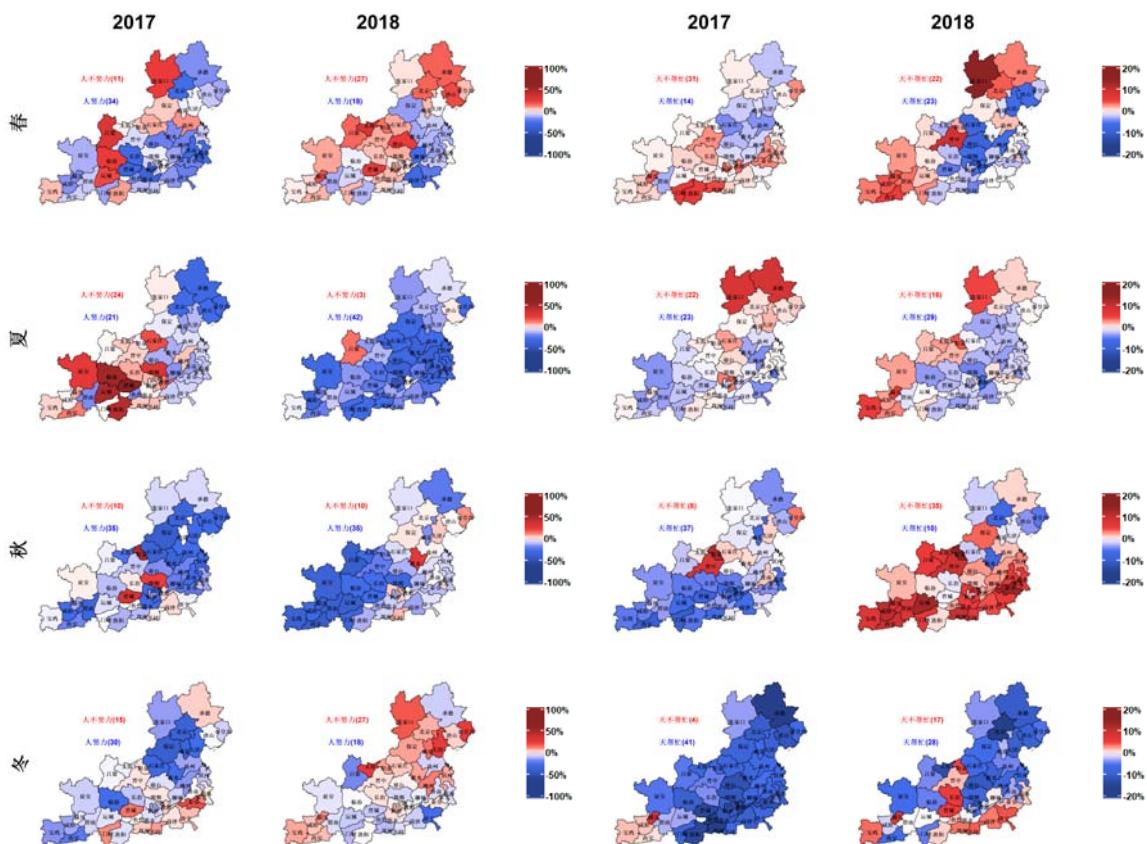


空气质量评估报告（六）

“2+43”城市 2013-2018 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

“人努力” “天帮忙”



北京大学统计科学中心
北京大学光华管理学院

二零一九年四月

前言

本报告是本环境统计团队完成的第六份空气质量评估报告。前五份报告分别发布于 2015 年 3 月、2016 年 3 月、2017 年 3 月和 8 月、2018 年 4 月。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} 浓度的变化趋势；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，并且将分析的污染物从单一的 PM_{2.5} 增加到常规的六种污染物；第四份报告[4]通过分析京津冀地区 13 个城市 73 个国控站点 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；第五份报告[5]综合评估了“2+31”城市（比“2+26”多 5 个城市）172 个国控站点 2013 年 3 月至 2018 年 2 月的状态和变化趋势。本报告覆盖的城市范围在去年“2+31”城市报告[5]的基础上，增加了汾渭平原 11 市和延安市，统称“2+43”城市。

本报告将基于这 45 个城市 247 个国控空气质量监测站点 2013 年 3 月至 2019 年 2 月污染物监测数据和 55 个气象站点过去八年的气象数据（数据总量超过 1 亿 9700 万条），综合评估“2+43”城市过去六年空气质量的实际状态和变化趋势。

本报告的具体内容如下：

- 描述过去六年“2+43”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陕地区六种常规污染物的浓度变化趋势；
- 总结“2+43”城市空气质量情况，为京津冀及周边晋鲁豫陕地区空气治理提出切实可行的建议。
- 首次给出“人努力-天帮忙”指数，分别量化气象和人为因素对空气质量的影响。

目录

| | |
|---------------------------------|----|
| 一、背景介绍..... | 1 |
| 二、采用数据说明..... | 3 |
| 三、空气质量基本描述..... | 5 |
| 四、六种常规空气污染物变化趋势..... | 15 |
| 五 “2+43” 城市污染物综合累计降幅与监视坐标 | 63 |
| 六、区域煤炭消耗与工业运行数据分析..... | 67 |
| 七、“人努力一天帮忙” 指数..... | 73 |
| 八、总结与建议..... | 76 |
| 参考文献..... | 83 |

一、背景介绍

2013 年 9 月，国务院发布《大气污染防治行动计划》[8]（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》[9]。我们去年发布的空气质量报告（五）中，在“2+26”城市基础上保留了 2017 年发布的京津冀报告（四）中已经研究的河北省北部的张家口、承德和秦皇岛市。另外为了使山东省的济南和济宁之间没有“空隙”，我们又加上了泰安、莱芜二个城市，因此共有“2+31”个城市。

2018 年 6 月，在生态环境部印发的《2018-2019 年蓝天保卫战重点区域强化督查方案》[7]中，汾渭平原地区首次被提及。汾渭平原 11 城市包括：陕西省的西安、咸阳、渭南、宝鸡、铜川，山西省的吕梁、晋中、运城、临汾，河南省的洛阳、三门峡。另外，我们额外加上延安市作为对照城市。因而在本报告中，我们在去年“2+31”城市的基础上，增加上汾渭平原 11 市和延安，总称为“2+43”城市。

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，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，尤其不适合炼钢、炼铁、炼焦、造水泥等高污染行业。然而，2001 年之后，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，成为中国乃至世界重要的钢铁产区。

“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，其地形条件不利于污染物的扩散。太原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。长治和晋城分别地处上党盆地和泽州盆地。在工业特点上，太原经济增长依赖原材料、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。晋城以煤炭、电力、煤化工、钢铁等工业为主。

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，济宁是山东省经济发展较快的地区之一，城市化、工业化迅猛发展使该地区具有典型的煤烟型污染特征。德州夏季炎热、湿度大，冬季严寒干燥，导致冬季污染物扩散条件较差。菏泽位于太行山与泰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，加之降水对空气污染物有一定的清洗作用；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，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”。

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，安阳位于河南省最北部、京津冀经济圈的边缘，近年来，已形成了冶金、电子、化工、机械等工业体系，污染物排放量加大。焦作市位于河南省的西北部，地区资源以煤炭为主，还有 40 余种矿产资源，多种工业以煤炭为主要能源。郑州是全国重要的冶金建材工业基地，濮阳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。

汾渭平原为黄河流域汾河平原、渭河平原的总称，横跨山西、陕西、河南三省。地理因素方面，汾河平原北接忻定盆地，东西受吕梁山脉与太行山脉地形阻隔，渭河平原南依秦岭，北仰黄土高原，西接陇山山脉，二者均沿汾渭地堑方向延伸，呈狭长形，全年风速较小，静风频率较高，不利于污染物扩散，环境承载力较低。产业结构方面，汾渭平原地区更偏向重工业，且规模偏小、装备水平较低，火电、钢铁、焦化等行业企业数量多，产量大，中小型企业集中。能源结构方面，该区域工业以煤炭为主，且大量燃用散煤，工业锅炉、采暖锅炉、炼焦、炼铁工业等均构成重要的污染源。交通运输结构方面，该区域以公路运输为主，且重型货车、散货车多，过境车辆占比较大。

自 2013 年 1 月 1 日起，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}、PM₁₀、二氧化硫、二氧化氮、一氧化碳和臭氧）的浓度。历经六年大气污染治理的评估与考核，京津冀及周边地区和汾渭平原区域空气质量是否有所改善，本报告将就此问题进行展开。基于已有的 1 亿 9700 万条数据，本报告将空气污染物浓度的变化可视化，针对其中存在的问题加以分析，并对其气象与人为因素的比例进行量化分析与解读。

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“2+43”城市247个监测站点，其中汾渭平原11市（用蓝色标记），延安市（用红色标记）是本报告新加入城市。本报告所考虑的城市比“2+26”及汾渭平原多了6个城市：河北北部三市，山东泰安、莱芜和陕西延安。按照省市口径统计如下：

- 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（保定、邢台、衡水、邯郸、沧州、廊坊、唐山、秦皇岛、承德、张家口）共57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：8个城市（太原、阳泉、长治、晋城、[晋中](#)、[运城](#)、[临汾](#)、[吕梁](#)）共49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：9个城市（郑州、开封、安阳、鹤壁、新乡、焦作、濮阳、[洛阳](#)、[三门峡](#)）共47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、三门峡风景区背景站）
- 陕西省：6个城市（[西安](#)、[铜川](#)、[宝鸡](#)、[咸阳](#)、[渭南](#)、[延安](#)）共33个国控空气质量监测站（不包含西安草滩、宝鸡庙沟村、咸阳气象站、渭南农科所、延安枣园背景站）

由于2013年1月和2月所考虑地区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2019年2月。其中，山西、山东、河南和陕西省有些城市在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、第四和第五份报告一致。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月到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} 、二氧化硫(SO_2)、二氧化氮(NO_2)、一氧化碳(CO)和臭氧(O_3)。

由于气象条件对观测污染物浓度的影响很大，本报告沿用前五份报告的统计学方法，对污染物浓度的观测值进行气象调整，剔除气象因素的影响。具体来说，我们基于2011年3月到2019年2月累计八年的小时气象数据，对“2+43”总共45个城市分别构造基准气象条件。我们之所以用了8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污染物的浓度。其中，河北、山西、山东、河南和陕西省 43 个地级市的气象数据来源于对应城市的气象站点，共 43 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 247 个污染物监测站点外加 13 个背景站（红色圆点）和 55 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，空间匹配度高。

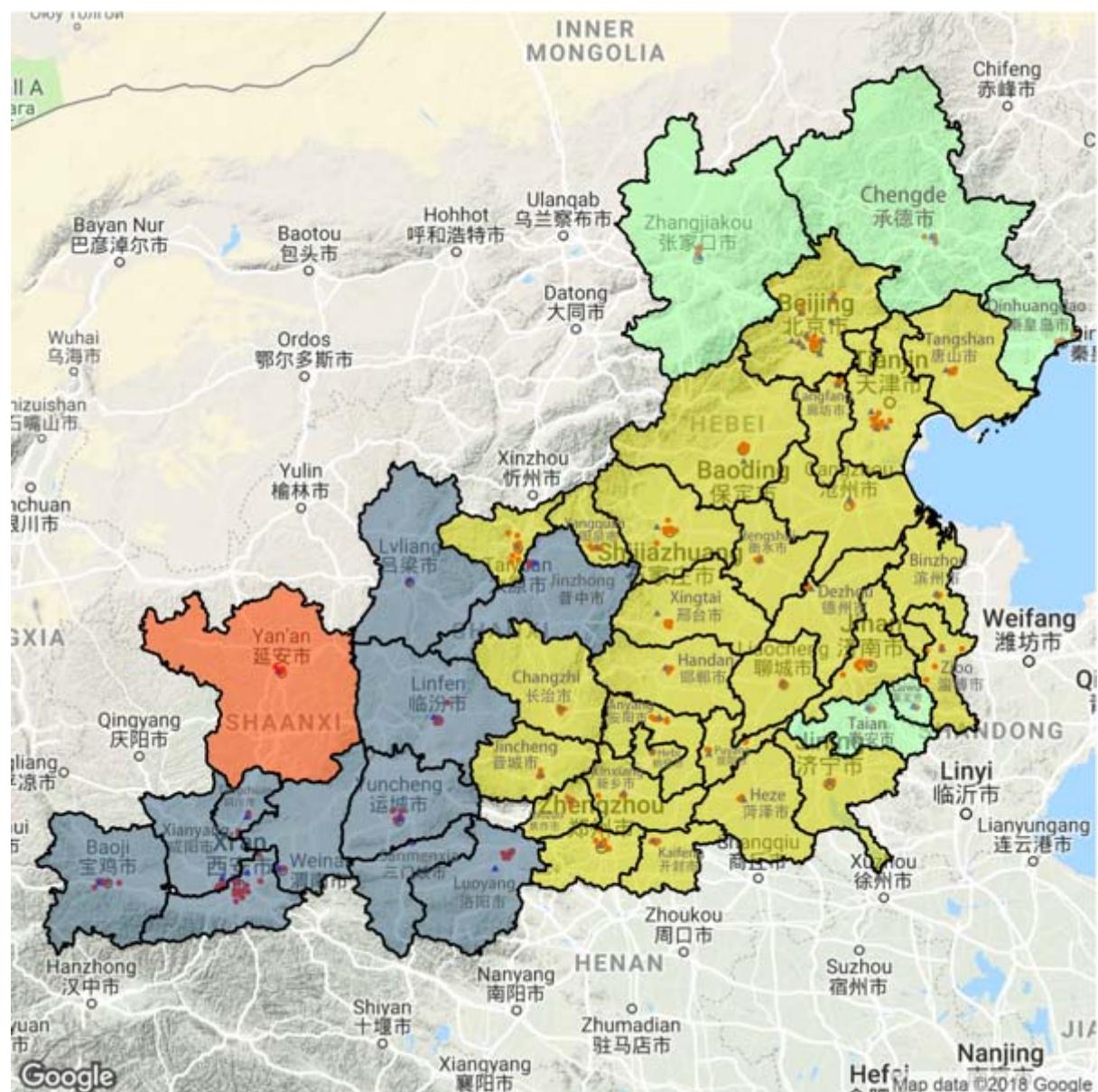


图 1：“2+43” 城市区划及其站点分布（●代表空气质量监测站点，▲代表气象站点）

(图中黄色区域为“2+26”城市范围，灰色区域为汾渭平原 11 市，橙红色和绿色区域为本报告加上的 6 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+43”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[10]。通过图 2 至图 7，我们发现，按照这个标准，“2+43”城市中很多城市已经有超过 50% 的时间达到“优良空气”标准。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。实际上，空气质量“良”也是一种伤害[11]，因此我们建议尽快使用 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。这一国家标准的提高将有效减少中国人群的污染暴露水平和未来个人及国家的医疗健康开支，也将为下一步的大气污染防治行动计划提供更高的目标和新的动能。

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[12, 13, 14]。

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，用于计算各个城市六种空气质量等级在每个季节所占的比例。用这种方法，我们绘制了图 2 至图 7 的时间占比图。¹

¹这一方法受气象混杂因素干扰，不能完全代表背景排放。第四节我们将给出去除气象干扰的调整浓度。

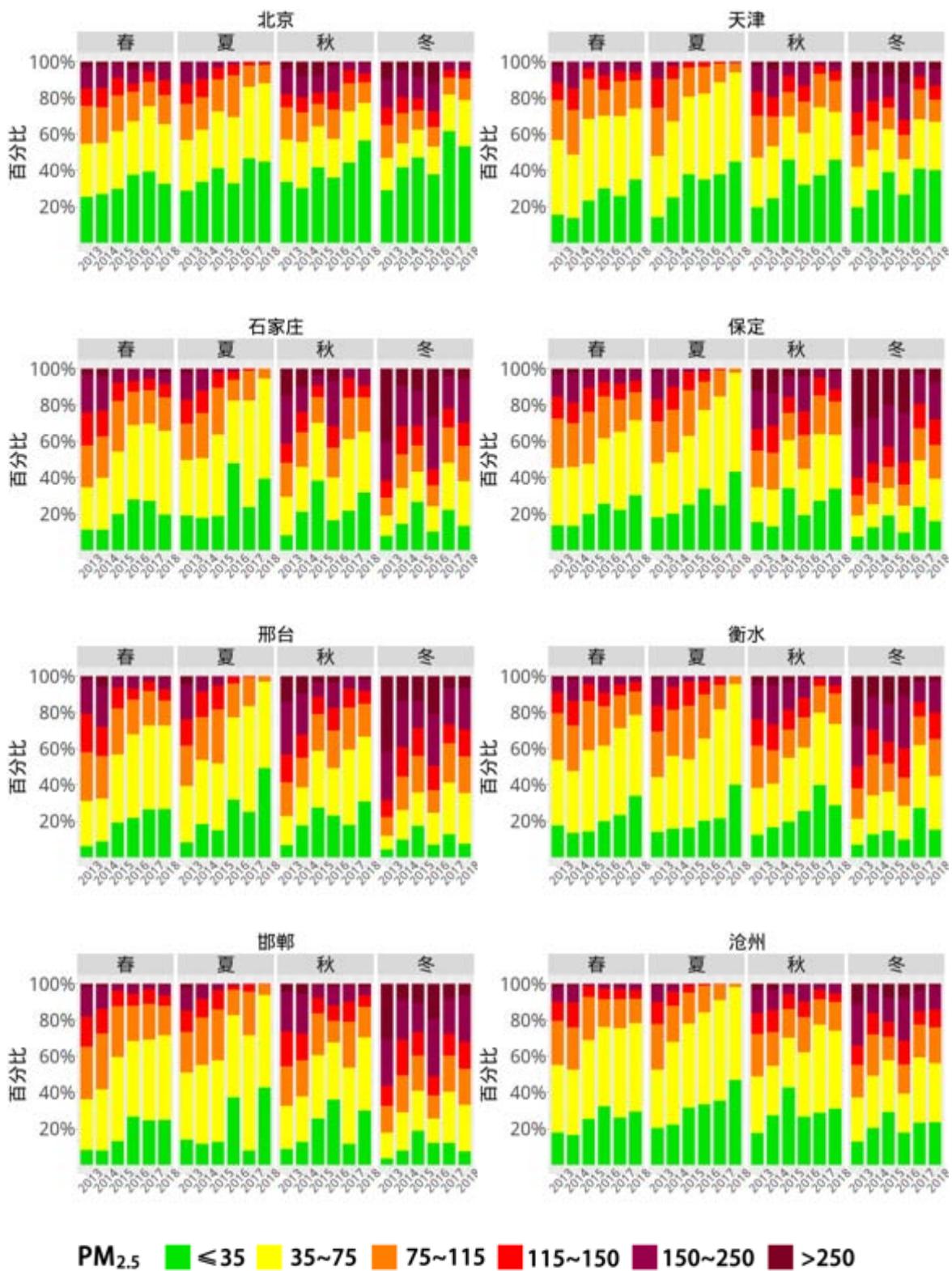


图 2：北京、天津市和河北省 6 市 2013 年至 2018 年空气质量六个状态时间占比图

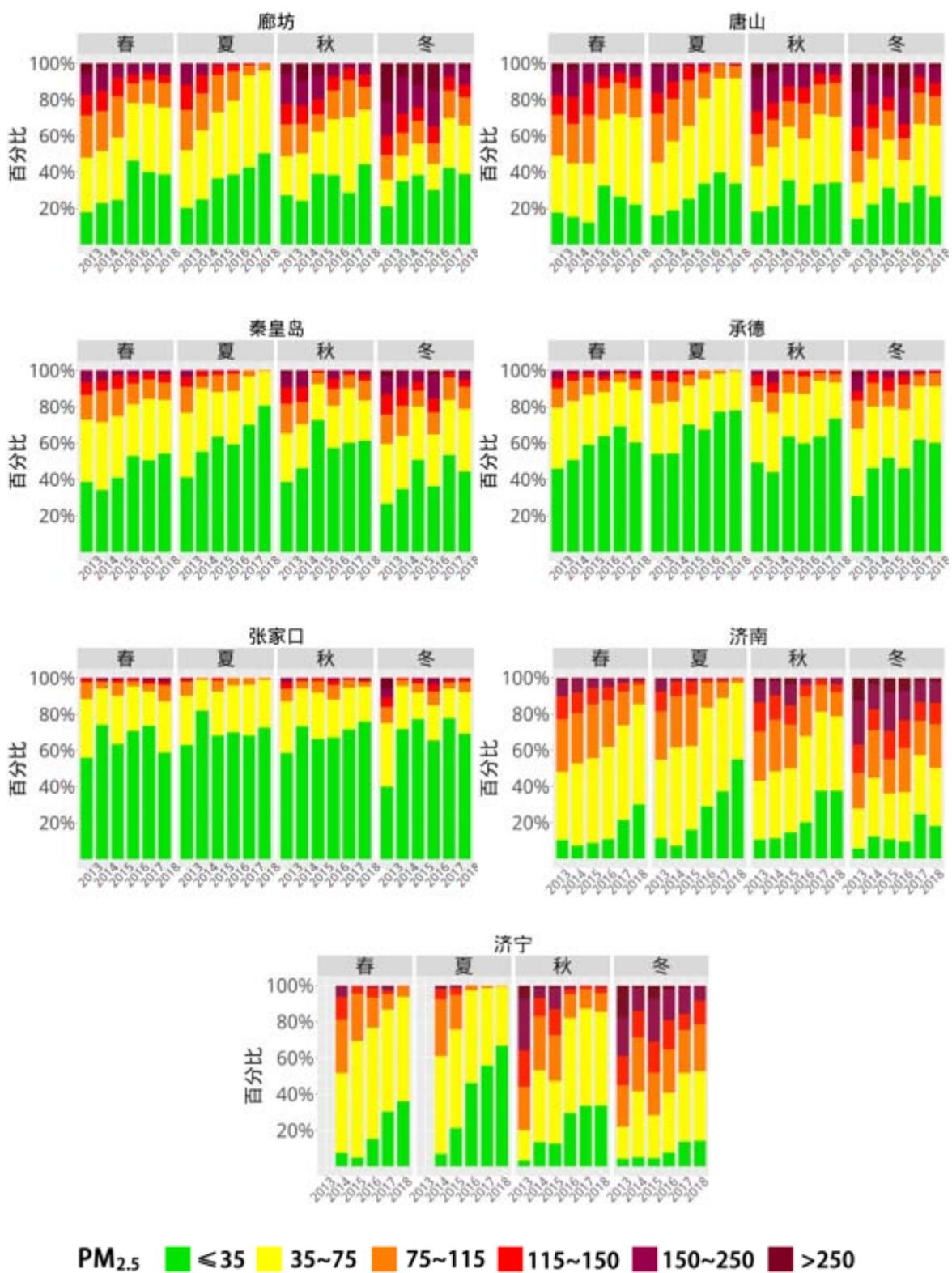


图 3：河北省 5 市和山东省 2 市 2013 年至 2018 年空气质量六个状态时间占比图

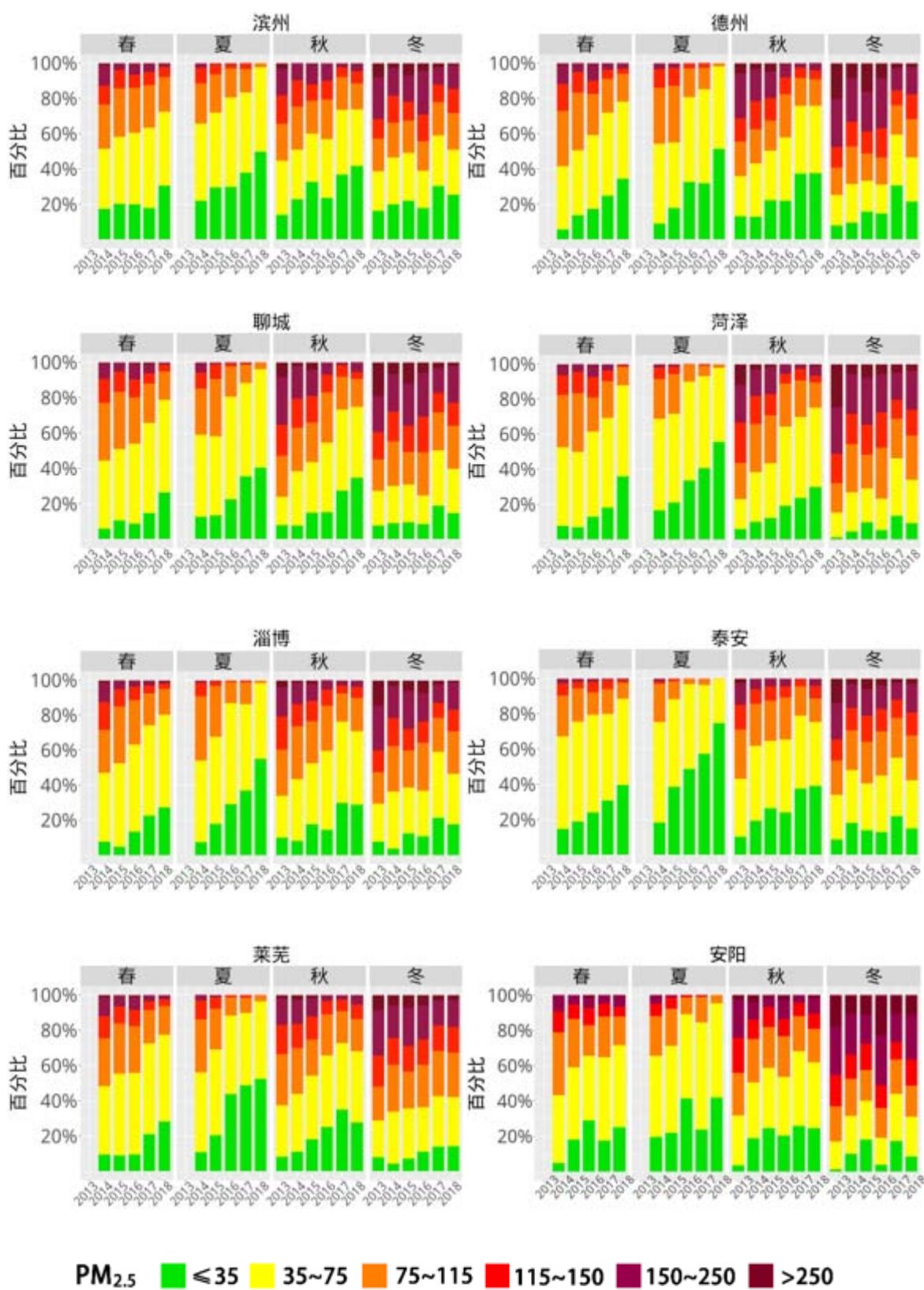


图 4：山东省 7 市和河南省 1 市 2013 年至 2018 年空气质量六个状态时间占比图

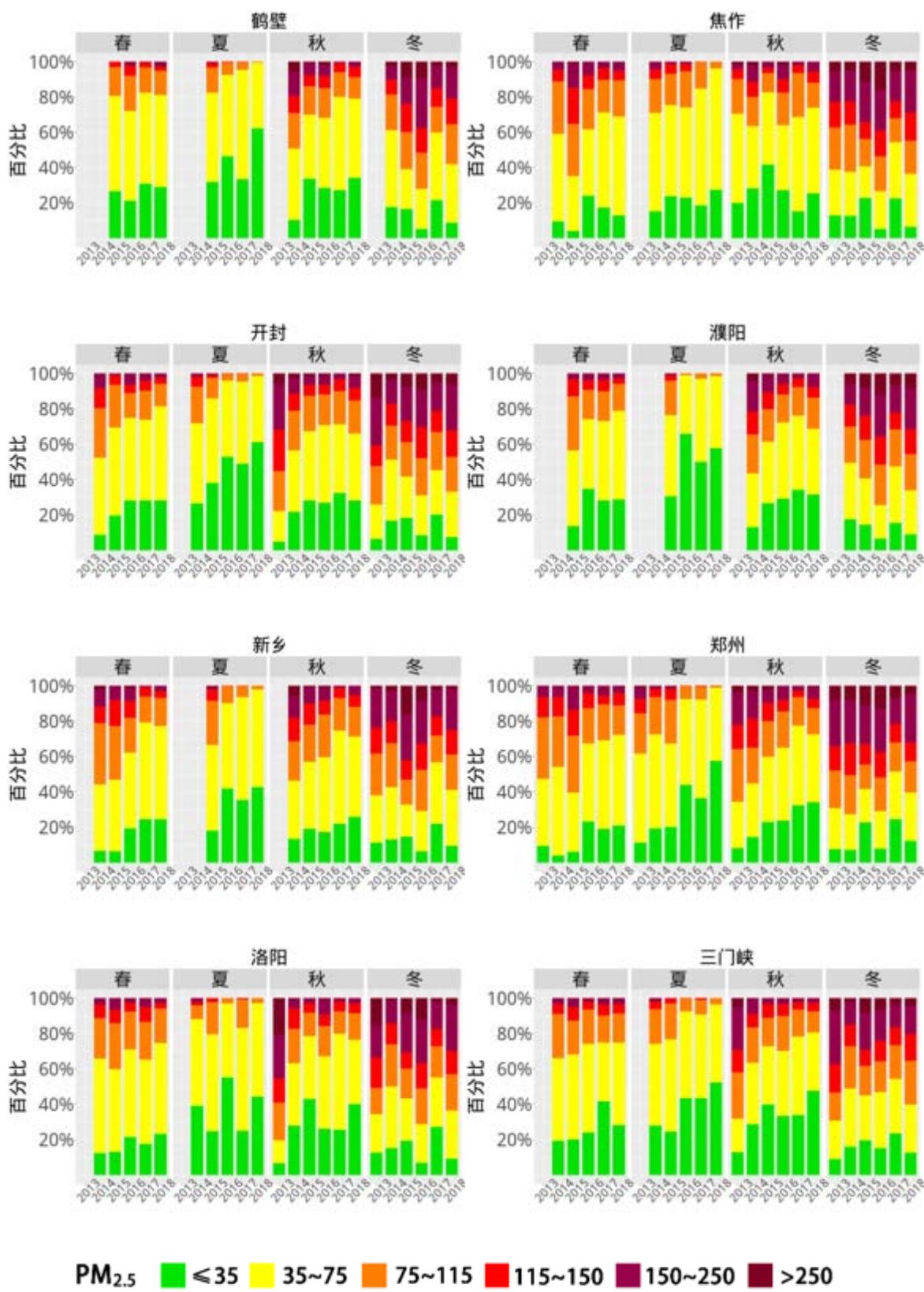


图 5：河南省 8 市 2013 年至 2018 年空气质量六个状态时间占比图

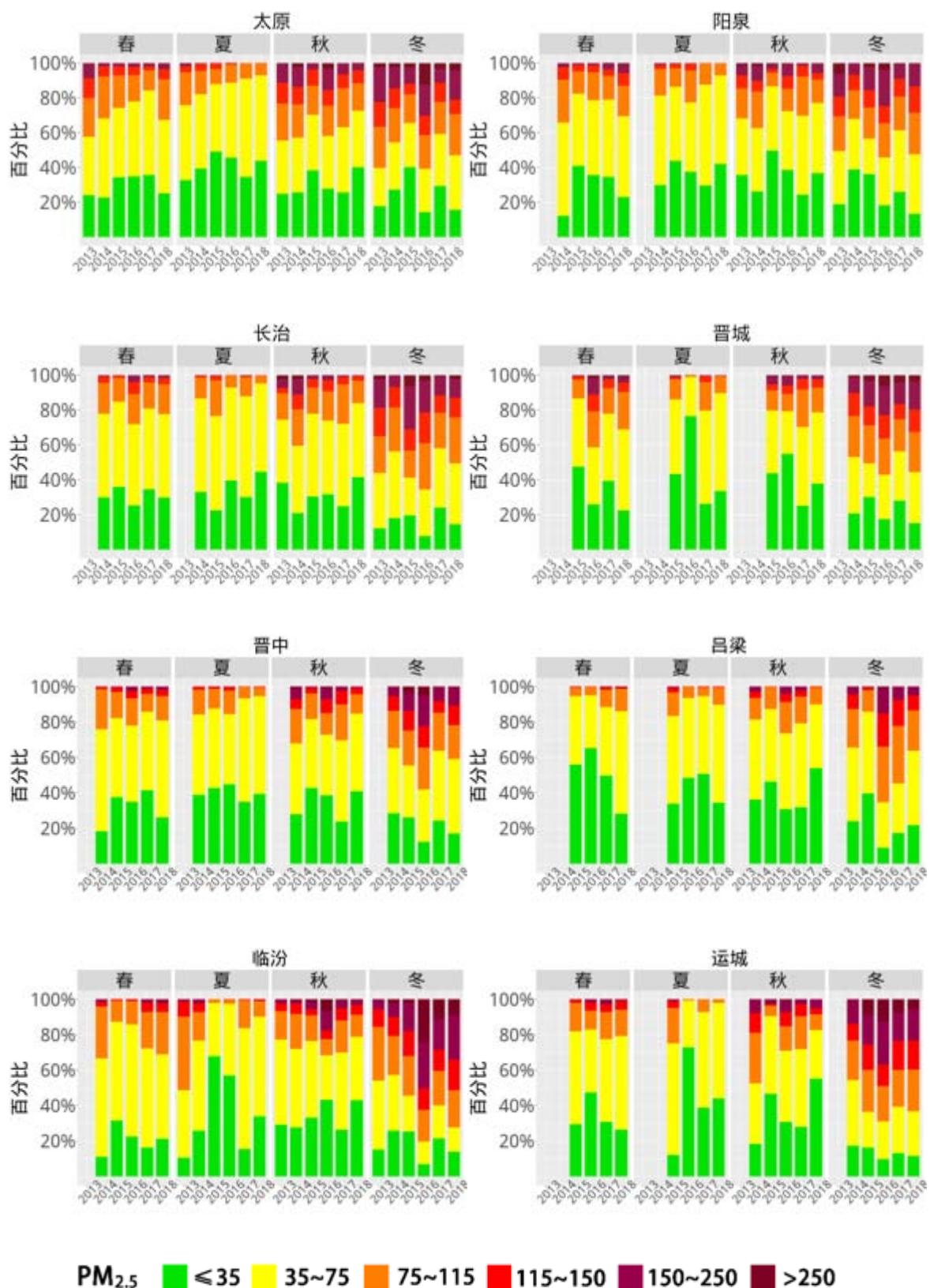


图 6：山西省 8 市 2013 年至 2018 年空气质量六个状态时间占比图

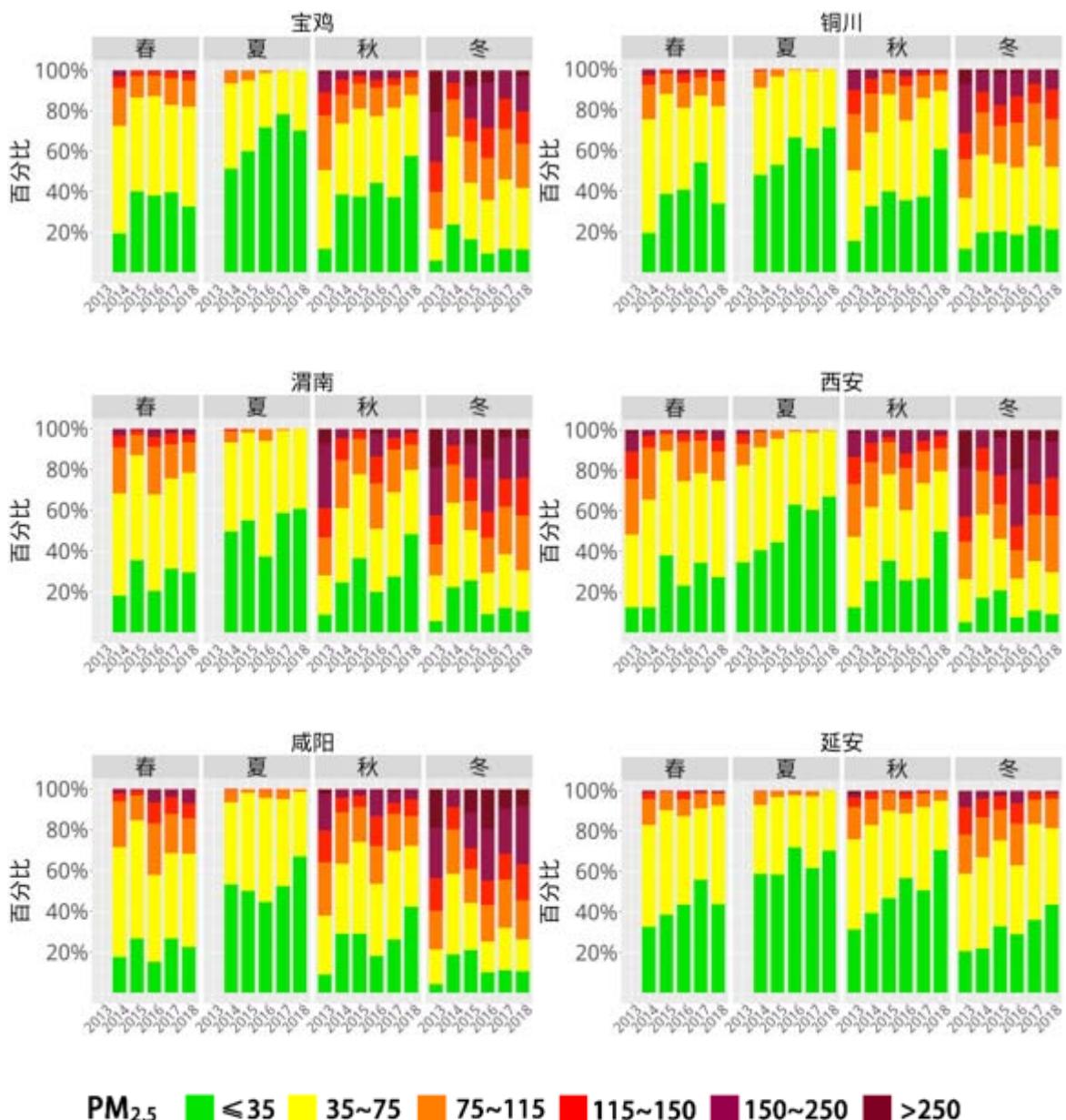


图 7：陕西省 6 市 2013 年至 2018 年空气质量六个状态时间占比图

综合分析图 2 至图 7，我们可以获取“2+43”城市空气质量的一些信息：

• 地理区域特征

对于“优良空气”($\text{PM}_{2.5} \leq 35$ 微克 / 立方米) 占比：以河北省北部三城市（张家口、承德和秦皇岛）和延安最高，陕西省其余城市次之，山西、山东、“环渤海五城市”（沧州、廊坊、唐山、北京和天津）与河南再次，“沿太行山五城市”（石家庄、保定、邢台、邯郸和衡水）最低。就 2018 年而言，山东省“优良空气”占比继续保持上升趋势，并且多于山西、河南等省份；环渤海城市与沿太行山城市之间差距呈现缩小态势；汾渭平原方面，春季除临汾、洛阳外均有不同程度恶化，夏季（除吕梁、宝鸡）和秋季则有明显提升。

