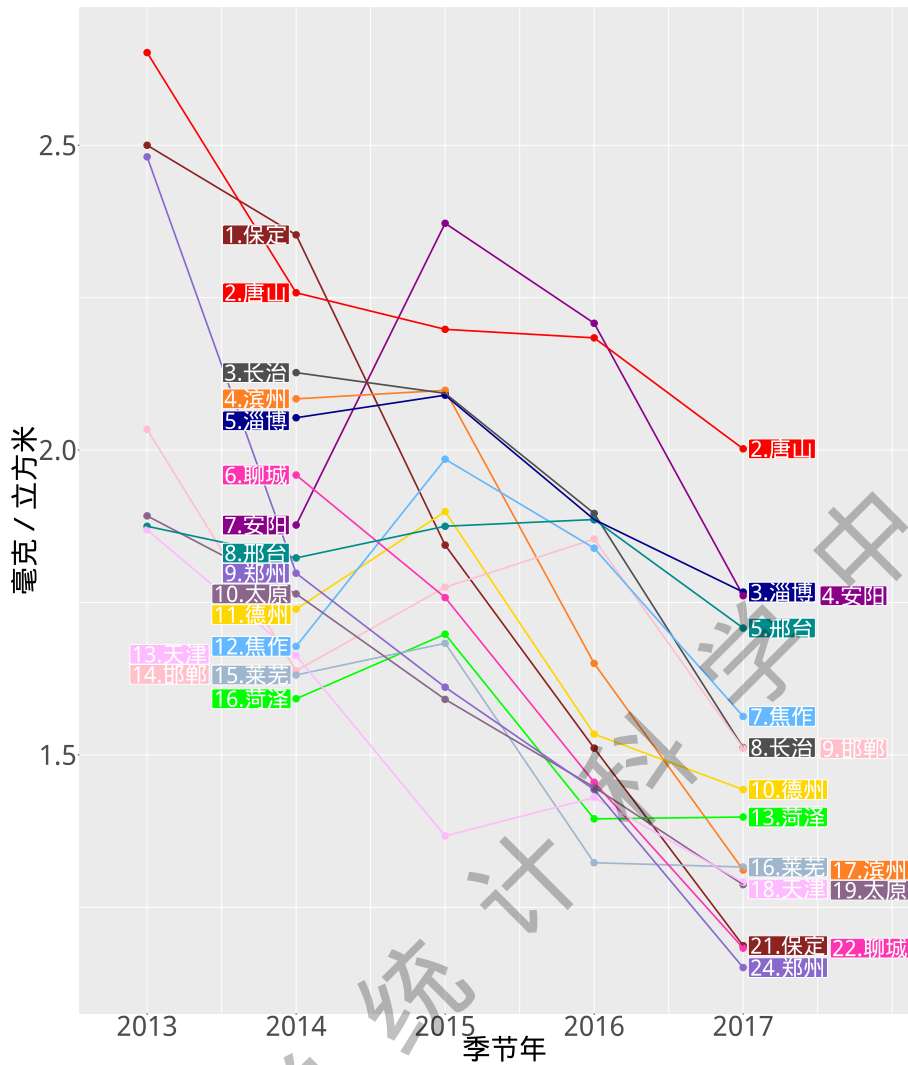


图 54: 京津冀及周边晋鲁豫地区 33 市前 16 名城市气象调整后一氧化碳季节年平均浓度(微克/立方米)年际变化图
(2014、2017 季节年的排名均以当年浓度为基准)

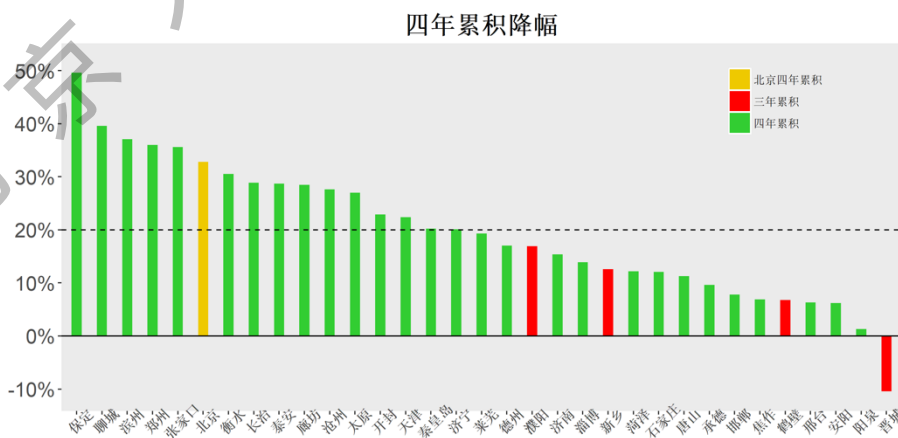


图 55: 京津冀及周边晋鲁豫地区 33 市气象调整后季节年一氧化碳四年 (绿色) 或三年 (红色) 累积降幅图
(用红色柱表示的新乡、鹤壁、濮阳和晋城因 2014 年部分季度数据缺失而计算的三年累积降幅)

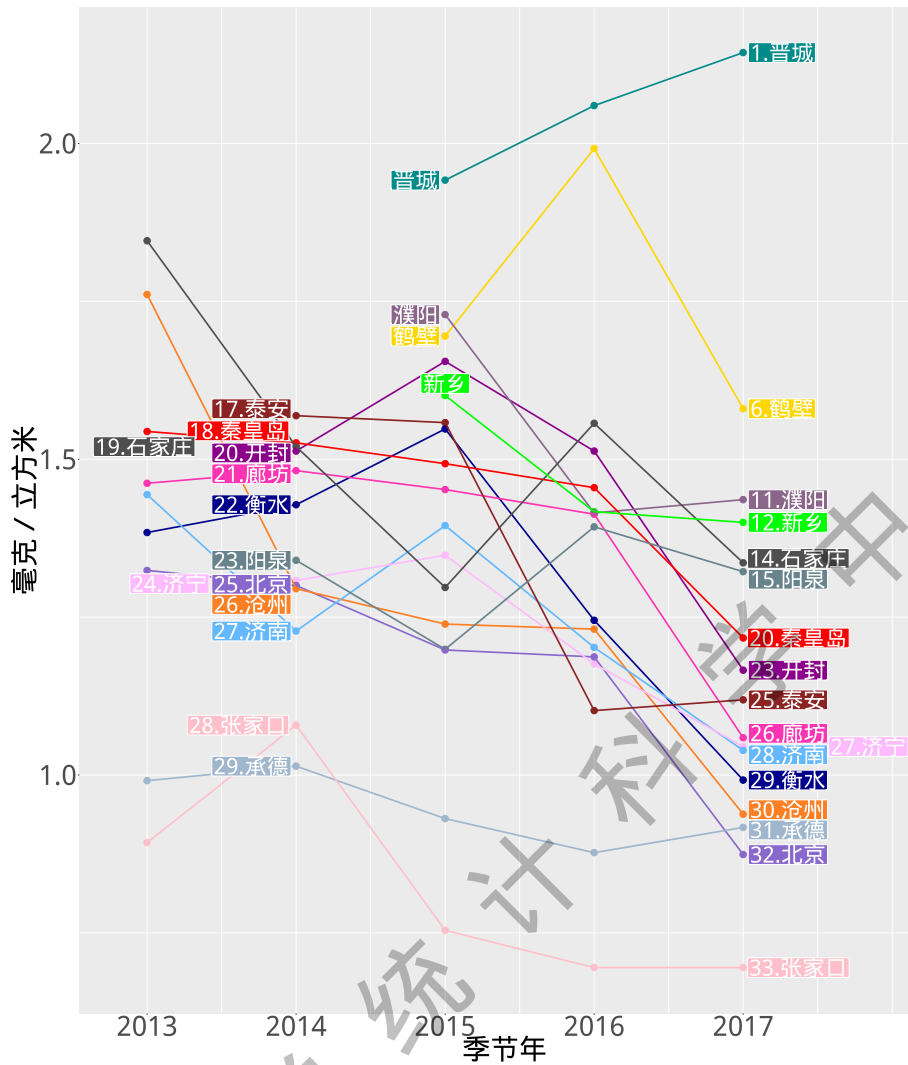


图 56: 京津冀及周边晋鲁豫地区 33 市后 17 名城市气象调整后一氧化碳季节年平均浓度(微克/立方米)年际变化图
(新乡、濮阳、鹤壁和晋城 4 城市因为 2014 年某些季度数据缺失而仅给出 2015 年至 2017 年平均浓度)

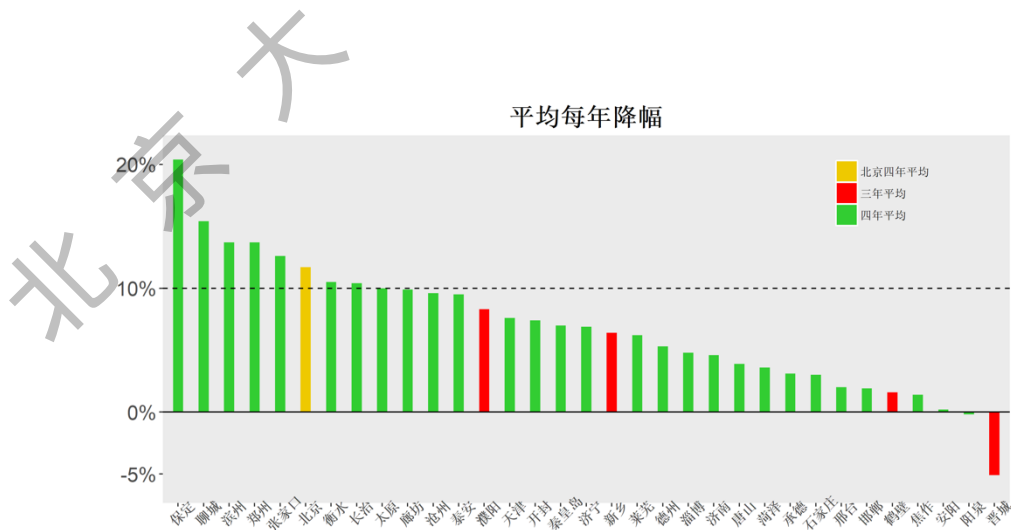


图 57: 京津冀及周边晋鲁豫地区 33 市气象调整后季节年一氧化碳四年 (绿色) 或三年 (红色) 平均降幅图
(用红色柱表示的新乡、鹤壁、濮阳和晋城因 2014 年部分季度数据缺失而计算的三年平均降幅)

- 累积降幅较大，保定市累积降幅为 50%左右

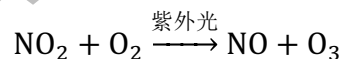
从图 55 累积降幅和图 57 年均降幅来看，“2+31”城市中多数地区呈现显著改善，北京市的累积降幅和平均降幅均位于第 6 位，山西省治理情况仍然处于末尾，晋城市降幅为负，阳泉市累积降幅也明显低于其他城市。保定市降幅尤为显著，在 50%左右，整体来看 25 个城市累积降幅大于 20%，整体改善显著。但一氧化碳低于二氧化硫的改善程度。

(六)臭氧

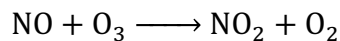
臭氧(O₃)是一种有强氧化性的气体。在距离地面高约 15~35km 的范围内，有厚约 20km 的臭氧层，吸收太阳辐射的紫外线，起到保护人类与环境的重要作用。但是，在对流层大气中如果臭氧浓度增加，就会造成一系列的不利于人体健康的影响。由于臭氧具有强氧化性，被吸入呼吸道时，就会与呼吸道中的细胞、流体和组织很快反应，导致肺功能减弱和组织损伤[12]。同时，臭氧可促使空气中的大量气体污染物转化为颗粒物，进而转化为PM_{2.5}。因此，近地面臭氧浓度超标，其危害程度不亚于PM_{2.5}超标。

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。根据环境保护部 2014 年上半年全国环境质量状况显示，各地区，尤其是珠三角和长三角等经济发达地区，在努力降低PM_{2.5}浓度的过程中，不可避免地发现臭氧已成为 5~10 月间的首要污染物，污染加重的趋势不容忽视。

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。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日最高的 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。

一天 24 小时中，各个小时的臭氧浓度不同并且差异很大，这是因为臭氧的生成极易受到光照强度的影响，光照越强，臭氧浓度越高。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 小时臭氧浓度，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。

