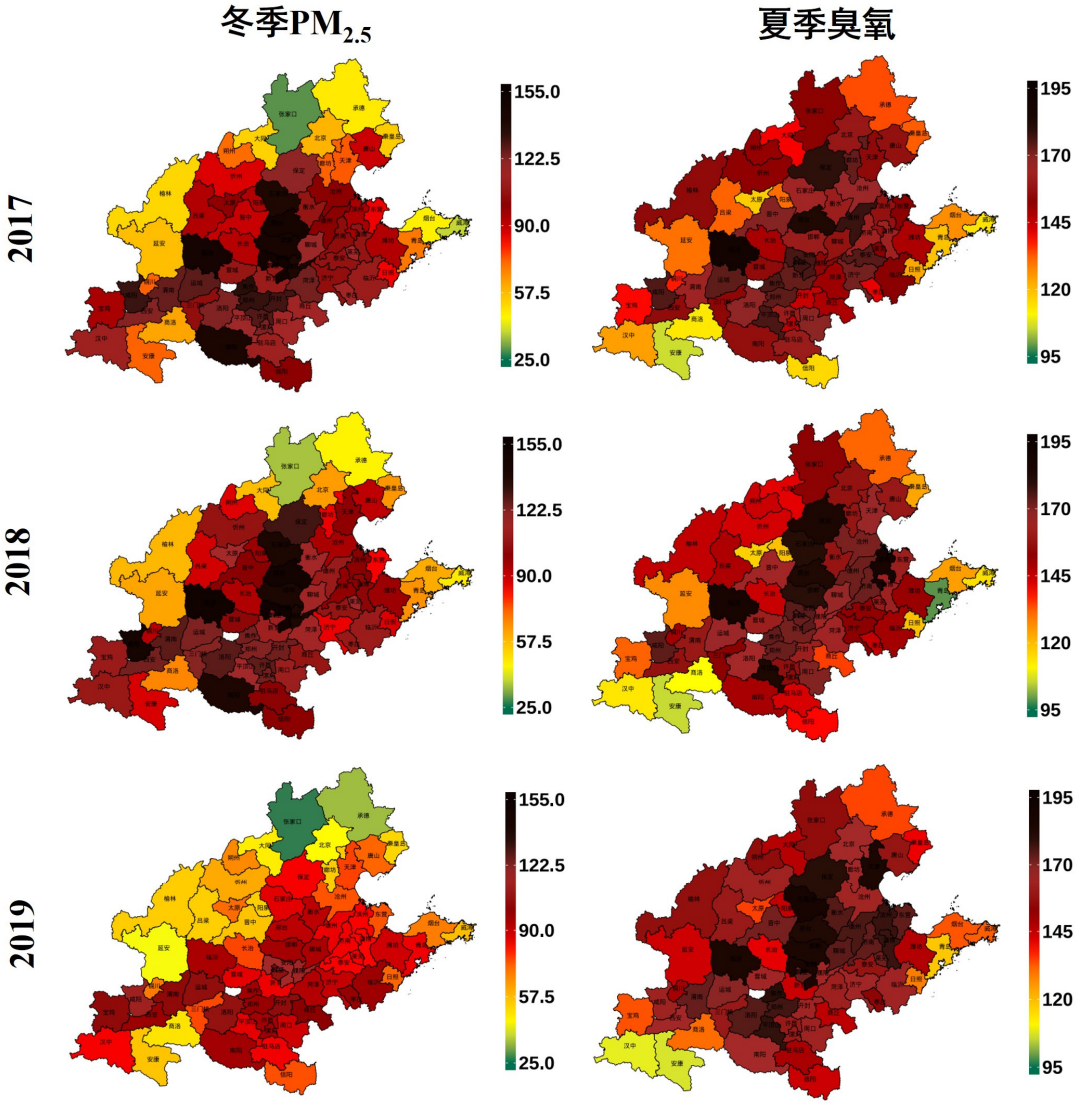
空气质量评估报告（七）

“2+66”城市 2013-2019 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

二零二零年七月

前言

本报告是本环境统计团队完成的第七份空气质量评估报告。**由于计算新冠肺炎疫情对2019 季节年大气污染浓度的影响，本报告的发布时间比往年晚了近三个月。**前六份报告分别发布于 2015 年 3 月、2016 年 3 月、2017 年 3 月和 8 月、2018 年 4 月、2019 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，并且将纳入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；第六份报告[6]综合评估了“2+43”城市（相比于报告五增加了汾渭平原 11 市和延安市）247 个国控站点 2013 年 3 月至 2019 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+43”城市报告[6]的基础上，补齐了山东，河南，山西，陕西余下的城市，统称“2+66”城市。