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 年曾达到 60%，环渤海五城市、山东和河南次之，达到 40%，山西在 20% 左右。就 2018 年而言，同 2017 年相比，京津冀方面：沿太行山五城市恶化，体现在秋冬季节重污染占比的提升（除邯郸秋季以外），环渤海五城市也有恶化但幅度较小。其他地区方面：河南、山东、山西几乎所有城市均存在不同程度的恶化，其中以河南地区最为严重，重污染占比普遍有近 10% 的增加。汾渭平原地区秋季普遍有所好转，体现在“优良空气”占比提升和污染占比下降，冬季则城市间差别较大，洛阳、三门峡、临汾等恶化，吕梁地区空气质量有所提高，陕西地区六个城市普遍在秋季改善、冬季恶化，其他城市则变化不明显。

• 季节特征

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 年至 2016 年达到 50% 左右，2017 年冬季下降明显，但 2018 年普遍提升。夏季重污染鲜有发生，近年来轻度污染占比也趋于下降，多数城市不超过 10%，主要以优、良为主。春秋两季空气质量介于夏冬之间，通常秋季空气质量低于春季。

表 1 和表 2 分别统计了 2015 至 2018 年度“2+3+1”城市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+3+1”城市空气污染的情况和演变。

2015 年至 2018 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，2018 年河南和沿太行山地区的城市占比增幅较大。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。空气质量最好的四个城市承德、张家口、秦皇岛和延安分别位居河北北部和陕西北部。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 7、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+3+1”城市的空气污染状况，但是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 的城市排名有相当大的出入。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+43”城市 2015 至 2018 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 | 2018 年 |
| 1 | 保定 17.7% | 石家庄 25.6% | 咸阳 10.6% | 安阳 13.4% |
| 2 | 德州 16.4% | 保定 20.9% | 邯郸 10.2% | 咸阳 12.2% |
| 3 | 衡水 15.6% | 邢台 18.4% | 石家庄 9.7% | 石家庄 11.7% |
| 4 | 新乡 15.6% | 安阳 17.9% | 邢台 9.1% | 保定 11.4% |
| 5 | 聊城 15.2% | 邯郸 17.2% | 安阳 9.0% | 邢台 11.2% |
| 6 | 郑州 14.5% | 临汾 16.9% | 临汾 8.8% | 邯郸 11.2% |
| 7 | 菏泽 14.4% | 咸阳 16.1% | 西安 8.3% | 郑州 10.8% |
| 8 | 石家庄 13.6% | 衡水 15.7% | 保定 8.1% | 开封 10.6% |
| 9 | 焦作 13.4% | 西安 15.0% | 渭南 7.8% | 濮阳 10.4% |
| 10 | 廊坊 13.4% | 渭南 14.5% | 郑州 7.6% | 临汾 10.0% |
| 11 | 济南 12.9% | 焦作 14.4% | 运城 7.2% | 焦作 9.8% |
| 12 | 邢台 12.8% | 北京 14.4% | 开封 7.2% | 洛阳 8.9% |
| 13 | 北京 12.5% | 唐山 13.9% | 焦作 7.1% | 新乡 8.4% |
| 14 | 莱芜 12.2% | 德州 13.7% | 濮阳 7.1% | 菏泽 8.3% |
| 15 | 淄博 11.4% | 天津 13.2% | 菏泽 6.8% | 西安 7.8% |
| 16 | 济宁 11.3% | 新乡 12.4% | 聊城 6.2% | 聊城 7.4% |
| 17 | 唐山 10.9% | 郑州 12.2% | 洛阳 6.1% | 运城 7.2% |
| 18 | 邯郸 10.4% | 廊坊 12.2% | 莱芜 5.8% | 衡水 7.2% |
| 19 | 安阳 10.3% | 洛阳 12.0% | 三门峡 5.6% | 长治 7.1% |
| 20 | 洛阳 10.1% | 聊城 11.9% | 沧州 5.4% | 渭南 7.1% |
| 21 | 濮阳 9.7% | 太原 11.9% | 德州 5.4% | 晋城 6.6% |
| 22 | 滨州 9.6% | 滨州 11.4% | 晋城 5.4% | 三门峡 6.6% |
| 23 | 三门峡 9.5% | 运城 11.4% | 衡水 5.3% | 鹤壁 6.6% |
| 24 | 开封 8.8% | 鹤壁 11.3% | 长治 4.9% | 莱芜 6.5% |
| 25 | 太原 8.3% | 濮阳 11.3% | 滨州 4.8% | 阳泉 6.3% |
| 26 | 咸阳 8.2% | 沧州 10.9% | 新乡 4.8% | 唐山 6.3% |
| 27 | 鹤壁 8.1% | 开封 10.8% | 淄博 4.7% | 德州 6.2% |
| 28 | 天津 7.9% | 菏泽 10.1% | 唐山 4.6% | 天津 6.2% |
| 29 | 运城 7.4% | 阳泉 10.0% | 济宁 4.6% | 廊坊 6.1% |
| 30 | 沧州 7.1% | 莱芜 9.2% | 宝鸡 4.5% | 泰安 6.0% |
| 31 | 泰安 6.8% | 晋城 8.3% | 廊坊 4.4% | 沧州 5.8% |
| 32 | 西安 6.6% | 济南 8.3% | 济南 4.4% | 宝鸡 5.7% |
| 33 | 宝鸡 6.5% | 宝鸡 8.2% | 鹤壁 4.1% | 淄博 5.7% |
| 34 | 渭南 6.4% | 晋中 8.2% | 天津 3.9% | 北京 5.6% |
| 35 | 长治 6.2% | 淄博 8.1% | 北京 3.7% | 滨州 5.2% |

| | | | | |
|----|----------|----------|----------|----------|
| 36 | 临汾 5.9% | 三门峡 7.3% | 太原 3.6% | 济南 4.8% |
| 37 | 阳泉 5.1% | 长治 7.0% | 阳泉 3.5% | 太原 3.8% |
| 38 | 铜川 4.7% | 泰安 5.8% | 泰安 3.3% | 晋中 3.4% |
| 39 | 晋城 4.4% | 秦皇岛 5.7% | 晋中 2.9% | 铜川 3.0% |
| 40 | 晋中 3.8% | 济宁 5.5% | 吕梁 2.6% | 秦皇岛 2.4% |
| 41 | 承德 2.3% | 吕梁 4.8% | 铜川 2.4% | 济宁 2.3% |
| 42 | 秦皇岛 1.6% | 铜川 4.6% | 张家口 0.8% | 吕梁 1.4% |
| 43 | 延安 0.7% | 延安 2.0% | 秦皇岛 0.7% | 张家口 1.0% |
| 44 | 张家口 0.6% | 承德 1.4% | 延安 0.5% | 承德 0.6% |
| 45 | 吕梁 0.4% | 张家口 1.4% | 承德 0.4% | 延安 0.6% |

表2：“2+43”城市2015至2018年(季历年)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 | 2018年 |
| 1 | 济宁 89.0% | 聊城 86.1% | 邯郸 86.0% | 焦作 82.0% |
| 2 | 聊城 87.7% | 淄博 82.9% | 焦作 81.6% | 安阳 74.9% |
| 3 | 菏泽 87.6% | 济南 82.5% | 临汾 80.1% | 新乡 74.3% |
| 4 | 济南 87.4% | 菏泽 82.1% | 邢台 79.5% | 石家庄 74.0% |
| 5 | 淄博 86.8% | 衡水 81.4% | 安阳 78.9% | 邯郸 73.7% |
| 6 | 莱芜 86.1% | 焦作 80.2% | 石家庄 77.6% | 晋城 72.7% |
| 7 | 新乡 85.4% | 邢台 79.1% | 洛阳 76.3% | 临汾 72.0% |
| 8 | 衡水 84.1% | 新乡 78.7% | 菏泽 75.9% | 邢台 71.4% |
| 9 | 邯郸 82.5% | 德州 78.2% | 聊城 75.7% | 阳泉 71.1% |
| 10 | 德州 82.5% | 渭南 78.1% | 保定 75.5% | 唐山 70.9% |
| 11 | 郑州 82.0% | 保定 77.8% | 新乡 74.0% | 洛阳 70.9% |
| 12 | 邢台 80.4% | 咸阳 77.7% | 衡水 72.5% | 聊城 70.7% |
| 13 | 安阳 79.4% | 莱芜 77.4% | 运城 72.2% | 衡水 70.5% |
| 14 | 濮阳 78.7% | 滨州 77.0% | 淄博 72.2% | 晋中 69.2% |
| 15 | 焦作 77.0% | 安阳 76.3% | 沧州 72.1% | 莱芜 69.2% |
| 16 | 保定 75.5% | 郑州 75.2% | 郑州 71.9% | 保定 69.0% |
| 17 | 泰安 75.4% | 济宁 75.1% | 鹤壁 71.7% | 郑州 68.8% |
| 18 | 洛阳 75.0% | 鹤壁 74.6% | 阳泉 71.5% | 开封 68.7% |
| 19 | 唐山 74.1% | 长治 73.7% | 太原 71.3% | 长治 68.6% |
| 20 | 开封 74.0% | 石家庄 73.6% | 咸阳 70.7% | 濮阳 68.2% |
| 21 | 三门峡 74.0% | 沧州 72.8% | 晋城 70.2% | 淄博 67.6% |
| 22 | 运城 73.9% | 洛阳 72.4% | 莱芜 70.1% | 沧州 67.3% |
| 23 | 滨州 73.8% | 唐山 72.3% | 济南 69.6% | 太原 67.2% |

| | | | | |
|----|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 24 | 石家庄 73.5% | 泰安 72.3% | 滨州 69.1% | 菏泽 67.1% |
| 25 | 太原 72.8% | 邯郸 72.0% | 晋中 68.8% | 鹤壁 66.4% |
| 26 | 鹤壁 72.8% | 三门峡 70.9% | 德州 68.8% | 运城 65.7% |
| 27 | 咸阳 68.2% | 开封 70.8% | 长治 68.5% | 吕梁 65.6% |
| 28 | 沧州 68.1% | 西安 69.8% | 濮阳 68.0% | 三门峡 65.0% |
| 29 | 廊坊 65.8% | 天津 69.6% | 开封 67.6% | 济南 64.5% |
| 30 | 西安 65.1% | 太原 69.2% | 渭南 67.4% | 咸阳 64.2% |
| 31 | 天津 64.0% | 临汾 67.5% | 唐山 67.1% | 德州 63.6% |
| 32 | 晋中 62.6% | 晋城 67.3% | 西安 66.5% | 滨州 63.0% |
| 33 | 铜川 62.0% | 晋中 67.3% | 济宁 66.5% | 渭南 62.5% |
| 34 | 渭南 61.7% | 濮阳 65.8% | 天津 65.0% | 济宁 62.1% |
| 35 | 宝鸡 61.3% | 北京 64.1% | 廊坊 64.5% | 西安 61.3% |
| 36 | 临汾 60.5% | 廊坊 62.5% | 三门峡 64.3% | 天津 58.6% |
| 37 | 北京 60.2% | 吕梁 61.5% | 泰安 62.8% | 泰安 57.7% |
| 38 | 晋城 59.4% | 运城 59.6% | 吕梁 62.5% | 廊坊 57.0% |
| 39 | 长治 58.7% | 铜川 59.4% | 宝鸡 58.0% | 宝鸡 56.7% |
| 40 | 阳泉 57.3% | 宝鸡 58.7% | 铜川 55.9% | 北京 53.2% |
| 41 | 吕梁 56.1% | 阳泉 56.2% | 北京 52.1% | 铜川 52.9% |
| 42 | 延安 55.7% | 延安 49.5% | 延安 48.7% | 延安 42.7% |
| 43 | 承德 43.2% | 秦皇岛 48.5% | 张家口 41.5% | 秦皇岛 39.9% |
| 44 | 秦皇岛 38.8% | 张家口 40.7% | 承德 32.1% | 承德 32.0% |
| 45 | 张家口 31.3% | 承德 31.7% | 秦皇岛 27.2% | 张家口 31.0% |

四、六种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，以得到背景排放的度量。本报告沿用前五份报告所使用的统计学气象调整方法，并对方法进行了与第五份报告一致的调整，主要目的在于提高气象因素在不同年的可比程度。我们将计算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[15, 16, 17]）。

关于气象调整的必要性，我们引用下例加以说明：20世纪60年代，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烟民进行对照实验。通过跟踪三组人群若干年后，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，有时甚至低于不吸烟者。但是统计学家 Cochran 在[20]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年龄增长的自然死亡混杂在一起了，死亡率高的部分原因是年龄因素造成的。为了去除年龄引起的混杂影响，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。由此可见，进行吸烟对健康影响的研究时需要控制年龄的因素。同理，在研究大气污染的年际变化时也要去除气象因素的影响。关于气象调整的统计学原理，感兴趣的读者可以参看本团队发表的论文 [15, 16, 17]。

获悉“三年滑动平均法”可能成为评估空气质量变化的方法。我们认为该方法仍存在缺陷，由三年滑动平均所计算的 2018 年与 2017 年的浓度差，实际运算结果可化简为 2018 年与 2015 年浓度差的三分之一，既不能反映 2017 年到 2018 年的变化，也不能去除掉天气因素的干扰。详细讨论还请参考本团队于 2018 年发表在 Atmospheric Environment 上的论文[18]。

(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泡内，并进入血液通往全身。大量流行病学研究发现：颗粒物浓度和发病率及死亡率有明显联系，尤其是细粒子与心肺疾病的相关性更为明显。我国目前的 PM_{2.5} 平均浓度标准如下表 3 所示。

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+43”城市从 2013 年 3 月到 2019 年 2 月经过气象调整得到的以季度为单位的 PM_{2.5} 均值浓度，并以此来分析研究区域内 PM_{2.5} 的变化情况。

图 8 和图 9 展示了“2+43”城市过去 24 个季节（2013 年春季至 2018 年冬季）经气象调整的 PM_{2.5} 季节平均值浓度随时间变化的情况以及在给定季节的时间序列。综合图 8 和图 9，我们可以总结出过去六年 PM_{2.5} 浓度如下几个特征：

- **季节效应**

“2+43”城市中，除承德、张家口外，其余 43 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。以上季节特征在河北沿太行山的五个城市（保定、石家庄、邢台、邯郸和衡水）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 2018 年冬季的浓度（132.5 微克/立方米）是夏季（42.4 微克/立方米）的 3.13 倍。

- **区域特征**

根据图 8、图 9 和图 12，我们可以将“2+43”城市可以被划分为三个区域，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：沿太行山脉的保定、石家庄、邢台、邯郸和衡水河北五市，河南所有九市，陕西除延安和宝鸡外的四市为**高浓度区域**；河北北部张家口、承德、秦皇岛三市为**低浓度区域**；北京、天津及自唐山以南的河北城市和山东九市为**中浓度区域**。延安的污染水平要高于河北北部三市，同北京、天津、廊坊相近，故也归入中浓度区域。

- **极端污染**

为说明各个季节 $PM_{2.5}$ 浓度的极端污染情况，我们也计算了经过气象调整的 90% 分位数浓度，它们代表了最严重的 10% 污染情况。图 10 和 11 分别展示了“2+43”城市过去 24 个季节（2013 年春季至 2018 年冬季）经气象调整的 $PM_{2.5}$ 浓度 90% 分位数随时间变化的情况以及给定季节的时间序列。从 90% 分位数角度，45 城市 $PM_{2.5}$ 浓度仍具有同均值浓度类似的区域和季节特征。太行山东侧从保定向南到河南北部、山西西部和陕西地区仍为 $PM_{2.5}$ 高浓度区域，尤其在秋冬两季污染最为严重。近年来**京津冀鲁 90% 分位数浓度下降显著，晋豫陕 23 市则改善不大**。山西省太原、临汾、运城等城市自 2016 年以来还有显著恶化。除了相对低的夏季外，90% 分位数浓度在秋春季仍普遍高于 100 微克/立方米。冬季 90% 分位数在沿太行山东侧、河北河南及关中平原城市仍高于 200 微克/立方米，仍有很大的改善空间。

- **变化趋势**

对于 $PM_{2.5}$ 浓度最低的夏季，除河北张家口，山西 8 市，陕西 6 市外，其余 30 个城市近六年浓度明显下降。河南焦作、鹤壁、临汾、运城四市虽有改善但波动较大；山西 8 市的夏季 $PM_{2.5}$ 浓度水平改善不大，保持在 50 微克/立方米附近波动，陕西 6 市则维持在 30~40 微克/立方米的水平。

对于 $PM_{2.5}$ 浓度最高的冬季，京津冀地区 13 市中 2017 年 9 个城市（石家庄、保定、衡水、廊坊、沧州、秦皇岛、张家口、北京、天津）改善，承德恶化，2018 年 2 个城市（沧州、承德）改善，7 个城市（石家庄、保定、衡水、廊坊、秦皇岛、张家口、天津）恶化；山东 9 市 2017 年 3 个城市（滨州、德州和聊城）改善，4 个城市（菏泽、济宁、莱芜、泰安）恶化，2018 年 2 个城市（菏泽、济宁）改善，2 个城市（德州、滨州）恶化；河南省 9 城市 2017 年 4 个城市改善（鹤壁、焦作、三门峡和新乡），3 个城市恶化（开封、濮阳和郑州）；2018 年 4 个城市（焦作、郑州、三门峡）改善，鹤壁恶化；山西省改善幅度不大，临汾市在 2013 至 2016 年呈现迅猛增长态势，2015 年以来运城、临汾整体虽有下降但冬季 $PM_{2.5}$ 浓度仍显著高于同省其他城市；陕西省 6 市 2017 年均有改善，2018 年除渭南、延安外均有显著恶化。值得注意的是，汾渭平原上有 10 个城市 2014 年冬季 $PM_{2.5}$ 浓度远远低于

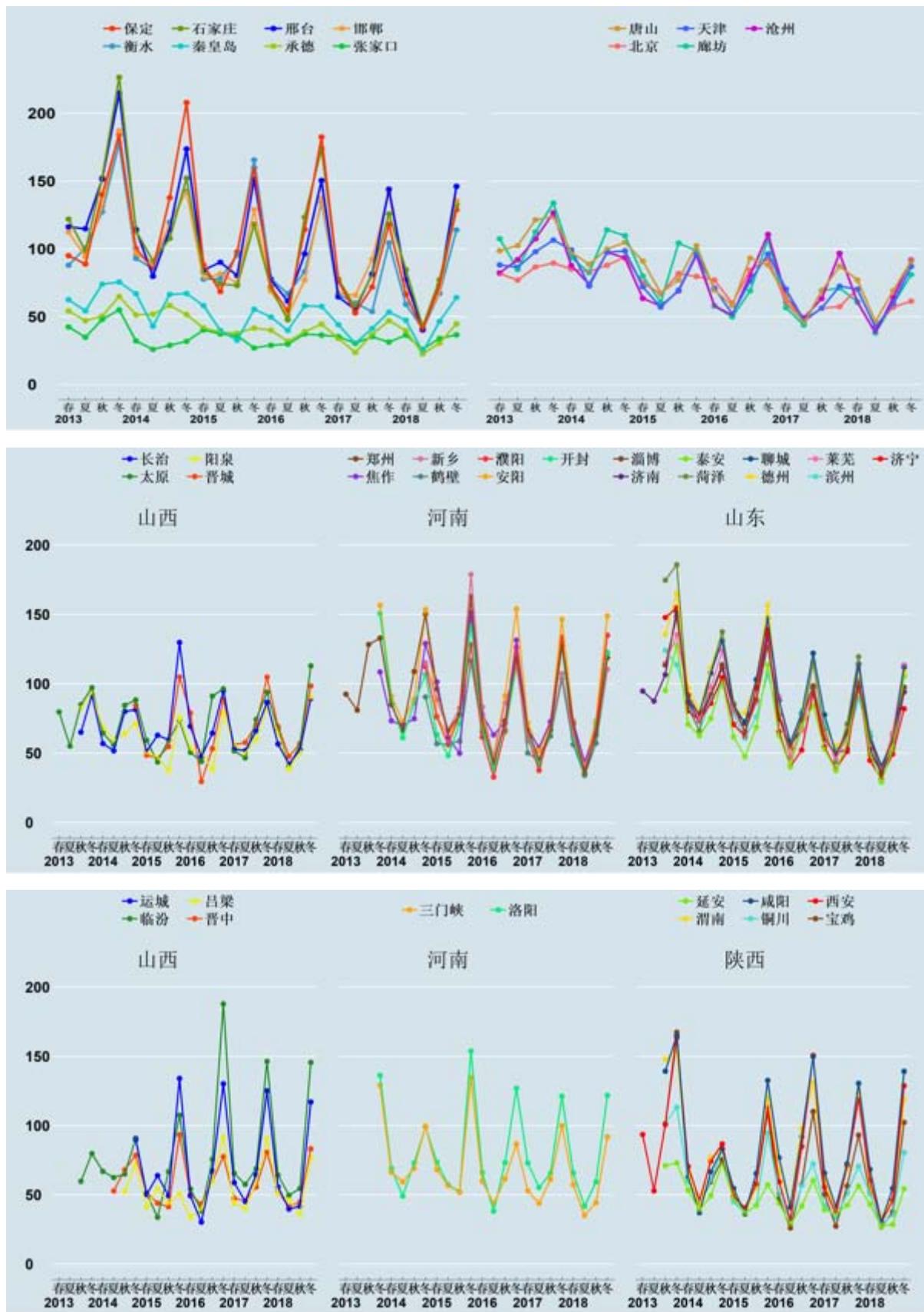


图 8：“2+43”城市气象调整后 2013 年至 2018 年 PM_{2.5} 季节平均值浓度(微克/立方米)时间序列图

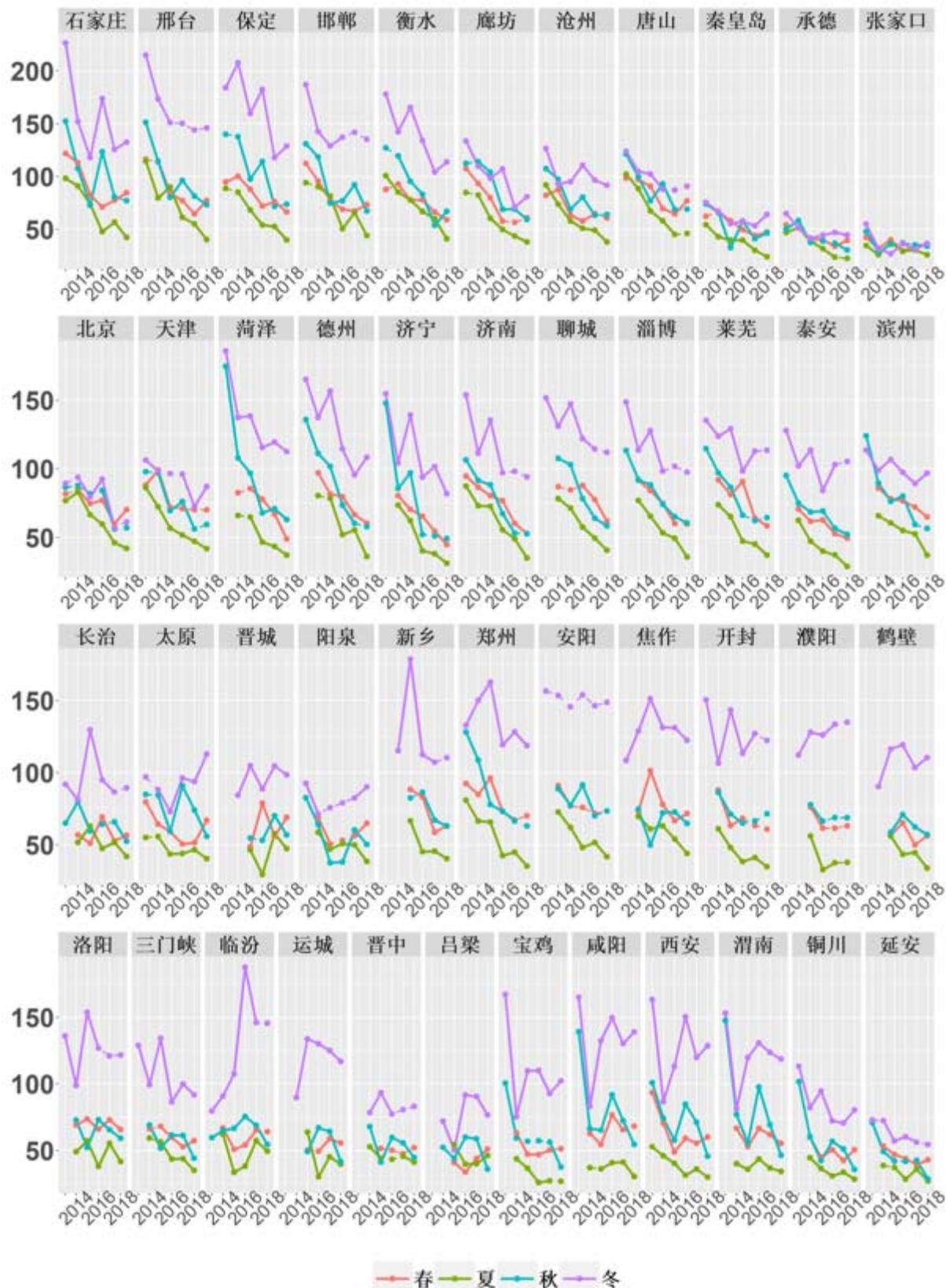


图 9：“2+43”城市气象调整后 2013 年至 2018 年 $\text{PM}_{2.5}$ 季节平均浓度(微克/立方米)的变化序列图

图中实线（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

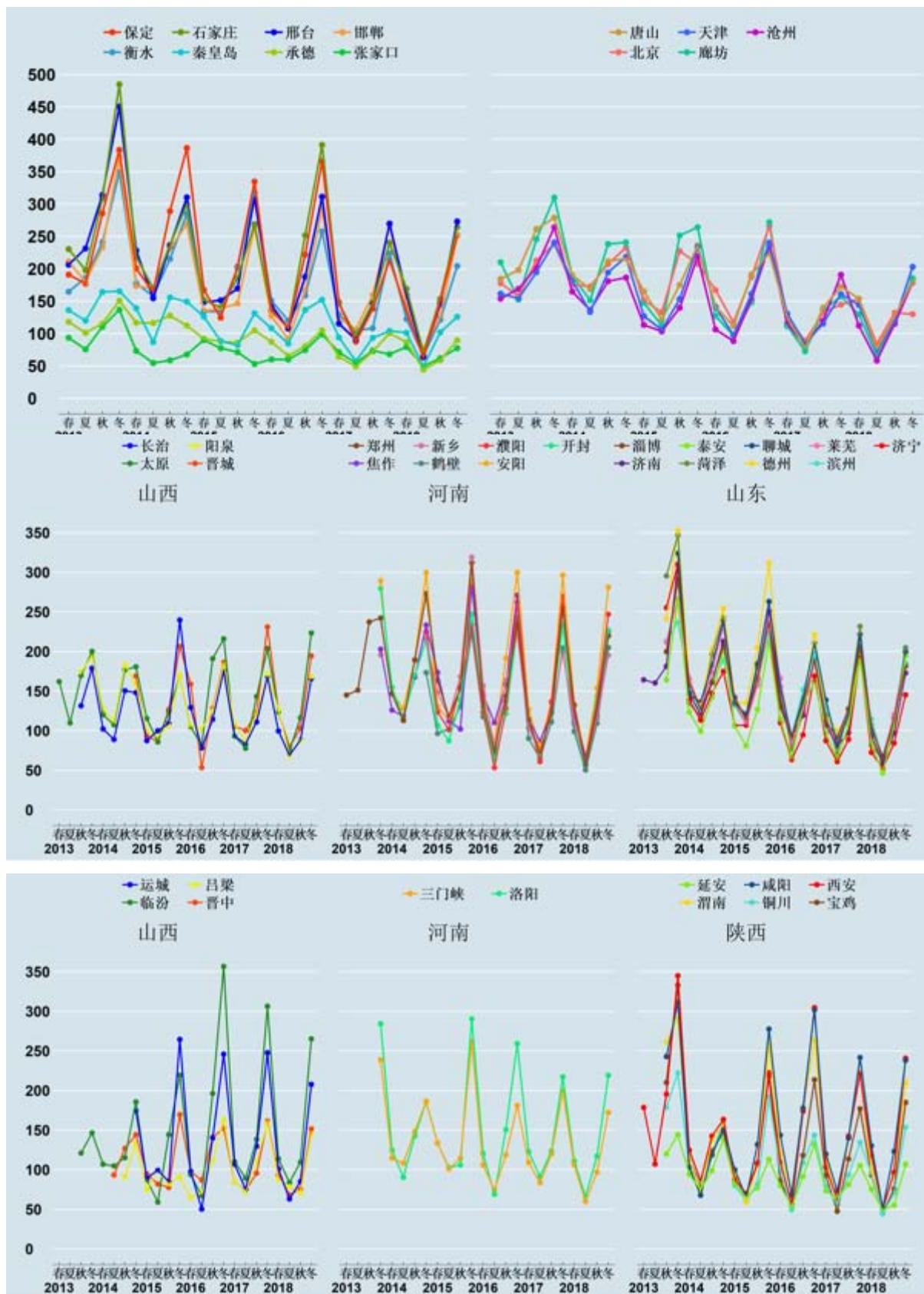


图 10：“2+43”城市气象调整后 2013 年至 2018 年 PM_{2.5} 季节 90% 分位数浓度(微克/立方米)时间序列图

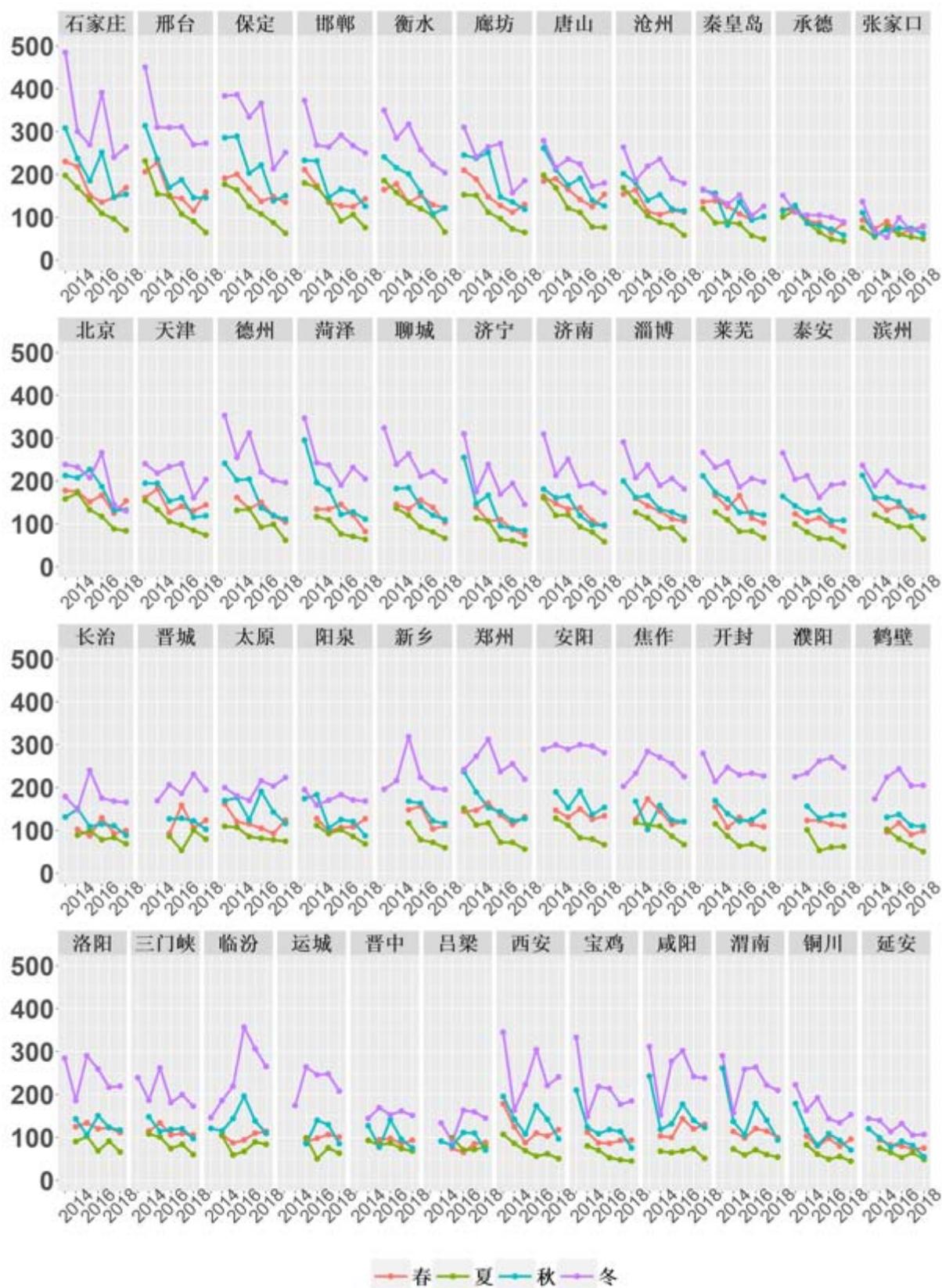


图 11：“2+43”城市气象调整后 2013 年至 2018 年 PM_{2.5} 季节 90% 分位数浓度(微克/立方米)的变化序列图

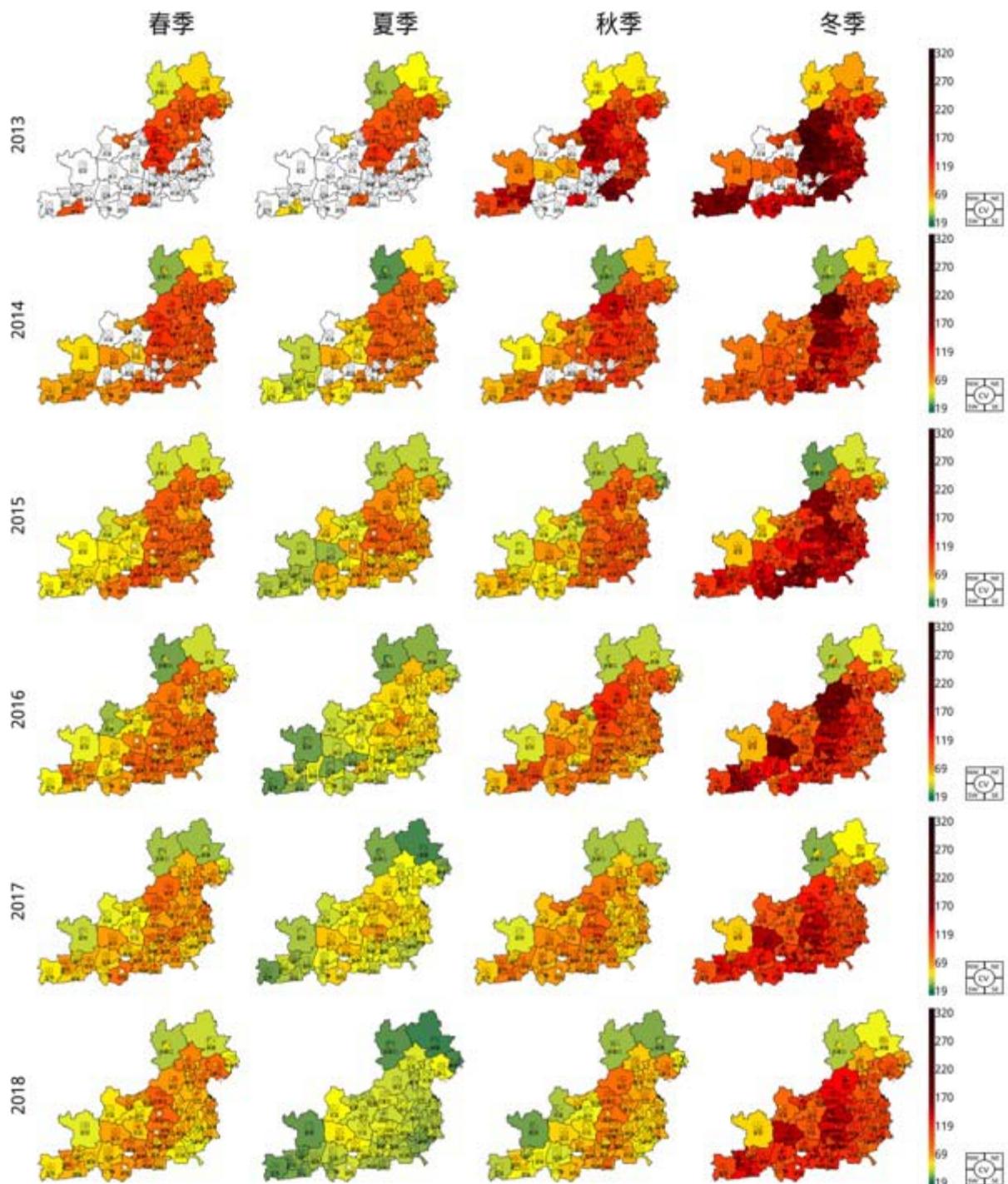


图 12：“2+43”城市 2013 年到 2018 年气象调整后 PM_{2.5}季节平均浓度(微克/立方米)地图
(白色代表数据少，无法得到可靠结果)