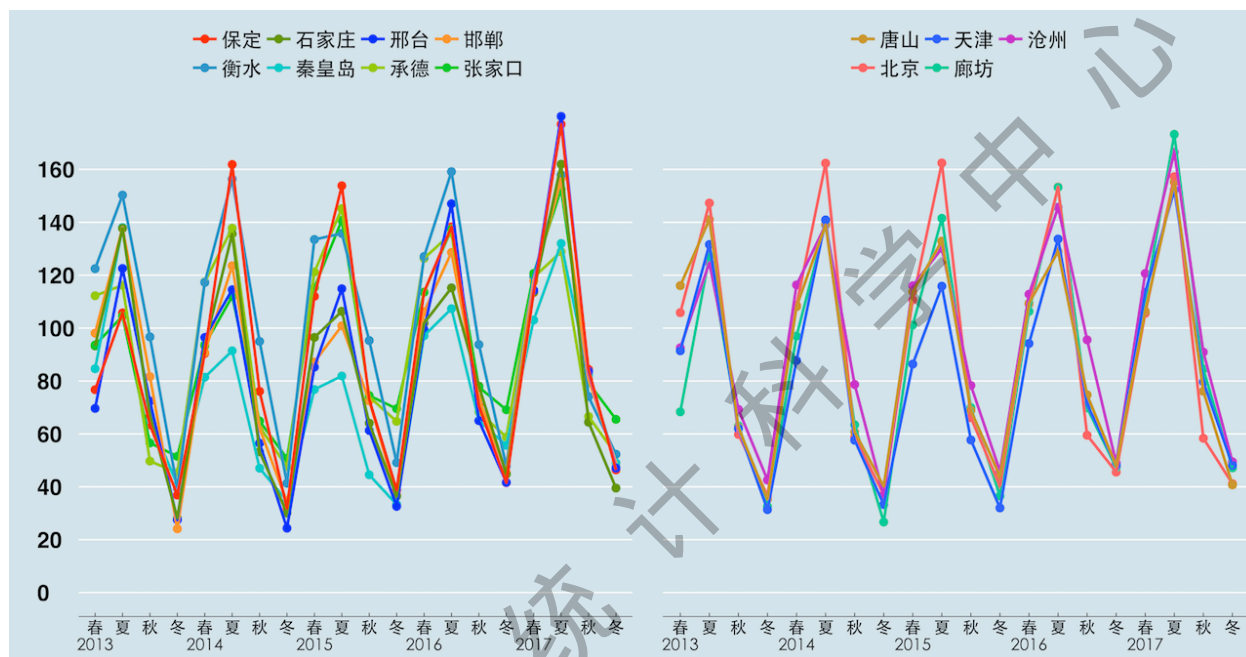


图 58：京津冀 13 市气象调整后 2013 年至 2017 年 8 小时臭氧季节平均值浓度(微克/立方米)时间序列图

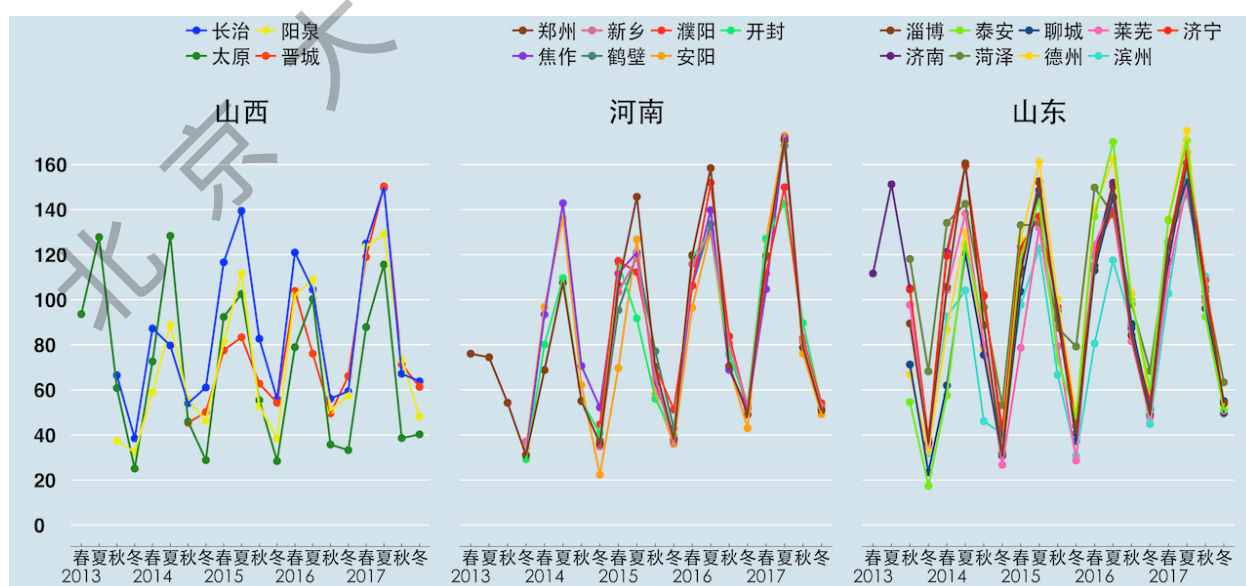


图 59：京津冀周边晋鲁豫 20 市气象调整后 2013 至 2017 年 8 小时臭氧季节平均值浓度(微克/立方米)时间序列图

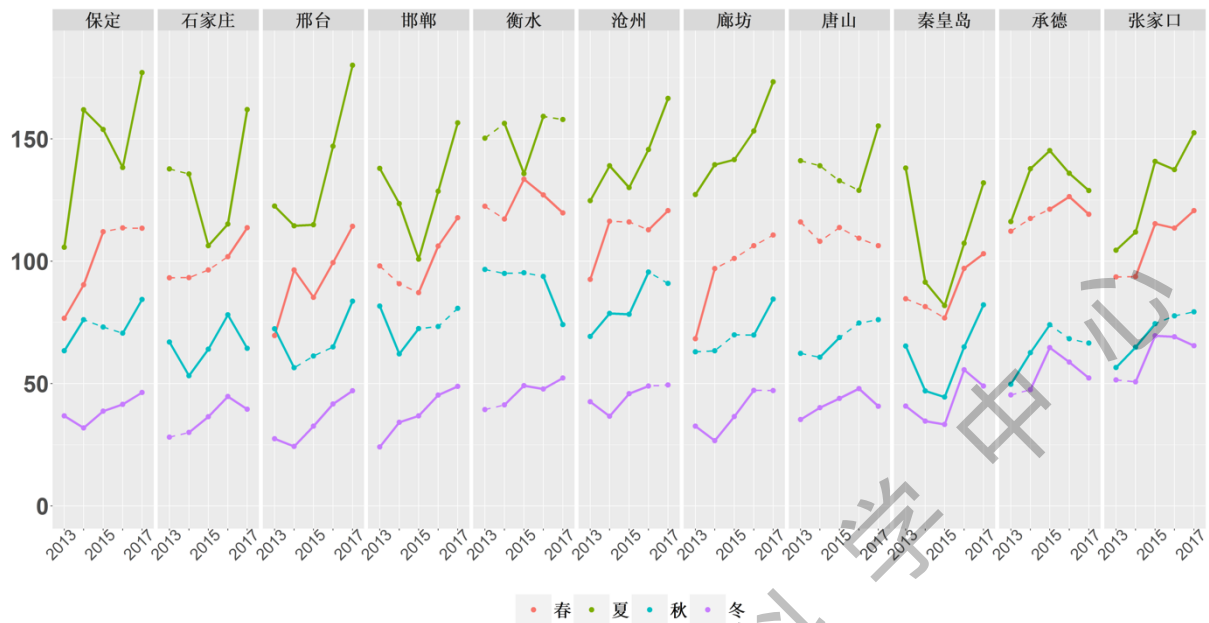


图 60: 河北省 11 市气象调整后 2013 年至 2017 年 8 小时臭氧季节平均浓度(微克/立方米)的变化序列图
(实线(虚线)代表在 5% 统计学显著水平比上年有(无)显著增加或减少)

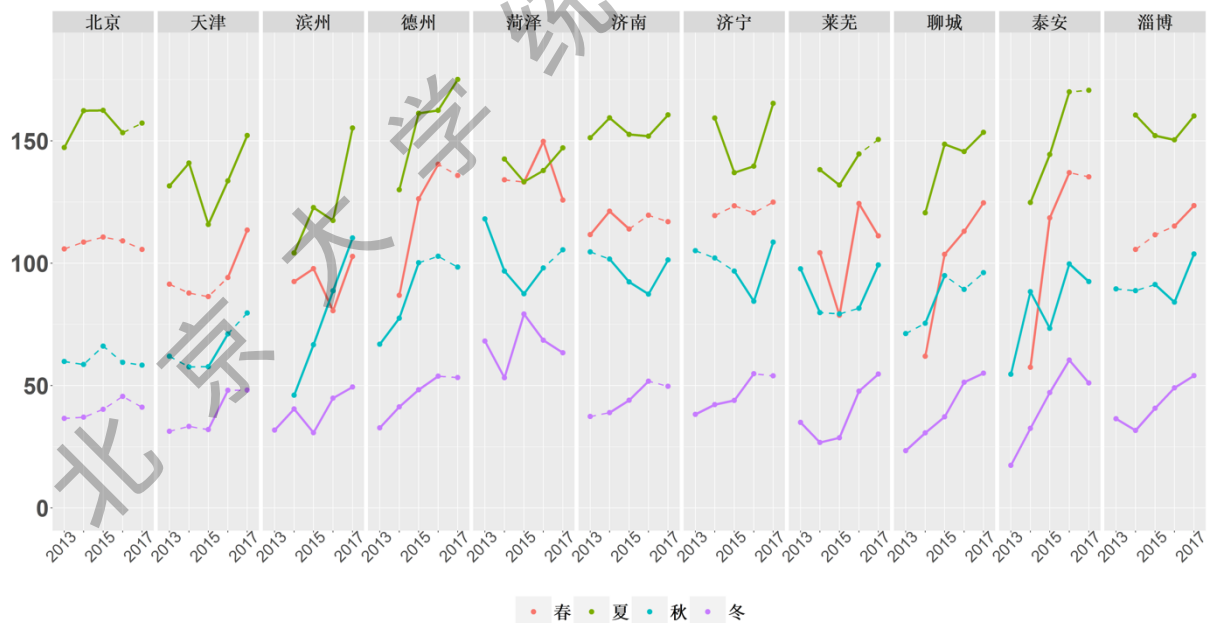


图 61: 北京、天津和山东省 9 市气象调整后 2013 至 2017 年 8 小时臭氧季节平均浓度(微克/立方米)的变化序列图
(实线(虚线)代表在 5% 统计学显著水平比上年有(无)显著增加或减少)

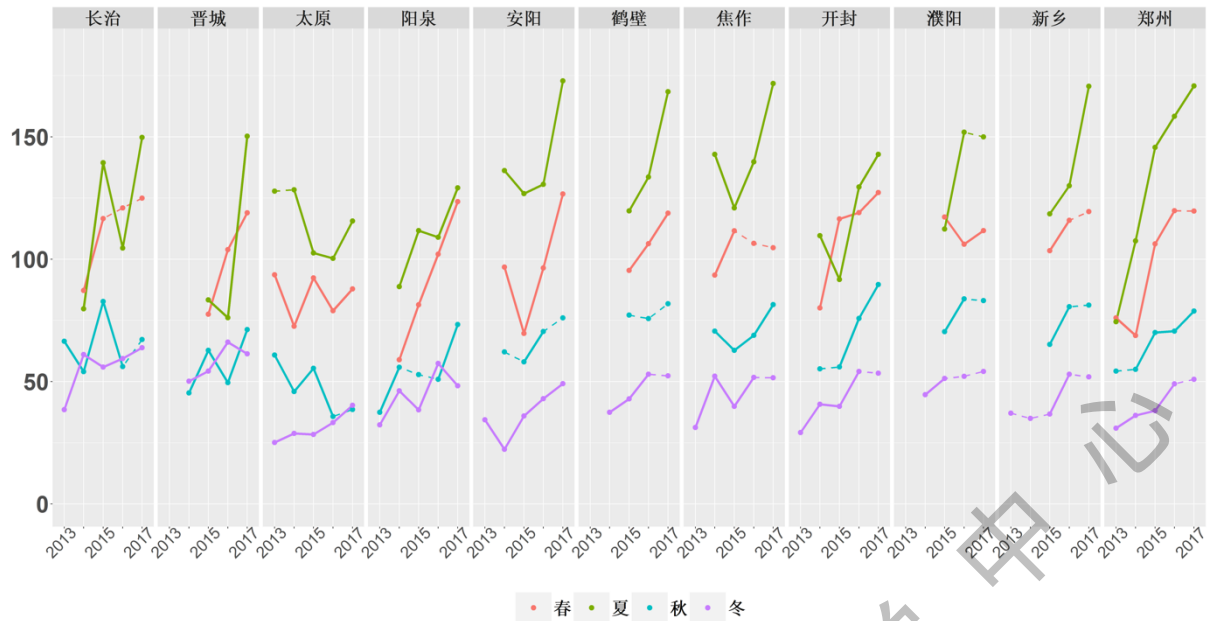


图 62：山西省 4 市和河南省 7 市气象调整后 2013 至 2017 年 8 小时臭氧季节平均浓度(微克/立方米)的变化序列图
(实线(虚线)代表在 5% 统计学显著水平比上年有(无)显著增加或减少)