本报告将基于这 68 个城市 354 个国控空气质量监测站点（不含背景站点）2013 年 3 月至 2020 年 2 月污染物监测数据和 78 个气象站点 2011 年 3 月到 2020 年 2 月累积八年的小时气象数据，综合评估“2+66”城市过去七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：

- 描述过去七年“2+66”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+66”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；
- 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；
- 评价 2020 年初新冠疫情对污染物浓度的影响。

北京大学统计科学中心

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.....17

五、 “2+66”城市污染物综合累积降幅与监视坐标.....73

六、 “人努力—天帮忙”指数.....78

七、 区域煤炭消耗与工业运行数据分析.....83

八、 总结与建议.....88

附录.....101

参考文献.....106

北京大学统计科学中心

一、背景介绍

2013 年 9 月，国务院发布《大气污染防治行动计划》[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]。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，因此我们在去年发布的空气质量报告（六）中，除了保留 2018 年发布的报告（五）中已经研究的“2+31”城市，还加上了汾渭平原 11 市和对照城市延安，因此共有“2+43”个城市。

为了研究“京津冀”、“山东省”、“河南省”、“山西省”、“陕西省”五个区域的空气质量，我们在本报告中增加了山东省的东营、临沂、青岛、日照、潍坊、威海、烟台、枣庄市，河南省的漯河、南阳、平顶山、商丘、信阳、许昌、周口、驻马店市，山西省的大同、朔州、忻州市，陕西省的安康、汉中、商洛、榆林市。**因而在本报告中，我们在去年“2+43”城市的基础上，增加 23 个城市，总称为“2+66”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、水泥制造等高污染行业。然而，2001 年之后，华北平原上出现了大量的重工业，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。

山西省的 11 个城市，包括太原、阳泉、长治、晋城、大同、晋中、临汾、吕梁、运城、朔州、忻州，其地形条件大多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、晋城、大同分别地处上党盆地、泽州盆地和大同盆地。晋中位于太行山脉中段与太原盆地之间。临汾地形轮廓大体呈“凹”字型分布，四周环山，中间平川。吕梁地处吕梁山脉中段，地势中间高两翼低。运城地形比较复杂，相对高差明显，具有平原、山地、丘陵、盆地、台地等多种地貌类型。朔州北、西、南三面环山，山势较高，中间是桑干河域冲积平原，相对较低，呈倒“V”字结构。忻州山岳纵横，地貌多样，南、西、北三面环山。在工业特点上，山西省的产业主要是以煤矿工业及其派生产业为主，工业分布主要在大兴煤矿开采周边地区大中型工业城市，主要的工业部门包括冶金、化工、焦炭等。

北京大学统计科学中心

山东原有报告中的 9 个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。新增的 8 个城市多位于山东省的东部，缓丘起伏，东部山东半岛伸入黄海，北临渤海，东南则临靠较宽阔的黄海。在 17 个城市中，烟台市市区北部临海，容易形成风向为北风的弱海风，弱海风与陆上的南风在市区频繁交汇，导致大气层结构更加稳定，不利于污染物扩散。济宁是山东省经济发展较快的地区之一，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，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更加严重。

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，漯河处于南北气候过渡带，境内无高山，北方风力到此地之后减弱，容易引起污染物聚集。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。