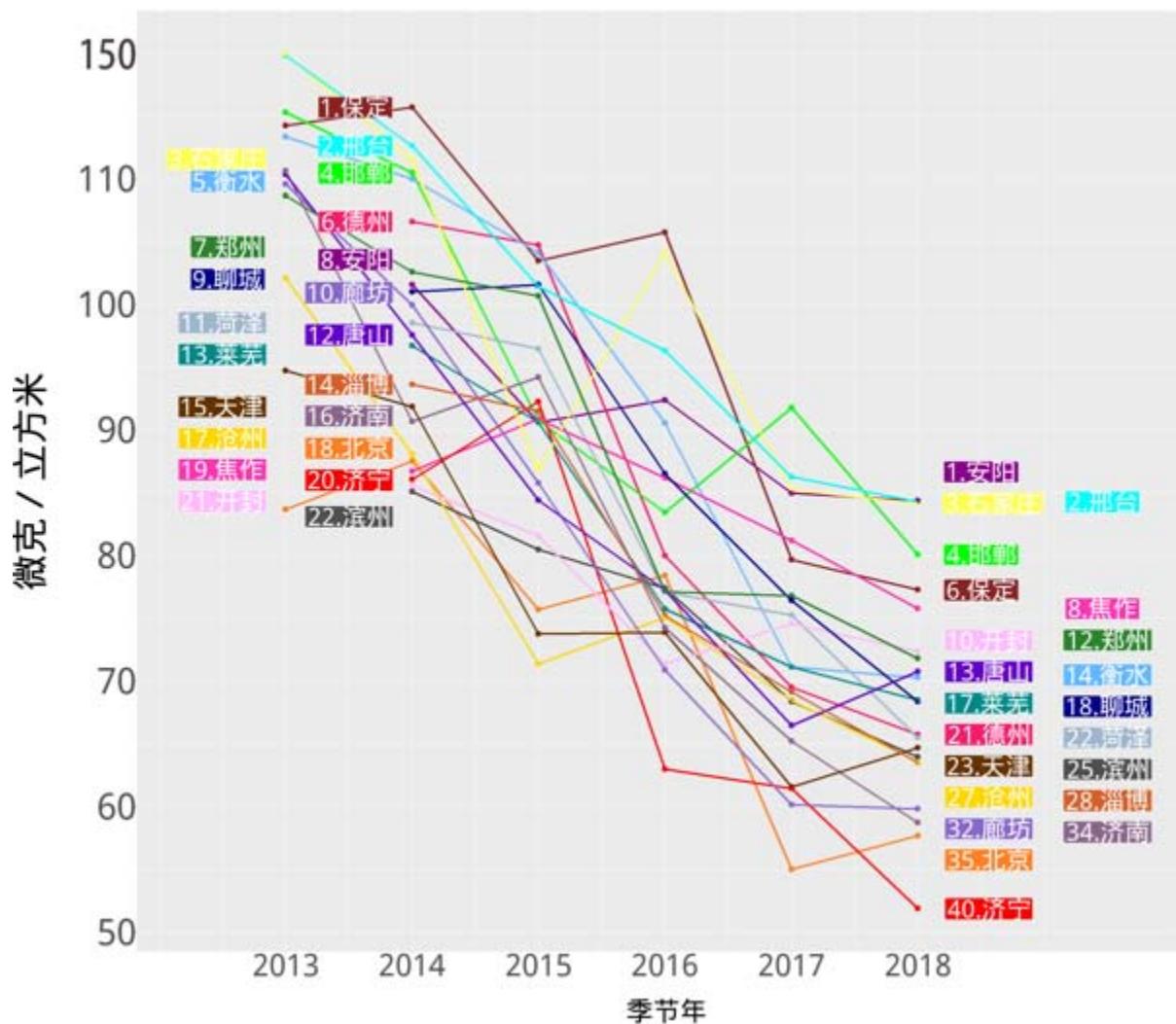


图 13：“2+43”城市前 22 名城市气象调整后 PM_{2.5}季节年平均浓度(微克/立方米)年际变化图
(2014、2018 季历年均以当年气象调整后的浓度为基准)



图 14：“2+43”城市气象调整后季节年 PM_{2.5}过去五/四年（绿色）或过去四/三年（红色）累积降幅图
(红色表示因 2014 年部分季度数据缺失而计算的四/三年累积降幅)

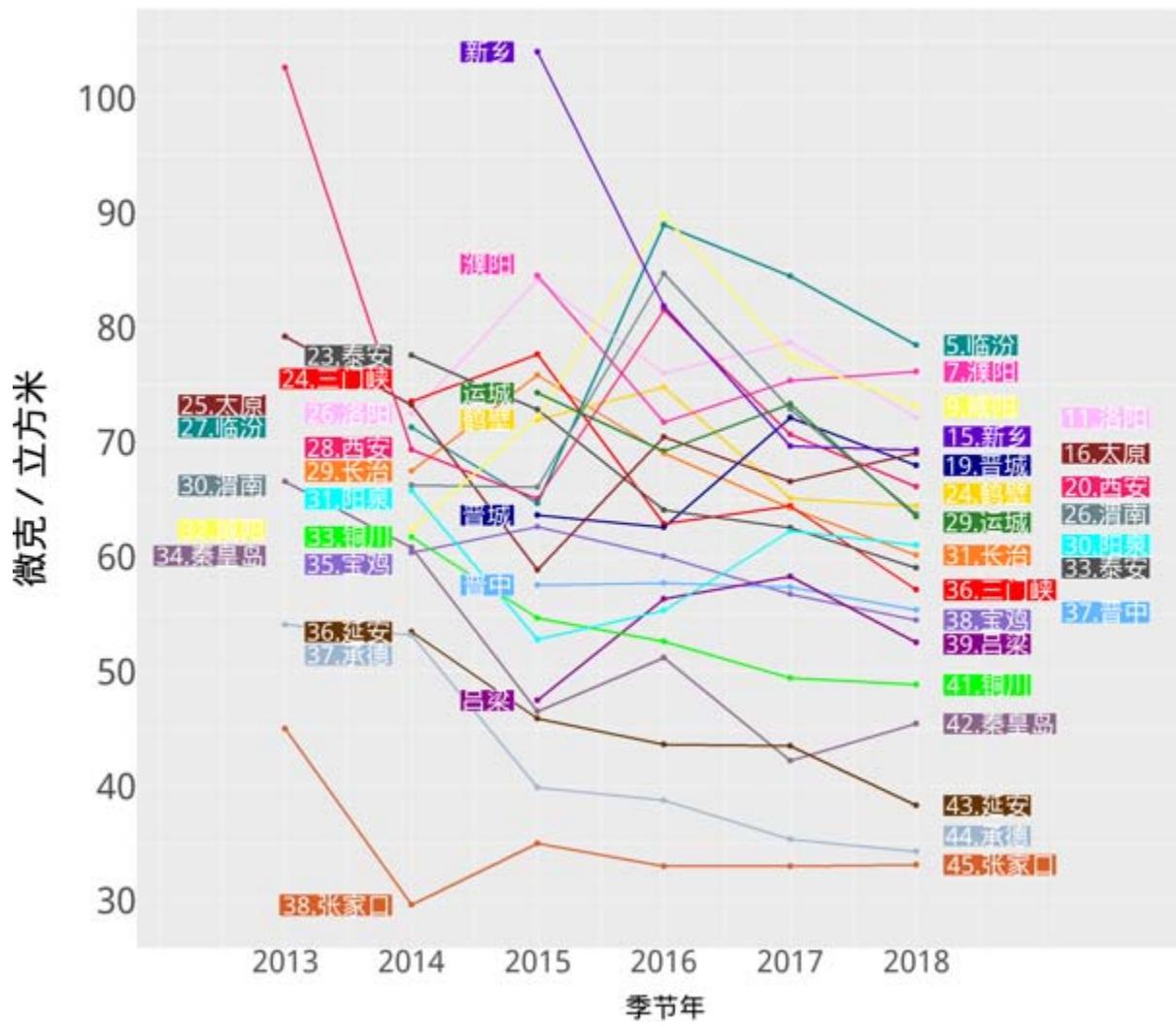


图 15：“2+43”城市气象调整后 PM_{2.5}季节年平均浓度(微克/立方米)年际变化图
(新乡、濮阳、运城、鹤壁、晋城、晋中和吕梁因 2014 年部分季度数据缺失而给出 2015 年至 2018 年平均浓度)

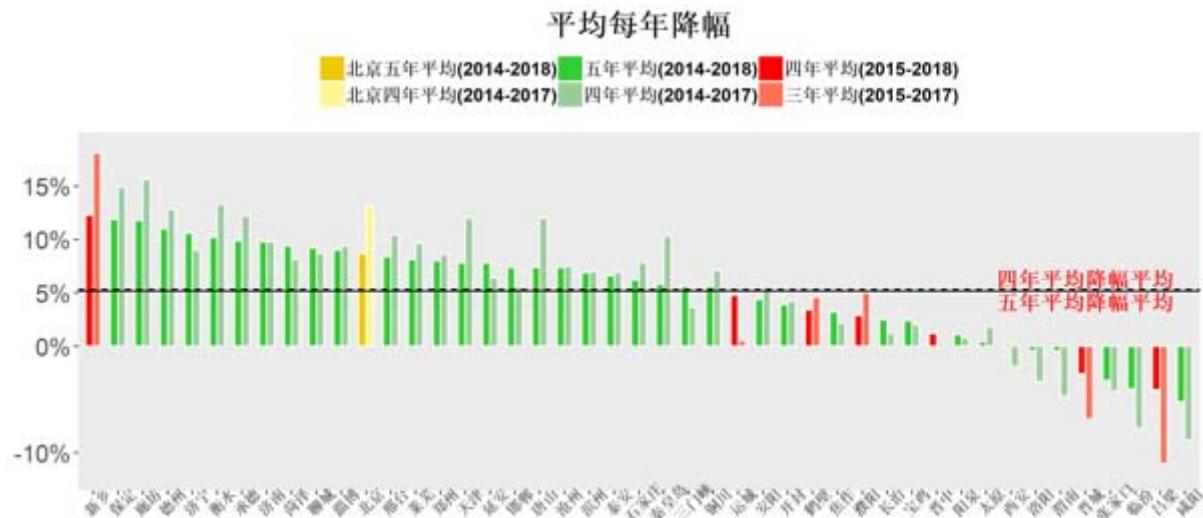


图 16：“2+43”城市气象调整后季节年 PM_{2.5}过去五/四年 (绿色) 或过去四/三年 (红色) 平均降幅图
(红色表示因 2014 年部分季度数据缺失而计算的四/三年平均降幅。图 14 和图 16 的计算方法不同：五年累积降幅
是 2018 年相较于 2014 年的降幅，平均每年降幅是每一年相较于前一年的降幅取平均。)

2015 年冬季的浓度。总体而言，京津冀鲁区域 22 市近六年 $PM_{2.5}$ 浓度已具有明显的下降趋势；山西、陕西地区 14 市 $PM_{2.5}$ 浓度一致性的下降趋势仍有待建立。

根据图 13 和 15 的“2+43”城市气象调整后 $PM_{2.5}$ 季节年平均浓度排名，廊坊和济宁排名下降（改善）幅度最大，分别下降了 22 和 20 名；咸阳和临汾的排名上升（恶化）幅度最大，分别上升了 23、22 名。

从图 14 五年累积降幅来看，除晋城、临汾、吕梁、张家口、咸阳外的所有城市在 2018 年的浓度均小于 2013 年的浓度，且大部分城市都是远远小于；其中新乡、运城、鹤壁、濮阳、晋中、晋城和吕梁比较的是 2018 年同 2014 年的变化情况。保定累积降幅最高，达到 41.8%，但由于其在 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。降幅为负的城市中，晋城、吕梁 2017 年前均持续恶化；咸阳在 2016 年前有严重恶化，而后虽有明显改观但改善幅度不足。对于 $PM_{2.5}$ 浓度较高的秋冬季节，沿太行山脉、环渤海、山东和河北北部这四个区域 $PM_{2.5}$ 秋冬两季 2014 至 2018 累积降幅分别为 28.3%、27.7%、25.0%、15.8%。河南、山西和陕西三个区域秋冬两季累积增幅相对较少，分别为 11.8%、1.4% 和 5.5%。相比 2017 年，2018 年秋冬两季晋鲁豫陕仍有不同程度的下降，以山西 8 市最为显著， $PM_{2.5}$ 浓度下降至 122.0 微克/立方米，降幅达 9.2%；京津冀地区 $PM_{2.5}$ 浓度有不同程度反弹，反弹了 1.8%，说明该地区 2018 年末 2019 年初颗粒物治理上有所松懈。

从图 16 年平均降幅来看，年平均降幅共有 6 个城市超过 10%，包括新乡、保定、廊坊、德州、济宁和衡水，新乡年平均降幅最多，达 12.3%。45 市年平均降幅平均值是 5.18%。洛阳、渭南、晋城、张家口、临汾、吕梁和渭南 7 城市降幅为负。

无论是累积降幅还是平均降幅，山东省与京津冀地区除张家口外的 21 城市均位于前 24 名，晋豫陕地区除新乡、郑州、延安的 20 城市则居于后 21 名。上述关于累积降幅和平均降幅的讨论进一步说明了京津冀地区 13 市与山东 9 市整体近年已然形成稳定的下降趋势；山西、陕西等地区降幅较低甚至有不降反增的现象，持续稳定的下降趋势仍有待建立！

● 2018 年情况

同 2017 年相比，2018 年春季 $PM_{2.5}$ 经气象调整后的浓度有 18 市反弹，它们是石家庄、邢台、邯郸、唐山、秦皇岛、承德、北京、长治、太原、晋城、阳泉、焦作、鹤壁、三门峡、吕梁、西安、铜川、延安；2018 夏季 $PM_{2.5}$ 经气象调整后的浓度仅有吕梁反弹；2018 年秋季 $PM_{2.5}$ 经气象调整后的浓度有 4 市反弹：保定、衡水、沧州、秦皇岛；2018 年冬季 $PM_{2.5}$ 经气象调整后的浓度有 16 市反弹：石家庄、保定、衡水、廊坊、秦皇岛、张家口、天津、德州、滨州、太原、阳泉、鹤壁、宝鸡、咸阳、西安、铜川。从全年平均角度，2018 年唐山、秦皇岛、天津、北京、太原 5 市显著恶化；濮阳、张家口 2 市恶化但不显著；保定、开封、邢台、晋中、阳泉、石家庄、衡水、鹤壁、铜川、安阳、新乡、廊坊 12 市有改善但不显著。读者还可参考第七节本团队首次给出的各城市的“人努力一天帮忙”指数。

- 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

本报告延续第五份报告继续计算了每个城市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 年晋鲁豫陕四省有一些城市有“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、沧州、滨州东面临海，东北风、东南风较西风更有利于 $PM_{2.5}$ 的扩散。其他各个城市由于污染源分布不同而具有不同的有利和不利于 $PM_{2.5}$ 的扩散的风向。（各城市感兴趣人员可以细致查阅。）

（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指数、用于官员考核。2013 年 $PM_{2.5}$ 取代 PM_{10} 成为大气污染的主要指标。2013 年，“2+43” 城市的 PM_{10} 数据有相当多的缺失，尤其是在晋鲁豫陕城市 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，故图 19 中会有大片的“空白区”。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”，即 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， PM_{10} 的浓度值应该大于 $PM_{2.5}$ 。但在实际观测中，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。本报告将使用这种方法²。另一种方法是对 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 关系进行建模，以推出缺失的 PM_{10} 。

我国目前的 PM_{10} 平均浓度标准如下表 4 所示。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。

表 4：我国目前 PM_{10} 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 | |

²因为倒挂在统计上能够解释为观测误差。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。

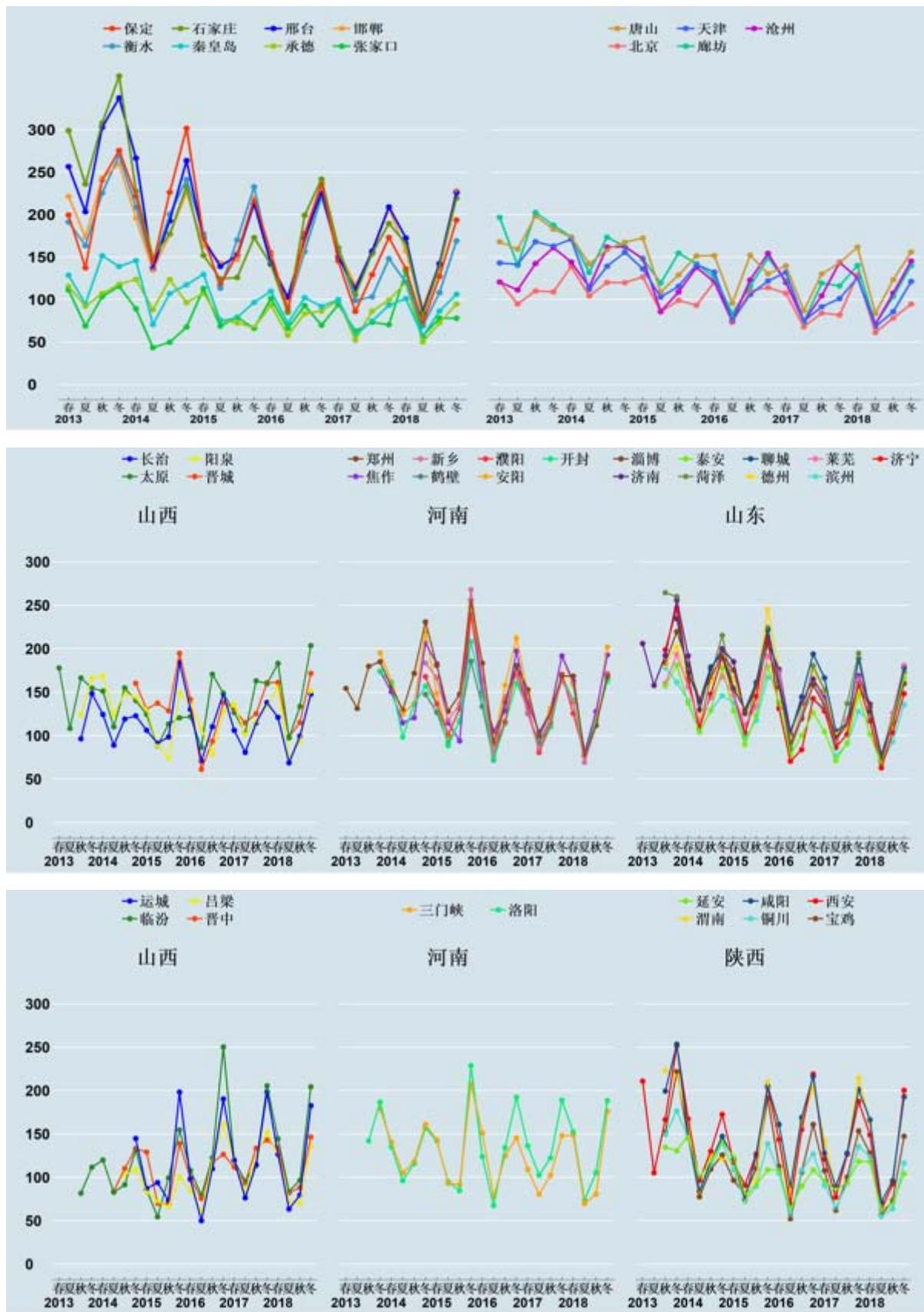


图 17：“2+43”城市气象调整后 2013 年至 2018 年 PM_{10} 季节平均值浓度(微克/立方米)时间序列图

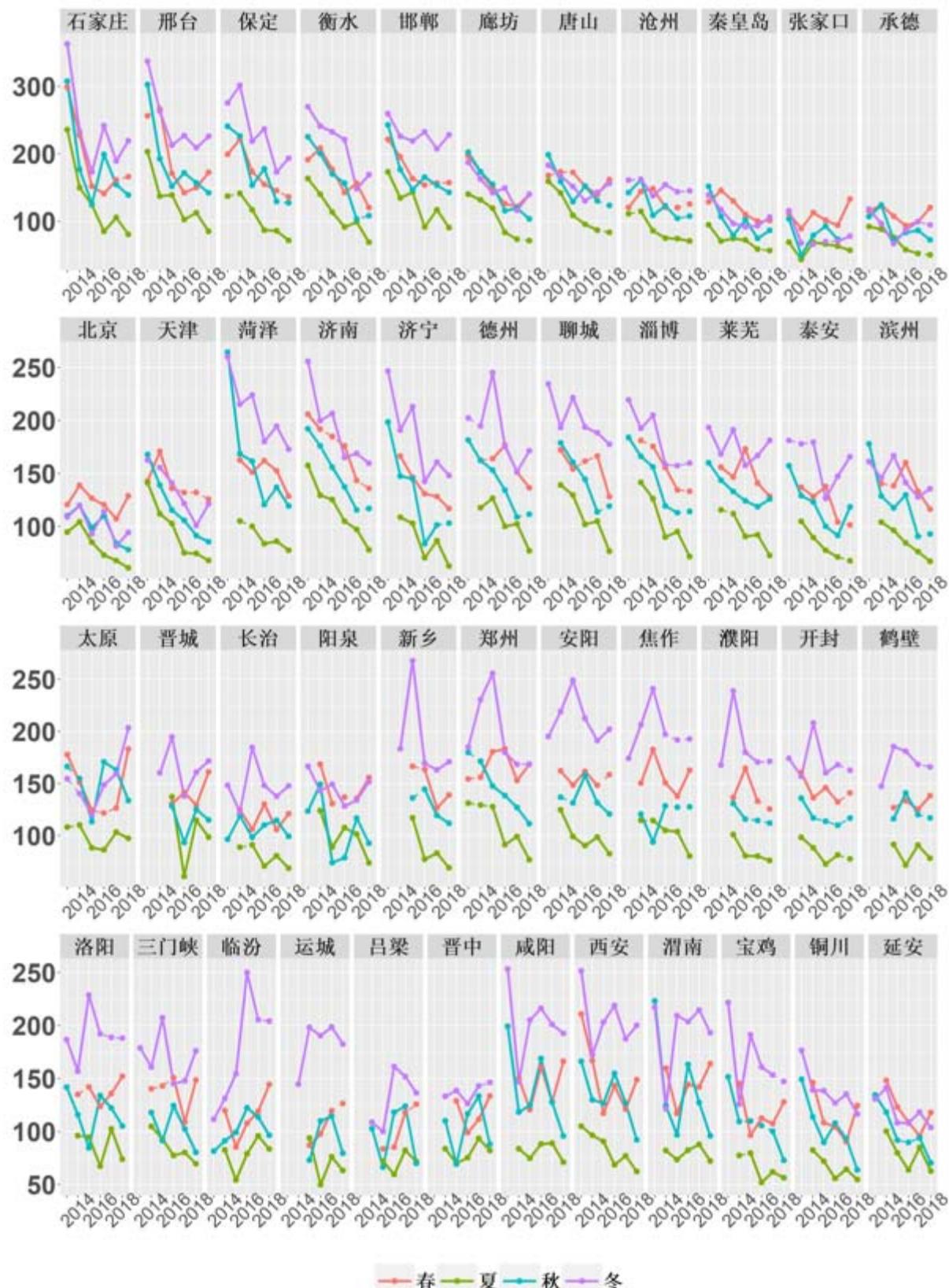


图 18：“2+43”城市气象调整后 2013 年至 2018 年 PM₁₀季节平均浓度(微克/立方米)的变化序列图

图中实线（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

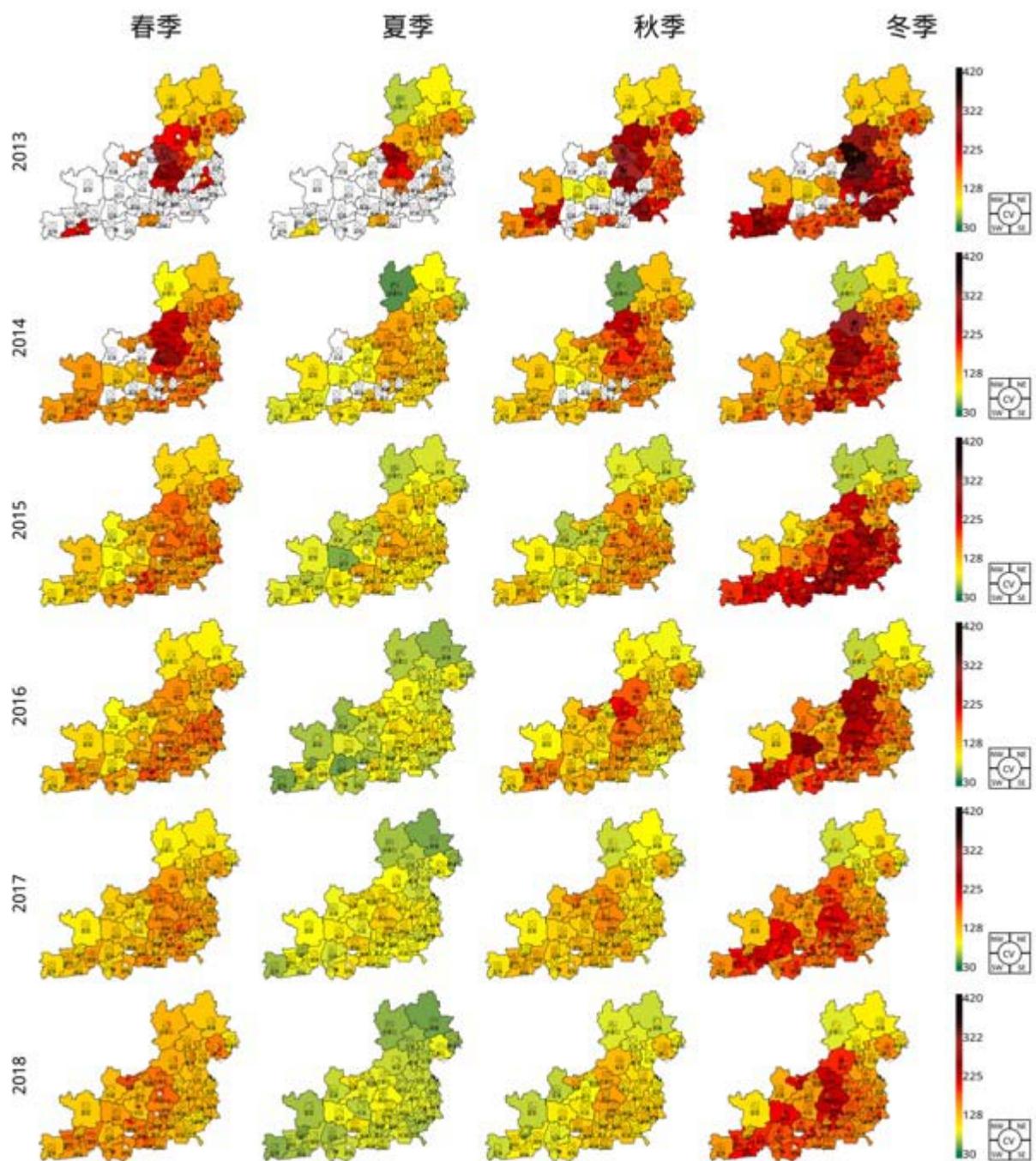


图 19：“2+43”城市 2013 年到 2018 年气象调整后 PM₁₀季节平均浓度(微克/立方米)地图
(白色代表数据少，无法得到可靠结果)

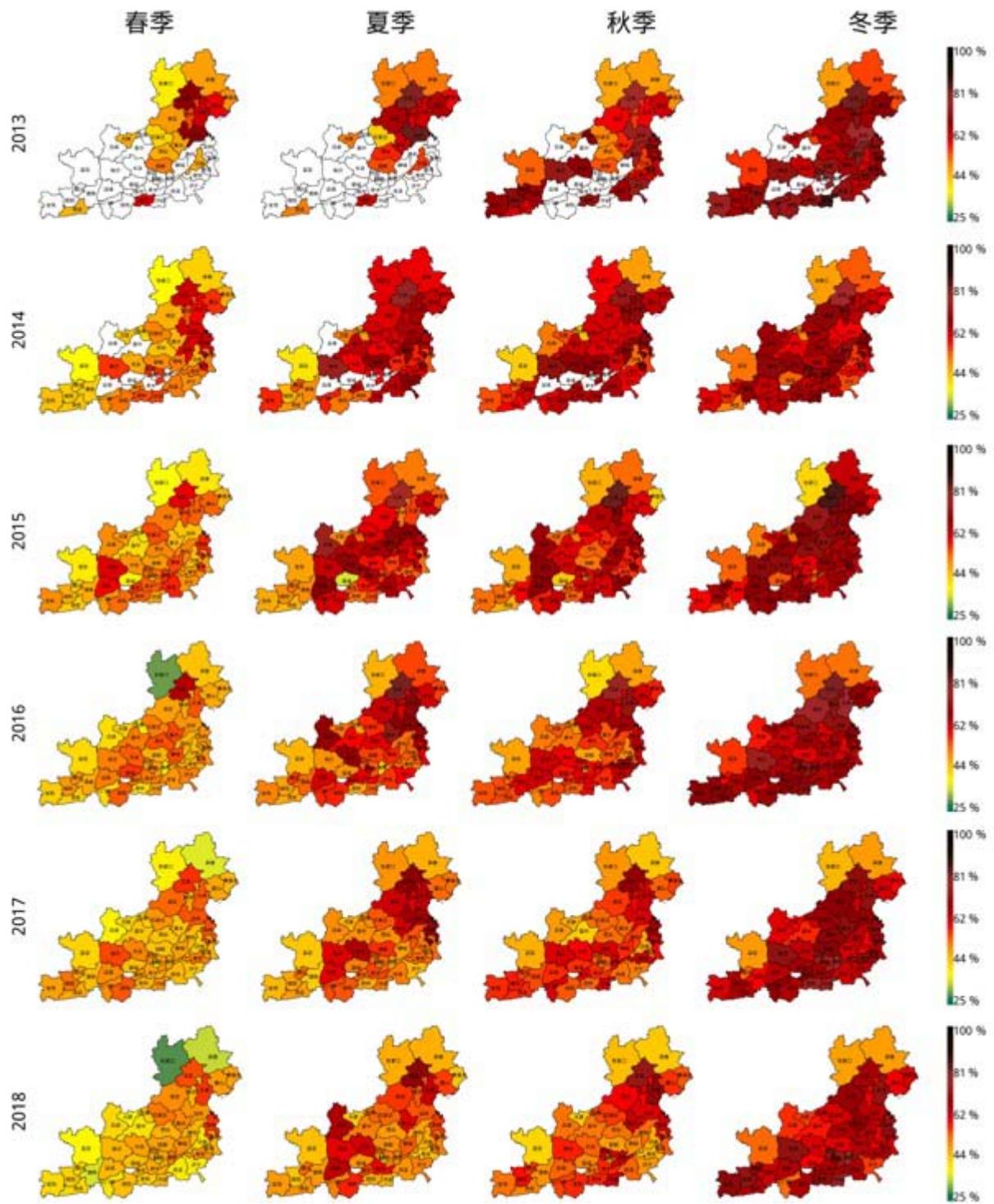


图 20：“2+43”市 2013 至 2018 年气象调整后 PM_{2.5} 占 PM₁₀ 的比例地图
(白色代表数据少, 无法得到可靠结果)

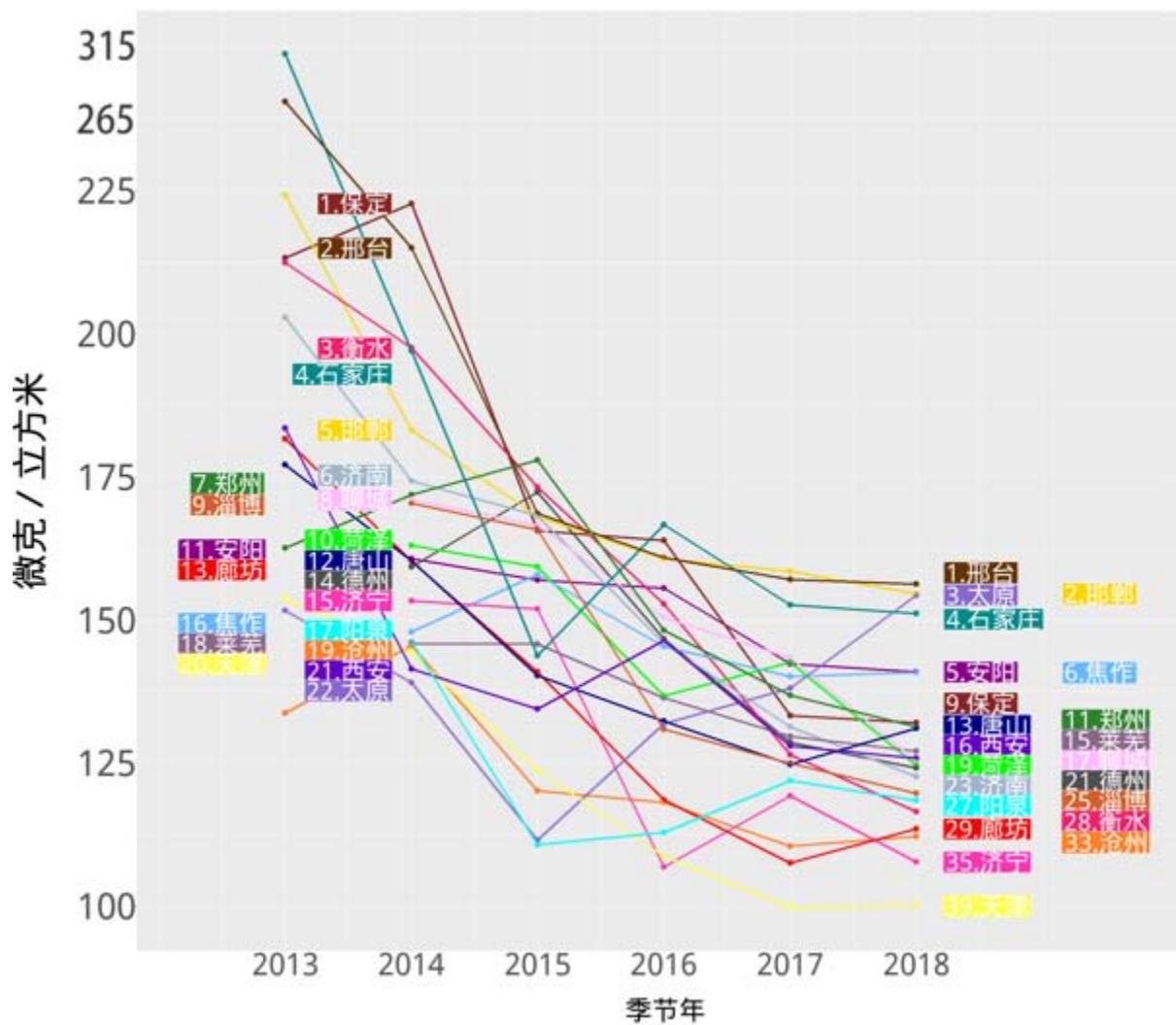


图 21：“2+43”城市前 22 名城市气象调整后 PM₁₀季节年平均浓度(微克/立方米)年际变化图
(2014、2018 季历年排名均以当年气象调整后浓度为基准)

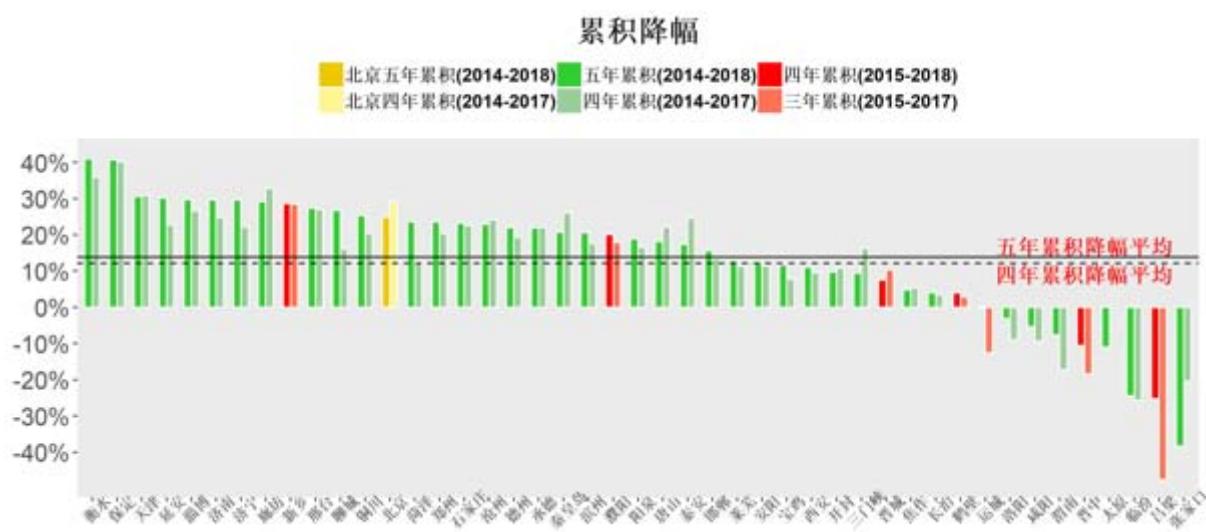


图 22：“2+43”城市气象调整后季历年 PM₁₀过去五/四年（绿色）或过去四/三年（红色）累积降幅图
(红色表示因 2014 年部分季度数据缺失而计算的四/三年累积降幅)