- **区域特征**

京津冀 13 市整体相差不大，没有明显的分区。晋鲁豫中，山西的臭氧污染略低于山东和河南。

- **季节效应**

从图 60 至图 62 可以看出，臭氧同样具有明显的季节效应，夏季臭氧的浓度一般是冬季的 2 到 3 倍，这可以从图中直观的看到。山西长治、晋城季节差异较其他城市不大。但与前五种污染物明显不同的是，臭氧在夏季浓度最高，冬季最低。这是由于夏天光照强，臭氧的产生与光照强度高度相关而造成的。京津冀地区和晋鲁豫 20 市 8 小时臭氧浓度整个夏季的平均值基本都超过了中国和世卫组织 100 微克/立方米的标准。可以说，夏季臭氧污染已经成为京津冀及周边晋鲁豫大气污染的一个突出问题。

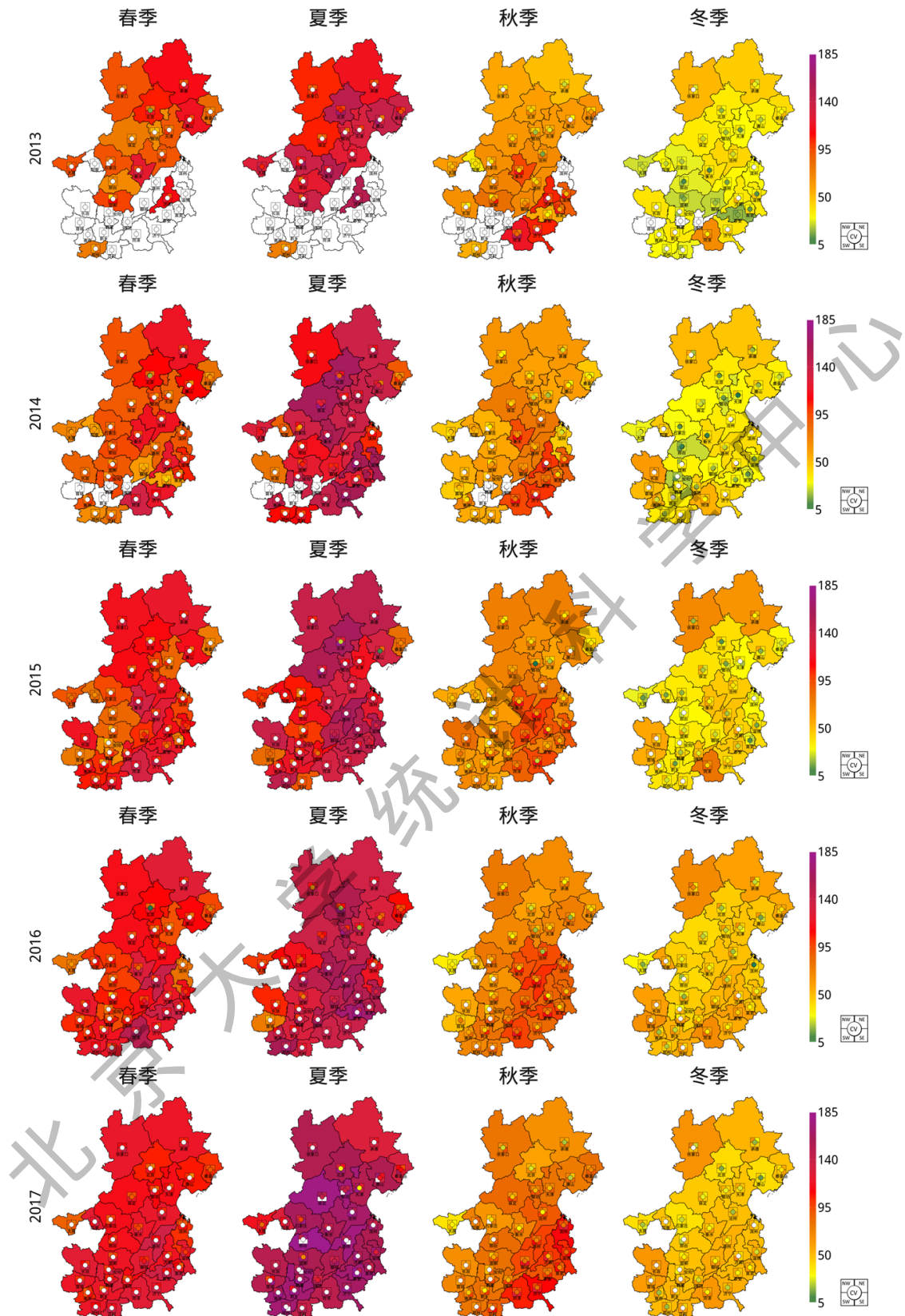


图 63：京津冀及周边晋鲁豫地区 33 市 2013 年到 2017 年气象调整后 8 小时臭氧季节平均浓度(微克/立方米)地图

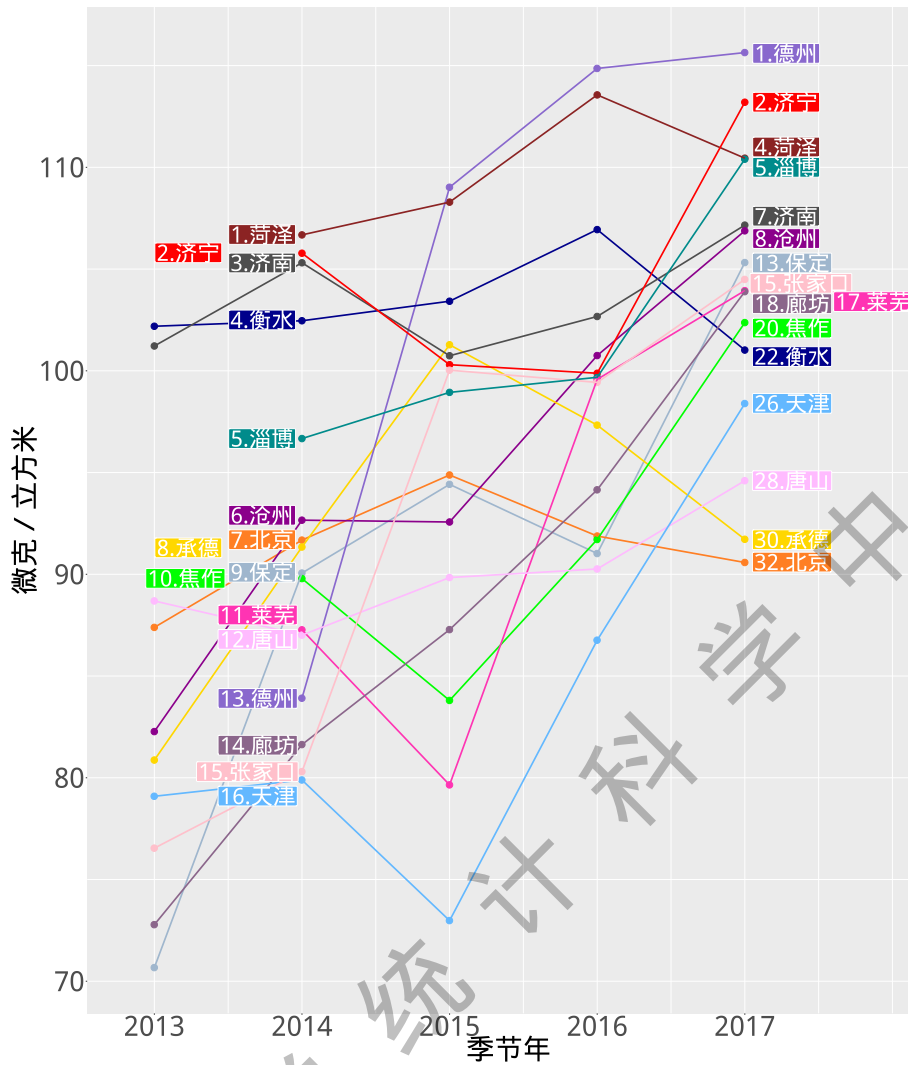


图 64: 京津冀及周边晋鲁豫地区 33 市前 16 名城市气象调整后 8 小时臭氧季节年平均浓度(微克/立方米)年际变化 (2014、2017 季节年的排名均以当年浓度为基准)

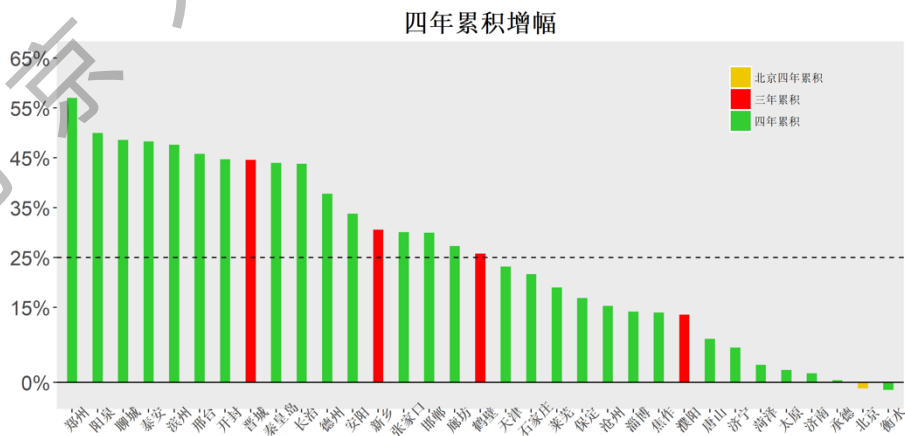


图 65: 京津冀及周边晋鲁豫地区 33 市气象调整后季节年 8 小时臭氧四年 (绿色) 或三年 (红色) 累积增幅图 (用红色柱表示的新乡、鹤壁、濮阳和晋城因 2014 年部分季度数据缺失而计算的三年累积增幅)