陕西省位于中国中部、黄河中游地区，南部兼跨长江支流的汉江流域和嘉陵江上游的秦巴山地区，地势南北高、中间低。省区横跨三个气候带，南北气候差异较大，总特点是春季温暖干燥，降水较少，多风沙天气；夏季炎热多雨，间有伏旱；秋季凉爽，较湿润；冬季寒冷干燥，气温低，雨雪稀少。其中，西安位于渭河盆地的中心地区，北有黄土高原，南有秦岭，加之盛行东北风，渭河盆地东北部有缺口，东北风把华北的污染物也吹进了渭河谷地；秋冬季由于地面夜间的辐射降温明显，大气低空容易出现“逆温层”，导致空气污染；近些年西安作为国家重点发展城市，城市发展速度加快，造成的扬尘、废弃物使得雾霾更加严重。咸阳处于南有秦岭、北有黄土高原的地理位置，自然形成的“污染天井”导致污染物在内部循环累积，不易扩散；进入冬季，静风天气较多，雨水偏少，各种大气污染物累积，加之居民取暖、火电厂发电任务猛增，雾霾天气加剧。

北京大学统计学中心

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（$PM_{2.5}$、PM_{10}、二氧化硫、二氧化氮、一氧化碳和臭氧）的浓度。历经七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 2 亿条数据，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，共包含五省二市（即河北、河南、山东、山西、陕西五省及北京、天津二市）**全部“2+66”城市** 354 个监测站点（不含背景站点），具体可细分为“2+26”城市（用黑色标记），汾渭平原 11 市（用蓝色标记）及区域内其他城市（用绿色标记），相比第六份报告新增 23 个城市。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 15 个国控空气质量监测站
- 河北省：11 个地级市（石家庄、保定、邢台、衡水、邯郸、沧州、廊坊、唐山、秦皇岛、承德、张家口）共 55 个国控空气质量监测站（不包含石家庄封龙山、张家口北泵房、承德离宫背景站）
- 河南省：17 个地级市（郑州、开封、安阳、鹤壁、新乡、焦作、濮阳、洛阳、三门峡、平顶山、许昌、漯河、商丘、周口、驻马店、南阳、信阳）共 80 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）
- 山东省：17 个城市（济南、淄博、济宁、德州、聊城、滨州、菏泽、泰安、莱芜、青岛、枣庄、东营、烟台、潍坊、威海、日照、临沂）共 84 个国控空气质量监测站（不包括青岛仰口背景站点）
- 山西省：11 个城市（太原、阳泉、长治、晋城、晋中、运城、临汾、吕梁、大同、朔州、忻州）共 64 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）
- 陕西省：10 个城市（西安、铜川、宝鸡、咸阳、渭南、延安、榆林、汉中、安康、商洛）共 45 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、汉中汉川机床厂子校背景站点）