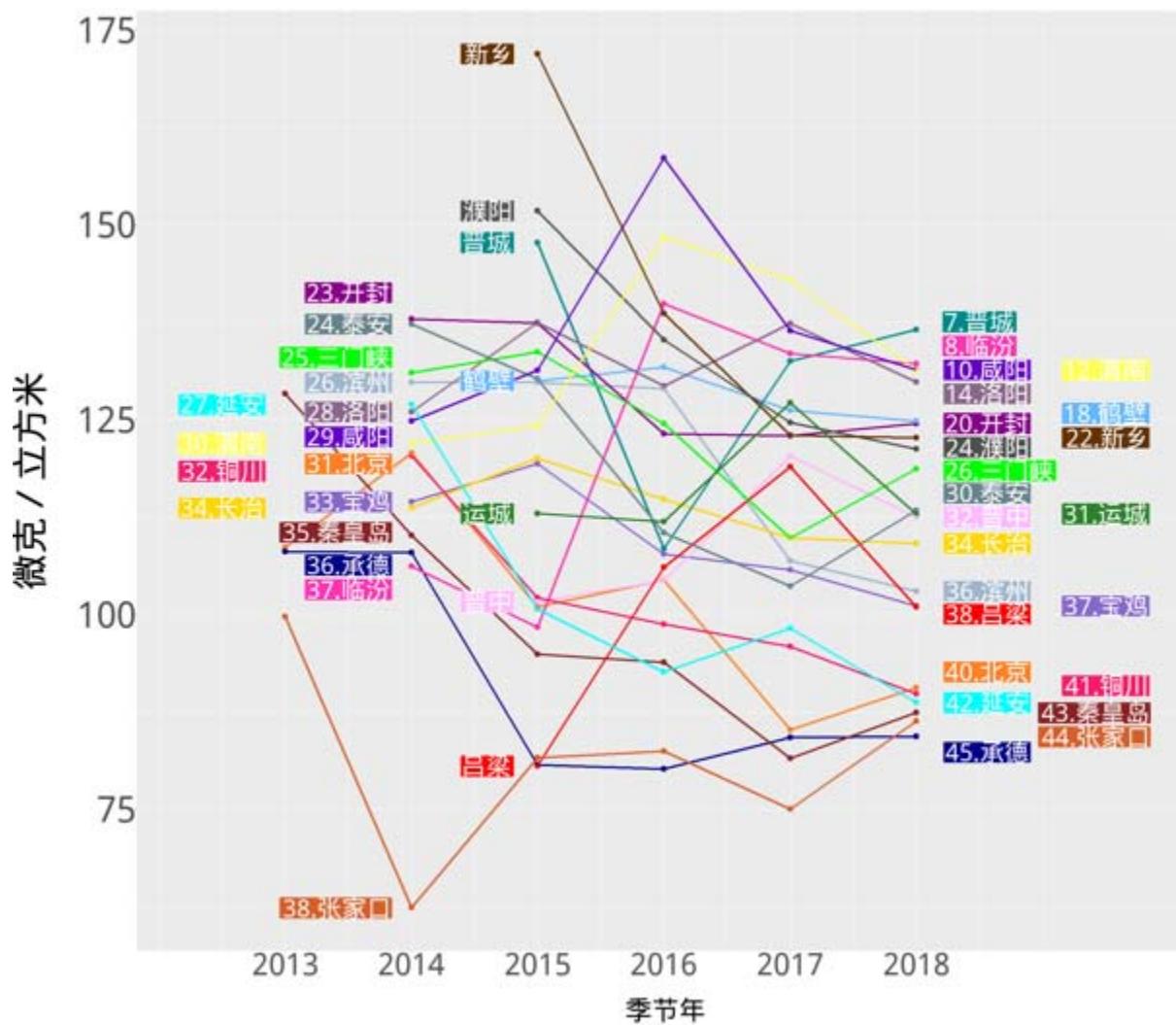


图 23：“2+43”城市气象调整后 PM₁₀季节年平均浓度(微克/立方米)年际变化图
(新乡、濮阳、运城、鹤壁、晋城、晋中和吕梁因 2014 年部分季度数据缺失而给出 2015 年至 2018 年平均浓度)

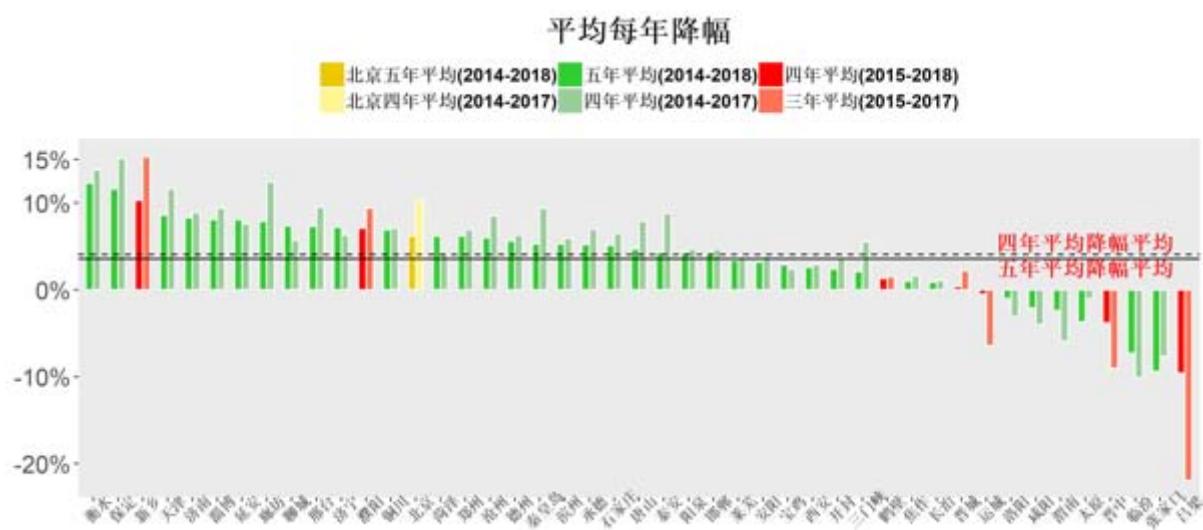


图 24：“2+43”城市气象调整后季节年 PM₁₀过去五/四年（绿色）或过去四/三年（红色）平均降幅图
(红色表示因 2014 年部分季度数据缺失而计算的四/三年平均降幅)

图 17 和图 18 展示了“2+43”城市过去 24 个季节经气象调整的 PM_{10} 季节平均值浓度随时间变化的情况以及在每个给定季节的时间序列，我们发现过去六年 PM_{10} 浓度有如下几个特征：

- **季节效应**

同 $PM_{2.5}$ 一样， PM_{10} 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、陕西、河南和环渤海，最后是山西和河北北部城市。此外，“2+43”城市 PM_{10} 污染还有独特的、不同于 $PM_{2.5}$ 的特征。一方面， PM_{10} 浓度最高的季节与城市的地理位置密切相关。沿太行山 5 市，河南 9 市，山东 9 市，山西除阳泉外的 7 市以及陕西除延安外的 5 市，冬季的 PM_{10} 浓度最高。然而河北北部的北京、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+43”城市绝大部分城市和年份 PM_{10} 春季浓度要高于秋季。这也说明春季的沙尘对 PM_{10} 浓度影响很大。

- **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：即太行山脉的保定、石家庄、邢台、邯郸和衡水河北五市，河南所有九市，陕西除延安和宝鸡外的四市为高浓度区域；河北北部张家口、承德、秦皇岛三市为低浓度区；北京、天津、延安及自唐山以南的河北城市和山东九市为中浓度区。太行山脉附近的城市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。河北北部城市尽管更易受到沙尘的影响，但 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自身排放。

- **变化趋势**

根据图 21 和图 23 的 45 城市气象调整后 PM_{10} 年平均浓度排序，衡水和济宁降幅最大，分别下降了 25 和 20 名；临汾、太原、咸阳增幅最大，分别增长了 29、19、19 名。

从图 22 五年累积降幅来看，除去太原、张家口和汾渭平原的洛阳、咸阳、渭南、晋中、临汾、吕梁的其他城市较其初始年份，均在 2018 年有一定降幅，衡水、保定降幅最高，均超过 40%；天津、延安则达到 30% 的水平；共 18 个城市居于 20% 至 30% 之间。从图 24 年平均降幅来看，“2+43”大部分集中在 10% 以内，平均值为 3.56%。衡水、保定、新乡三市超过 10%；运城、洛阳、咸阳、渭南、太原、晋中、临汾、张家口、吕梁 9 市降幅为负。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。

类似于 $PM_{2.5}$ ，无论是累积降幅还是平均降幅，山东省与京津冀地区除张家口外的 21 城市均位于前 27 名，晋豫陕地区除新乡、延安、濮阳、铜川、郑州、阳泉外的 17 城市则居于后 18 名。这进一步印证我们的观点，即京津冀鲁 22 市的颗粒物已形成稳定下降趋势；而山西、陕西地区持续稳定的下降趋势仍有待建立。

- PM_{2.5} 占 PM₁₀ 的比例

根据图 20, 45 个城市 2013 年至 2018 年各季度 PM_{2.5} 占 PM₁₀ 的比例具有如下特征。

从季节分布来看: PM_{2.5} 占 PM₁₀ 的比例随季节变动明显, 春季占比最低, 平均值为 47.2%; 夏季、秋季较高, 平均值分别为 55.5% 和 57.1%; 冬季占比最高, 平均值达 64.2%。

从年际变化来看: 从 2013 年至 2018 年, PM_{2.5} 占 PM₁₀ 的比例逐年降低, 2013 年平均值为 61.8%, 2014 年平均值为 57.8%, 到 2018 年逐年下降至 52.8%。

从地理分布来看: 地区间差异较小, 京津冀、山东、河南、山西、陕西全年平均值分别为 57.4%、57.3%、57.1%、55.1%、52.0%; 45 个城市中, 北京 PM_{2.5} 占比均值最高, 全年平均值为 72.2%, 张家口 PM_{2.5} 占比均值最低, 全年平均值为 44.4%; 北京、滨州、天津、沧州、临汾 5 市全年均值超过 60%; 张家口、延安、承德 3 市则不超过 50%。就 2018 年而言, 仍以北京最高, 张家口最低, 全年均值分别降至 65.3% 和 40.8%; 北京、天津、滨州、濮阳四市全年均值超过 60%; 不超过 50% 的城市增至 12 个, 在 5 个地区分布均匀。

PM_{2.5} 占 PM₁₀ 的比例变化说明, 伴随 PM_{2.5} 治理和浓度水平降低, PM_{10-2.5} 的下降速度低于 PM_{2.5} 的下降速度, PM_{10-2.5} 污染也应逐渐被重视。

(三)二氧化硫

二氧化硫 (SO₂) 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 SO₃, 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[19]。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 75 ppb (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 0.5 ppm (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 | |

- **季节效应**

根据图 25 和 26，“2+43”城市具有相似的、明显的季节效应，以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，比如长治 2016 年的冬（138.8 微克/立方米）夏（13.1 微克/立方米）季比例甚至达到了 10.6 倍。唐山市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 1.1 到 2 之间。伴随二氧化硫污染治理及其浓度的降低，这种冬夏差距在逐步缩小。

- **区域特征**

根据图 25、26 和 27，相对于 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} ，二氧化硫具有不同的区域划分。**二氧化硫的空间分布特征不能由地理因素完全解释，且近六年有较大变化。**根据图 25、26 和 27，2013 至 2015 年二氧化硫区域划分，尤其是对冬季的划分，以河北、河南沿太行山城市为高浓度区域；北京，河北北部，陕西西部为低浓度区域；其他城市为中浓度区域。2016 至 2017 年，河北、河南沿太行山城市浓度下降幅度很快。**由于太行山东侧城市的快速下降，山西成为冬季高浓度的集中区域，此外唐山、延安浓度也比较高。**到 2018 年，二氧化硫区域划分基本上以山西为高浓度区；北京，河北北部，河南，陕西西部，山东济宁、菏泽二市为低浓度区；河北、河南沿太行山城市，山东其余七市以及唐山、延安为中浓度区。

值得注意的是，唐山二氧化硫的水平远高于环渤海其他城市（沧州、廊坊、北京和天津）。考虑到唐山有利的大气扩散条件，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）；不属于“2+26”城市范围的山东省莱芜市，二氧化硫浓度水平居山东第二位，这同样反映其生产活动中二氧化硫排放较高；相比于其他地区，山西二氧化硫浓度已成为较高水平区域，二氧化硫控制应成为山西大气污染治理的主要问题。

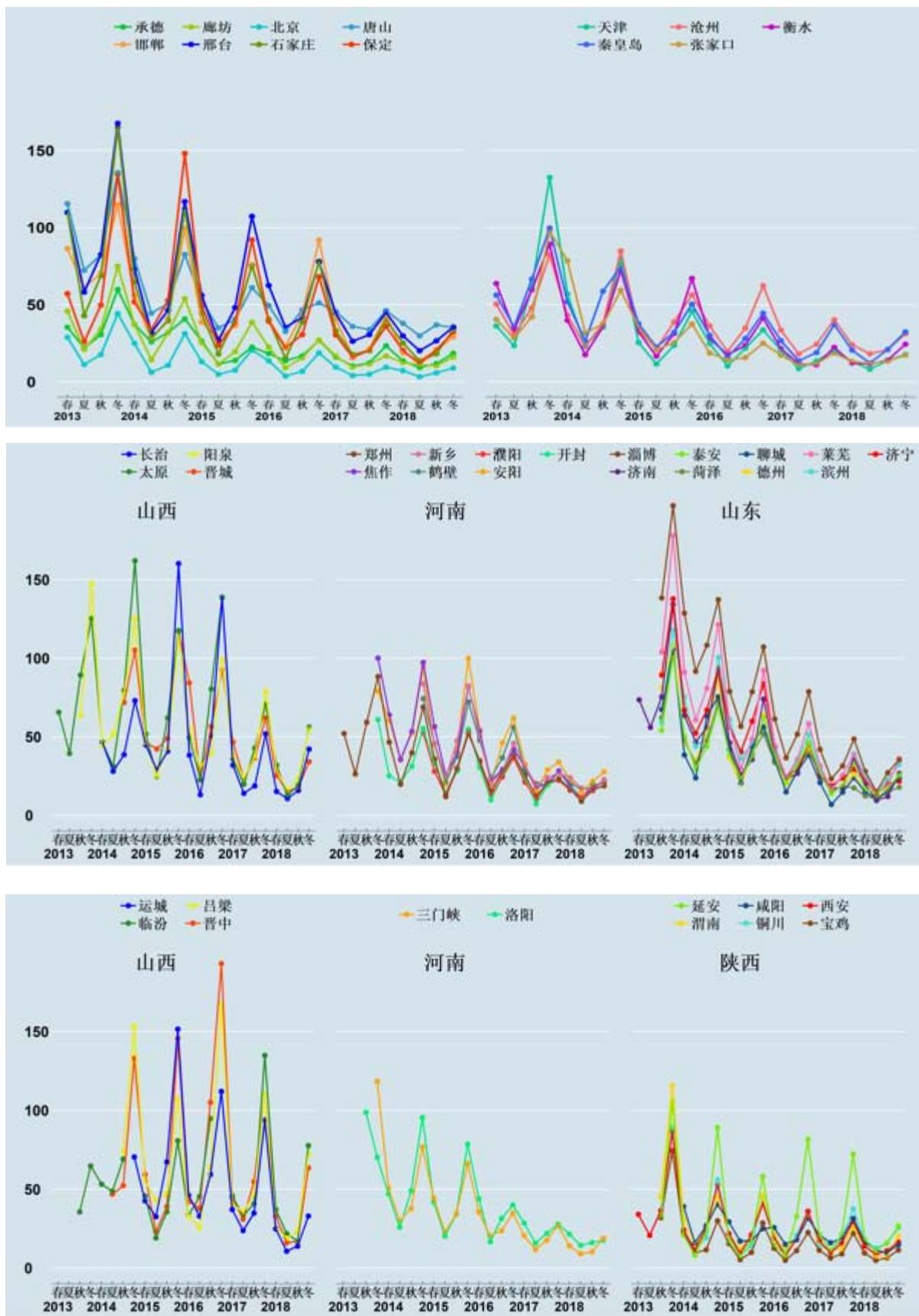


图 25: “2+43”城市气象调整后 2013 年至 2018 年二氧化硫季节平均值浓度(微克/立方米)时间序列图

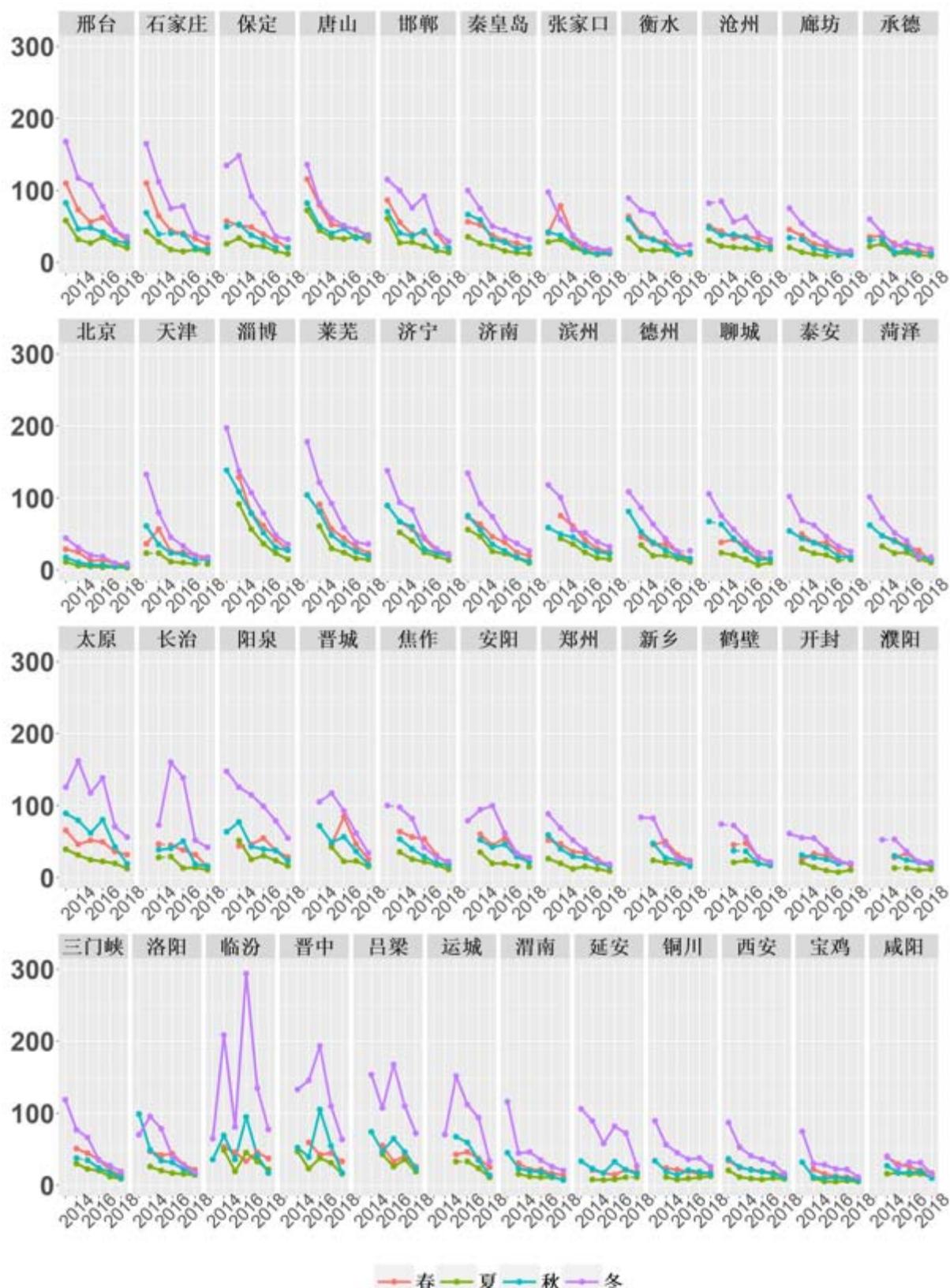


图 26：“2+43”城市气象调整后 2013 年至 2018 年二氧化硫季节平均浓度(微克/立方米)的变化序列图

图中实线（虚线）代表在 5% 统计学显著水平比上一年有（无）显著增加或减少

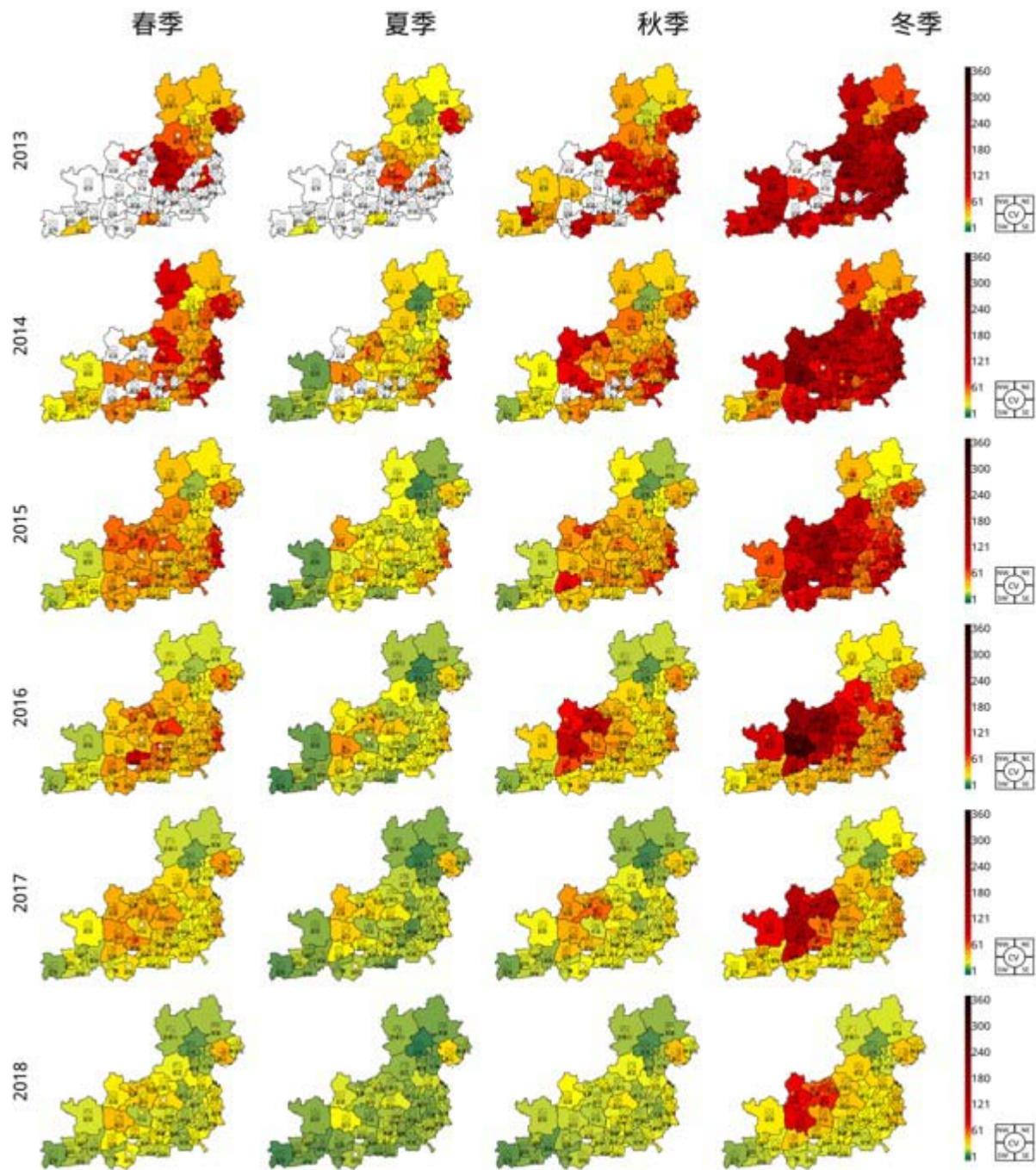


图 27：“2+43”城市 2013 年到 2018 年气象调整后二氧化硫季节平均浓度(微克/立方米)地图
(白色代表数据少，无法得到可靠结果)

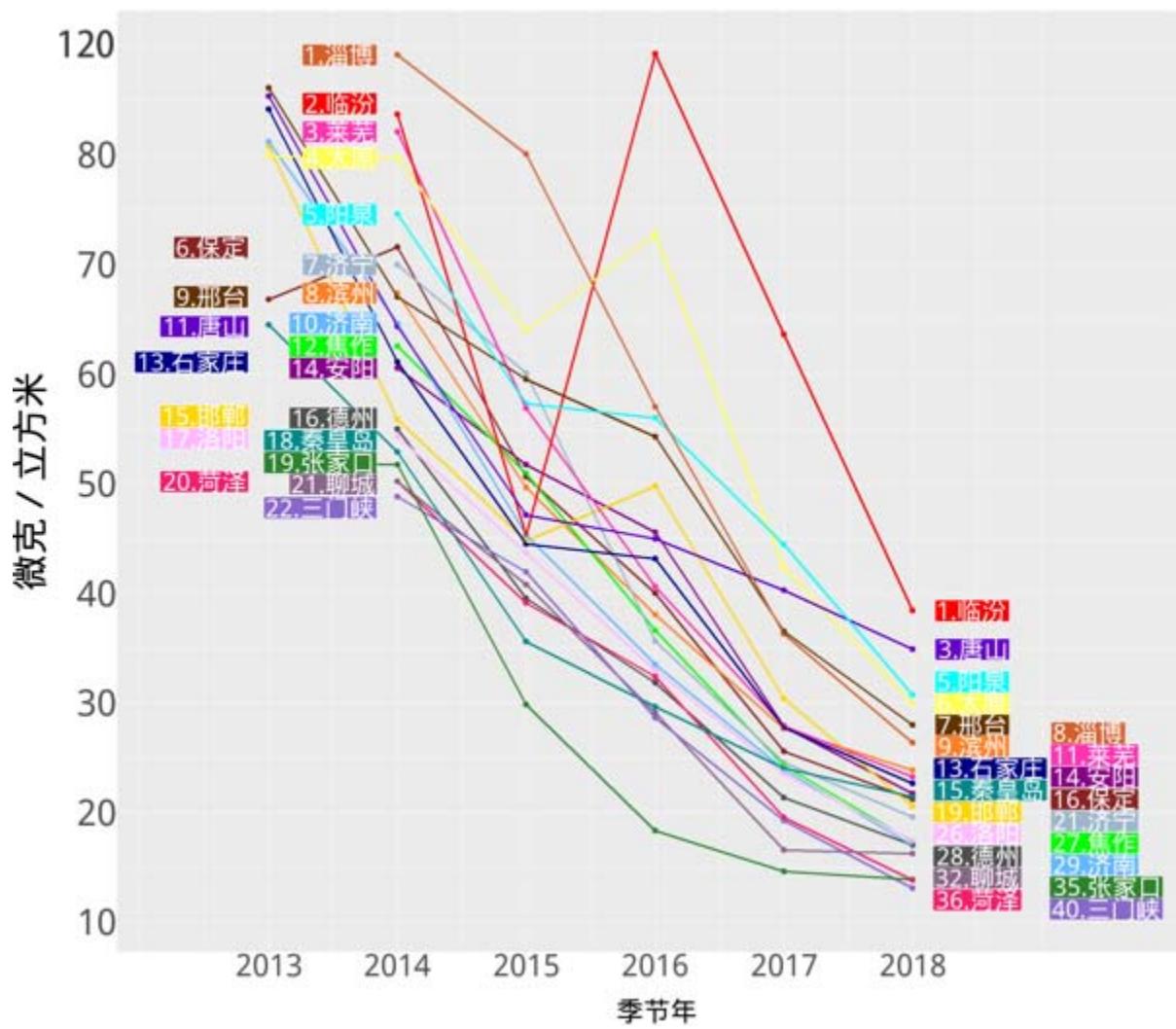


图 28: “2+43”城市前 22 名城市气象调整后二氧化硫季节年平均浓度(微克/立方米)年际变化图

(2014、2018 季历年均以当年气象调整后的浓度为基准)

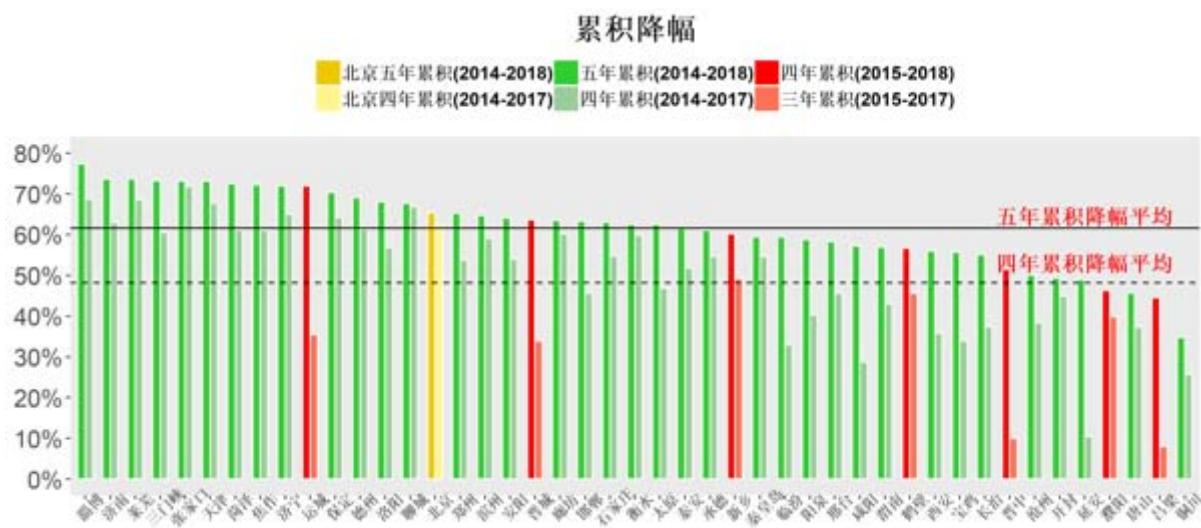


图 29: “2+43”城市气象调整后季节年二氧化硫过去五/四年（绿色）或过去四/三年（红色）累积降幅图

(红色表示因 2014 年部分季度数据缺失而计算的四/三年累积降幅)

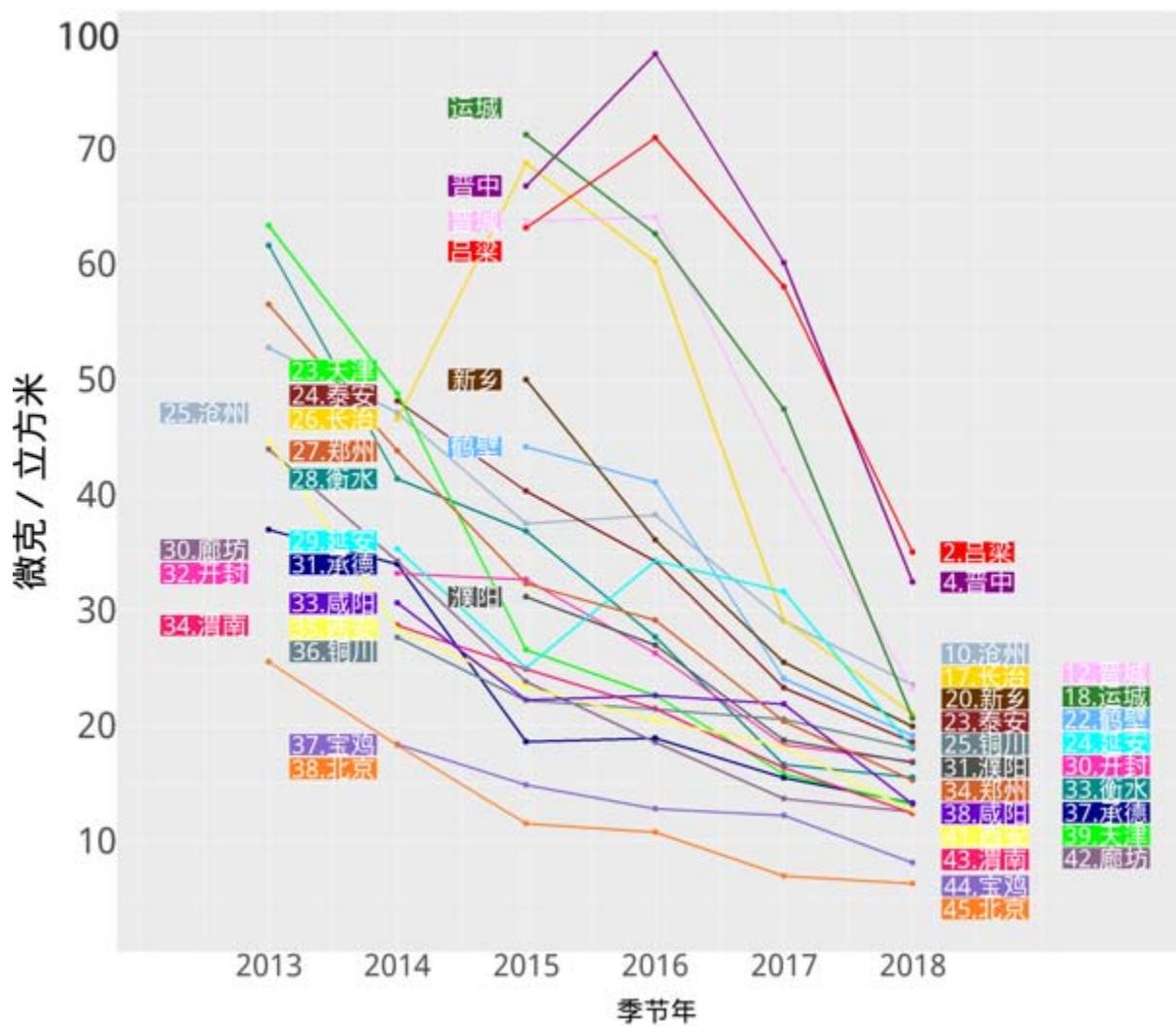


图 30: “2+43”城市后 23 名城市气象调整后二氧化硫季节年平均浓度(微克/立方米)年际变化图
(新乡、濮阳、运城、鹤壁、晋城、晋中和吕梁因 2014 年部分季度数据缺失而给出 2015 年至 2018 年平均浓度)

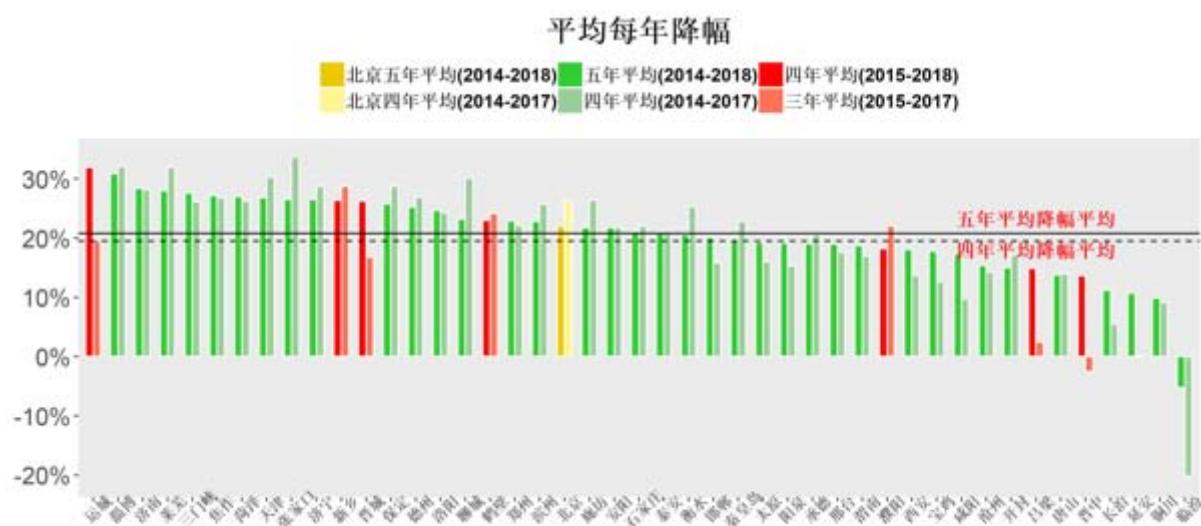


图 31: “2+43”城市气象调整后季节年二氧化硫过去五/四年（绿色）或过去四/三年（红色）平均降幅图
(红色表示因 2014 年部分季度数据缺失而计算的四/三年平均降幅)

- 变化趋势

根据图 29 和 31, 过去六年整体来看, 区域内二氧化硫浓度改善显著。其中北京市从 2017 年开始的 8 个季度的二氧化硫浓度均为个位数, 达到了一些发达国家水平。2018 年冬季有 21 个城市 (宝鸡、北京、承德、鹤壁、衡水、菏泽、焦作、济宁、开封、廊坊、聊城、洛阳、濮阳、三门峡、天津、渭南、西安、咸阳、新乡、张家口、郑州) 平均浓度达到 25 微克/立方米以下。45 城市五年累积增幅平均达 61.6%, 共有 11 个城市累积降幅达 70%以上, 前三均为山东省。山西 8 市 2017 至 2018 年冬季二氧化硫浓度有所改善, 从 2017 年 8 城市全部超过 50 微克/立方米且有 4 个城市超过 90 微克/立方米, 降低至 2018 年只有 5 市 (临汾、吕梁、晋中、太原和阳泉) 超过 50 微克/立方米且均不超过 80 微克/立方米, 但比较而言, 山西二氧化硫浓度仍处于较高水平。

根据图 28 和 30, 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 2018 年位居第三位。济南和三门峡的排名降幅最大, 分别下降 19 和 18 名。沧州和铜川的排名增幅最大, 分别上升 15 和 11 名。因 2014 年数据缺失而未参与计算的吕梁、晋中分别位居 2018 年第 2、4 名, 这也反应了山西二氧化硫浓度较高的问题。