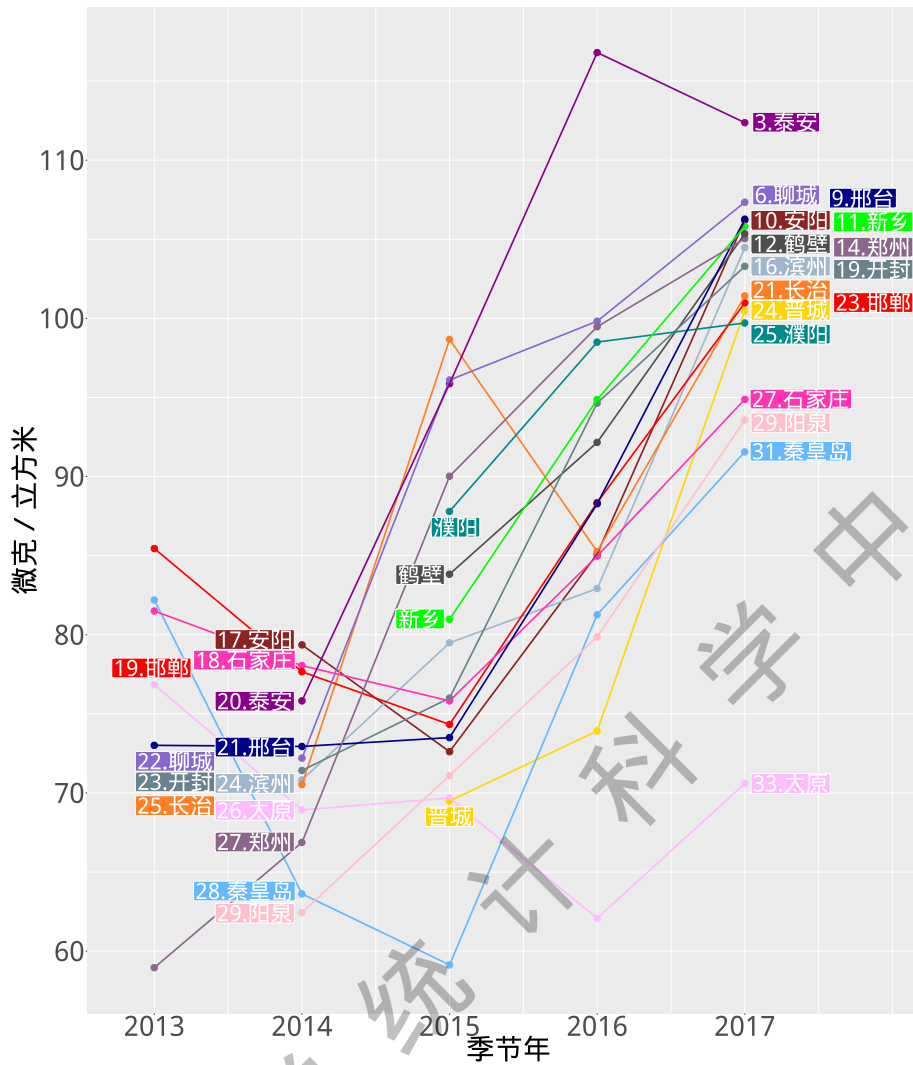


图 66: 京津冀及周边晋鲁豫地区 33 市后 17 名城市气象调整后 8 小时臭氧季节年平均浓度(微克/立方米)年际变化 (新乡、濮阳、鹤壁和晋城 4 个城市因为 2014 年某些季度数据缺失而仅给出 2015 年至 2017 年平均浓度)

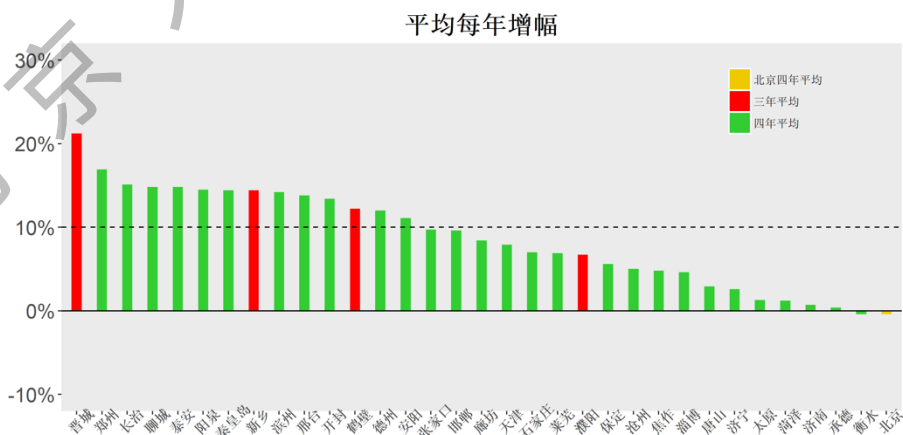


图 67: 京津冀及周边晋鲁豫地区 33 市气象调整后季节年 8 小时臭氧四年(绿色)或三年(红色)平均增幅图 (用红色柱表示的新乡、鹤壁、濮阳和晋城因 2014 年部分季度数据缺失而计算的三年平均增幅)

- **绝大部分城市年均臭氧浓度一致上升且幅度较大，需引起注意**

通过图 64、66 发现，与前五种污染物的明显改善状况不同，除衡水和太原外，其余城市在 2017 年的臭氧浓度较其初始年份（北京初始年份为 2013 年）均有所上升，其中部分城市出现大幅度上升，比如德州的臭氧年均浓度从 2014 年的 83.9 微克/立方米上升至 2017 年的 115.6 微克/立方米，排名也从第 13 名变为第 1 名，变成 2017 年臭氧污染最严重的城市。泰安的臭氧浓度从 2014 年的 75.8 微克/立方米上升至 2017 年的 112.4 微克/立方米，排名从第 20 名变成第 3 名，呈现直线上升的态势。

通过分析 2014 年和 2017 年的城市排名，发现 2014 年与 2017 年的城市排名差异很大。有 8 个城市在 2017 年退出最严重 16 强行列，同时也有 8 个城市进入了最严重 16 强城市。退出最严重 16 强行列的城市有衡水、北京、承德、焦作、莱芜、唐山、天津和廊坊，其中承德、衡水、北京的排名升高最多，分别从 2014 年的第 8、4、7 升高至 2017 年的第 30、22、32 名，北京在 2017 年的排名在所有城市中排名倒数第二位（最后一名为太原）。进入最严重 16 强城市的有泰安、聊城、邢台、安阳、新乡、鹤壁、郑州和滨州。

- **区域一致性特征不明显，郑州臭氧四年累积增幅最大**

从图 65 累积增幅和图 67 年均增幅的城市数据来看，臭氧的相对变动幅度大，郑州的臭氧年均浓度累积增幅超过 55%。此外，臭氧浓度增幅的城市相对排名和其他污染物出现较大的不一致性，比如新乡的臭氧浓度平均增幅位于第 8 位，而在 PM_{2.5} 平均降幅中位于第一位，邯郸的臭氧浓度在 2017 年处于第 23 位而 PM_{2.5} 浓度在“2+31”城市中最高，这反映出臭氧和 PM_{2.5} 的趋势变化出现一定的反向性，这与高浓度颗粒物影响光照强度，阻碍了臭氧的生成的作用原理有关。

五、区域煤炭消耗与工业运行数据分析

人类经济和生活活动所产生的化石类能源燃烧排放是产生大气污染的主要原因。为了对前几节的大气污染物的浓度变化提供解释，我们将在本节分析 2011 年以来京津冀晋鲁豫四省二市的煤炭消耗及主要工业产品产量情况。数据来源于国家统计局网站和中国煤炭资源网。

我国主要的煤炭消费行业可以分为以下四个：电力（火力发电和供热）、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，它会造成多十几倍的污染排放[13]。我们将分别从煤耗总量和各行业煤耗量两个方面进行分析。图 68 给出了京津冀晋鲁豫四省二市 1995-2017 年煤炭消费总量的统计。图 69 给出了冀晋鲁豫四省主要类别的年度煤耗量统计。为了对京津

冀晋鲁豫地区各行业的煤耗量变化有更深入的了解，我们在图 70 中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。

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%。但北京 2016 年气象调整后的 PM_{2.5} 季度平均值与 2015 年同期相比并未显著下降，甚至在秋冬两季仍有反弹。2017 年是北京《北京市 2013-2017 年清洁空气行动计划》的收官之年，北京市大规模取消燃煤锅炉，加大清洁能源采暖比重。随着“煤改气”工作的全面实施，2017 年的煤炭消费量比 2016 年下降了 63.6%。自 2017 年 4 月起，北京市电力行业耗煤量降至零，其它类的耗煤量也进一步下降。与此同时，北京市的 PM_{2.5} 均值大幅下降，这与北京市能源结构的大幅转变应该有密切关系。

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。天津的煤炭消费量在 2013 年达到六千万吨，到 2017 年，天津市自然年的年度消费量下降了 37.7%。2016 年和 2017 年，天津市的电力行业和其它类耗煤量有明显下降，这说明天津市的煤耗结构变化主要发生在 2016 年，这也同其进行的“煤改气”计划密切相关。天津市的生铁和粗钢产量在 2016 年秋季开始同比上升，2017 年春季和夏季仍保持同比上升的趋势，这样的变化趋势同样在发电量上得到了体现。这说明，同 2013-2015 年相比，天津市的工业（经济）在 2016 年和 2017 年上半年有所回暖。但在 2016 年四个季度和 2017 年春夏两季并未见 PM_{2.5} 平均值的明显变化趋势，这说明天津正在进行工业能源结构的转型，开始更清洁地使用煤炭能源。在 2017 年秋季，天津的生铁和粗钢产量有一个大的下降，煤炭消耗量下降，这反映在 PM_{2.5} 的平均值在 2017 年有了显著下降。

作为中国的煤炭消费的大省之一，河北省的煤炭消费总量从 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，在 2013 年达到三亿二千万吨的峰值，是 2001 年的 2.5 倍。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）。河北省的煤炭消耗量从 2013 年起就一直持续下降，从 2013 年至 2017 年，河北省的自然年年度煤炭消费量下降了 19.0%，其中电力行业耗煤量下降了 3.3%，冶金行业下降了 17.2%，其它类大幅度下降了 73.6%。作为钢铁生产大省，河北省的生铁产量在 2017 年三个季度生铁和粗钢总产量基本与

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。

2016 年持平，但这三个季度中冶金行业的耗煤量却比去年同时期下降了 7.5%，并且河北省各城市的 PM_{2.5}和二氧化硫也在逐年下降，这说明河北省钢铁行业的煤炭利用效率已经有了明显的提高。

河南省最主要耗煤行业为电力行业，占总耗煤量的 40~50%。2011 年为河南省耗煤量最多的年份，2012 年有所下降，之后几年基本持平。由于河南省南部城市未实现集中供暖，因此河南省电力行业供暖耗煤量在冬季并未有明显升高的趋势。2017 年河南省的自然年年度煤炭消费量比 2011 年下降了 20%，其中主要下降在冶金行业和其它类。这反映在河南省 2017 年的 SO₂ 均值有明显的下降趋势，但 PM_{2.5} 平均值变化并不明显。这与河北省情况相似，说明冶金行业的煤耗量和散煤的减少对二氧化硫的下降有较为显著的影响，并间接导致 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的下降。

作为煤炭消费大户之一的山东省自 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。山东省最主要的耗煤产业为电力行业。山东省 2015-2017 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，2017 年回落到 4.1 亿吨。2016 和 2017 年山东省冶金产品产量的变化趋势与天津市基本相同，直到 2017 年秋季有明显下降趋势，2017 年秋季电力、冶金行业和其它类耗煤量均同比下降超过 15%。但尽管山东省耗煤量在 2013-2016 年有上升趋势，但 PM_{2.5} 和二氧化硫的均值均有逐年下降的趋势。这说明山东省的能源利用率远高于其他省市。

中国产煤第一大省山西的消费量低于山东省，略高于河北省。从 2013 年（山西省年度耗煤量达到最高）起，山西省自然年年度煤炭消费量逐年下降，2016 年降为 2.8 亿吨，2017 年却有所反弹，同比上升 1.0%。其中 2017 年春夏两季上升最为明显，其中主要上升的为电力行业和冶金行业，其它类下降超过 30%。散煤燃烧的减少对 2017 年山西省的二氧化硫明显的下降趋势有显著影响，对 PM_{2.5} 的下降也有间接的影响。

山东、山西、河南三省的污染物数据与耗煤量数据变化趋势的不一致的一个原因是煤炭消费量的统计是全省，而我们只研究这三省部分城市的污染状况。

京津冀三省市的煤炭消耗量从 2013 年的 3.9 亿吨下降到 2017 年的 2.9 亿吨，下降了 25%。但晋鲁豫三省从 2013 年的 9.5 亿吨到 2017 年的 9.2 亿吨，仅下降了 3.2%。这一降低比率低于全国同期（2013 年 42.2 亿吨，2017 年 39.3 亿吨）6.9% 的下降比率。其中山东省从 2013 年的 3.7 亿吨增加至 2017 年的 4.1 亿吨，增幅达到 10.8%。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。

我们发现近几年煤炭消耗的下降主要在含散煤的“其它类”。从图 69 我们发现河北、河南和山西从 2014 年开始“其它类”煤炭消耗均有显著的下降，目前三省均控制在 1300 万吨以下。而山东