北京大学环境科学中心

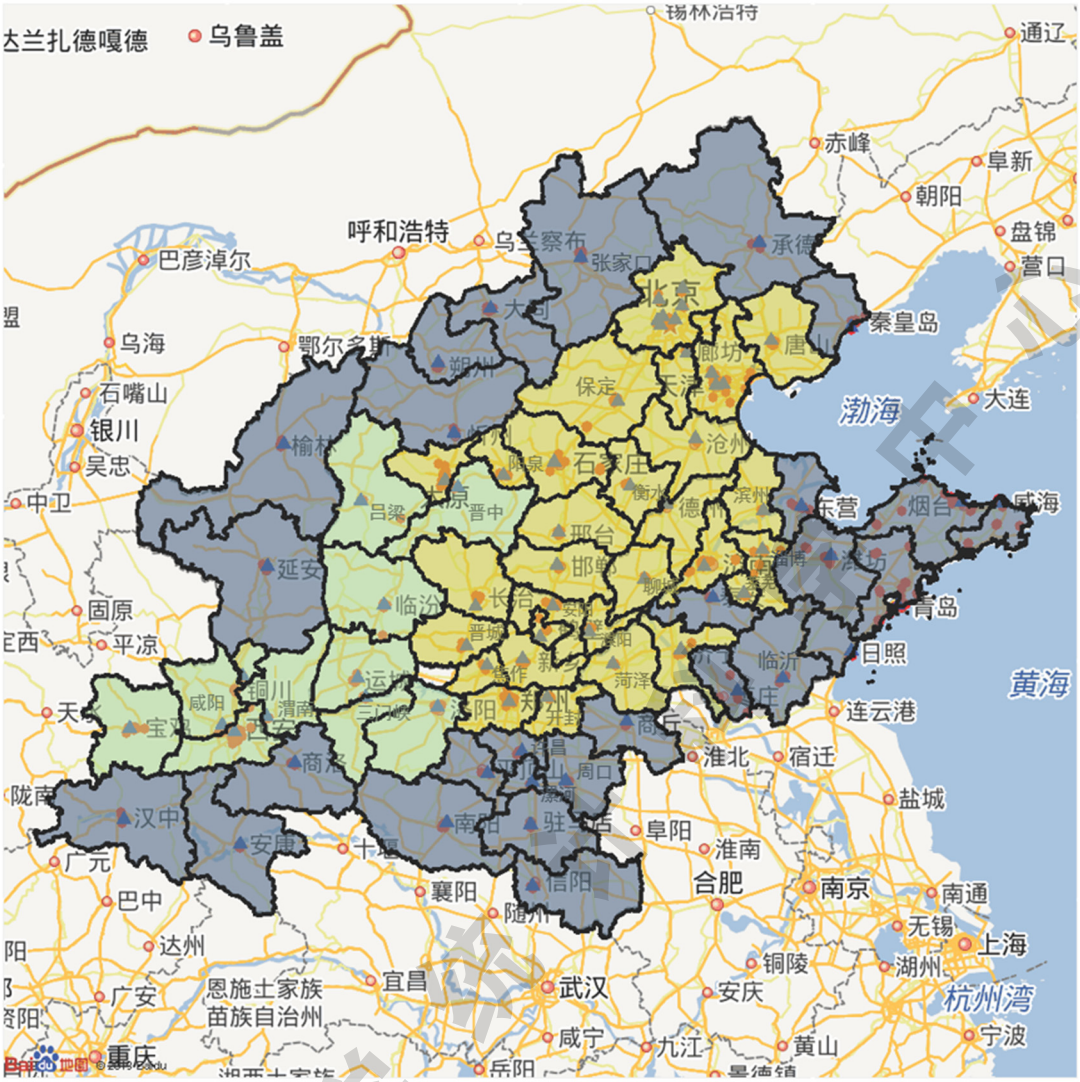


图 1 “2+66”城市区划及其站点分布（ ● 代表空气质量监测站点，▲ 代表气象站点）

（图中黄色区域为“2+26”城市范围，绿色区域为汾渭平原 11 市，灰色区域为区域内其他城市）

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，所以本报告选取的数据时段为 2013 年 3 月到 2020 年 2 月。其中，河南、山东、山西和陕西省有些城市在 2013 年并未开始监测，因此这些城市从开始监测的时刻算起，比如安阳从 2014 年开始监测，鹤壁从 2015 年开始监测。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至第六份报告一致。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）、一氧化碳（CO）、二氧化氮（NO_2）和臭氧（O_3）。

由于气象条件对观测污染物浓度的影响很大，本报告沿用前六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[15]-[19]。具体来说，我们基于 2011 年 3 月到 2018 年 2 月累积八年的小时气象数据，对“2+66”总共 68 个城市分别构造基准气象条件。我们之所以采用这 8 年的气象数据，是为了构造更稳定的基准气象条件，同时确保不同年间相似气象条件占比不会过少。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、河南、山东、山西和陕西省 66 个地级市的气象数据来源于对应城市的气象站点，共 66 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 354 个污染物监测站点外加 17 个背景站（红色圆点）和 78 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。

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+66”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，其中括号内为我国目前使用的空气质量等级划分：

- “优质空气”（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]。本报告使用 35 微克/立方米作为空气质量“优”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[12-14]。

北京大学统计科学中心

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，以计算各个城市六种空气质量等级在每个季节的占比。用这种方法，我们绘制了图 2 至图 10 的时间占比图[1]。本报告首次在黄色区段内加入黑色横线代表 50 微克/立方米分界线，用于论证提高空气质量标准的合理性。