(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 在雾滴表面被催化氧化形成 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 $PM_{2.5}$ 的重要组分之一。同时, 二氧化氮在光照下可与氧气发生化学反应生成臭氧, 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表 6 所示, 而美国环境保护署的一级和二级标准为: 年平均浓度 53 ppb (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 | |

- **季节效应**

“2+43”城市的二氧化氮也具有明显的季节特征。**二氧化氮浓度冬季最高，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，**延安、唐山、吕梁三市夏天二氧化氮浓度较高，需要引起关注。**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、河南和陕西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 45~70 微克/立方米，而这三个城市冬季存在超过 70 微克/立方米的情况；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。

- **区域特征**

根据图 32、33 和 34，二氧化氮浓度以河北、河南沿太行山城市与唐山市为高浓度区域；河北北部、山东南部（济宁、菏泽）二市和陕西宝鸡为低浓度区域；其他城市则差别不大，为中浓度区域。区域内二氧化氮下降微弱，多数城市未形成持续的下降趋势。值得注意的是，自 2016 年以来山西二氧化氮浓度呈上升态势，太原、阳泉、晋中等正在加入高浓度区域。

- **变化趋势**

根据图 35 和 37，济宁、德州、淄博的排名降幅最大，分别下降 22、22、20 名；太原和渭南的排名增幅最大，分别上升 29 和 22 名。

从图 36 五年累积降幅来看，累积降幅平均值为 1.75%。淄博降幅最高达 33%，德州、济宁 2 市则超过 20%，降幅前三名均为山东城市；共有 17 个城市降幅超过 10%；共有 13 个城市降幅为负（即 2018 年二氧化氮浓度高于其初始年份的二氧化氮浓度），包括山西省 6 个、陕西省 4 个、河北省 2 个、河南省 1 个，其中最末三位均为山西城市。从图 38 年均降幅来看，仍以淄博、德州、济宁最高，分别为 9.5%、6.2%、6%；运城和衡水降幅居于 5%~6% 之间；年降幅为负 13 个城市与累积降幅相同，仍以山西太原、晋中、吕梁三市居末位。

由此可见，二氧化氮改善程度远远小于二氧化硫和两个颗粒物，总体改善并不显著。关于污染恶化的城市及其分布，可参考图 34。

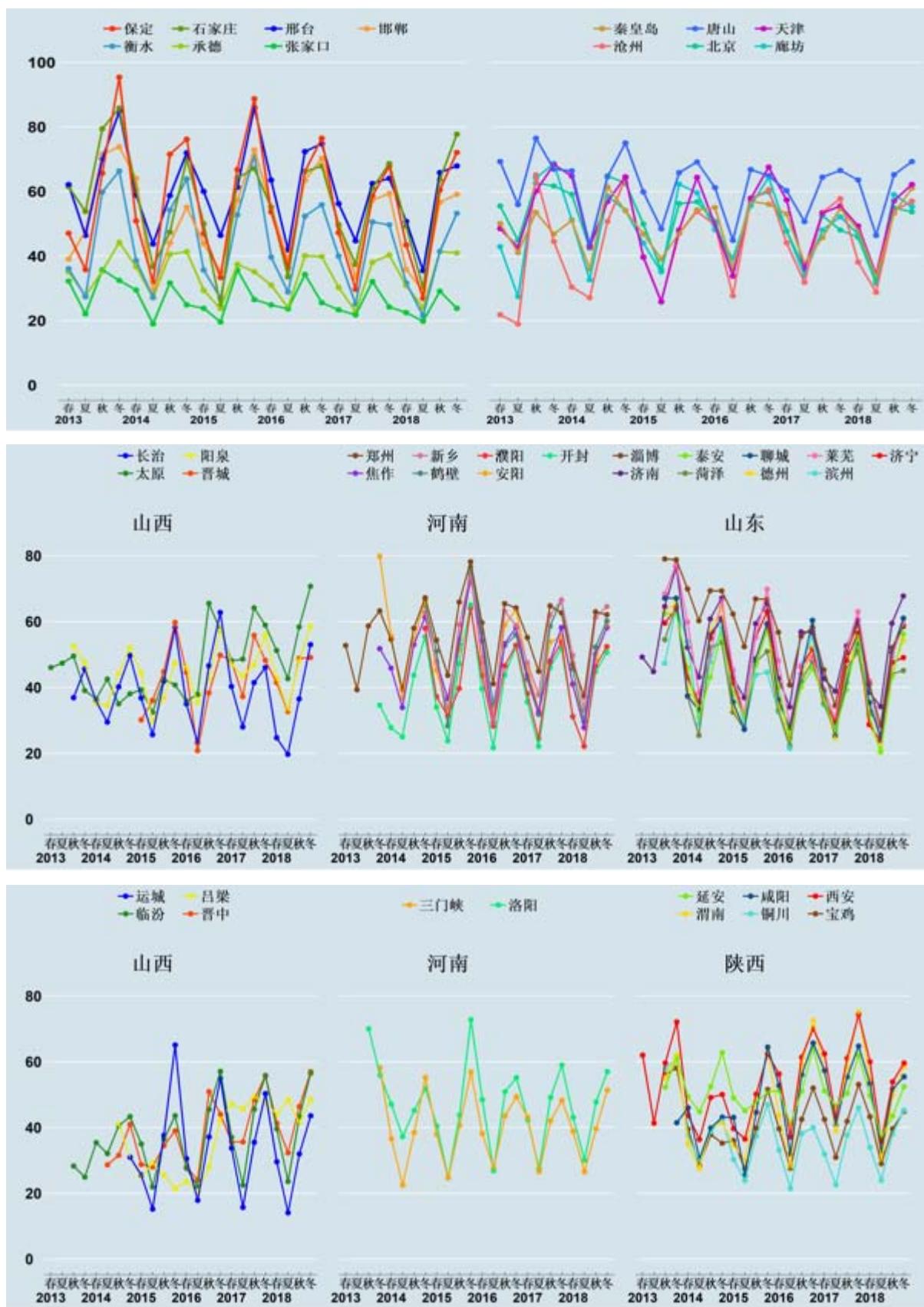


图 32：“2+43”城市气象调整后 2013 年至 2018 年二氧化氮季节平均值浓度(微克/立方米)时间序列图

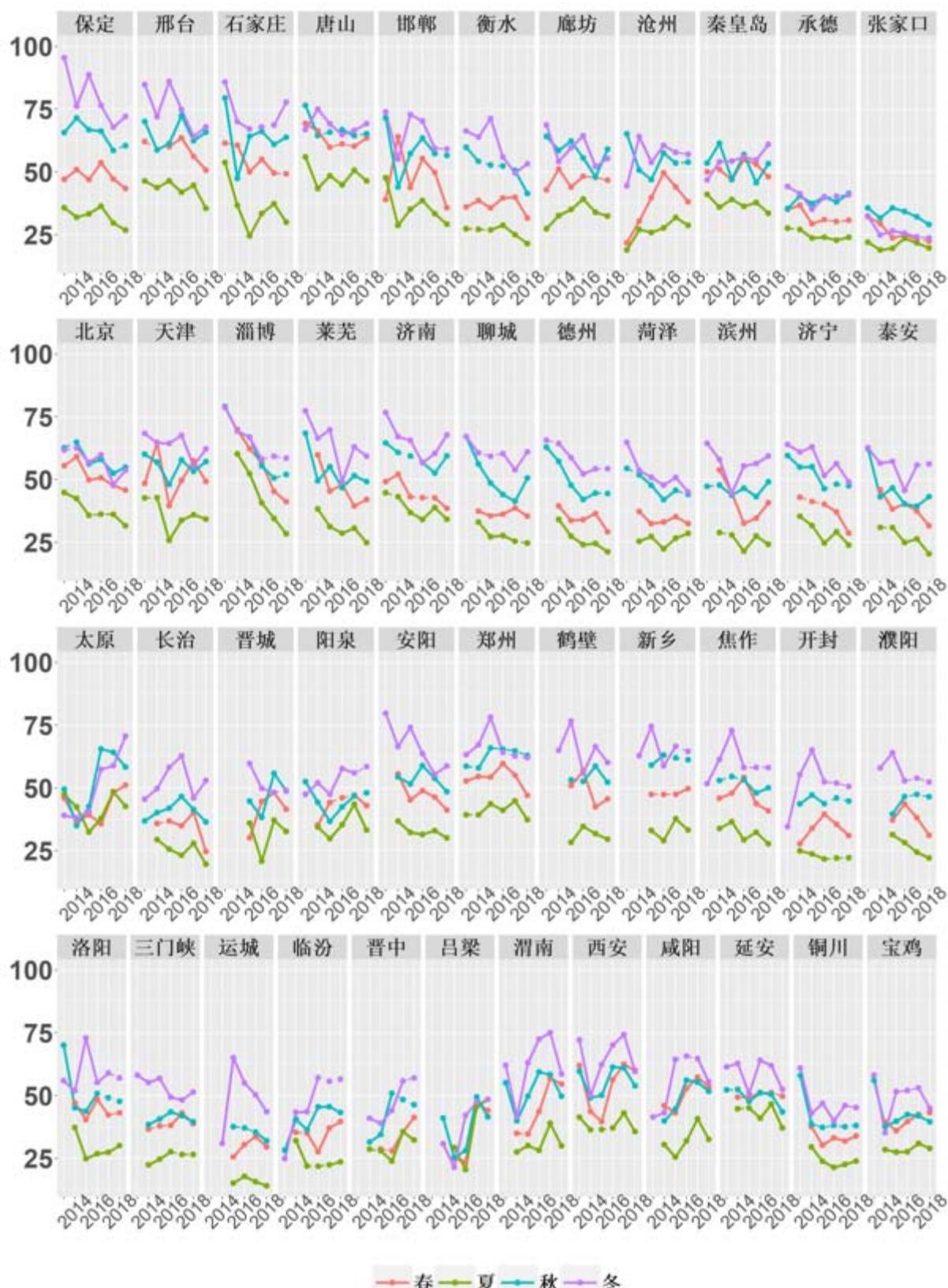


图 33：“2+43”城市气象调整后 2013 年至 2018 年二氧化氮季节平均浓度(微克/立方米)的变化序列图

图中实线(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

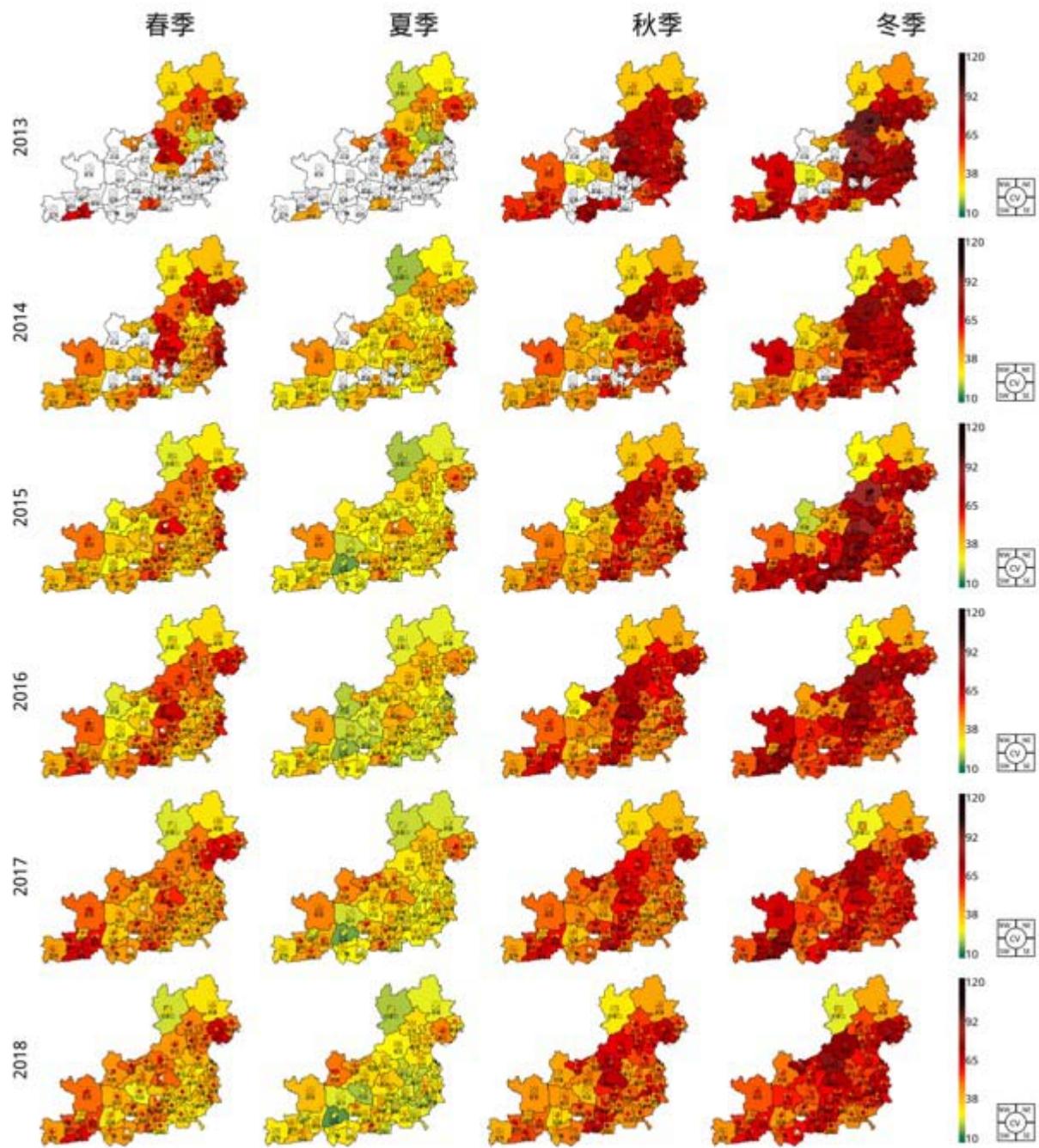
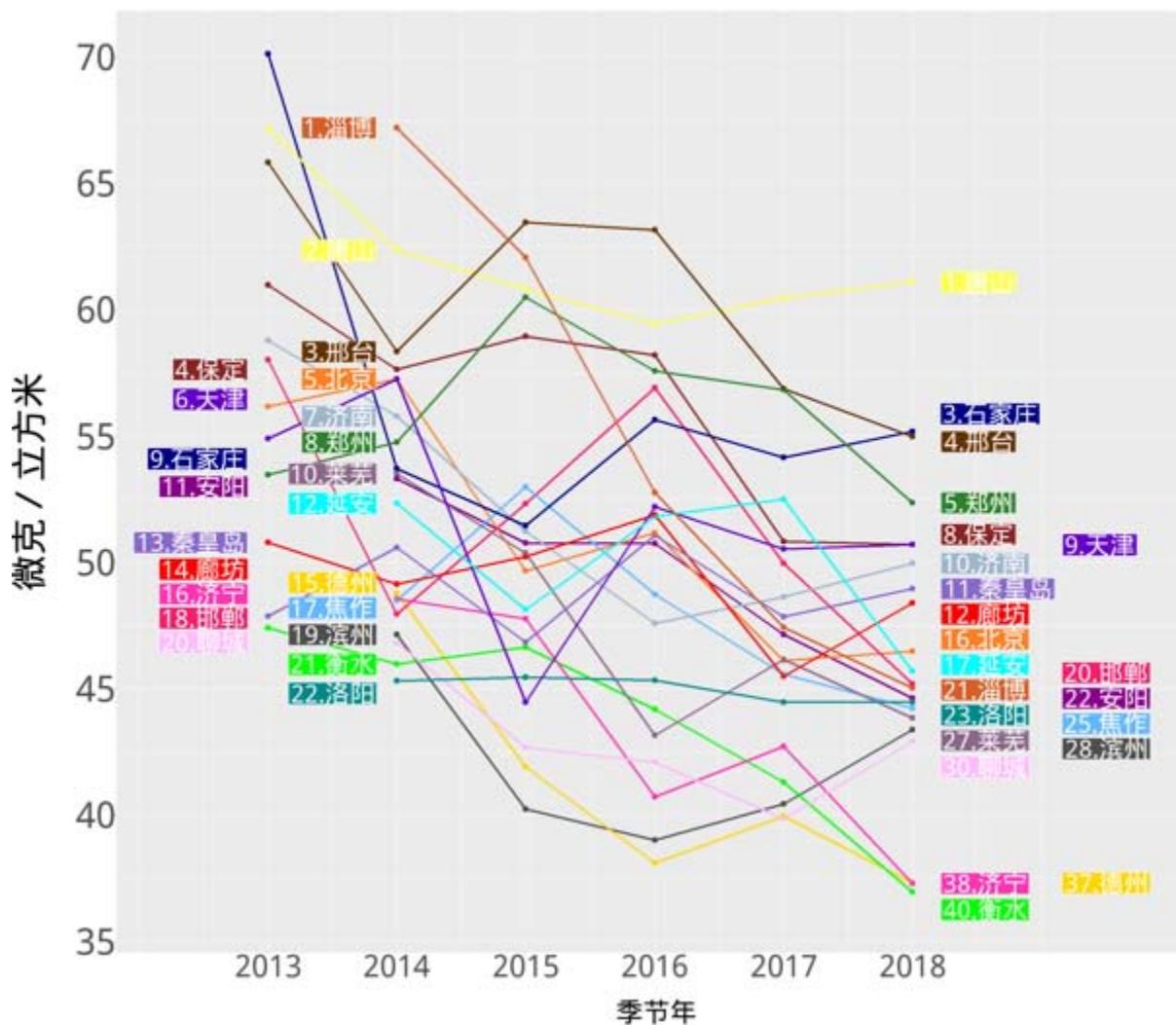


图 34：“2+43”城市 2013 年到 2018 年气象调整后二氧化氮季节平均浓度(微克/立方米)地图
(白色代表数据少，无法得到可靠结果)



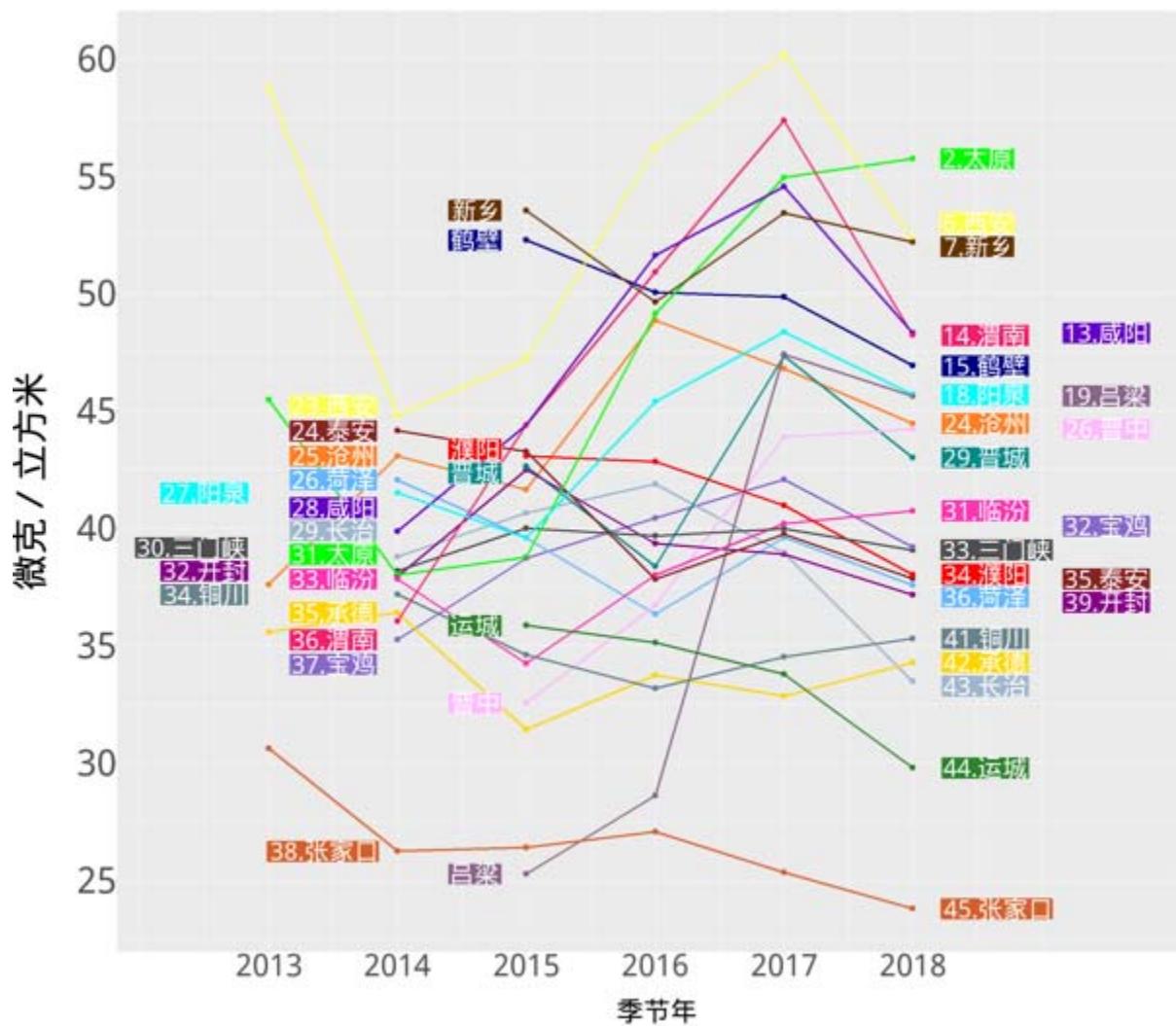


图 37：“2+43”城市后 23 名城市气象调整后二氧化氮季节年平均浓度(微克/立方米)年际变化图
(新乡、濮阳、运城、鹤壁、晋城、晋中和吕梁因 2014 年部分季度数据缺失而给出 2015 年至 2018 年平均浓度)

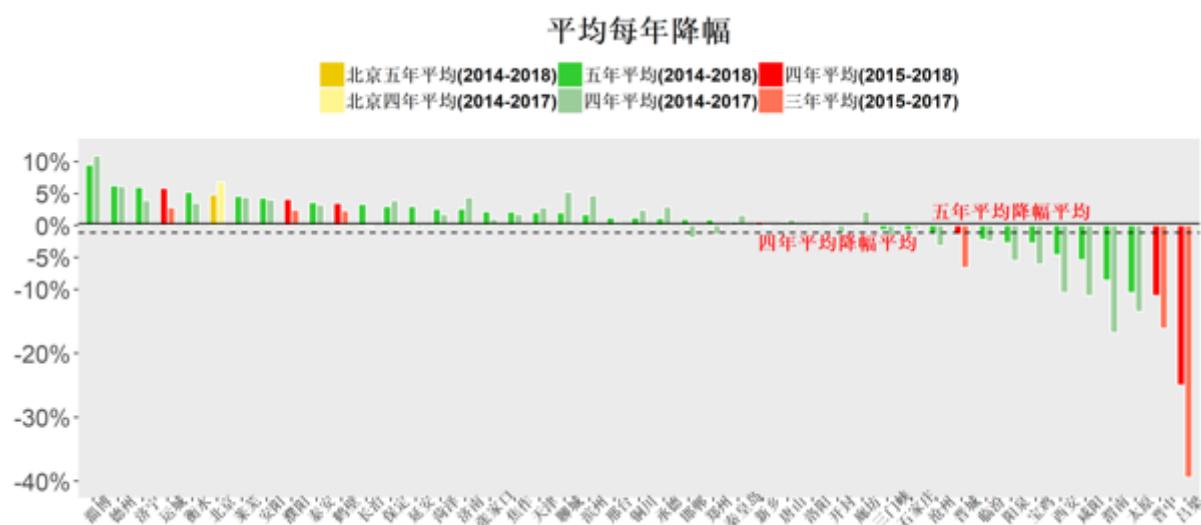


图 38：“2+43”城市气象调整后季节年二氧化氮过去五/四年（绿色）或过去四/三年（红色）平均降幅图
(红色表示因 2014 年部分季度数据缺失而计算的四/三年平均降幅)

(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 [19]，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 | |

- **季节特征**

从图 39 和 40，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。沿太行山五城市(保定、石家庄、邢台、邯郸、衡水)，河南省除开封、郑州外五市，山西省长治、晋中、运城、临汾四市，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)，山东省除淄博外 8 市，河南省开封、郑州二市，山西省吕梁、阳泉、太原三市冬季一氧化碳的浓度比其它季节高出约 0.5~1 毫克/立方米。唐山、淄博和晋城全年处于较高水平，且四季差异不大，这反映其工业生产的排放量过高。

- **区域特征**

根据图 39、40 和 41，一氧化碳区域划分近年发生变化。2015 年前以河北保定、邢台、邯郸三市，山西吕梁、临汾二市和延安为高浓度区域；2015 年后则以河北、河南沿太行山城市，山西南部以及唐山市为高浓度区域；其余城市一氧化碳浓度整体差异不大。需要注意的是山西临汾冬季一氧化碳浓度明显高于山西其他城市。

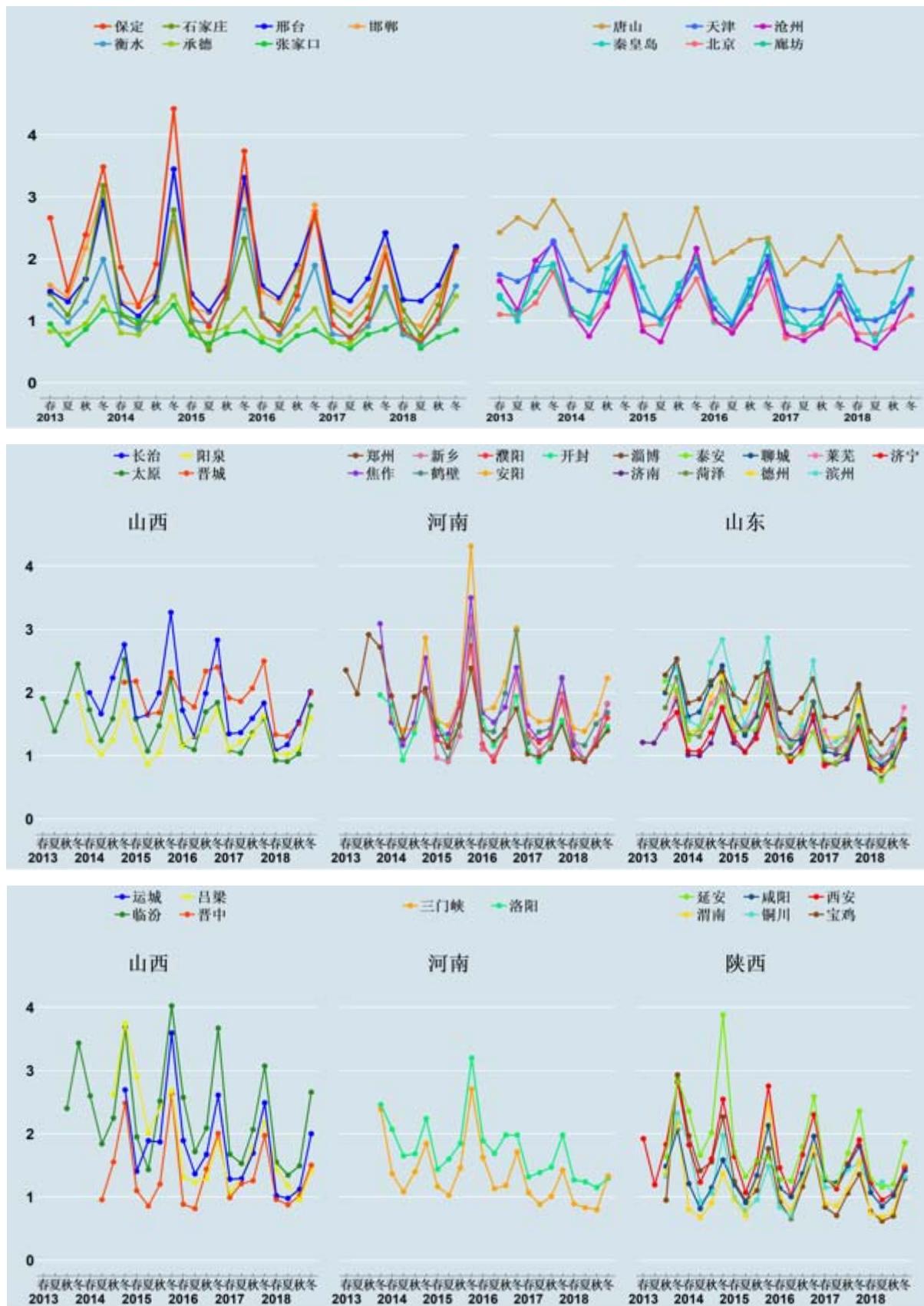


图 39：“2+43”城市气象调整后 2013 年至 2018 年一氧化碳季节平均值浓度(毫克/立方米)时间序列图

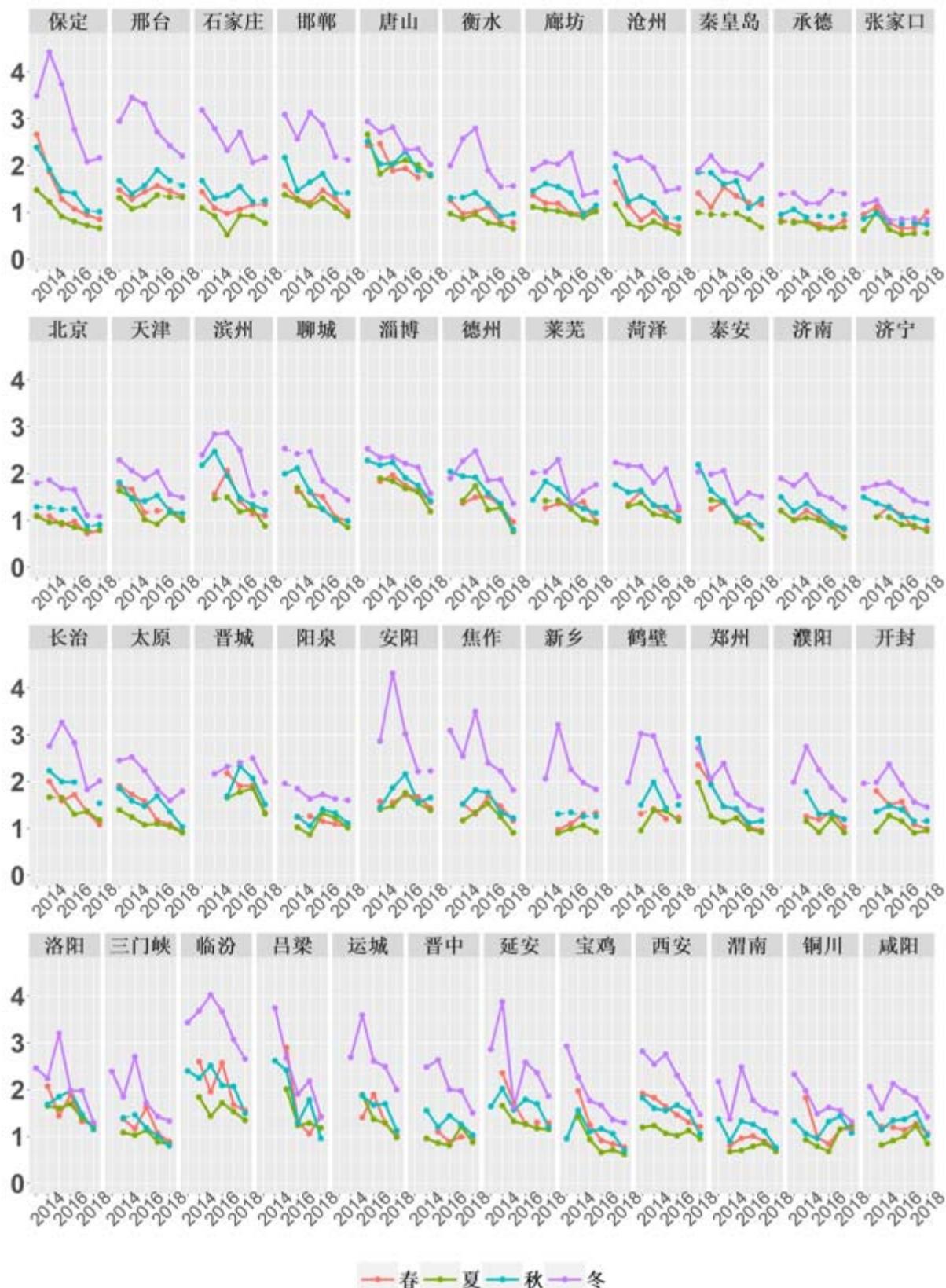


图 40：“2+43”城市气象调整后 2013 年至 2018 年一氧化碳季节平均浓度(毫克/立方米)的变化序列图

图中实线（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

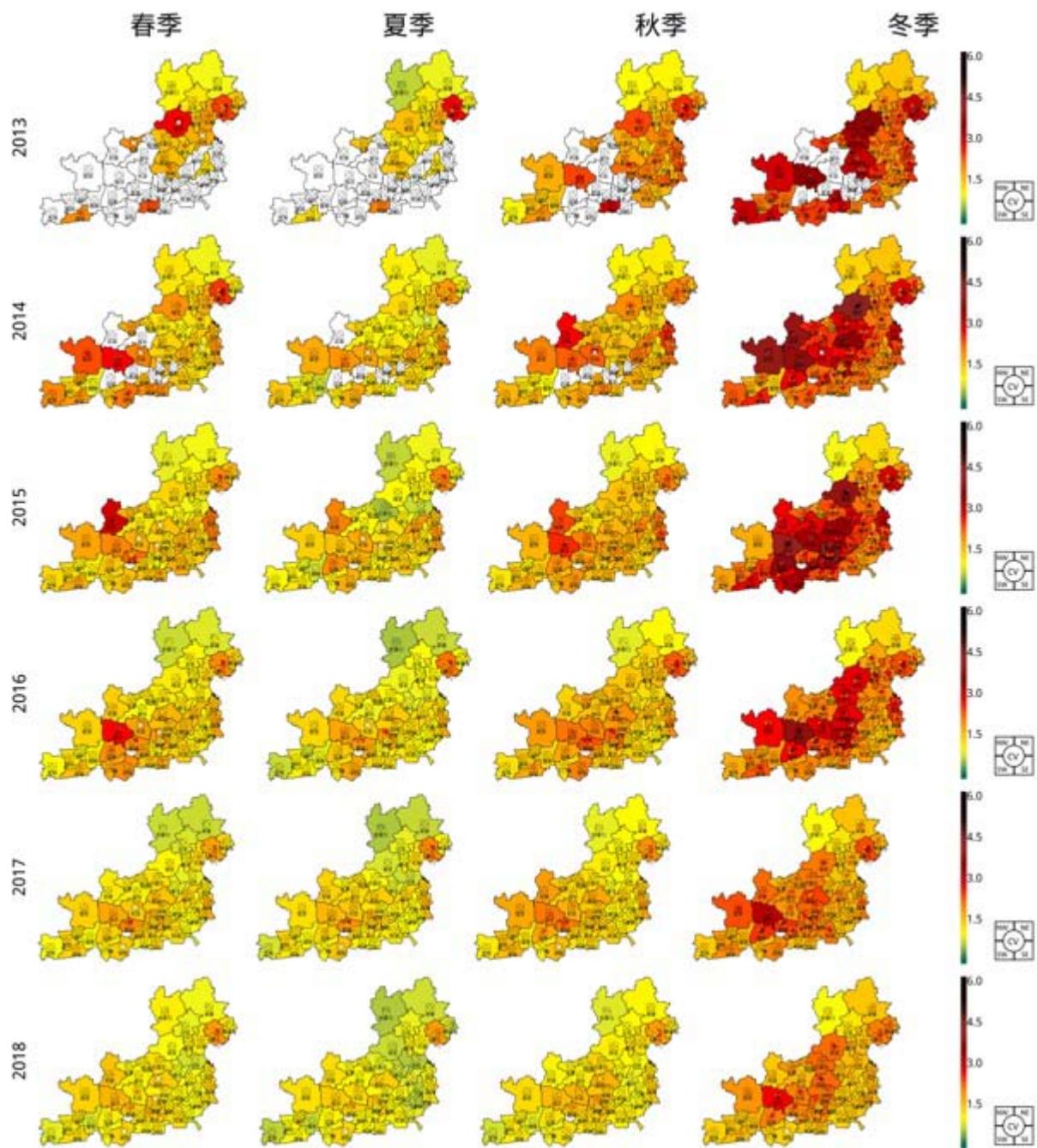
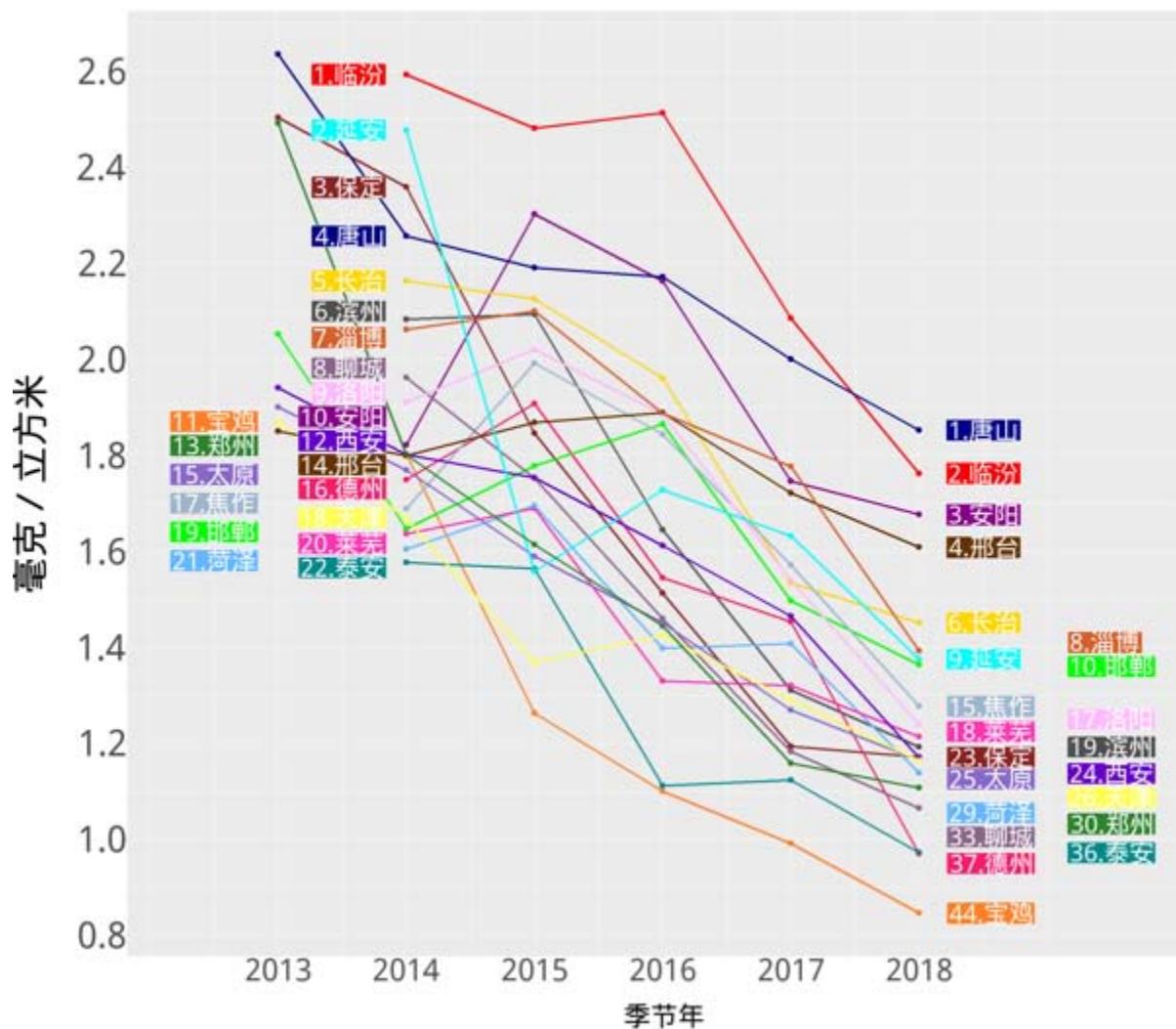