“其它类”煤炭消耗过去几年变化不大，高居于 4500 万吨左右。我们建议“京津冀大气污染传输通道”城市减煤重点应该是山东省的“其它类”。

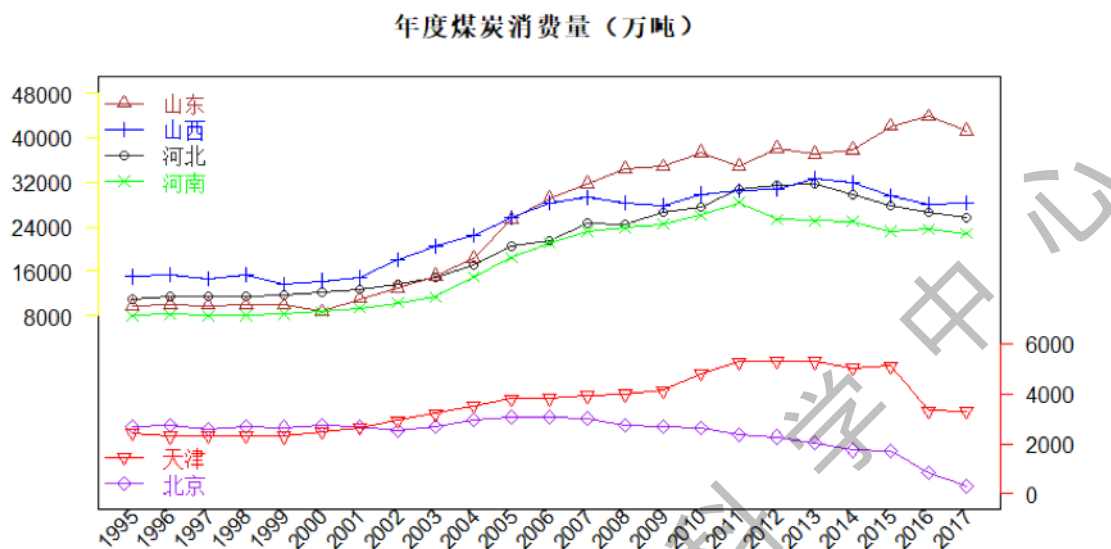
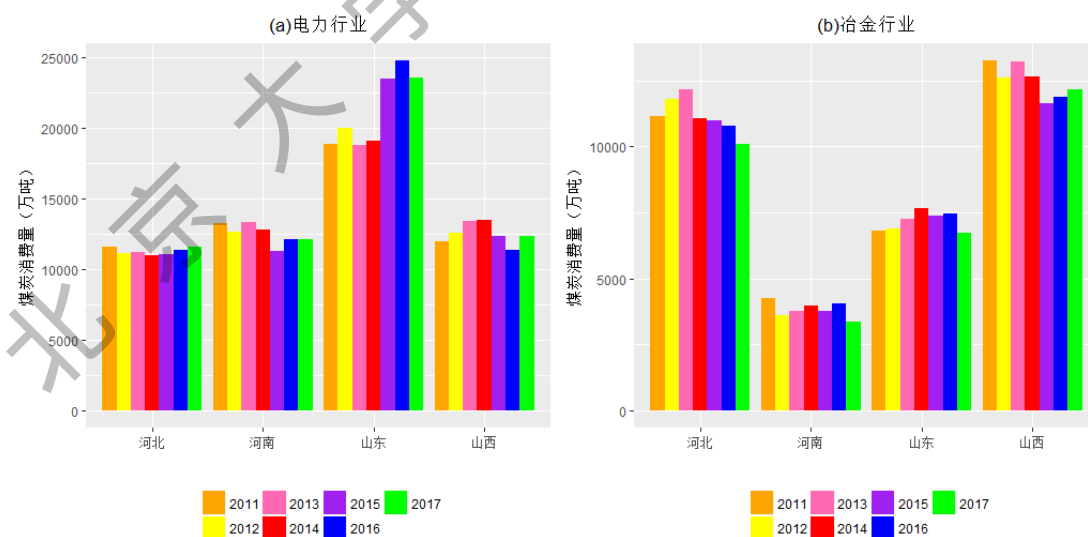


图 68：京津冀晋鲁豫四省二市年度煤炭消费量(万吨)
 (1995-2014 年数据来自国家统计局网站，2015-2017 年数据来自中国煤炭资源网)



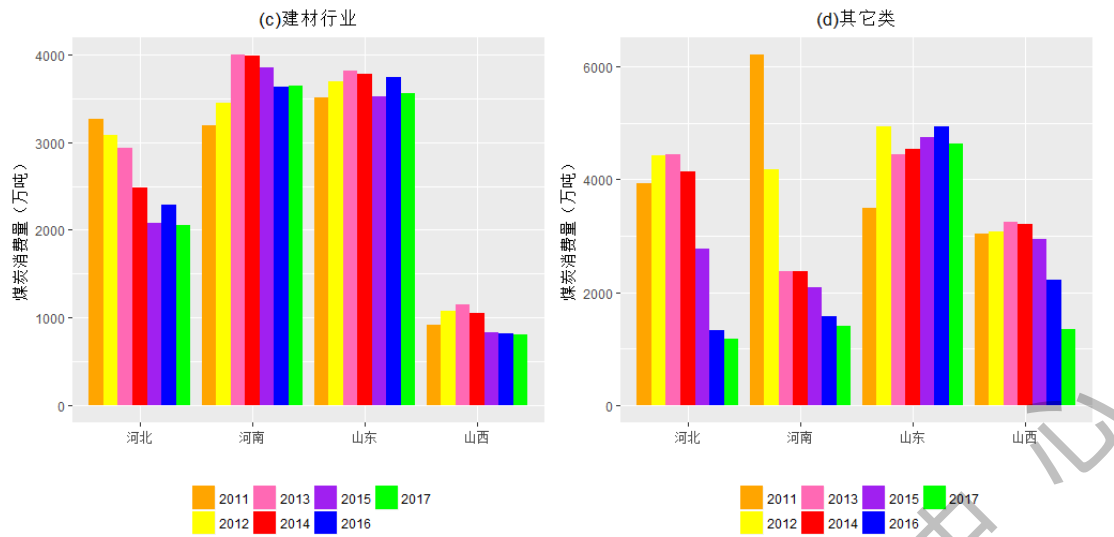


图 69：冀晋鲁豫四省分行业年度煤炭消耗总量（万吨）

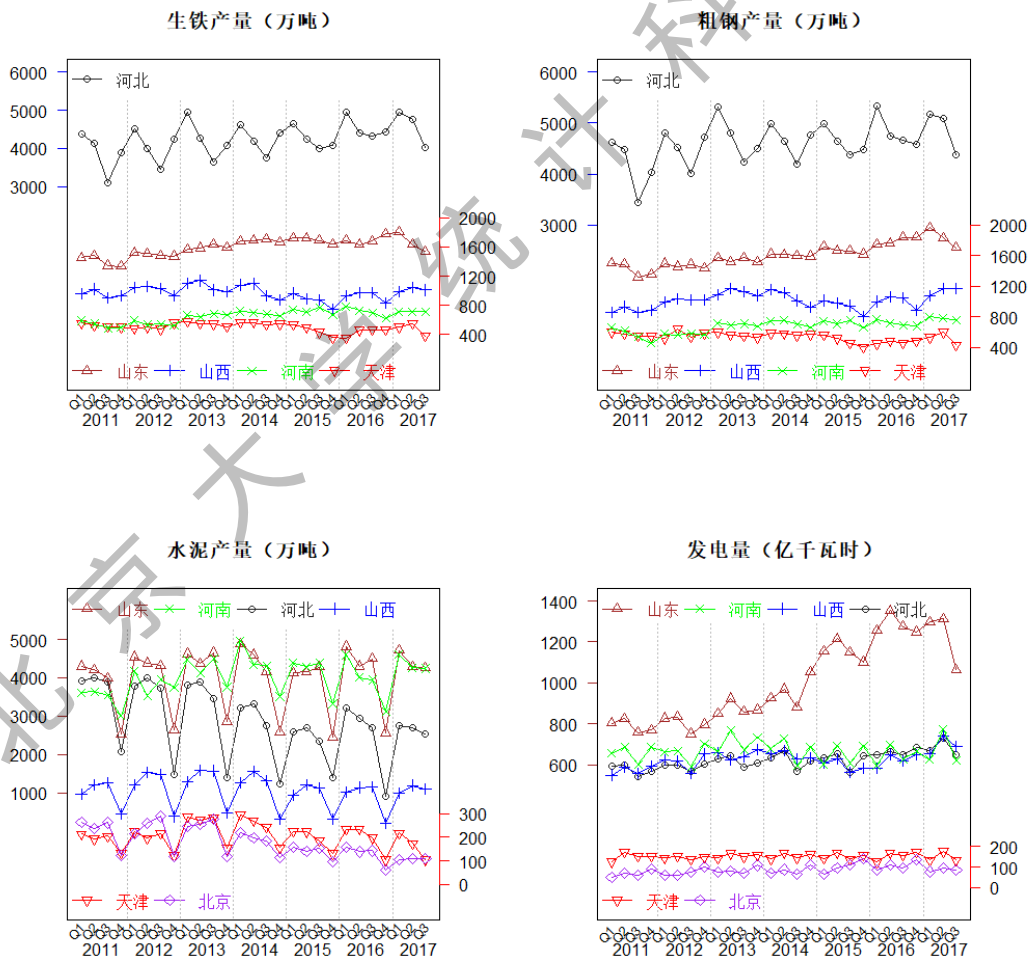


图 70：京津冀地区耗煤工业产品季度总产量及季度总发电量

六、总结与建议

图 71 和图 72 汇总了“2+31”城市 6 个分区 2013 年至 2017 年六个污染物经气象调整的平均季节年浓度水平的变化。综合这两张图和前面第四和五节对京津冀及周边晋鲁豫地区多种污染物浓度变化及能源消耗的分析，我们对“2+31”城市过去五年 20 个季度的空气质量状况及变化趋势得到如下总结论，并提出一些建议供各部门参考：

（一）PM_{2.5} 和 PM₁₀

经过五年的治理，京津冀地区 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 污染已经有了明显改善。京津冀 13 市 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 平均浓度分别从 2013 年的 103.78 微克/立方米和 178.35 微克/立方米下降到 2017 年的 64.05 微克/立方米和 114.72 微克/立方米，降幅达 32.28% 和 35.68%；北京市 PM_{2.5} 平均季节年浓度从 2013 年的 84.2 微克/立方米下降到 2017 年的 55.3 微克/立方米。京津冀均达到了“国十条”设立的 2017 年目标。

山东 9 城市和河南 7 城市也完成了“国十条”所规定的 PM_{2.5} 下降 20% 的目标。相比之下，山东和河南的减少程度低于京津冀。京津冀平原上“2+8”市 PM_{2.5} 四年累积降幅为 31.2%，而山东、河南、山西省分别为 26%、20% 和 2.6%。PM₁₀ 四年累积降幅京津冀平原上“2+8”市为 28.3%，而山东、河南、山西省分别为 19.4%、15.3% 和 4.9%。鲁豫 16 市每年 PM_{2.5} 平均值每年减少 5 微克/立方米左右，远小于京津冀平原上“2+8”市平均每年减少 10 微克/立方米的水平。山西省近两年 PM_{2.5} 浓度在持续增加！这些反应了京津冀及周边晋鲁豫大气污染治理的不平衡。山西省要加大颗粒物治理的力度。

2017 年秋冬两季京津冀鲁豫地区 PM_{2.5} 浓度下降明显，沿太行山脉、环渤海、河北北部、山东和河南这五个区域 PM_{2.5} 秋冬两季四年累积降幅分别为 29.1%、29.2%、22.5%、22.6% 和 14.4%。山西省不降反升，秋冬两季四年累积增幅为 3.9%。相比 2016 年，2017 年秋冬两季京津冀鲁豫地区 PM_{2.5} 浓度明显下降，这跟工业供暖季限产有很大的关系。沿太行山脉、环渤海和河北北部三个区域 PM_{2.5} 分别下降 20.5%、21.9% 和 13.5%。山东、河南分别下降 5.0% 和 5.2%，而山西升高了 9.0%。

尽管过去四年 PM₁₀ 有显著的下降，但 2017 年“2+31”城市中仍有 29 个城市的 PM₁₀ 的年均浓度在 100 微克/立方米以上。几乎所有“2+31”城市 PM_{2.5} 在 PM₁₀ 中的比例有下降的趋势。