图 41：“2+43”城市 2013 年到 2018 年气象调整后一氧化碳季节平均浓度(毫克/立方米)地图
(白色代表数据少，无法得到可靠结果)



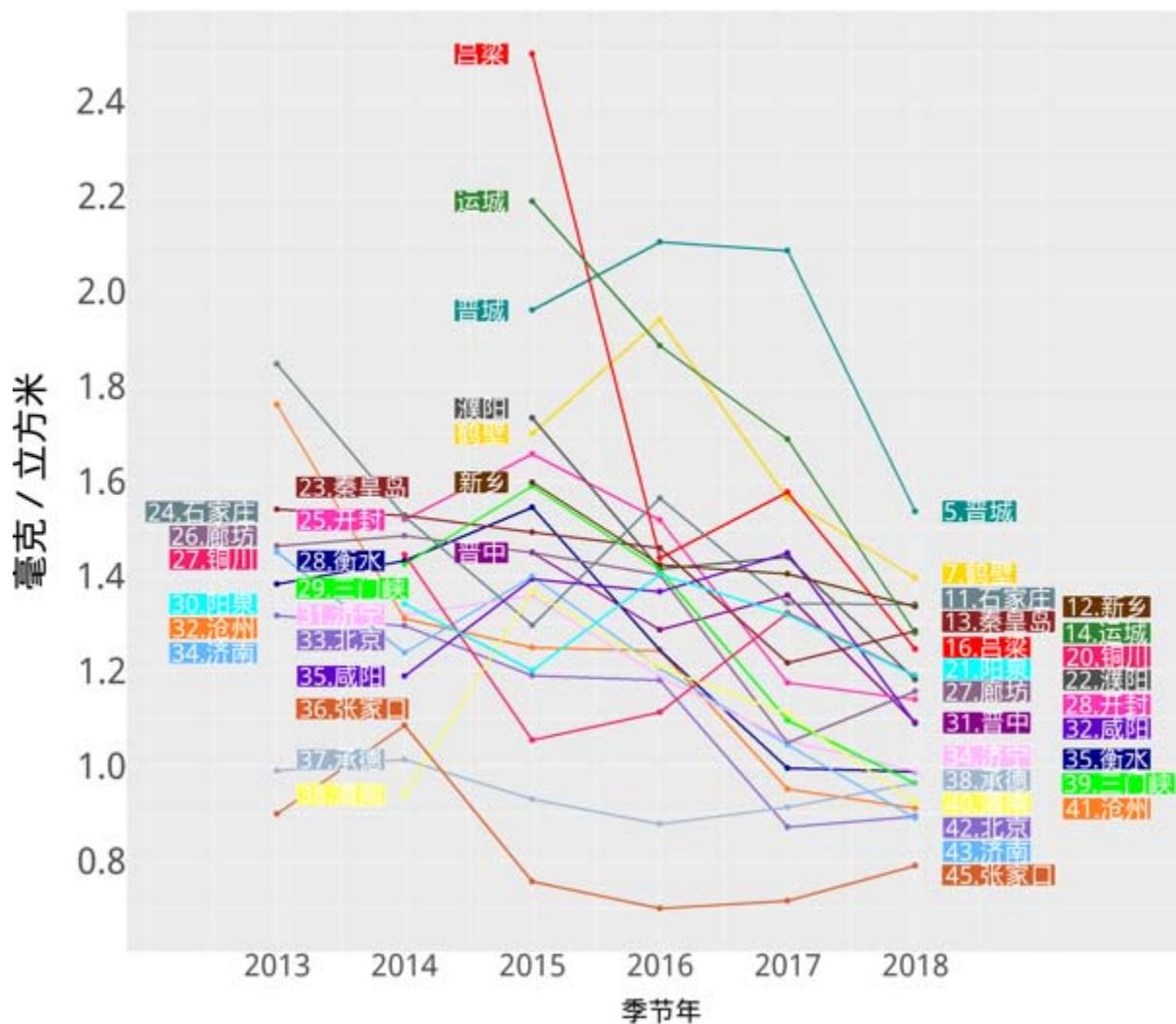


图 44：“2+43”城市气象调整后一氧化碳季节年平均浓度(微克/立方米)年际变化图
(新乡、濮阳、运城、鹤壁、晋城、晋中和吕梁因 2014 年部分季度数据缺失而给出 2015 年至 2018 年平均浓度)

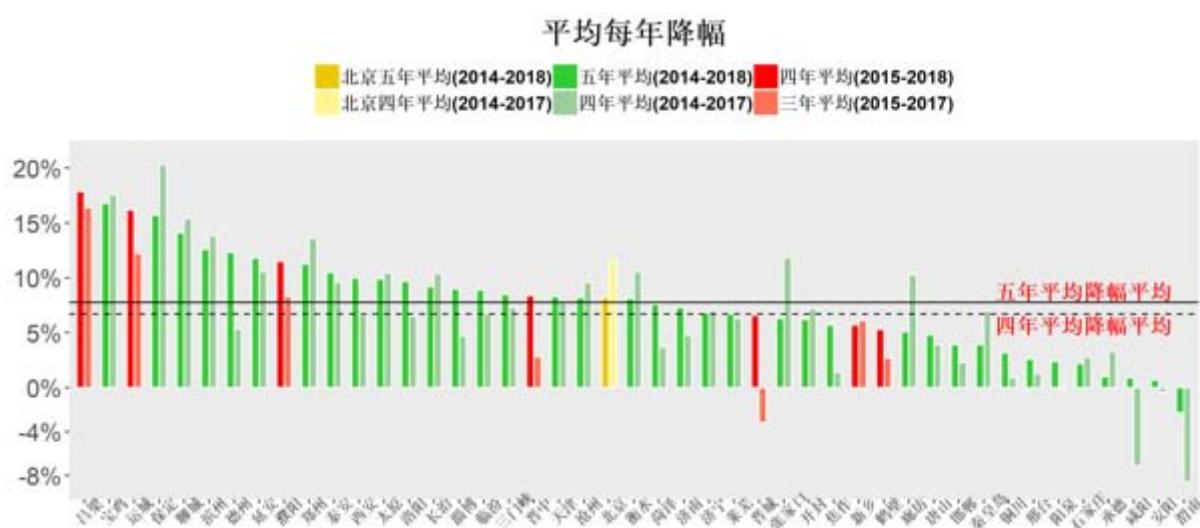


图 45：“2+43”城市气象调整后季节年一氧化碳过去五/四年（绿色）或过去四/三年（红色）平均降幅图
(红色表示因 2014 年部分季度数据缺失而计算的四/三年累积降幅)

- 变化趋势

在各城市一氧化碳的年平均浓度排名变化中，宝鸡和聊城的排名降幅最大，分别下降 33 和 25 名；石家庄、邢台、秦皇岛的排名增幅最大，分别上升 13、10、10 名；因 2014 年数据缺失而未参与计算的晋城、鹤壁分别位居 2018 年第 5、7 名，应予以关注。

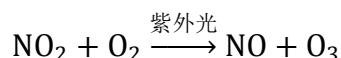
从图 43 五年累积降幅来看：累积降幅平均值达 27.8%；45 城市较其初始年份均有改善；宝鸡累积降幅最高，达 53.1%；宝鸡、保定、吕梁三市降幅超过 50%，聊城、德州、延安、滨州、运城 5 市居于 40%~50%；32 个城市累积降幅大于 20%。从图 45 年平均降幅来看：降幅平均值为 7.78%；吕梁平均降幅最高为 17.9%；吕梁、宝鸡、运城、保定 4 市超过 15%；共 12 个城市个超过 10%；仅有渭南市年平均降幅为负（没有改善）。整体来看，一氧化碳改善显著，但低于二氧化硫的改善程度。

(六) 臭氧

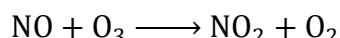
臭氧 (O_3) 是一种有强氧化性的气体。在距离地面高约 15~35km 的范围内，有厚约 20km 的臭氧层，吸收太阳辐射的紫外线，起到保护人类与环境的重要作用。但是，在对流层大气中如果臭氧浓度增加，就会造成一系列的不利于人体健康的影响。由于臭氧具有强氧化性，被吸入呼吸道时，就会与呼吸道中的细胞、流体和组织很快反应，导致肺功能减弱和组织损伤[19]。同时，臭氧可促使空气中的大量气体污染物转化为颗粒物，进而转化为 $PM_{2.5}$ 。因此，近地面臭氧浓度超标，其危害程度不亚于 $PM_{2.5}$ 超标。

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，不可避免的发现臭氧已成为 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。

- **季节效应**

从图 46 和 47 可以看出，臭氧具有明显的季节效应，夏季臭氧的浓度一般是冬季的 2 到 4 倍。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。“2+43”城市 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。到 2018 年夏季，45 个城市中有 35 个城市的 8 小时臭氧平均浓度超过 150 微克/立方米，比 2017 年夏季增加了 1 个城市。可以说，夏季臭氧污染已经成为“2+43”城市大气污染的一个突出问题。

- **区域特征**

从图 50，我们发现“2+43”城市普遍属于较高浓度水平，地区间差异不大，尤其是在夏春高浓度季节。自 2017 年以来，夏春分区是以河北、河南沿太行山城市，山西临汾，山东滨州为高浓度区域，其他城市为中浓度区。

- **极端污染**

图 48 和 49 展示了“2+43”城市过去 24 个季节（2013 年春季至 2018 年冬季）经气象调整的臭氧浓度 90% 分位数随时间变化的情况以及给定季节的时间序列。整体上 45 城市普遍臭氧浓度水平很高，季节特征显著，绝大部分城市保持迅猛增长态势。北京近六年夏天 90% 分位数始终保持在 240 微克/立方米左右。河北、河南沿太行山城市以及山西晋城、临汾，山东滨州等城市恶化趋势明显，尤其体现在夏季臭氧浓度上。2018 年共有 11 个城市夏季 90% 分位数超过 240 微克/立方米，其中滨州、保定、石家庄、临汾超过 260 微克/立方米；邯郸、邢台、济南、唐山、晋城、聊城、淄博介于 240 与 260 微克/立方米之间。

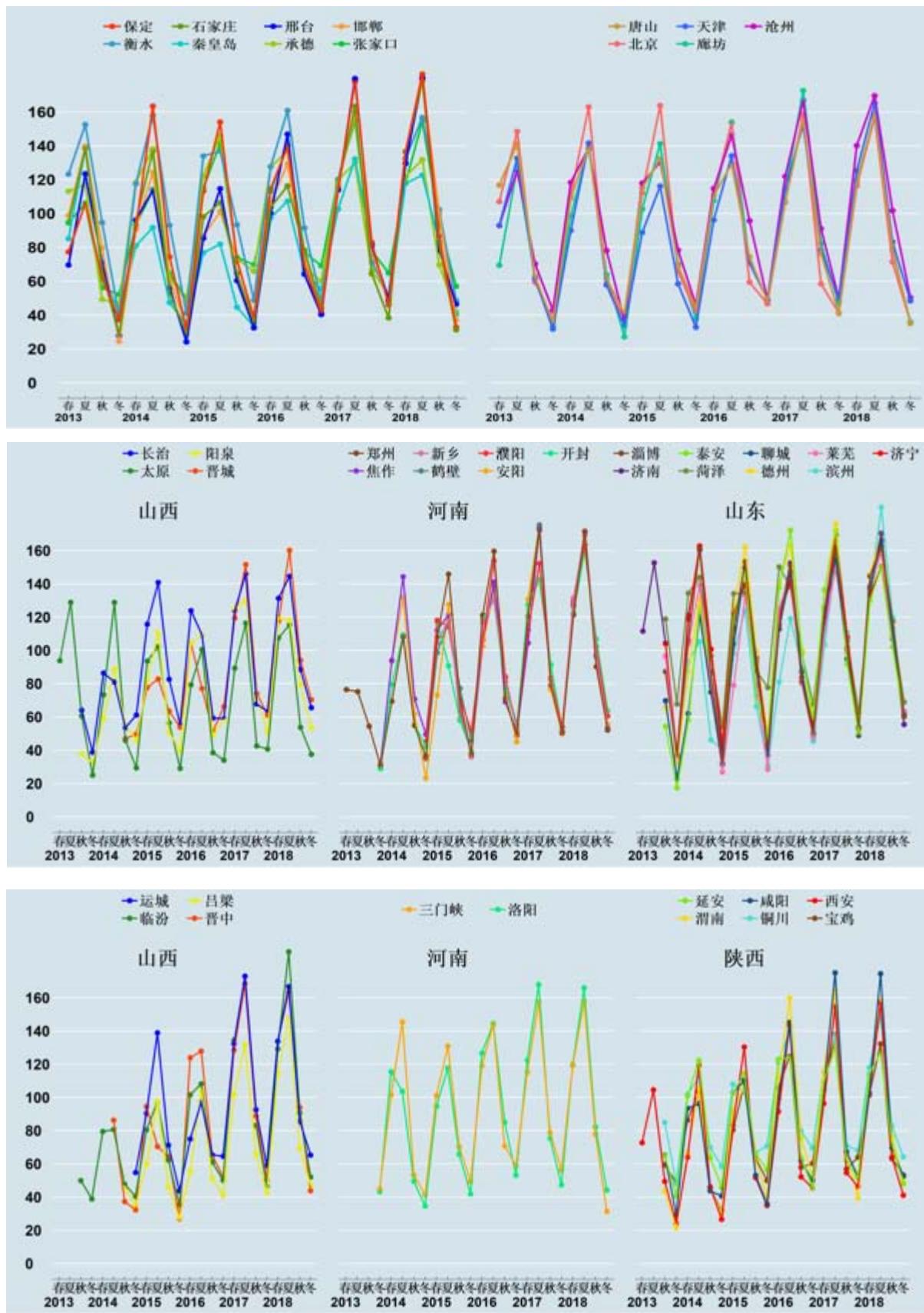


图 46：“2+43”城市气象调整后 2013 至 2018 年 8 小时臭氧季节平均值浓度(微克/立方米)时间序列图

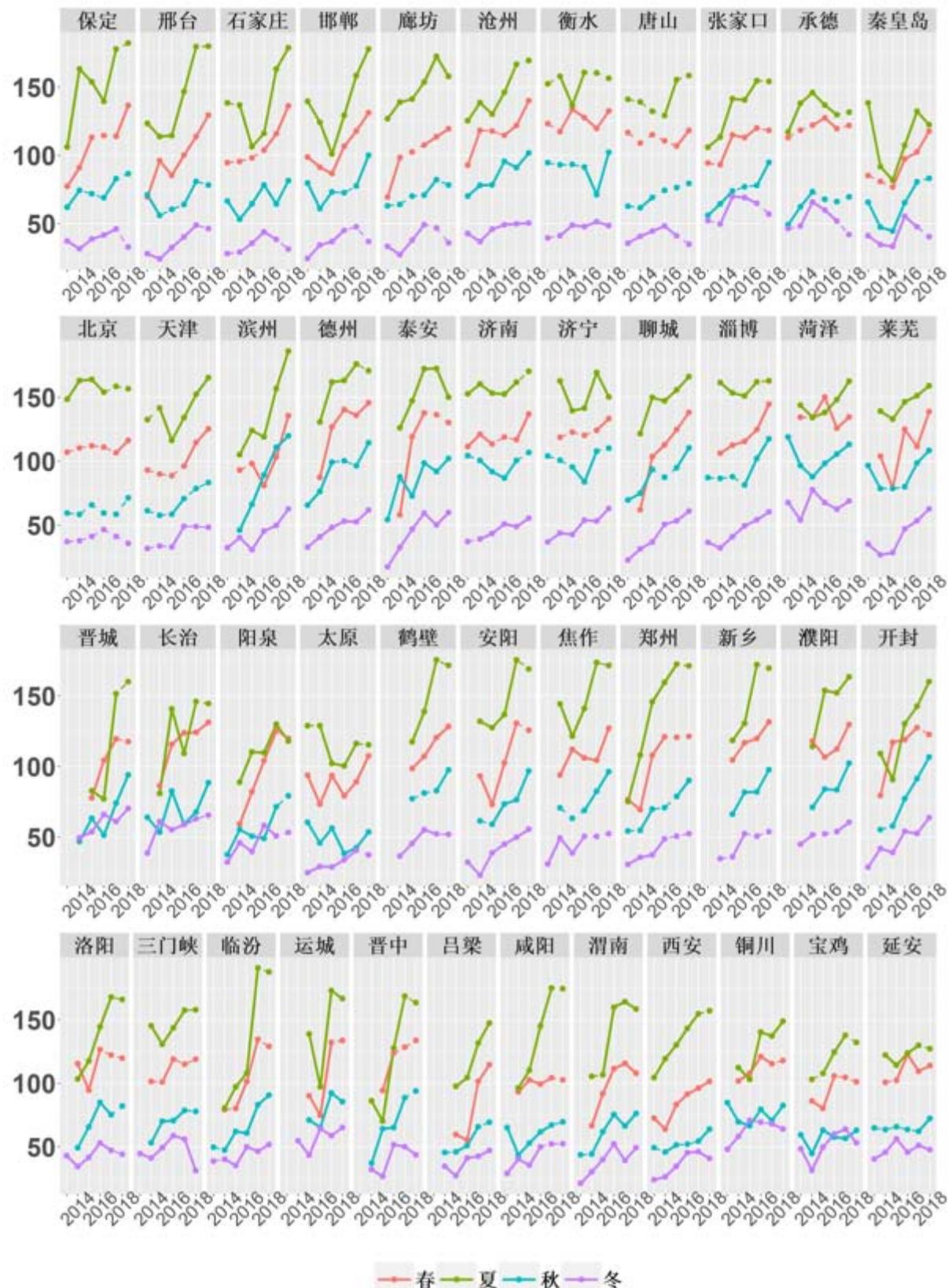


图 47：“2+43”城市气象调整后 2013 至 2018 年 8 小时臭氧季节平均浓度(微克/立方米)的变化序列图

图中实线（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

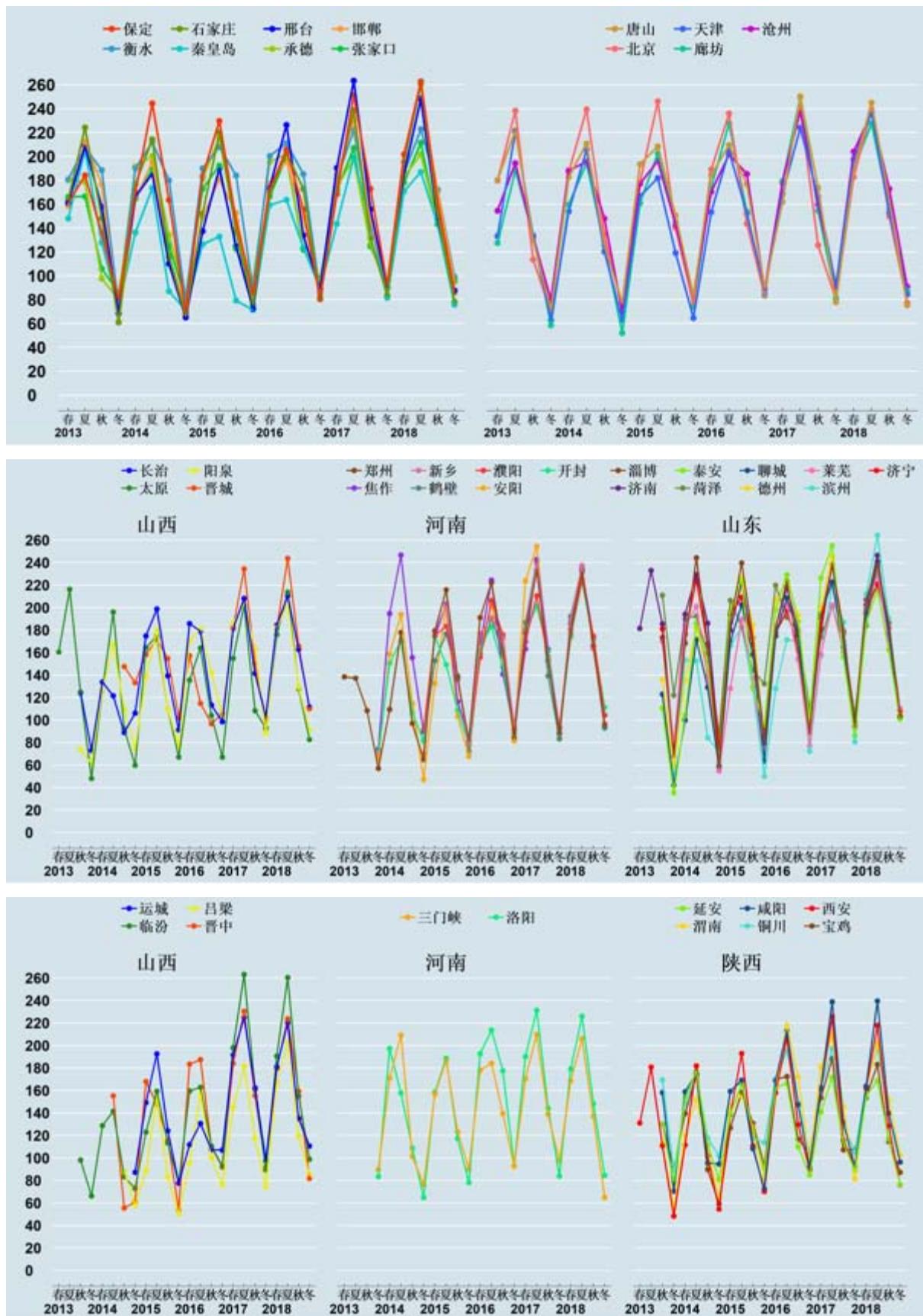


图 48：“2+43”城市气象调整后 2013 至 2018 年 8 小时臭氧季节浓度 90% 分位数(微克/立方米)时间序列图

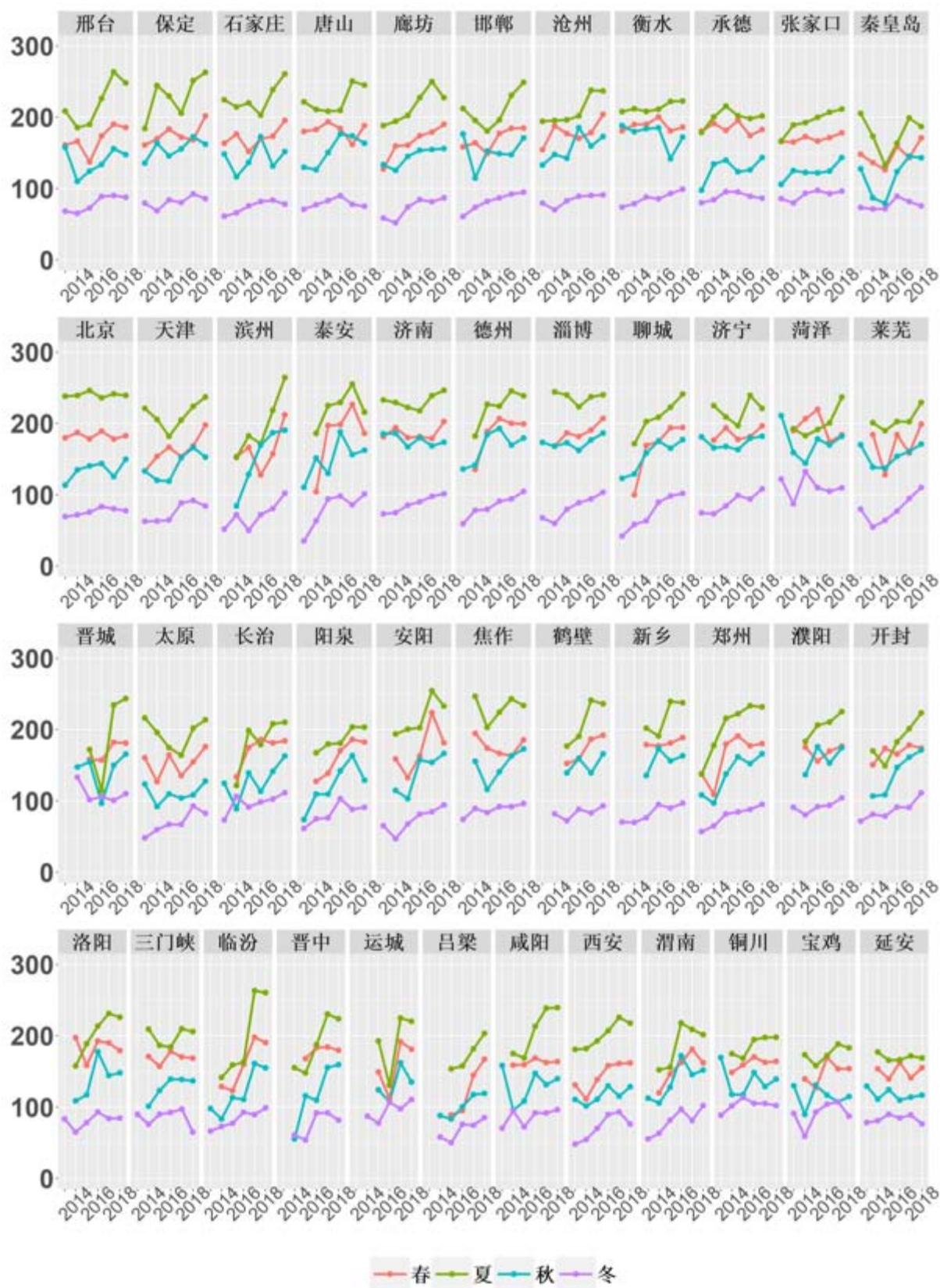


图 49：“2+43”城市气象调整后 2013 至 2018 年 8 小时臭氧季节浓度 90% 分位数(微克/立方米)的变化序列图

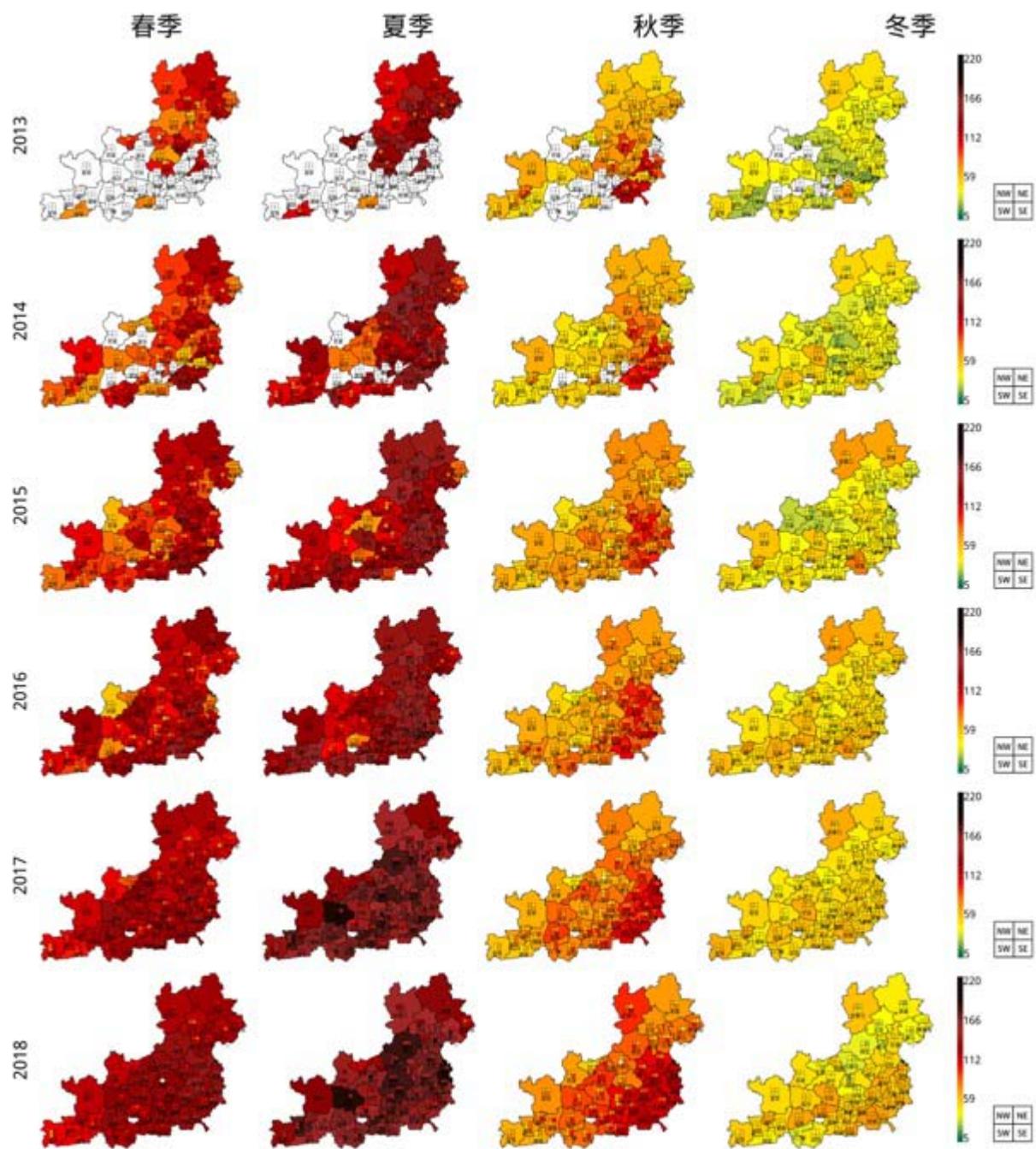


图 50：“2+43”城市 2013 年到 2018 年气象调整后 8 小时臭氧季节平均浓度(微克/立方米)地图
 (白色代表数据少，无法得到可靠结果)

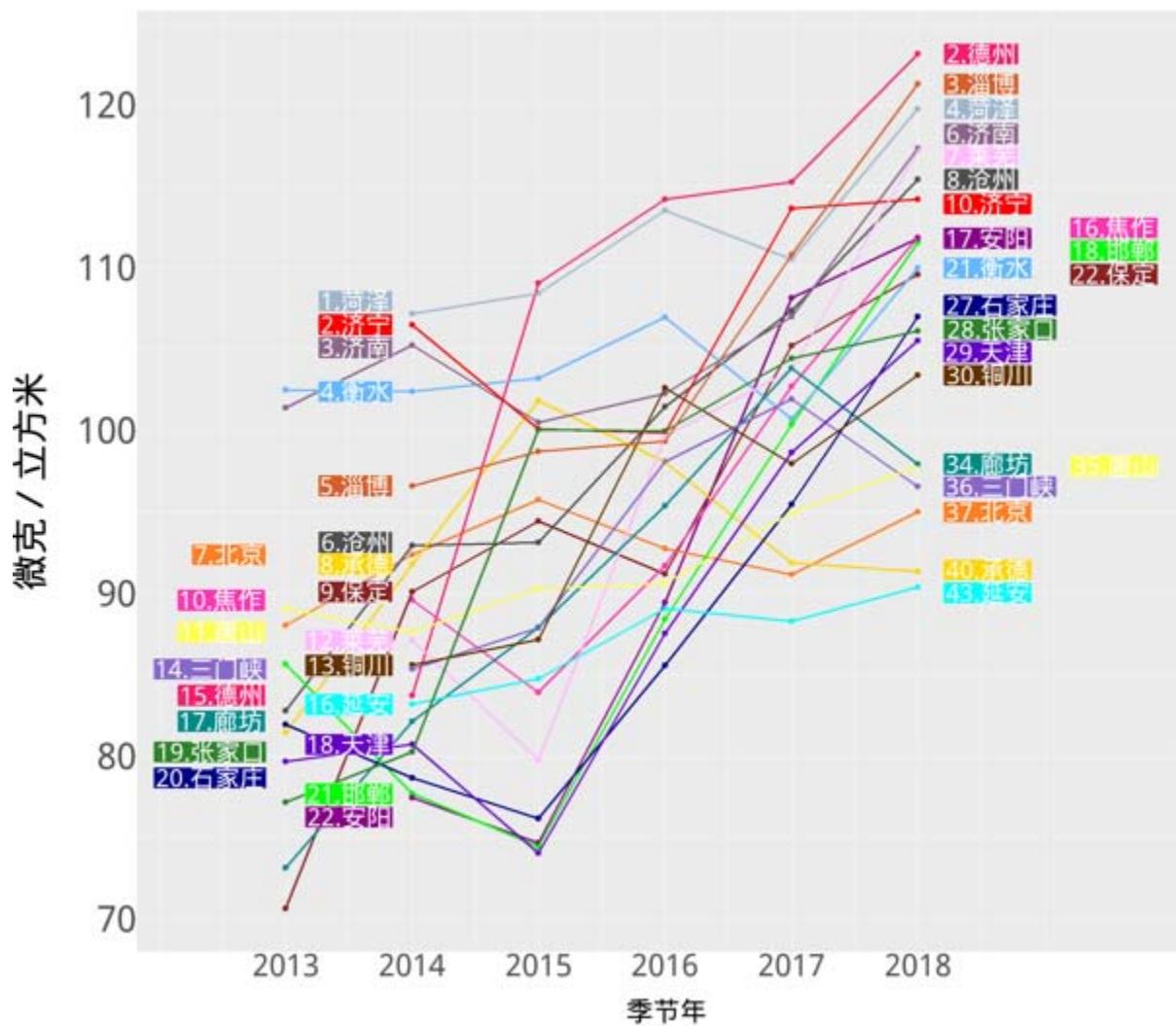


图 51：“2+43”城市前 22 名城市气象调整后 8 小时臭氧季节年平均浓度(微克/立方米)年际变化
(2014、2018 季历年均以当年气象调整后的浓度为基准)