根据“国十条”给北京市设定的 2017 年目标（60 微克/立方米），以及考虑到近几年我国空气质量的改善，我们认为以 75 微克/立方米作为二十四小时“优良空气”的上界已过于宽松，应对该标准进行调整。我们建议使用 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。这必将为下一步的大气污染防治提供新的目标和动能，将促进我国空气质量的进一步改善。

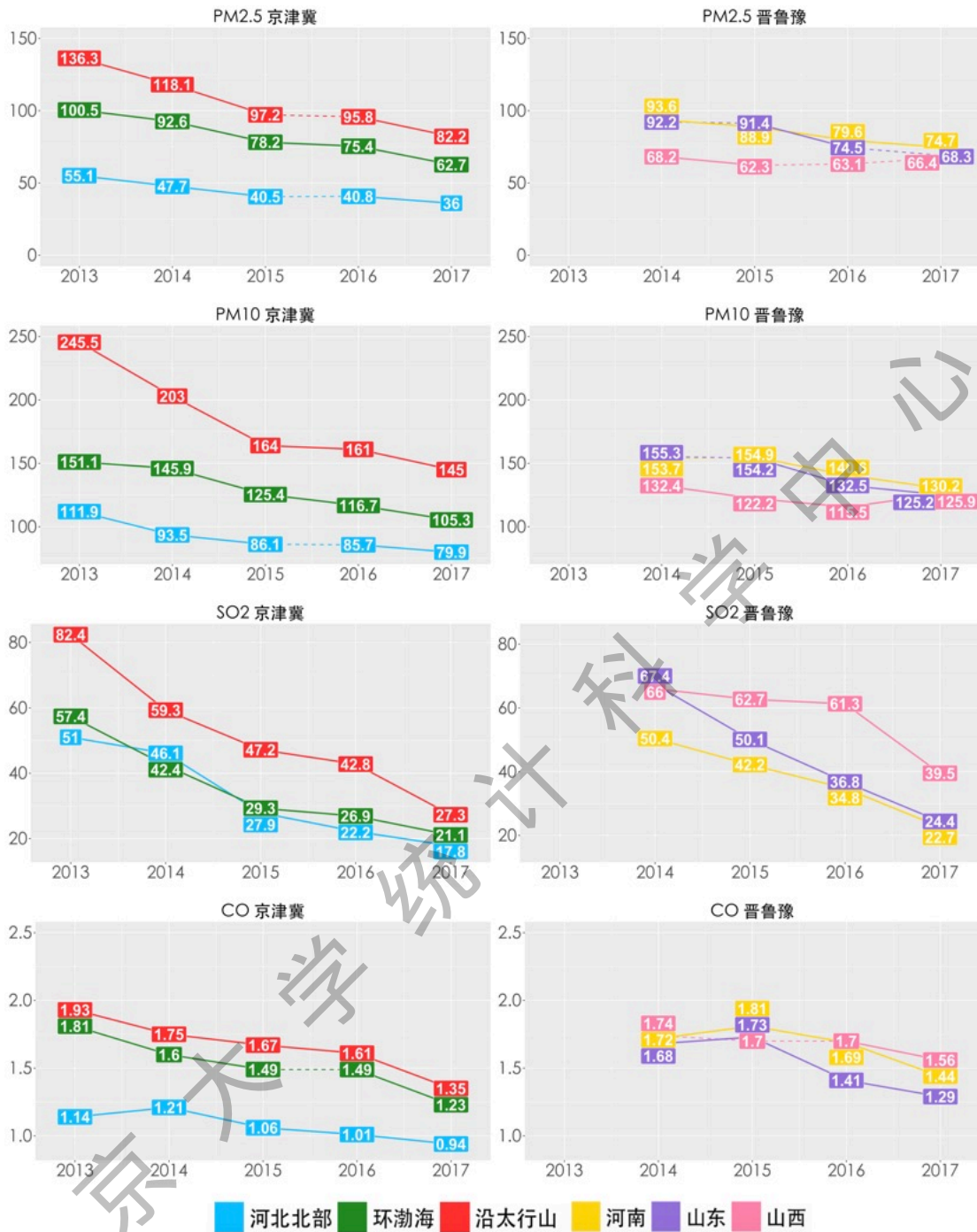


图 71：“2+31”城市气象调整后 PM_{2.5}、PM₁₀、二氧化硫和一氧化碳年平均浓度时间序列（微克/立方米）
（实线（虚线）代表在 5% 统计学显著水平比上年有（无）显著增加或减少）

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；**河南：**安阳、鹤壁、焦作、开封、濮阳、新乡、郑州；
山东：滨州、德州、菏泽、济南、济宁、莱芜、聊城、泰安、淄博；**山西：**太原、阳泉、长治、晋城

（二）二氧化硫和一氧化碳

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，京津冀二氧化硫的降低趋势显著，尤其是沿太行山地区。晋鲁豫地区中，山东九市的二氧化硫浓度降低也很显著，近两年每年降幅均超过 25%。区域性二氧化硫的显著下降是京津冀和晋鲁豫过去五年大气污染治理的最大亮点，也是区域范围 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 显著下降的主要推手。我们注意到虽然山西省二氧化硫浓度在 2017 年下降很多，但是这一下降并没有反映到 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 上，并且出现 PM_{2.5} 不降反升的情况。山西省的情况值得进一步研究。

“2+31”城市一氧化碳的下降幅度要远远小于二氧化硫的下降幅度。这是由于一氧化碳不止依赖于煤炭消费，也来自机动车排放，而我国大气污染治理对机动车的排放控制一直慢于对煤炭消费的管控。京津冀平原上的“2+8”市的减少幅度要高于晋鲁豫 20 市。晋鲁豫一氧化碳只从 2016 年开始才有下降，晚了前者两年，下降幅度也小很多。

（三）二氧化氮

近四年，京津冀晋鲁豫二氧化氮改善不大，九个城市不降反升，其中包括石家庄、开封、郑州、邯郸、沧州、长治、晋城、阳泉、太原。山西自 2014 年上升 21.7%。山东在 2015 年和 2016 年两年小幅下降后，在 2017 年有反弹。其余地区二氧化氮下降幅度较小，四年累积下降幅度多在 10% 上下，远远低于二氧化硫和一氧化碳的下降程度。尽管二氧化氮的主要来源是机动车尾气及生物质燃烧，但由于本研究所用的 172 个国控站多在城市中心区，其所度量的二氧化氮应该主要源于机动车排放。这表明机动车排放的控制应该是下一步大气治理的重点。另外由于二氧化氮和臭氧的双向互动反应（见 55 页），近几年臭氧的上升（如下一点所示）中和了更多的二氧化氮。所以各级部门且不可认为二氧化氮在京津冀及周边地区是基本得到控制。

（四）8 小时臭氧

“2+31”城市的 6 个地区过去四年低空 8 小时臭氧浓度均呈现上升的趋势，臭氧污染加重的问题日益突出。过去四年山西和河南省的上升幅度最大（分别为 36% 和 35.2%），山东省与京津冀地区由于基数高，上升趋势相对较缓（山东省 22.4%，京津冀平原上“2+8”市平均为 17.4%），多数城市四年累积增幅大于 25%。同样地，分析过去四年臭氧浓度最高的春夏两季的累积增幅，我们发现山西和河南省的上升幅度仍然是最大的，山西增幅更是达到了 45.5%，河南省增幅仍是 35.2%；山东省和京津冀平原上“2+8”市增幅分别为 19.6% 和 14.8%。臭氧上升是由于 (i) 作为主要前提物之一的二氧化氮在“2+31”城市改善不大³。(ii) 区域内 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的下降导致空气中悬浮物的减少，

³臭氧的另一类前提物是挥发性有机物 (VOC)，但我们没有这方面的数据，所以对其近几年的情况也不得而知。

提高了产生臭氧所需光照的强度，促进了臭氧生成的效率。(ii) 可以认为是颗粒物减少所带来的暂时的困扰。但 (i) 告诉我们治理臭氧离不开对氮氧化物和机动车排放的治理。

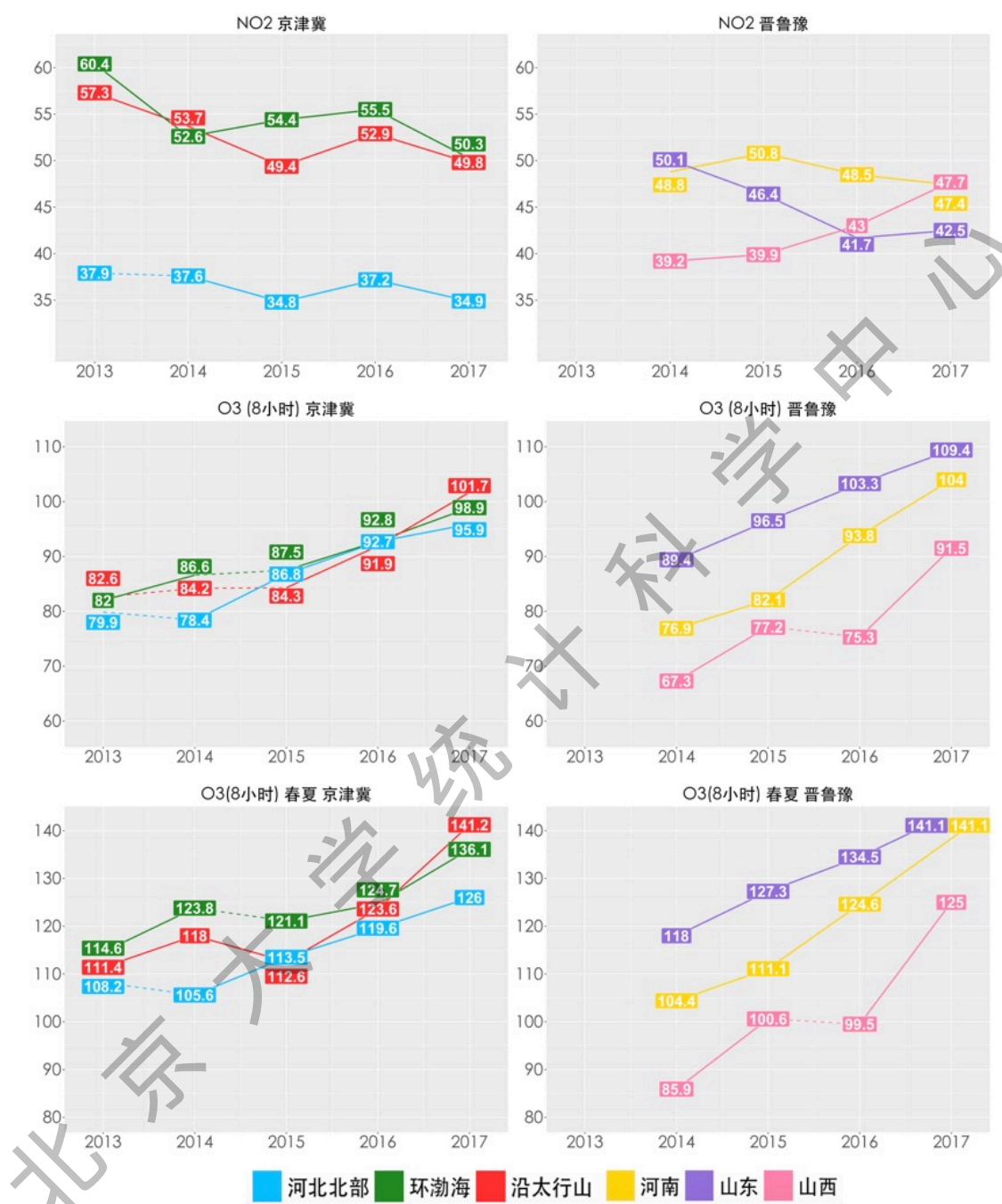


图 72: “2+31” 城市气象调整后二氧化氮和臭氧 8 小时年 (或春夏两季) 平均浓度时间序列 (微克/立方米)
(实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上年有 (无) 显著增加或减少, 图例定义如图 71)

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其增长的趋势、有效降低臭氧浓度。避免面临颗粒物和臭氧污染双重污染的局面。