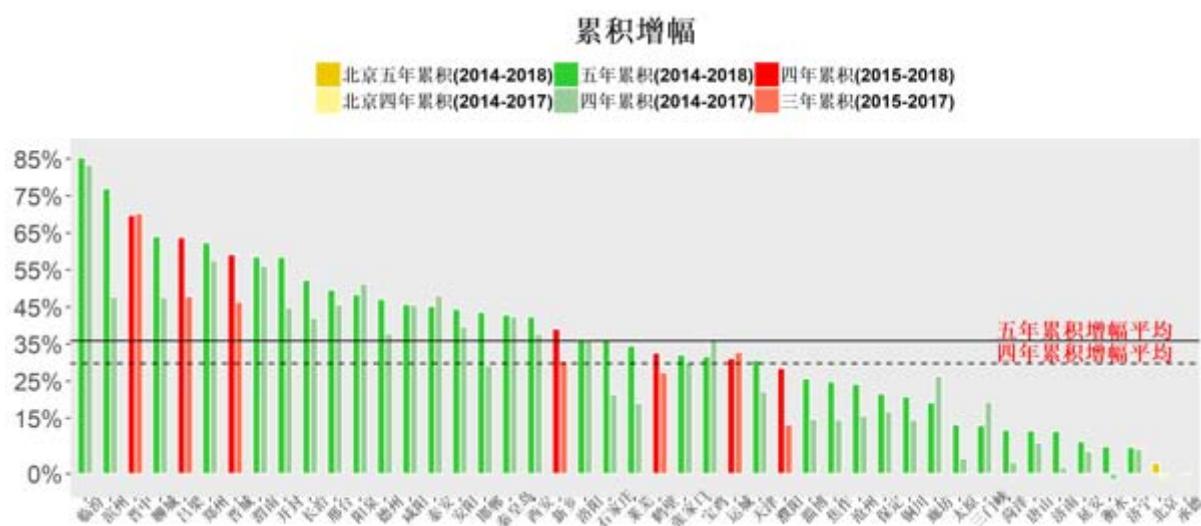
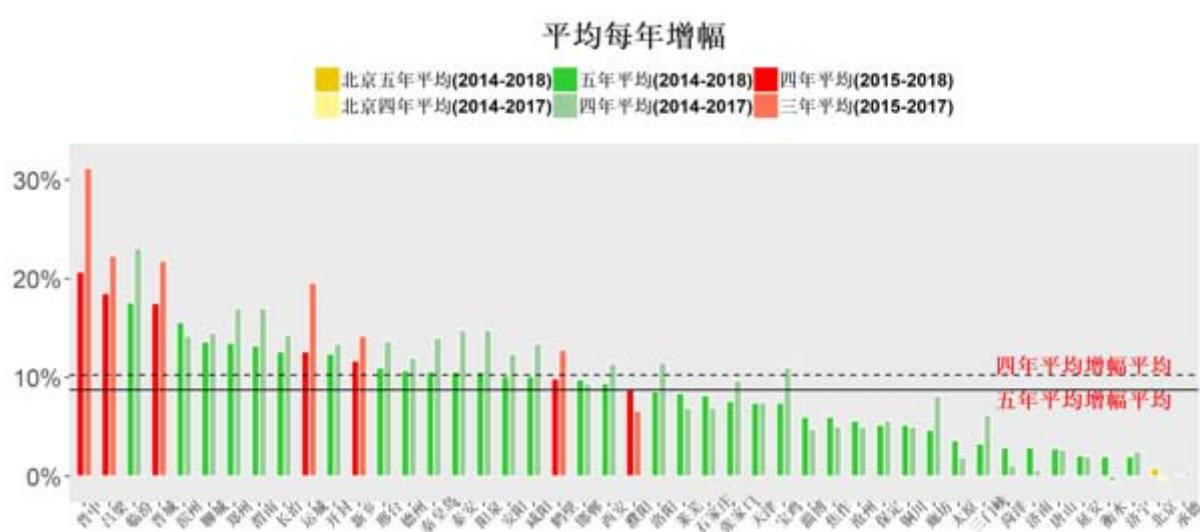
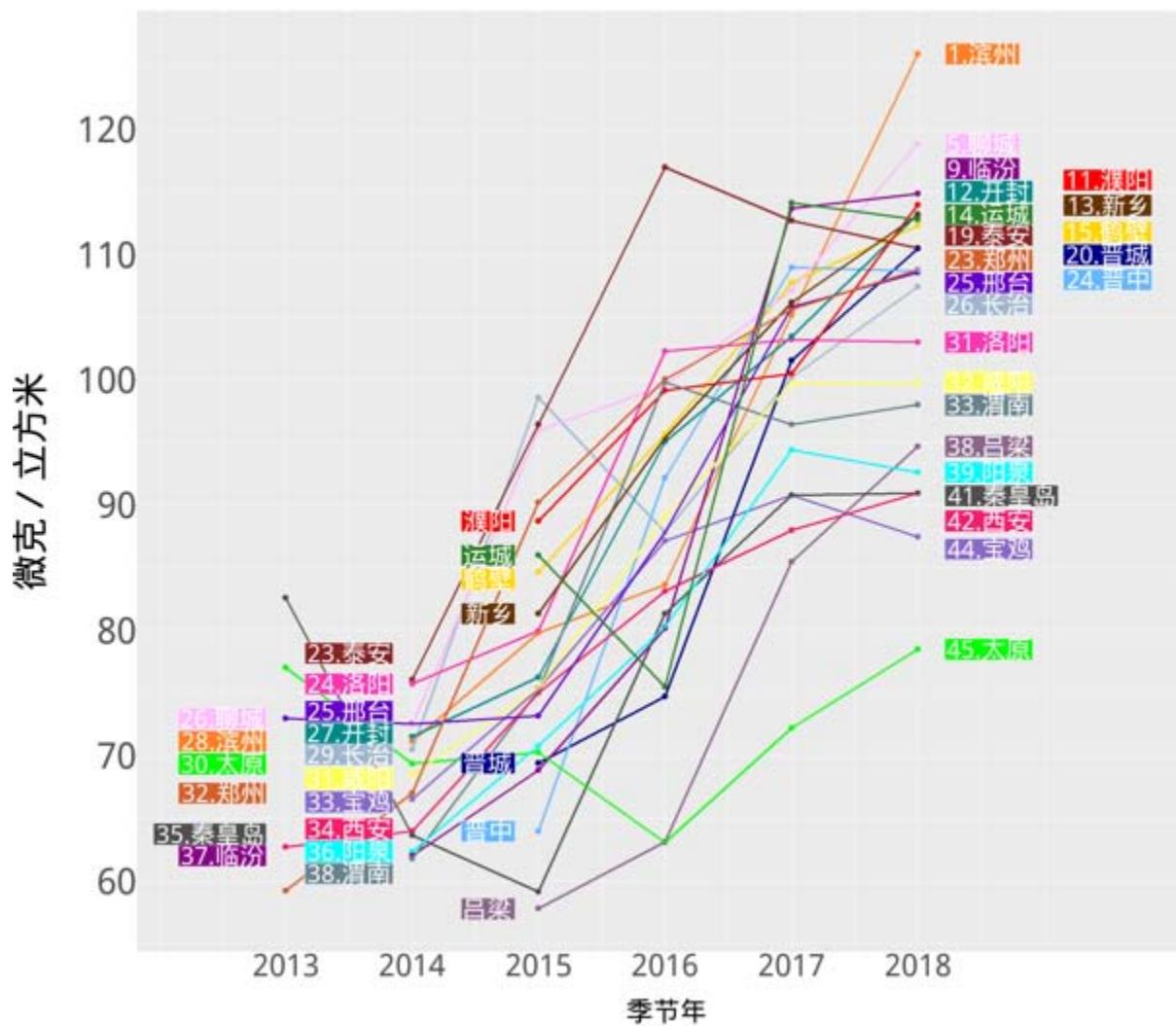


图 52：“2+43”城市气象调整后季节年 8 小时臭氧过去五/四年（绿色）或过去四/三年（红色）累积增幅图
(红色表示因 2014 年部分季度数据缺失而计算的四/三年累积增幅)



- 变化趋势

通过图 52 和 54 发现，与前五种污染物的改善状况不同，除承德外 44 城市在 2018 年的臭氧浓度较其初始年份均有所上升，其中部分城市增幅较大，临汾五年累积增幅甚至达 85%。共有 10 个城市累积增幅超过 50%，它们是山西临汾、晋中、吕梁、晋城、长治 5 市，河南郑州、开封 2 市，山东滨州、聊城 2 市，陕西渭南。12 个城市累积增幅介于 35%–50% 之间，它们是河北邢台、邯郸、秦皇岛、石家庄 4 市，河南安阳、新乡、洛阳 3 市，山东德州、泰安 2 市，陕西咸阳、西安 2 市，山西阳泉。“2+43”城市五年平均增幅平均值达 8.75%，较四年平均 10.25% 有所回落，但增长态势仍十分显著。19 个城市年平均增幅超过 10%，包括山西除太原外 7 市，山东滨州、聊城、德州、泰安 4 市，河南郑州、开封、新乡、安阳 4 市，河北邢台、秦皇岛 2 市，陕西渭南、咸阳 2 市。

排名方面，临汾和滨州的排名增幅最大，分别上升 28、27 名，累积增幅分别达 85.3% 和 77.0%。相比之下，承德和北京虽下降 32、30 名，但其春夏臭氧平均浓度仍达到 126.85、136.45 微克/立方米，这也从一个侧面反映了绝大部分城市年均臭氧浓度的一致大幅上升。但北京市夏季臭氧浓度在过去五年波动较小，无大幅增长，与京津冀地区其他城市形成鲜明对比，其对臭氧浓度的控制或有借鉴意义。另外，2018 年臭氧浓度前 7 名均为山东城市，前 10 名包含 8 个山东城市，这说明臭氧污染应成为山东省大气治理的重要命题。

五、“2+43”城市污染物综合累积降幅与监视坐标

表 8 给出每个城市过去五年或四年的综合改善情况，括号外为六种污染物 2014 年到 2018 年五年累积降幅的平均值，括号内为 2014 年到 2017 年四年累积降幅平均值。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气象因素的干扰，所以表 8 给出的是各城市污染物受人为影响的下降比例。

根据表 8，张家口、滨州、秦皇岛、北京、石家庄、廊坊、太原、开封 8 市五年综合降幅较四年综合降幅有所减少，这反映上述 8 市 2018 年大气污染整体上的恶化；承德、天津、聊城、唐山、保定、莱芜 6 市五年综合累积降幅虽高于四年综合累积降幅，但提升不超过 1%，这说明上述 6 市 2018 年大气污染治理水平的下降。对于 45 城市的数值变化及综合改善情况，可具体查看表 8。

为了方便各级管理部门了解 2018 年的六种污染物情况，同时考虑过去五年的浓度变化（“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 55 至 57）和“2+43”城市 2018 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。

表 8：“2+3”城市六种污染物五年（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 | 32.3(31.5) | 24 | 宝鸡 | 14.6(6.1) |
| 2 | 衡水 | 30.5(28.9) | 25 | 石家庄 | 14.5(15.6) |
| 3 | 济宁 | 30.4(23.6) | 26 | 邯郸 | 14.5(8.8) |
| 4 | 淄博 | 29.9(25.1) | 27 | 滨州 | 14.0(16.7) |
| 5 | 北京 | 28.6(30.4) | 28 | 铜川 | 13.8(11.3) |
| 6 | 济南 | 27.6(23.8) | 29 | 邢台 | 13.7(10.3) |
| 7 | 菏泽 | 26.3(18.7) | 30 | 秦皇岛 | 13.6(15.8) |
| 8 | 延安 | 26.0(13.2) | 31 | 安阳 | 12.2(9.6) |
| 9 | 德州 | 25.1(18.8) | 32 | 鹤壁 | 11.2(7.3) |
| 10 | 天津 | 24.0(24.0) | 33 | 洛阳 | 11.1(4.0) |
| 11 | 廊坊 | 22.8(23.8) | 34 | 长治 | 10.7(5.4) |
| 12 | 承德 | 21.6(21.6) | 35 | 西安 | 7.9(-1.7) |
| 13 | 莱芜 | 20.9(20.0) | 36 | 开封 | 7.1(7.3) |
| 14 | 三门峡 | 20.3(14.7) | 37 | 阳泉 | 6.3(-0.6) |
| 15 | 聊城 | 19.5(19.1) | 38 | 太原 | 5.2(6.1) |
| 16 | 运城 | 19.0(3.3) | 39 | 张家口 | 4.6(7.9) |
| 17 | 泰安 | 18.4(14.4) | 40 | 晋城 | 4.3(-5.5) |
| 18 | 沧州 | 17.3(14.7) | 41 | 咸阳* | -3.9(-18.1) |
| 19 | 新乡 | 17.0(15.4) | 42 | 晋中* | -6.0(-17.8) |
| 20 | 唐山 | 16.6(16.2) | 43 | 临汾* | -6.02(-13.57) |
| 21 | 郑州 | 16.6(12.3) | 44 | 渭南* | -6.27(-19.63) |
| 22 | 焦作 | 16.3(11.8) | 45 | 吕梁* | -14.18(-26.77) |
| 23 | 濮阳 | 15.2(12.9) | | | |

注：红色表示五年综合累积降幅低于四年综合累积降幅。星号（*）表示该城市五年综合累积降幅为负，即大气质量无改善。新乡、濮阳、运城、鹤壁、晋城、晋中、吕梁 7 市，因 2014 年部分季度数据缺失而只计算了六种污染物四年（三年）累积降幅的平均值。

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 我们发现唐山、邢台、淄博 3 市六种污染物均过高；邯郸、鹤壁、石家庄、新乡 4 市有五种污染物过高，另有 15 个城市（安阳、保定、济南、焦作、晋城、临汾、吕梁、太原、渭

南、西安、咸阳、延安、阳泉、运城和郑州) 四种污染物过高。我们希望图 55 至 57 和表 9 对各城市在下一步的大气污染治理中选定重点方向有所帮助。

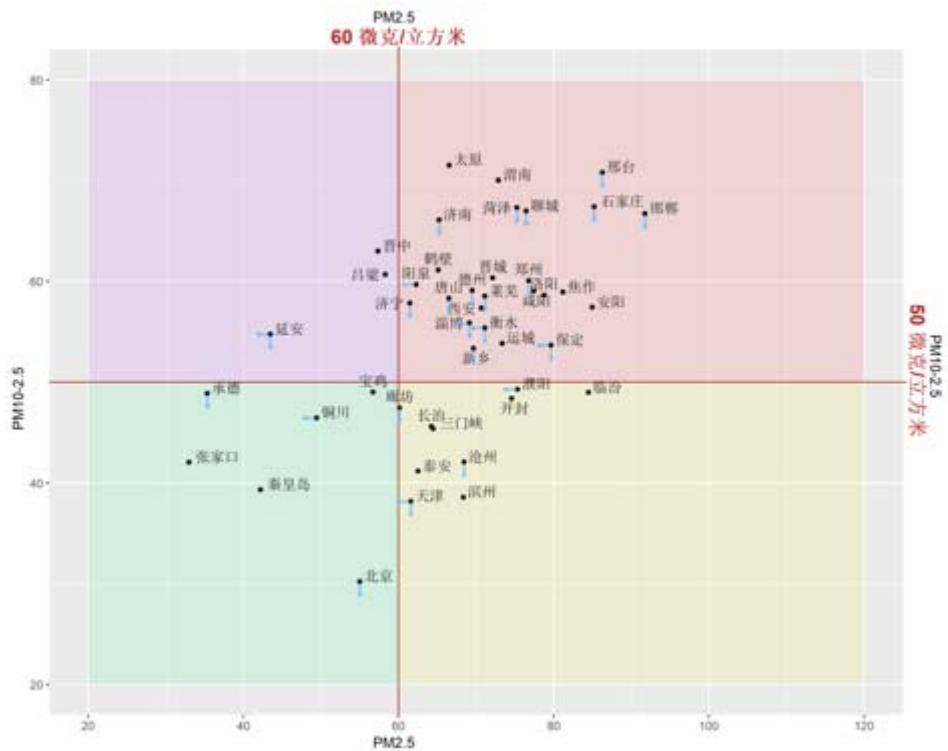


图 55：“2+43”城市 2018 年 $\text{PM}_{10-2.5}$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的监视坐标图

(纵向箭头表示该城市五年内 $\text{PM}_{10-2.5}$ 降幅至少 25%，横向箭头表示该城市五年内 $\text{PM}_{2.5}$ 降幅至少 26%)



图 56：“2+43”城市 2018 年一氧化碳和二氧化硫的监视坐标图

(纵向箭头表示该城市五年内一氧化碳降幅至少 30%，横向箭头表示该城市五年内二氧化硫降幅至少 65%)

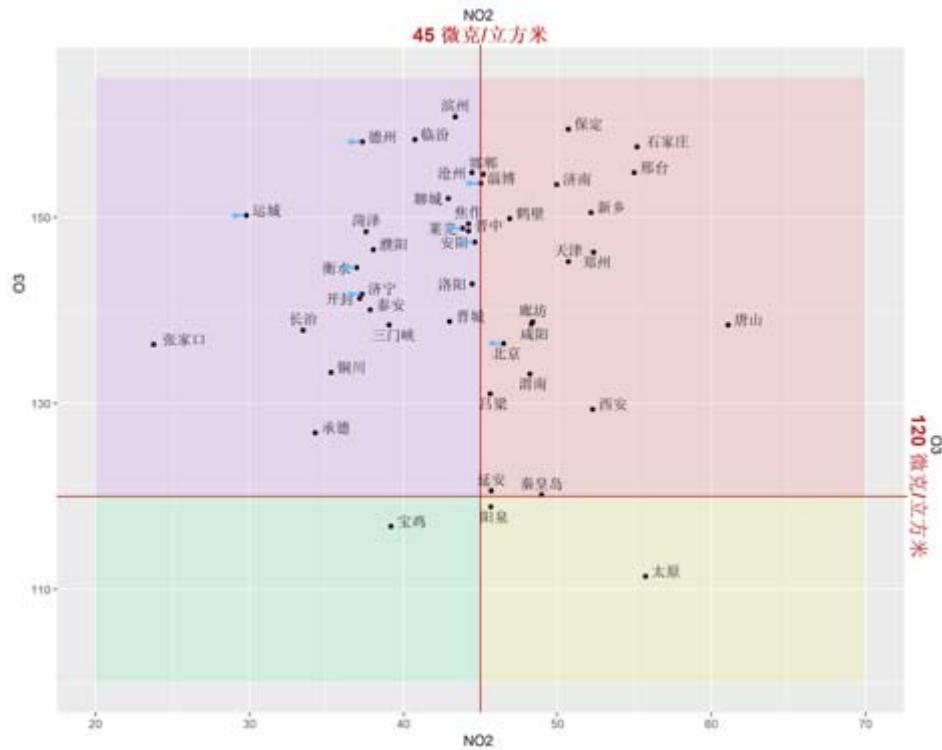


图 57：“2+43”城市 2018 年二氧化氮和春夏两季 8 小时臭氧的监视坐标图

(横向箭头表示该城市五年内二氧化氮降幅至少 15%)

表 9：“2+43”城市 2018 年超标污染物情况汇总

(“×”代表污染物过高)

| 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 | 唐山 | × | × | × | × | × | × |
| 2 | 邢台 | × | × | × | × | × | × |
| 3 | 淄博 | × | × | × | × | × | × |
| 4 | 邯郸 | × | × | | × | × | × |
| 5 | 鹤壁 | × | × | | × | × | × |
| 6 | 石家庄 | × | × | | × | × | × |
| 7 | 新乡 | × | × | | × | × | × |
| 8 | 安阳 | × | × | | × | | × |
| 9 | 保定 | × | × | | | × | × |
| 10 | 济南 | × | × | | | × | × |
| 11 | 焦作 | × | × | | × | | × |
| 12 | 晋城 | × | × | | × | | × |
| 13 | 临汾 | × | | × | × | | × |
| 14 | 吕梁 | | × | × | | × | × |
| 15 | 太原 | × | × | × | | × | |
| 16 | 渭南 | × | × | | | × | × |
| 17 | 西安 | × | × | | | × | × |

| | | | | | | |
|----|-----|---|---|---|---|---|
| 18 | 咸阳 | × | × | | × | × |
| 19 | 延安 | | × | × | × | × |
| 20 | 阳泉 | × | × | × | | × |
| 21 | 运城 | × | × | | × | |
| 22 | 郑州 | × | × | | × | × |
| 23 | 长治 | × | | × | | × |
| 24 | 德州 | × | × | | | × |
| 25 | 菏泽 | × | × | | | × |
| 26 | 衡水 | × | × | | | × |
| 27 | 济宁 | × | × | | | × |
| 28 | 晋中 | × | | × | | × |
| 29 | 莱芜 | × | × | | | × |
| 30 | 廊坊 | × | | | × | × |
| 31 | 聊城 | × | × | | | × |
| 32 | 洛阳 | × | × | | | × |
| 33 | 秦皇岛 | | | × | × | × |
| 34 | 天津 | × | | | × | × |
| 35 | 北京 | | | | × | × |
| 36 | 滨州 | × | | | | × |
| 37 | 沧州 | × | | | | × |
| 38 | 开封 | × | | | | × |
| 39 | 濮阳 | × | | | | × |
| 40 | 三门峡 | × | | | | × |
| 41 | 泰安 | × | | | | × |
| 42 | 承德 | | | | | × |
| 43 | 开封 | | | | | × |
| 44 | 张家口 | | | | | × |
| 45 | 宝鸡 | | | | | |

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，黑色代表无污染物超标。

六、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陕五省二市的煤炭消耗及主要工业产品产量情况。主要工业产品产量数据来源于国家统计局网站，各省市煤炭消费量数据来源于中国煤炭资源网。

2017 年冬季，为治理京津冀地区的冬季雾霾天气，环保部、发改委、工信部等多部委及北京、天津、河北等省市共同印发《京津冀及周边地区 2017-2018 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》[21]，京津冀及周边地区的 6 个省(直辖市)加入**秋冬季“蓝天保卫战”**。限产、停产措施涵盖了水泥、钢铁、有色金属、电力、化工等多个行业。2018 年秋天开始为了适应新的经济情况，2017 年冬季硬性限产方式将不再实行。

图 58 展示了 2011 年以来京津冀晋鲁豫陕五省二市的主要工业产品产量情况。从生铁产量趋势图中可以发现，天津市、河北、山东和河南省 2016 年与 2017 年冬季的生铁产量明显低于其它月份（山东省 2016 年冬季例外），2017 年冬季的生铁产量下降尤为明显。但山西省 2017 年冬季不降反升，生铁产量明显超过了 2015 和 2016 年同月水平。较为特殊的是陕西省，它不是钢铁生产大省，受到冬季限产令的影响并不大，从 2017 年下半年至 2018 年生铁产量并未发生较大变化。因冬季限产措施持续到 2018 年 3 月中旬，国内钢厂纷纷在冬季限产措施结束后提高产能。图 58 显示，从 2018 年春季起，各省市的生铁产量迅速上升，春夏秋三个季度的生铁产量均维持较高水平。尤其是河北省和山西省，2018 年生铁产量达到 2015 年以来的最高水平。山东省 2018 年春夏秋三个季度生铁产量基本持平，相比 2017 年同期均有较大幅度的上升。2018 年冬季的生铁产量比夏秋两季的生产水平明显降低，天津、河北、山东、河南和陕西都有此现象，这应该与供暖季的错峰生产和限产政策相关。2018 年各地的供暖季限产方案³有所不同，不再实行 2017 年的“一刀切”式停工停产措施，天津、河北、山西和山东省 **2018 年冬季的生铁产量均高于 2017 年冬季水平**。这点也体现在各省市的冶金行业煤炭消费数据上（见图 60）。山西省 2018 年冬季的生铁产量甚至比秋季更高，几乎接近同年夏季的最高水平，值得关注。同样值得注意的是河南省，在 2017 年冬季的限产政策结束后，生铁产量有所回升，但并未达到往年同期的水平。河南省 2018 年全年的生铁产量为 2015 年以来最低水平。此下降趋势应与经济放缓有关，这也是 2018 年供暖季限产政策变得灵活之由。各省市的粗钢产量变化趋势与以上分析的生铁产量变化趋势非常接近，2017 年秋冬季“停工限产令”在粗钢产量数据上也被直接体现。

图 58 中展示的各省市水泥产量变化趋势更加明显地反映出冬季限产令的效果。由于建材行业产业特征，冬季需求不旺盛（每年冬季水泥产量均为全年最低水平），再加上《京津冀及周边地区 2017-2018 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》[21]要求除民生保障需求外建材行业采暖季全部实施停产的要求，津京冀晋鲁豫陕五省二市的水泥产量在 2017 年冬季较 2016 年冬季又有明显下降，达到历年来同期最低水平。除河南省外，从 2018 年春季开始，水泥产量又呈现上升趋势。**山西省的水泥产量同样逆势上升，从 2018 年夏秋冬三个季度均达到 2015 年以来的最高水平**。山东、陕西和河南省 2018 年的水泥产量较往年来说有明显下降，全年产量均为 2015 年以来的最低

³《京津冀及周边地区 2018-2019 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》指出，京津冀及周边地区“2+26”城市，对钢铁、建材、铸造、有色、化工、焦化等高污染和高耗能行业，不再进行统一的停工限产比例，而是各地因地制宜实行差别化错峰生产，制定停工限产的范围和时间。

水平。比较特殊的是河南省，月度数据显示，在经过 2017 年冬季的低产期后，3, 4 两月的水泥产量迅速上升，但从 5 月开始又持续下降，并且此下降趋势持续到 11 月。2018 年秋季河南省的水泥产量几乎下降至 2017 年冬季限产期内的水平。这也从河南省的建材行业煤炭消费数据上得到体现。由于 2018 年冬季不再实行 2017 年的“一刀切”式停工停产措施，除河南省外，各省市 2018 年冬季的水泥产量均高于 2017 年冬季水平。

津京冀晋鲁豫陕五省二市的发电量变化趋势显示，从 2015 至 2018 年，各省市发电量的变化趋势并无明显变化，均为“冬夏高，春秋低”的趋势。这是因为居民有冬季用空调取暖、照明，夏季制冷的需求所致。部分省市 2017 年冬季发电量呈现上升的趋势，如河北，这很可能是因为在 2017 年冬季在京津冀地区推广的“煤改电”采暖措施所致。而山西省 2017 年冬季的发电量上升则也有可能是由钢铁产量上升所致。

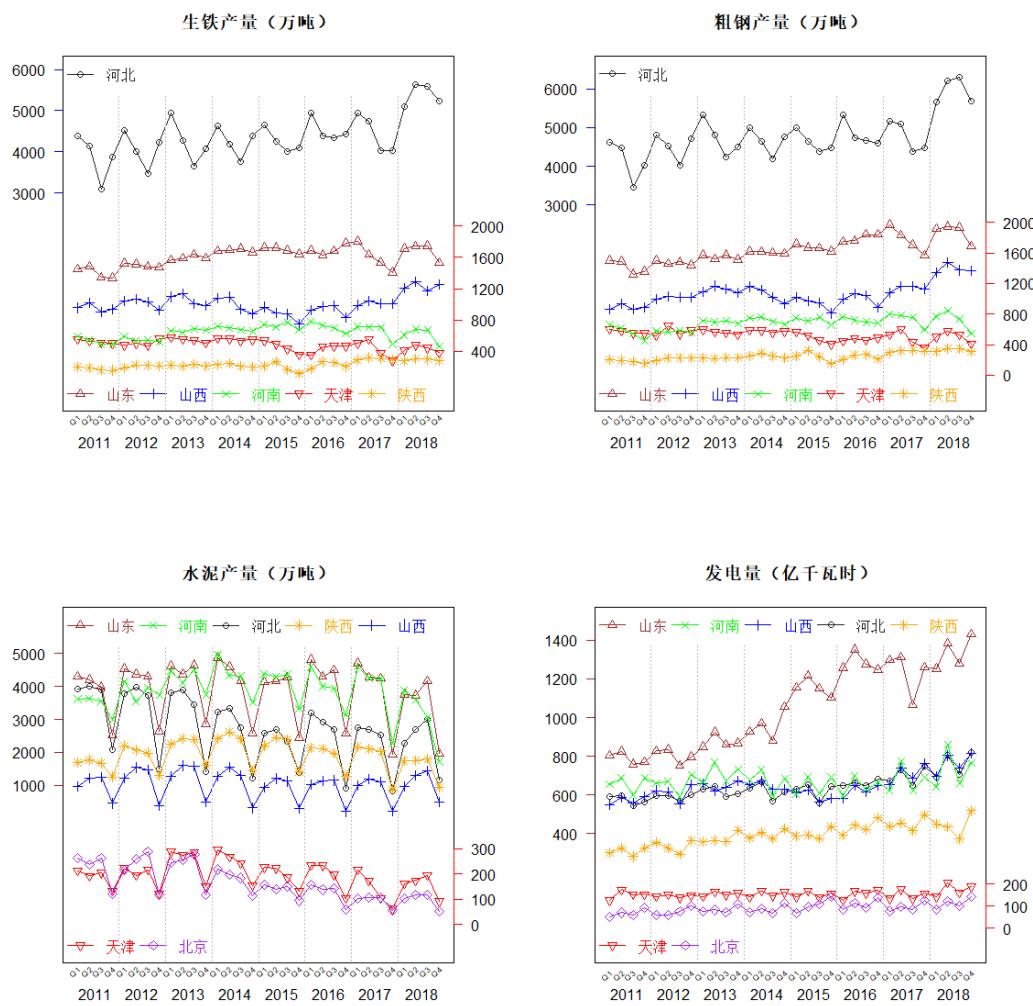


图 58：京津冀晋鲁豫陕五省二市耗煤工业产品季度总产量及季度总发电量

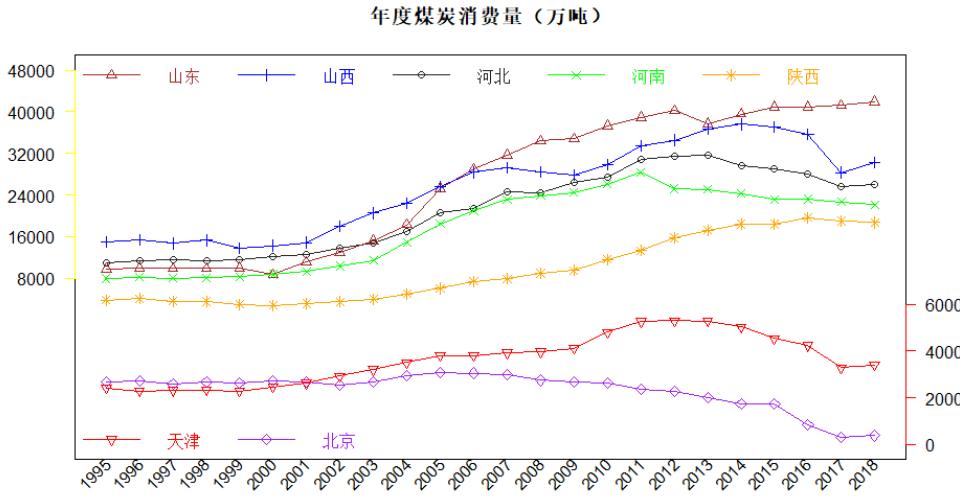


图 59：京津冀晋鲁豫陕五省二市自然年年度煤炭消费总量(万吨)
(1995–2016 年数据来自国家统计局网站, 2017–2018 年数据来自中国煤炭资源网)

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）四个行业。总耗煤量中减去这四个行业以外的耗煤量都归入其它类，它包含了民用散煤消费。散煤燃烧的效率最低，有研究表明它会造成多于十几倍的污染排放[22]。图 59 给出了京津冀晋鲁豫陕五省二市 1995–2017 年（按自然年计算）煤炭消费总量的统计。

北京市的煤炭消费量自奥运会之前的 2007 年就开始稳步下降，2016 年的消费量仅是 2007 年的 22.1%。2017 年北京市大规模取消燃煤锅炉，加大清洁能源采暖比重，2017 年的煤炭消费总量比 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。从 2013 年开始，天津和河北的煤炭消耗量逐年下降，2017 年的煤耗总量已下降至近十年的最低水平，这体现了京津冀地区空气污染治理措施的成效。2017 年，京津冀周边地区“2+31”城市开始“蓝天保卫战”。其中，山西和河南省自 2013 年起煤炭消费总量逐年下降。山东省自 2003 年超过山西成为五省中煤炭消费冠军之后，在 2013 年有所下降，但 2014 年开始煤炭消费总量呈现回升趋势，从 2016 年开始上升幅度减缓，每年煤炭消费总量约增加几十至几百万吨。陕西省 2017 年全年煤炭消费总量比 2016 年也有所下降。经过 2017 年的“停工限产令”后，2018 年各省市的工业生产纷纷回暖，除河南和陕西省煤炭消耗总量基本与 2017 年持平或略有下降外，其它省市的煤炭消费总量均较 2017 年有所上升，但上升幅度并不大。2018 年河北省煤炭消费总量共计 2.6 亿吨，山西省 3 亿吨，山东省 4.2 亿吨，河南省 2.2 亿吨，陕西省 1.8 亿吨，五省共消耗煤炭 13.9 亿吨，比 2017 年的 13.7 亿吨增加了 1.56%。

为了进一步了解京津冀晋鲁豫陕五省二市的煤炭消费量，图 60 绘制了各省市的煤炭消费总量和分行业煤炭消费量的季度数据变化趋势图。从图 60 中各省市 2017–2018 年季度煤炭消费数据来

看，山东和陕西省的煤炭消费总量增长势头有所减缓，减少煤炭的消耗还有进一步的空间。而山西省的 2018 年春夏秋三个季度的煤炭消费总量较 2017 年同期有明显增长，此上升势头值得进一步关注。2017 年秋冬两季由于受到“停工限产令”的影响，各省市的煤炭消费总量均达到近三年来最低水平。而 2018 年供暖季实行“灵活”的政策，产量较 2017 年同期水平更高，因此 2018 年 11 月和 12 月各省市的煤炭消费总量比 2017 年同月水平更高。

北京市自 2017 年 4 月开始全面实施“煤改气”清洁能源计划，曾经取消了燃煤发电，因此北京市的煤耗总量从 2017 年春季开始变得非常少，此处故不作重点分析。从图 60 中的煤炭消费总量趋势图中可以看出，天津市、河北、山西和河南省 2016 年各季度煤炭消费总量均比 2015 年同期有明显下降，但山东省却逆势上升。这一现象我们已经在《空气质量评估报告（四）——京津冀 2013-2016 年区域污染状况评估》[4] 的季度数据分析中提到过。可幸的是，2017 年的秋冬两季山东省煤炭消费总量相比于 2016 年同期水平有了显著的下降，达到近三年来最低水平，这反映了去年华北地区空气治理攻坚战的显著成果。受到冬季限产令的影响，其它地区在 2017 年秋冬两季的煤炭消费量也较上年同月有所下降。但 2017 年冬季的限产措施结束后，山东、河北、山西等地区从 2018 年春季以后的煤炭消费总量再次上升，这主要由电力行业和冶金行业的煤耗量上升引起，与之前分析的这些省市 2018 年的发电量上升趋势一致（见图 58）。陕西省 2018 年煤炭消费总量的变化趋势与 2017 年基本一致，且 2018 年各季度的数值都略小于 2017 年。河南省 2018 年各季度的煤炭消费总量均比 2017 年同期有显著下降，这与 2018 年以来河南省冶金类产品（如生铁、粗钢）与建材类产品（如水泥）的产量显著下降有关。图 60 中的电力行业耗煤量变化趋势与图 58 中的发电量趋势基本一致。

图 60 中也展示了京津冀晋鲁豫陕五省二市的冶金行业煤炭消费量。值得注意的是，以 2017 年河北省为例（除 2017 年冬季外），虽然生铁和粗钢的产量相比 2016 年有所上升（见图 58），但冶金行业的煤炭消费量却比 2016 年有所下降。这与河北省近两年来的能耗效率提高措施有关。自 2016 年起，作为去产能的一部分举措，河北省关闭了一些小型钢铁厂，而大型钢铁厂的煤耗效率比较高，因此尽管钢铁产量仍在增加，用于炼钢的煤耗量却在下降。2017 年冬季限产令的效果更是明显地体现在冶金行业的煤炭消费量上。河北省 2018 年夏秋两季（非供暖季）的冶金行业煤耗量有显著增加趋势，几乎达到了近三年来的同期最高水平。而山东省则相反，虽然生铁和粗钢的产量不减，但冶金行业的煤炭消费量在 2018 年上半年（春秋两季）大幅下降。这说明山东省的能耗效率也在逐渐提高和优化。陕西省冶金行业的煤炭消费量与生铁和粗钢产量变化的趋势基本相同。同时，值得注意的是，河南省 2018 年以来冶金行业煤炭消费量相比于 2017 年有明显下降。从图 58 中可知，河南省 2018 年生铁产量的下降是冶金行业煤炭消费量下降的主要原因之一。这也使得河南省煤炭消费总量在 2018 年有所下降。

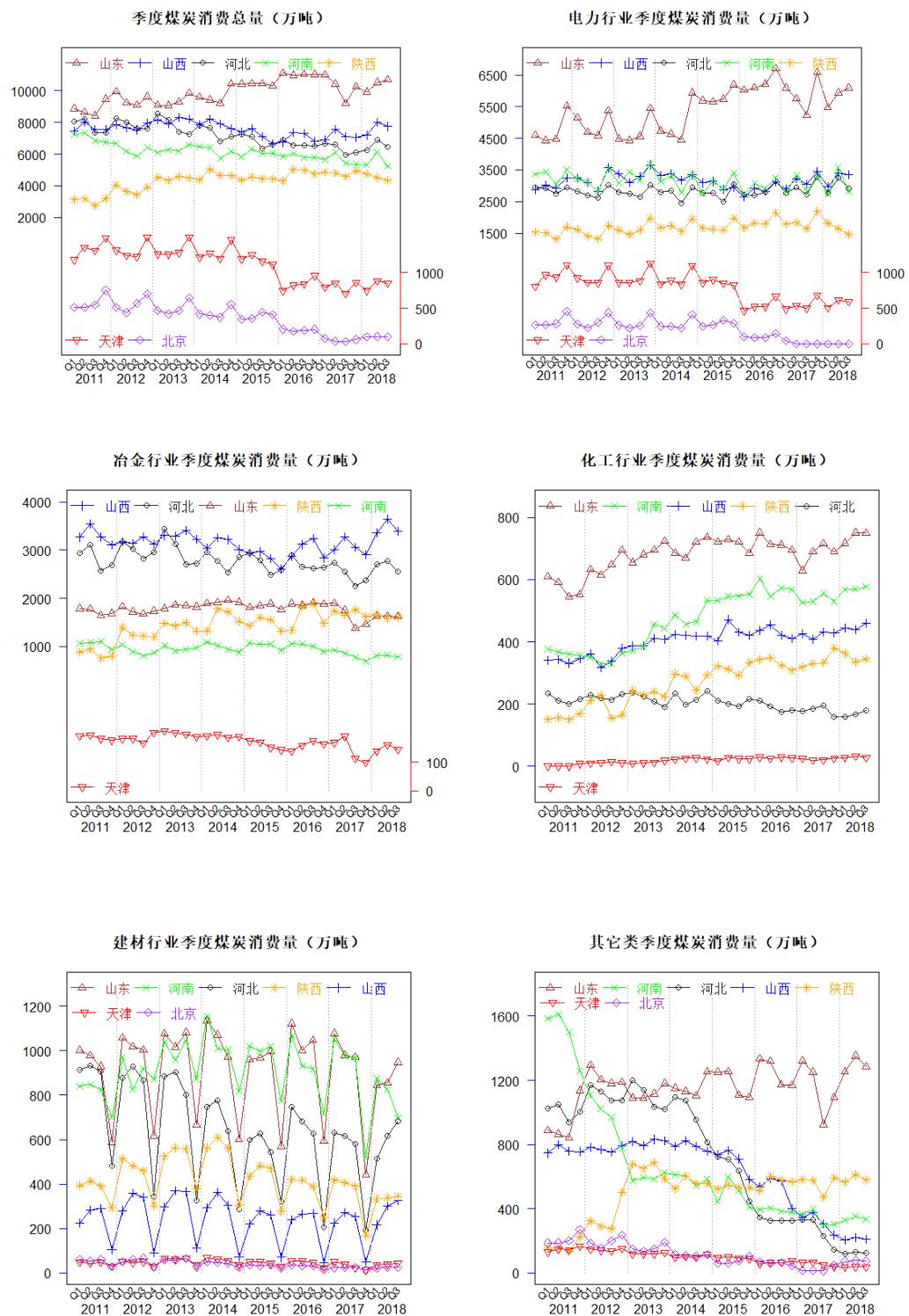


图 60: 京津冀晋鲁豫陕五省二市季度分行业煤炭消费量

图 60 中的化工和建材行业煤耗量也反映了 2017 年冬季限产的成效。相对其它行业来说，化工行业耗煤总量不如其它行业高，耗煤量的变化趋势也不如其它行业明显。尽管如此，从图 60 中

还是能看出各省市 2017 年冬季化工行业煤耗量的下降（除陕西省外）。除河北省外，天津、山东、陕西、河南和陕西省 2018 年春夏秋季化工行业的煤炭消费量均比 2017 年有所增加。图 60 中建材行业煤耗量的变化趋势同图 58 中水泥产量的变化趋势非常相似，此处也不再重复。

图 60 也展示了其它类煤炭消费量的情况。之前提到，民用散煤消费也归入其它类煤耗量。因此，这幅图可以反映近年来华北地区对散煤的治理情况。从图 60 中可以看出，自 2016 年以来，各省市的其它类煤耗量逐年下降，特别是 2017 年冬季至 2018 年底。尤其是河北省，2017 年冬季至 2018 年秋季其它类耗煤量下降至 2016 年的约二分之一，2015 年的约五分之一，下降非常显著。山东省虽不如其它省市下降趋势如此明显，但 2017 年冬季的其它类煤耗量明显减少。但山东和陕西的其它类耗煤量在 2018 年下半年又有明显上升的趋势。北京市 2018 年的其它类耗煤量却也逆势上升，造成北京市煤耗总量的上升趋势，也值得关注。（其它类煤耗量只有山东和北京有明显反弹）

七、“人努力一天帮忙”指数

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，该方法不同于目前常用的基于原始浓度的年际变化比率。因为基于原始浓度所得到的年际变化比率会受三个因素的影响：当年和去年的气象条件（所谓的“天帮忙”或“天不帮忙”，也称为气象干扰）和背景浓度的变化（由所谓的“人努力”或“人不努力”所致），所以有必要使用气象调整后的污染物浓度。其中气象条件对污染水平的影响可以通过比较调整后浓度和原始浓度得到，背景排放浓度可以通过比较经气象调整的浓度而获得。因此将原始浓度和调整后浓度结合可以更准确地度量和评估大气减排的真实效果与气象条件的整体影响，下面将具体说明我们给出的“人努力-天帮忙”指数的机理。

以 2018 年秋季某市的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化比率分解为例，我们用 x_1 和 \tilde{x}_1 分别表示 2017 年秋季 $\text{PM}_{2.5}$ 的原始平均浓度和经气象调整后平均浓度；用 x_2 和 \tilde{x}_2 表示 2018 年秋季 $\text{PM}_{2.5}$ 的原始平均浓度和调整后平均浓度。则 2018 年秋季与 2017 年秋季相比， $\text{PM}_{2.5}$ 原始浓度的变化比率是 $\frac{x_2 - x_1}{x_1}$ ，其有如下分解

$$\frac{x_2 - x_1}{x_1} = \frac{x_2 - \tilde{x}_2}{x_1} + \frac{\tilde{x}_2 - \tilde{x}_1}{x_1} + \frac{\tilde{x}_1 - x_1}{x_1},$$

其中， $\frac{x_2 - \tilde{x}_2}{x_1}$ 反映了 2018 年秋季的气象因素对原始变化比率的影响； $\frac{\tilde{x}_2 - \tilde{x}_1}{x_1}$ 是调整后的均值变化比率，反映了 2018 年相比 2017 年人为因素对原始变化比率的影响； $\frac{\tilde{x}_1 - x_1}{x_1}$ 则为 2017 年秋季气象条件对原始变化比率的影响。

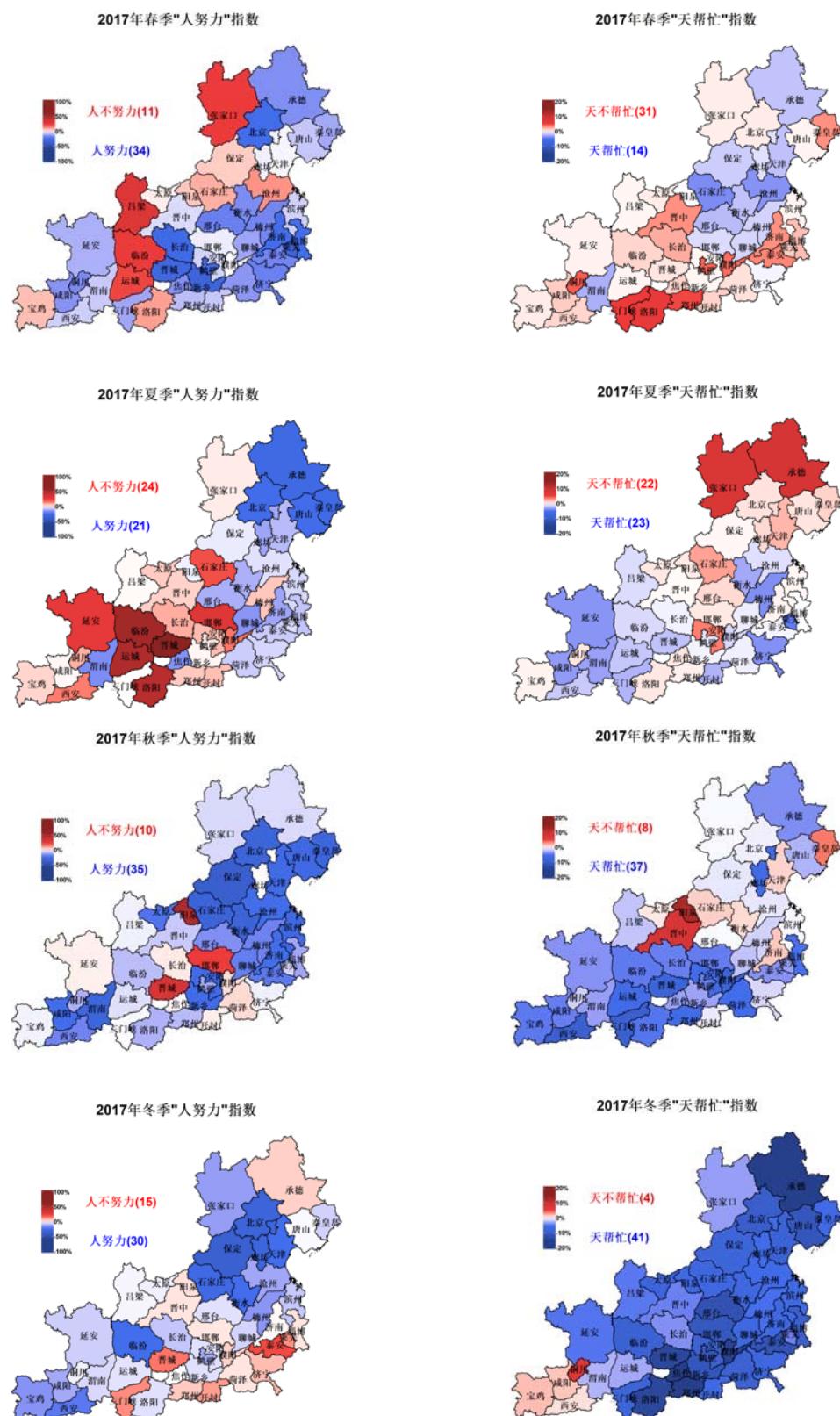


图 61：2017 年分季节“人努力”及“天帮忙”图（红色代表不利气象/人不努力，蓝色代表有利气象/人努力，颜色越深，表示分解项的第一/二项绝对值越大，气象/人为的影响越大）

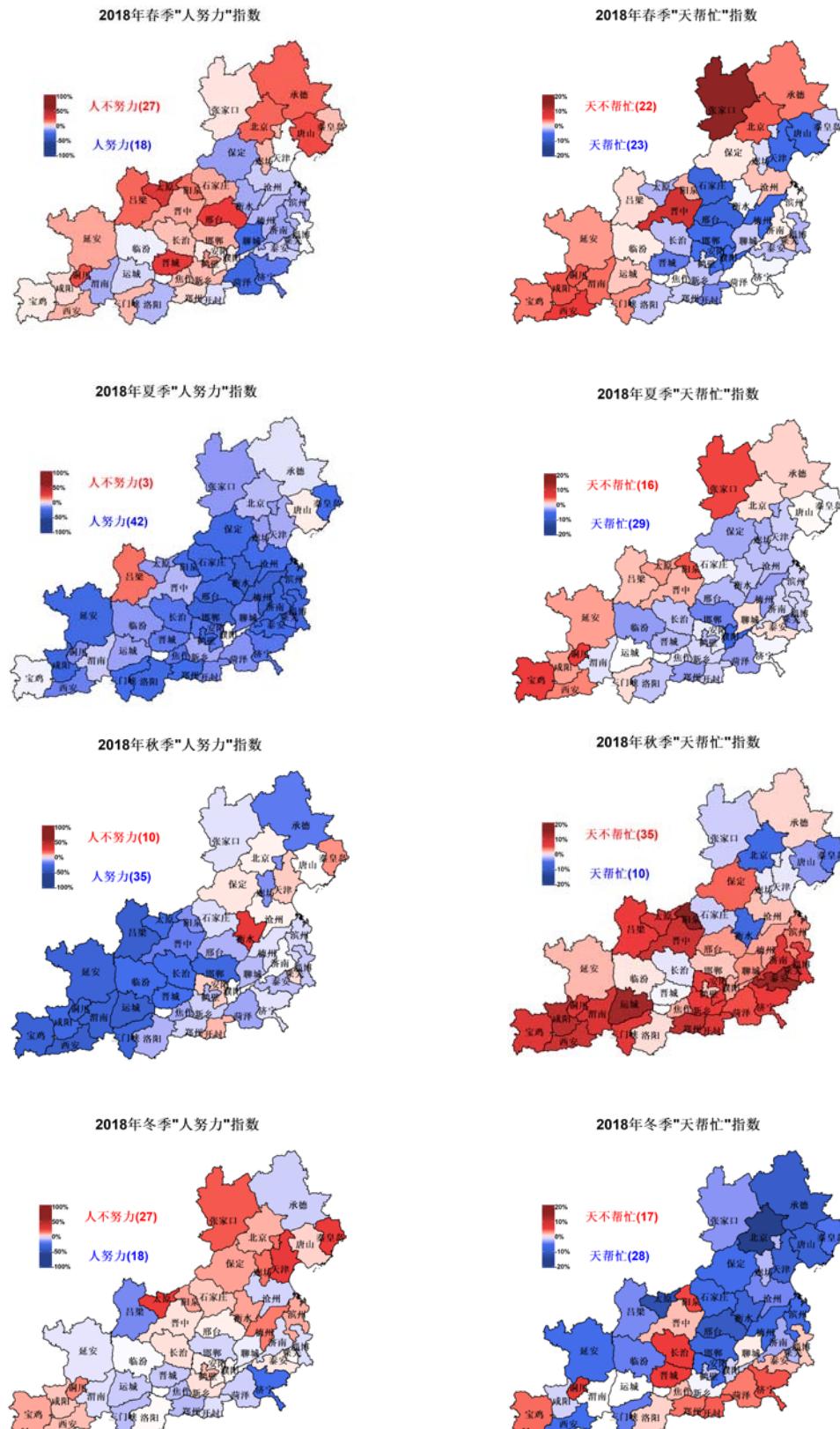


图 62: 2018 年分季节“人努力”及“天帮忙”图 (红色代表不利气象/人不努力, 蓝色代表有利气象/人为的影响越大, 颜色越深, 表示分解项的第一/二项绝对值越大, 气象/人为的影响越大)

推广到一般情况的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度年变化比率，分解式的第一项 $\frac{\widetilde{x}_2 - \widetilde{x}_1}{x_1}$ 代表了该年气象因素对 $\text{PM}_{2.5}$ 原始浓度年变化的贡献，其中正值代表今年气象条件不利于污染物扩散，即“天不帮忙”；负值代表今年气象条件利于污染物扩散，即“天帮忙”。分解式的第二项 $\frac{\widetilde{x}_1 - \widetilde{x}_2}{x_1}$ 代表了该年人为因素对 $\text{PM}_{2.5}$ 原始浓度年变化的贡献，其中正值代表今年背景浓度上升，即“人不努力”；负值代表背景浓度下降，即“人努力”。

图 61 和 62 分别给出了 2017 年和 2018 年四个季节每个城市的“人努力”指数（即 $\frac{\widetilde{x}_2 - \widetilde{x}_1}{x_1}$ ）和“天帮忙”指数（即 $\frac{\widetilde{x}_1 - \widetilde{x}_2}{x_1}$ ）。从图中可以看出，2017 年春季尽管有 31 个城市“天不帮忙”，但仍有 34 个城市“人努力”。夏季北京、承德、唐山、秦皇岛“人努力”的程度在 45 个城市中位居前列，而“天帮忙”的区域较春季相比，由北部转向南部。秋季“人努力”的城市个数为 2017 年四个季节中最多，达到了 35 个城市；与此同时，“天帮忙”的城市个数也较多，达到了 37 个城市，即 2017 年秋季在大幅减少排放的同时气象条件亦有利于污染物扩散。冬季“人努力”的城市有 30 个，该指标与秋季相比略微减少，但是“天帮忙”的城市个数为 2017 年四个季节中最多，除宝鸡、咸阳、西安、铜川外，其余城市的气象条件均有利于污染物扩散。2018 年春季“人不努力”城市较多，“天帮忙”与“天不帮忙”城市个数各占一半。夏季除吕梁、唐山、濮阳外的 42 个城市均为“人努力”；“天帮忙”方面，各城市“天帮忙”与否与春季差别不大，但气象因素对污染物浓度的影响力度较春季有所减弱。秋季“天不帮忙”的城市个数为 2018 年四个季节中最多，仅北京、衡水、秦皇岛、唐山、张家口等 10 个城市的气象条件有利于污染物扩散，其余 35 个城市的气象条件均不利于污染物扩散。然而，秋季除衡水、秦皇岛等城市为“人不努力”外，其余 35 个城市均为“人努力”。冬季的气象条件好转，共有 28 个城市为“天帮忙”，尤其是京津冀地区，气象条件极有利于污染物扩散。但是冬季“人不努力”的城市有 27 个，这些城市大多聚集在北部地区。

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”或“天帮倒忙”的影响。

八、总结与建议

图 63 和图 64 汇总了“2+43”城市按 7 个分区 2013 年或 2014 年至 2018 年六种污染物经气象调整的季节平均年浓度。由于非京津冀城市 2013 年数据质量普遍不高，我们的总结集中于 2014 年到 2018 年的五年。综合这两张图和前面第四到六节对多种污染物浓度变化及能源消耗的分析，我们对“2+43”城市过去五年的空气质量状况及变化趋势得到如下结论，并提出一些建议供有关部门参考。

(一) 空气质量评估方法

科学的大气环境管理需要科学、公平的评价手段。目前对各城市大气治理的评估是基于直接观测的小时浓度平均。如我们在第七节给出的“人努力-天帮忙”指数及发表论文所述，这一方法受气象因素的影响很大，不能完全反映各城市大气污染治理的人为努力程度。据悉“三年滑动平均法”可能成为评估空气质量变化的方法。如文献[18]所指出，该方法存在缺陷，并不能去除掉天气因素的干扰。我们建议使用去除气象干扰的空气质量评估方法，使得对各城市大气治理努力程度的评估不受“天帮忙”或“天帮倒忙”的影响。使用公平的评估指标无疑将能调动各级部门大气治理的积极性。

(二) $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} ⁴

经过近五年的治理，京津冀与山东省 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染已经有了明显改善。京津冀平原上“2+8”市和山东 9 市 $PM_{2.5}$ 累积降幅分别为 32.5% 和 32.4%。其中，北京市改善显著，与京津冀平原其他城市拉开差距，颗粒物浓度接近北部三市水平。相比之下，河南、山西和陕西的减少程度要低于京津冀和山东，累积降幅分别为 17.9%、8.5% 和 4.4%。 PM_{10} 累积降幅京津冀平原上“2+8”市为 27.9%，山东 9 市为 24.0%，而河南、陕西、山西省分别为 12.1%、7.0% 和 3.3%。山西最近一年、陕西最近两年 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 才有所下降趋势。2014 年山西 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 分别低于山东 23.5 微克和 29.7 微克/立方米，但却在 2018 年均超过了山东。以上这些数据结果反应了京津冀及周边晋鲁豫陕大气污染治理的不平衡，我们建议山西、陕西尽快实行一个行之有效的颗粒物治理的方案。

我们的研究发现，2017 至 2018 年京津冀地区 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度下降明显放缓，其中“环渤海五城市”（北京、天津、唐山、沧州和廊坊）在 2018 年出现不显著增加或显著增加。河北北部 3 城市作为京津冀的“氧吧”，2017 至 2018 年 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度均出现增加。尽管河北北部 3 个城市不属于“2+26”和汾渭平原城市的范畴，但我们建议河北北部三市加强污染防治的力度，尤其考虑到 2020 年的“冬奥会”将在张家口和北京举行。

尽管过去五年 PM_{10} 有显著的下降，但 2018 年 45 城市中仍有 39 个城市的 PM_{10} 的年均浓度在 100 微克/立方米以上。几乎所有城市 $PM_{2.5}$ 在 PM_{10} 中所占的比例有下降的趋势，这说明 $PM_{10-2.5}$ 的下降速度低于 $PM_{2.5}$ 的下降速度。我们建议加强对区域内扬尘的管理。

⁴ 直径为 0.5–5 微米的粒子可以直接到达肺泡内，并进入血液通往全身。大量流行病学研究发现：颗粒物浓度和发病率及死亡率有明显联系，尤其是细粒子与心肺疾病的相关性更为明显。

(三) 2018 年新的管理策略的影响评价

2017 年至 2018 年河北沿太行山五市 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度下降放缓，北京、天津、唐山、沧州和廊坊地区的浓度在 2018 年出现增加。这主要是 2018 年春、冬两季及 11 月份的浓度增加所致。2018 年春季的增加应该是 2017 年国十条达标任务完成后的休整所致。环保部五月开始组织的一万人环保巡查无疑是导致 2018 年 6 月到 10 月（夏季和秋季前两个月）颗粒物浓度下降的主要原因。2018 年 11 月和冬季的增加是由于 2018 年晚秋开始采取的更加灵活的管理策略所致，即避免 2017 年所采用的“一刀切”式的停产、限产方式。但从 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的增加程度看，沿太行山五城市 $PM_{2.5}$ 冬季平均浓度从 126.79 微克上升到 131.33 微克/立方米， PM_{10} 从 185.33 微克上升到 207.16 微克/立方米，增幅分别为 3.50% 和 11.78%；环渤海五城市 $PM_{2.5}$ 冬季平均浓度从 76.91 微克上升到 82.36 微克/立方米， PM_{10} 冬季浓度从 117.04 微克上升到 131.32 微克/立方米，增幅分别为 7.09% 和 12.20%。这说明新的管理策略并没有导致冬季 $PM_{2.5}$ 浓度的剧烈反弹，但 PM_{10} 浓度有过高的增加。

(四) 提高空气质量“良”的标准

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，印度和孟加拉国“良”的标准分别为 60 和 65 微克/立方米，均比我国目前使用的 75 微克/立方米要严格。我们建议尽快使用 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。提高“良”的国家标准的提高将使中国人群能够实行有效的保护措施，有效减少中国人群的污染暴露水平和未来个人及国家的医疗健康开支，也将为下一步的大气污染防治行动计划提供更高的目标和新的动能。

(五) 二氧化硫和一氧化碳⁵

二氧化硫污染改善显著，京津冀、山东、河南、山西和陕西累积降幅均超过 50%。京津冀各城市自 2013 年起逐渐推行“煤改气”、“煤改电”和燃煤脱硫等举措。得益于此，45 市二氧化硫的降低趋势显著。京津冀平原“2+8”城市 2018 年二氧化硫平均浓度已降至 19.8 微克/立方米，北京市连续八个季度浓度降至个位数。山西、山东、河南、陕西地区二氧化硫浓度在 2018 年分别降至 28.9、19.5、17.5、12.8 微克/立方米。区域性二氧化硫的显著下降是京津冀及周边晋鲁豫陕地区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 PM_{10} 显著下降的主要原因。

⁵ SO_2 的短期暴露会对人体的呼吸系统造成损害，其排放也会导致 SO_4^{2-} 浓度的增加，而后者是细颗粒物的组成；长期暴露于中高浓度的一氧化碳中则会增加心脏病风险。

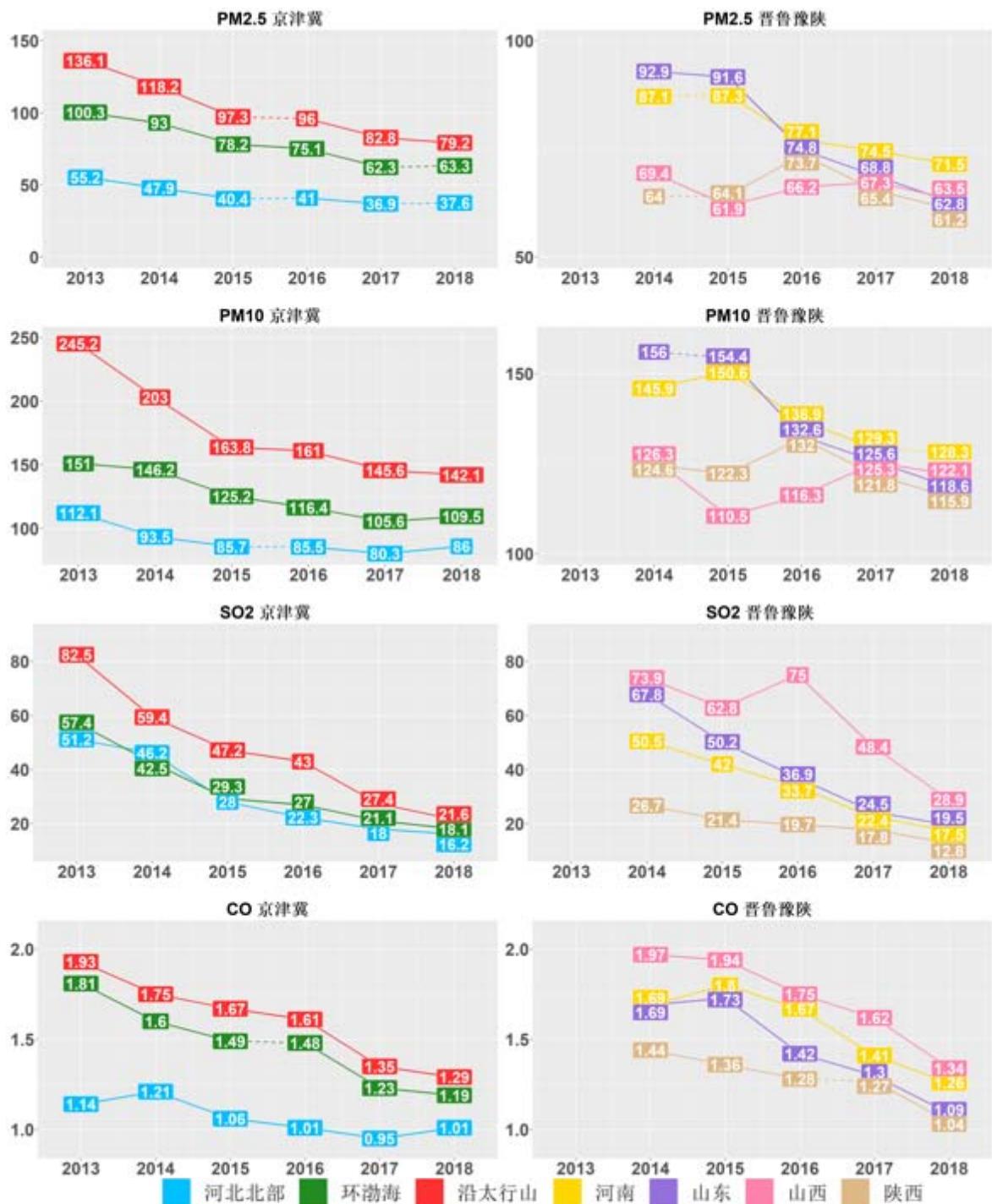


图 63：“2+43”城市气象调整后 PM_{2.5}、PM₁₀、二氧化硫和一氧化碳年平均浓度时间序列（微克/立方米）

实线（虚线）代表在 5% 统计学显著水平比上一年有（无）显著增加或减少

河北北部: 张家口、承德、秦皇岛；**环渤海**: 唐山、天津、沧州、北京、廊坊；

沿太行山脉: 保定、石家庄、邢台、邯郸、衡水；

河南: 安阳、鹤壁、焦作、开封、洛阳、濮阳、三门峡、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、临汾、吕梁、晋城、晋中、运城；**陕西**: 宝鸡、铜川、西安、咸阳、渭南

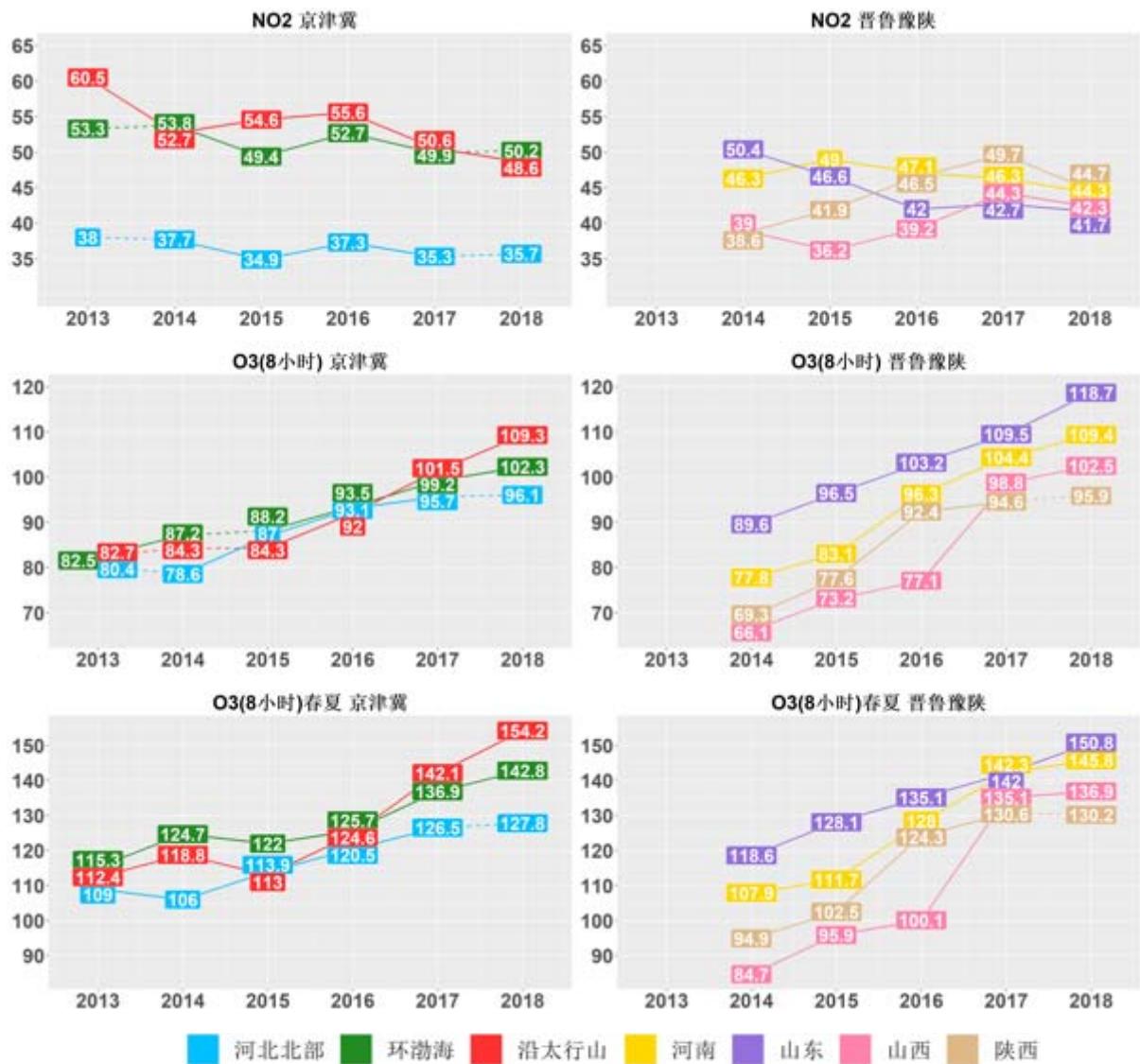


图 64：“2+43”城市气象调整后二氧化氮和臭氧8小时年（或春夏两季）平均浓度时间序列（微克/立方米）
实线（虚线）代表在5%统计学显著水平比上年有（无）显著增加或减少，图例定义如图63

“2+43”城市一氧化碳的下降幅度要小于二氧化硫的下降幅度。这是由于一氧化碳不只来自煤炭消费，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滞后于对煤炭消费的管控。近两年，京津冀地区一氧化碳浓度下降放缓，其中北部3城市浓度甚至增加。山西近五年二氧化硫和一氧化碳的虽然下降明显，但是山西这五年均是五省二市七个区域二氧化硫和一氧化碳浓度最高的地区，甚至高于河北沿太行山5市。由于一氧化碳会促进臭氧的生成，我们建议通过有效减少机动车排放及一般基本排放水平的方法来使一氧化碳也有更显著的下降，从而也将促成臭氧的减少。

(六) 二氧化氮⁶

“2+43”城市二氧化氮改善不大，较其初始年份共有 18 个城市二氧化氮浓度不降反升或无显著下降。山西和陕西地区 2018 年较 2014 年分别上升 8.5% 和 15.8%，其中，山西仅在 2015 和 2018 年出现下降，而陕西仅在 2018 年有所下降。其余地区 2018 年较 2014 年二氧化氮虽然有所下降，但下降幅度较小。山东、京津冀平原“2+8”市和河南分别累积下降了 17.3%、7.2% 和 4.3%，远远低于二氧化硫和一氧化碳的下降程度。2018 年“环渤海五城市”（北京、天津、唐山、沧州和廊坊）和河北北部 3 城市出现不显著增加。区域内各省市还有待找到减少二氧化氮的有效途径。

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 247 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。由于二氧化氮是臭氧的一个前体物，减少二氧化氮也是遏制区域内臭氧增加的有效手段。考虑到区域内二氧化硫已经有很显著下降，二氧化硫进一步下降空间有限。我们建议各省市采取措施有效减少二氧化氮的浓度，这在遏制臭氧的上升同时也为PM_{2.5} 和 PM₁₀ 下降提供新的路径。

(七) 8 小时臭氧⁷

“2+43”城市的 7 个省市过去五年 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。2014 至 2018 年山西、河南和陕西地区的上升幅度较大（分别为 55.1%、40.6% 和 38.4%）。山东省与京津冀地区由于基数高，上升趋势相对较缓（山东为 32.5%，京津冀平原上“2+8”市平均为 23.5%）。“2+43”城市中有 28 个城市累积增幅大于 30%。同样地，在臭氧浓度最高的春夏两季，山西、河南及陕西的累积上升幅度仍较高，山西增幅达到 61.6%，其他两省增幅分别为 35.1% 和 37.2%；山东省和京津冀平原上“2+8”市增幅分别为 27.2% 和 21.9%。**京津冀晋鲁豫 2018 年的增势并没有减少的迹象**。臭氧上升是由于(i)作为主要前提物之一的二氧化氮在“2+43”城市改善不大⁸。(ii) 区域内 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的下降导致空气中悬浮物的减少，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。

在臭氧高浓度地区（沿太行山、山东、河南）如何降低臭氧浓度也是亟需关注的问题。2018 年，沿太行山、山东和河南三个区域的春夏臭氧浓度均高于 145 微克 / 立方米。该高浓度地区的 23 个城市中有 21 个城市在 2018 年春夏季 8 小时臭氧的 90% 分位数浓度高于 200 微克 / 立方米。

⁶短期暴露于 NO₂ 会引起呼吸系统疾病，此外，NO₂ 在大气中会转化为 NO³⁻。NO³⁻ 作为细颗粒物的组成，也会对人体的呼吸系统有一定损害。

⁷长期暴露于臭氧与哮喘的加重和永久性肺损伤有关联，近期研究表明臭氧的短期暴露也会对呼吸系统造成损害。

⁸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不得而知。

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，以便采取有力措施通过显著降低区域内二氧化氮和一氧化碳浓度及时遏制其增长的趋势、有效降低臭氧浓度。避免部分地区面临颗粒物和臭氧双重污染的局面。

(八) 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 2018 年的 3 亿吨，下降了 24%，其中 2017 年的煤炭消耗量为 2.9 亿吨。但晋鲁豫陕四省从 2013 年的 11.2 亿吨到 2018 年的 11.3 亿吨，反而上升了 0.4%。而全国的煤炭消耗量从 2013 年到 2018 年下降了 5.6%。**山西的煤炭消费总量 2018 年约 3 亿吨，达到 2015 年以来的最高水平，主要来源于冶金和建材行业煤耗量的逆势上升。山西省 2018 年煤炭消费量的逆势上升是影响五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、山西和陕西的煤炭消耗量作为衡量基础排放的指标纳入大气污染防治的重点监测内容。

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”。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，目前三省年耗量均控制在 1400 万吨以下。而山东“其它类”煤炭消耗过去几年变化不大，2018 年仍高居 5000 万吨。陕西“其它类”煤炭消耗趋势与山东相似，2018 年为 2300 万吨。我们建议京津冀晋鲁豫陕城市减煤重点应该是山东和陕西省的“其它类”及山西省的冶金和建材行业。

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://songxichen.gsm.pku.edu.cn/images/Air_Quality_Assessment_Report_I_201503.pdf)
- [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://songxichen.gsm.pku.edu.cn/images/Air_Quality_Assessment_Report_II_20160903.pdf)
- [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/images/Air_Quality_Assessment_Report_III_20170317.pdf)
- [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/images/JJJ_report_1101_Final_WaterMarked.pdf)
- [5]北京大学统计科学中心环境统计组 (2018). 空气质量评估报告(五): “2+31” 城市 2013-2017 年区域污染状况评, 2018 年 4 月. (http://songxichen.gsm.pku.edu.cn/images/231cities_0410c.pdf)
- [6]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.
- [7]中国生态环境部(2018), 2018-2019 年蓝天保卫战重点区域强化督查方案, 环环监〔2018〕48 号.
- [8]中国国务院 (2013), 大气污染防治行动计划, 国发〔2013〕37 号.
- [9] 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.
- [10]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.
- [11] 知识分子 (2019), 空气质量“良”, 也是一种伤害, 2019 年 1 月 5 日. (https://mp.weixin.qq.com/s/Hqfccz4yz589IS_0e35KWQ)
- [12] Villeneuve PJ, Weichenthal S A, Crouse D, et al. Long-term exposure to fine particulate matter air pollution and mortality among Canadian women. *Epidemiology*, 2015, 26(4): 536-545.
- [13] Shi L, Zanobetti A, Kloog I, et al. Low-concentration PM2.5 and mortality: estimating acute and chronic effects in a population-based study. *Environmental Health Perspectives*, 2015, 124(1): 46-52.
- [14] Di Q, Wang Y, Zanobetti A, et al. Air pollution and mortality in the Medicare population. *New England Journal of Medicine*, 2017, 376(26): 2513-2522.
- [15] 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>)
- [16] 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>)

- [17] 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>)
- [18] Chen, L., Guo, B., Huang, J., He, J., Wang, H., Zhang, S., and Chen, S. X. (2018). Assessing air-quality in Beijing-Tianjin-Hebei region: The method and mixed tales of PM2.5 and O₃. *Atmospheric Environment*, Volume 193, 290-301. (<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.08.047>)
- [19] 唐孝炎, 张远航, 邵敏 (2016), 大气环境化学: 第二版, 365-446.
- [20] Cochran, W.G. (1968). The effectiveness of adjustment by subclassification in removing bias in observational studies, *Biometrics*, 295-313, 24(2).
- [21] 中国环境保护部等(2017), 京津冀及周边地区 2017-2018 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案, 环大气 (2017) 110 号.
- [22] 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..

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



叶方舒，北京大学环境科学与工程学院本科生



孙浩轩，北京大学数学科学学院本科生



郭斌，西南财经大学统计学院副教授



刘睿，北京大学数学科学学院本科生



肖静，北京大学光华管理学院本科生



何婧，西南财经大学统计学院助理教授



郑翔宇，北京大学光华管理学院硕士研究生



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，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。感谢环境监测总站王帅博士提供不懈的帮助与讨论，北京大学张远航院士、陶澍院士、朱彤教授，中国科学院大气物理研究所王自发研究员，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。感谢北京大学统计与经济计量同仁的长期支持与鼓励，感谢王文庆先生在数据库方面一如既往地协助与努力。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。感谢统计中心管理团队的李楠、王彦懿的协助和光华管理学院对外关系团队：王奂然、晏琴的支援和安排。

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

北京大学统计科学中心北京大学光华管理学院
www.stat-center.pku.edu.cnwww.gsm.pku.edu.cn