（五）煤炭消耗

京津冀三省市的煤炭消耗量从 2013 年的 3.9 亿吨下降到 2017 年的 2.9 亿吨，下降了 25.6%。但晋鲁豫三省从 2013 年的 9.5 亿吨到 2017 年的 9.2 亿吨，仅下降了 3.2%。这一下降比率低于全国同期的 6.9%。山东省每年超过 4 亿吨以上的巨大消耗量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纳入大气污染防治的重点监测指标。

从第五节的煤炭数据分析，我们发现近几年煤炭消费的下降主要在含散煤的“其它类”。从图 69 我们发现河北、河南和山西从 2014 年开始“其它类”煤炭消耗均有显著的下降，目前三省均控制在 1300 万吨以下。而山东“其它类”煤炭消耗过去几年变化不大，高居于 4500 万吨左右。我们建议“京津冀大气污染传输通道”城市减煤重点应该是山东省的“其它类”。

（六）气象调整方法

本报告使用经过气象调整的污染物浓度来评价每个城市的大气污染状况。目前常用的方法是基于原始浓度的简单小时平均得到年际变化比率。然而如[15]所指出的，基于原始浓度所得到的年际变化比率受三个因素的影响：当年和去年的气象条件（所谓的“天帮忙”，也称为气象干扰）和背景浓度的变化（所谓的“人努力”）。而本报告使用的去除气象因素的年际变化率，描述的只是背景浓度的变化，所以更适用于度量和评估大气减排的效果。

我们建议使用去除气象干扰的空气质量评估方法，从而使得对各级政府部门大气治理努力程度的评估不受“天帮忙”和“天帮倒忙”的影响。

（七）国控站点布局

目前的国控空气质量监测站点过于集中在城市中心（见图 1），分散度不够、覆盖面不高，影响监测数据的空间效率。我们建议提高测量六种污染物浓度的国控站的数量。这一方面可以通过提升现有省控站而得到，也可以通过使用统计学的实验设计方法合理布站点，提高站点的分散度、有效覆盖面积和监测站点的空间效率。

（八）“京津冀大气污染传输通道”城市

本报告考虑了“2+31”城市，比传输通道城市多了五个（泰安和莱芜以及河北北部三市）。考虑泰安和莱芜是为了填补济南和济宁之间的“空隙”。如以下坐标警示所示，莱芜六个污染物在华北 33 城中均过高。我们发现太原和长治、晋城之间也有一个“空隙”——晋中。我们建议在“2+26”城市基础上加上泰安、莱芜和晋中，以保障“京津冀大气污染传输通道”没有“空隙”。

（九）“2+31”城市四年“人努力”指数

综合六种污染物 2014 年到 2017 年四年累积降幅的平均值，我们在表 8 给出每个城市过去四年的综合改善情况。由于 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 有相当的重合部分，所以尽管我们使用六种污染物等权重平均，PM_{2.5} 所占比例仍高于其他污染物。由于我们的方法去掉了“天帮忙”（气象干扰）的成分，所以表 8 给出的是各城市“人努力”的程度。

表 8：“2+31”城市四年综合改善情况排名表

排名	城市	降幅百分比	排名	城市	降幅百分比
1	保定	31.6%	18	新乡	15.6%
2	北京	30.3%	19	沧州	14.7%
3	衡水	28.8%	20	泰安	14.3%
4	淄博	25.2%	21	濮阳	12.8%
5	天津	23.6%	22	郑州	12.6%
6	济南	23.6%	23	焦作	12.0%
7	济宁	23.5%	24	邢台	11.5%
8	廊坊	22.9%	25	安阳	11.2%
9	承德	21.4%	26	张家口	8.8%
10	莱芜	19.9%	27	鹤壁	8.6%
11	聊城	18.8%	28	邯郸	8.2%
12	德州	18.7%	29	开封	7.4%
13	菏泽	18.6%	30	太原	5.0%
14	滨州	16.5%	31	长治	4.7%
15	秦皇岛	16.4%	32	阳泉	-0.7%
16	唐山	16.1%	33	晋城	-6.8%
17	石家庄	15.7%			

注：其中新乡、鹤壁、濮阳和晋城因 2014 年部分季度数据缺失而只计算了六种污染物三年累积降幅的平均值。

（十）“2+31”城市 2017 年六种污染物的监视坐标

为了方便各级管理部门了解 2017 年的六种污染物情况，同时考虑过去四年的浓度变化（“人努力”）情况，也为找到每个城市突出的污染问题，我们绘制了六种污染物的监视坐标图（图 73 至 75）和“2+31”城市 2017 年超标污染物情况汇总表（表 9）。为了剔除 PM₁₀ 中 PM_{2.5} 的部分，我们将对 PM₁₀ 的监视替换成了 PM_{10-2.5}。它是 PM₁₀ 中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，通过用 PM₁₀ 的浓度减去 PM_{2.5} 的浓度而得到。

对于这六种污染物，我们设定的超标的标准分别为：60 微克/立方米（PM_{2.5}）、50 微克/立方米（PM_{10-2.5}）、25 微克/立方米（二氧化硫）、1.25 毫克/立方米（一氧化碳）、120 微克/立方米（春夏两季 8 小时臭氧）、45 微克/立方米（二氧化氮）。这些标准是参考国家标准、目前的城市均值浓度

分布和数据的区分度而定。我们将六种污染物分成三对给出监视坐标图。每个图中右上象限指两种污染物均过高，左上和右下象限表示一种污染物过高，左下象限的城市表示情况相对较好，图中箭头代表过去四年某污染物已有显著下降。

通过表9我们发现，安阳、邯郸、晋城、莱芜、石家庄、唐山、新乡、邢台、阳泉和淄博这10个城市六种污染物均过高；保定、鹤壁、焦作和太原有五种污染物过高，还有8个城市有四种污染物过高，它们是滨州、沧州、长治、德州、菏泽、济南、天津和郑州。我们希望这三个图和表9对各城市下一步的大气污染治理中选定重点方向有所帮助。

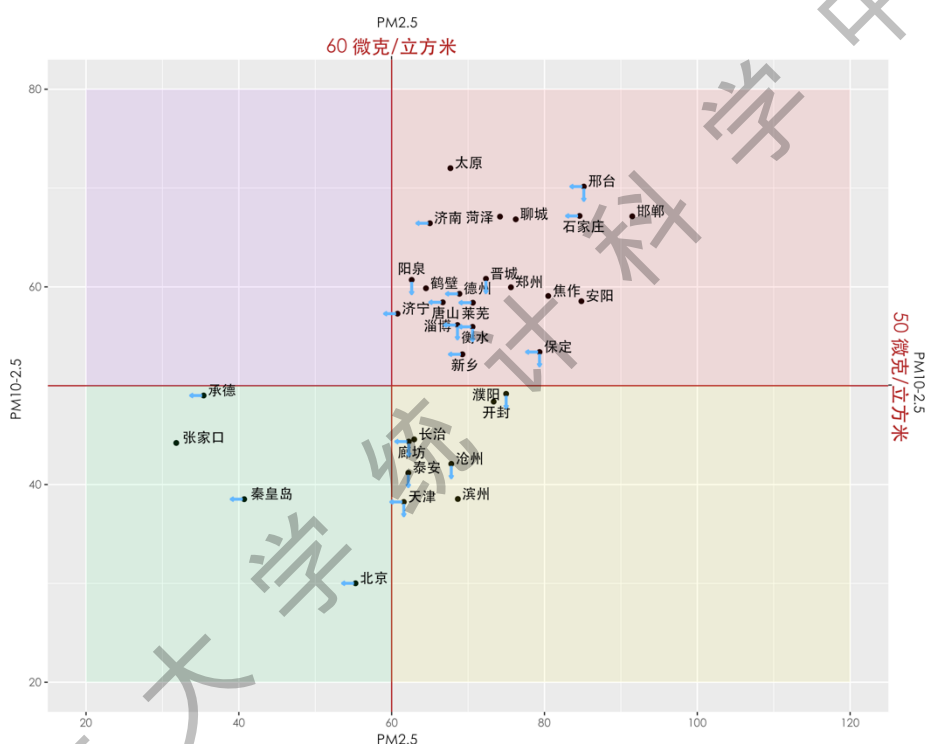


图 73：“2+31”城市 2017 年 $PM_{10-2.5}$ 和 $PM_{2.5}$ 的监视坐标图

(纵向箭头表示该城市四年内 $PM_{2.5-10}$ 降幅至少 25%，横向箭头表示该城市四年内 $PM_{2.5}$ 降幅至少 26%)

表 9：“2+31”城市 2017 年超标污染物情况汇总
 (“×”代表污染物过高，“ ”代表污染物水平相对较低)

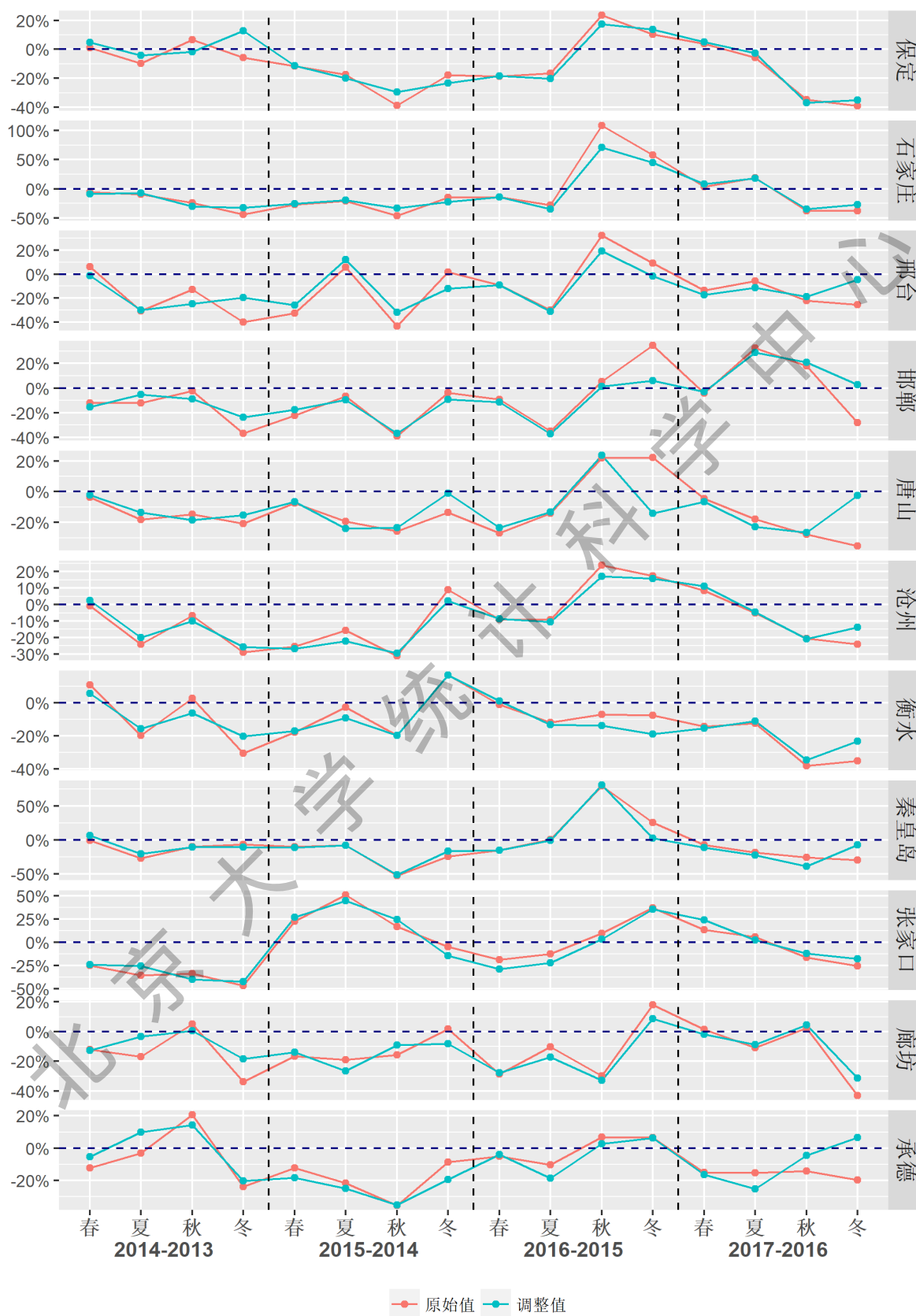
序号	城市	PM _{2.5}	PM _{10-2.5}	二氧化硫	一氧化碳	二氧化氮	8 小时臭氧 (春夏)
1	安阳	×	×	×	×	×	×
2	邯郸	×	×	×	×	×	×
3	晋城	×	×	×	×	×	×
4	莱芜	×	×	×	×	×	×
5	石家庄	×	×	×	×	×	×
6	唐山	×	×	×	×	×	×
7	新乡	×	×	×	×	×	×
8	邢台	×	×	×	×	×	×
9	阳泉	×	×	×	×	×	×
10	淄博	×	×	×	×	×	×
11	保定	×	×	×		×	×
12	鹤壁	×	×		×	×	×
13	焦作	×	×		×	×	×
14	太原	×	×	×	×	×	
15	滨州	×		×	×		×
16	沧州	×		×		×	×
17	长治	×		×	×		×
18	德州	×	×		×		×
19	菏泽	×	×		×		×
20	济南	×	×			×	×
21	天津	×			×	×	×
22	郑州	×	×			×	×
23	衡水	×	×				×
24	济宁	×	×				×
25	廊坊	×				×	×
26	聊城	×	×				×
27	濮阳	×			×		×
28	北京					×	×
29	开封	×					×
30	泰安	×					×
31	承德						×
32	秦皇岛					×	
33	张家口						×

注：表格中文字颜色代表城市污染物超标个数：红色代表 6 个污染物超标，紫色代表 5 个污染物超标，棕色代表 4 个污染物超标，蓝色代表 3 个污染物超标，绿色代表 2 个污染物超标，灰色代表 1 个污染物超标。

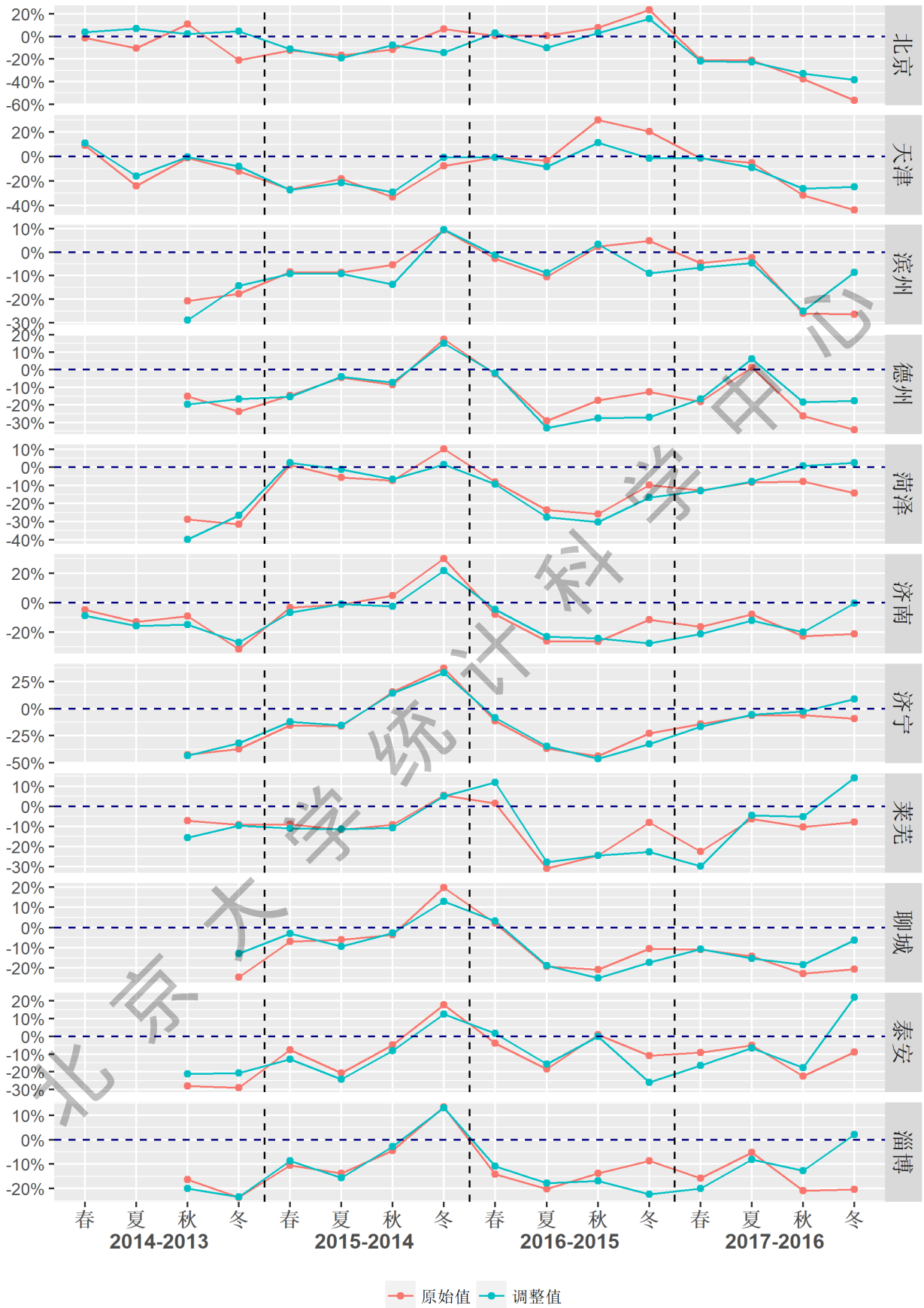
参考文献

- [1] 北京大学统计科学中心环境统计组 (2015). 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 (2016). 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 (2017). 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. (http://songxichen.gsm.pku.edu.cn/index.php/Research/#tab_34)
- [4] 北京大学统计科学中心环境统计组 (2017). 空气质量评估报告(四): 京津冀 2013-2016 年区域污染状况评估, 2017 年 8 月. (http://songxichen.gsm.pku.edu.cn/index.php/Research/#tab_34)
- [5] 中国环境保护部等 (2017), 京津冀及周边地区 2017 年大气污染防治工作方案.
- [6] 中国国务院 (2013), 大气污染防治行动计划, 国发〔2013〕37 号.
- [7] 中国环境保护部等 (2013), 京津冀及周边地区落实大气污染防治行动计划实施细则, 环发〔2013〕104 号.
- [8] 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.
- [9] 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>)
- [10] 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>)
- [11] Zhang, S., Guo, B., Dong A., He J., Xu Z., and Chen, S. X. (2017). Cautionary Tales on Air-Quality Improvement in Beijing. *Proceedings of the Royal Society A, Volume 473, No. 2205*. (<http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/473/2205/20170457>)
- [12] 唐孝炎, 张远航, 邵敏 (2016), 大气环境化学: 第二版, 365-446.
- [13] 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.
- [14] Cochran, W.G. (1968). The effectiveness of adjustment by subclassification in removing bias in observational studies, *Biometrics*, 295-313, 24(2).
- [15] 北京大学统计科学中心环境统计组 (2018). 常用大气污染物年际变化百分比受气象影响之分析, 2018 年 3 月.

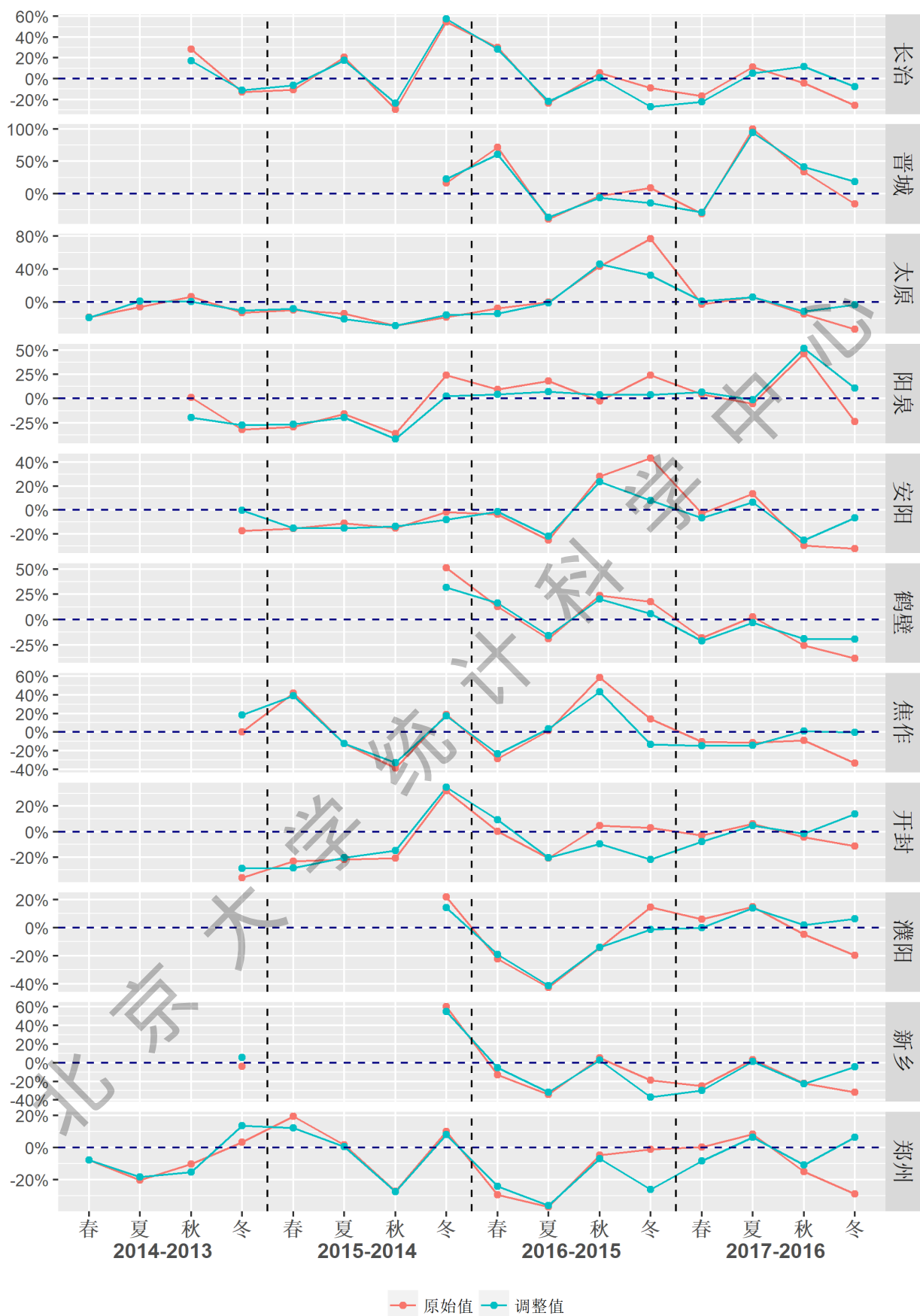
附录



附图 1: 河北省 11 市 PM_{2.5} 原始季均值与调整季均值同比变化百分比图



附图 2: 北京、天津和山东省 9 市 PM_{2.5} 原始季均值与调整季均值同比变化百分比图



附图 3: 山西省 4 市和河南省 7 市 PM_{2.5} 原始季均值与调整季均值同比变化百分比图

课题组成员



刘慧杰，北京大学前沿交叉学科研究院硕士研究生，主要完成人



郭斌，西南财经大学统计学院副教授，主要完成人



叶方舒，北京大学环境科学与工程学院本科生



李一溪，北京大学城市与环境学院本科生



郑翔宇，北京大学光华管理学院硕士研究生



何婧，西南财经大学统计学院助理教授



王恒放，Iowa State University 统计系博士研究生



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。感谢中国环境监测总站，青悦开放环境数据中心，在意空气 App(<http://air.fresh-ideas.cc/>)，网站 pm25.in 为本次报告提供数据。感谢中国气象局气象数据中心提供实时气象数据。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、莫纳什大学梁萱博士，北京大学张澍一、陈磊、许子平、张爽、程子珊同学的有益研讨和帮助。感谢王文庆先生在数据库方面一如既往地协助。感谢光华管理学院对外关系团队：王免然，晏琴，闫敏的支援、安排，感谢牟修瑞、庞立春在报告写作过程和宣传中提供的中文编辑服务。报告封面设计是张澍一和程子珊。

Chen's Lab: songxichen.gsm.pku.edu.cn

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