通过图 2 至图 10，我们发现在目前 75 微克/立方米作为“良”的标准下，2019 年“2+66”城市中除了安阳（68.54%）之外的所有城市空气质量优、良级别占比都超过 70%，与 2015 年相比，29 个城市空气质量优、良级别占比提高了 15%以上。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空气质量“良”的上界已过于宽松，应对该标准进行调整[11]。**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。**在这一新的标准下，各城市的年际优良率变化与旧标准下的变化趋势非常相似。图 11 展示了“2+66”城市在新旧标准下 2015、2018 和 2019 年的“优良空气”占比情况，新的优良率标准下，虽然各城市优良空气占比平均下降 17.45%，56 个城市的下降超过 15%，但是 2019 年除安阳（48.59%）、太原（49.89%）之外所有城市空气质量优、良级别占比都超过了 50%，22 个城市优良空气占比仍在 60%以上。这说明提高标准，选择 50 微克/立方米作为新的“良”的标准是合适的。“良”的标准具有重要的污染风险提示作用，标准提高后，我国人群获得的污染风险提示的界限将从 75 微克/立方米降低至 50 微克/立方米，这将有效降低我国人群的污染暴露水平和颗粒物长期积累，减少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力。

综合分析图 2 至图 10，我们可以获取“2+66”城市空气质量的一些信息：

- **地理区域特征**

  对于空气质量“优”（$PM_{2.5}$≤35 微克/立方米）占比：河北省北部三城市（张家口、承德和秦皇岛），山东半岛沿海三城市（青岛、威海和烟台），陕西省安康、商洛和延安最高，空气质量“优”占比达到了 58%以上；山东省枣庄、莱芜、济宁、淄博、聊城、菏泽和济南，河北省邯郸和邢台，河南省焦作、安阳和平顶山，以及山西省临汾、晋城、运城和太原最低，空气质量“优”占比不到 35%。就 2019 年而言，山西省、陕西省、河南省、河北省空气质量“优”占比继续保持上升趋势，河北省石家庄和沧州、河南省信阳、平顶山、驻马店和新乡、山西省晋中、吕梁和忻

[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。

北京大学能源研究中心

州改善非常显著，空气质量“优”占比相比 2018 年都提升了 10%以上；山东省污染状况有所回弹，各城市空气质量“优”占比普遍下降。

冬季的重污染（$PM_{2.5}$>150 微克/立方米）占比在城市间差异较大，河北沿太行山五城市（石家庄、保定、邢台、邯郸和衡水）最高，在 2013 年曾达到 60%，环渤海五城市（北京、天津、沧州、廊坊、唐山）、山东和河南次之。就 2019 年而言，同 2018 年相比，京津冀方面：沿太行山五城市有所改善，体现在冬季重污染占比的降低，空气质量“优”占比的提升；环渤海五城市基本稳定。河南、山东、山西、陕西几乎所有城市均存在不同程度的改善，各城市普遍空气质量“优”占比提升或重污染占比下降。

- **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，2018 年比重上升明显，但 2019 年普遍改善。夏季重污染发生较少，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。

附录中附表 1 和附表 2 分别统计了 2015 至 2019 年度“2+66”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。通过对附表 1 和附表 2 的分析，我们可以直观地感受到“2+66”城市空气污染的情况和演变。

2015 年至 2018 年重度及以上污染（$PM_{2.5}$ >150 微克/立方米）严重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。2019 年重度及以上污染状况明显改善。其中沿太行山地区的城市改善显著，现已优于陕西、山西、河南和河北的部分城市。2017 至 2018 年，污染状态（$PM_{2.5}$ > 35 微克/立方米）占比较高的城市由 2015 年和 2016 年的山东省的城市转移到沿太行山脉的河北、河南城市。但 2019 年，其余省市污染状况普遍改善，山东省略有回弹，多个城市污染状态占比排名靠前。空气质量最好的四个城市威海、烟台、张家口和承德分别位居山东半岛沿海和河北北部。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 10、附表 1 和附表 2 所示六种空气质量时间占比在一定程度上可以反映“2+66”城市的空气污染状况，**但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，使得这种比较不公平。我们发现附表 1 和附表 2 中的城市排名与经过气象调整得到的表 2（参见第四节）的城市排名有相当大的出入。**

北京大学统计科学中心

这意味着我们需要用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。

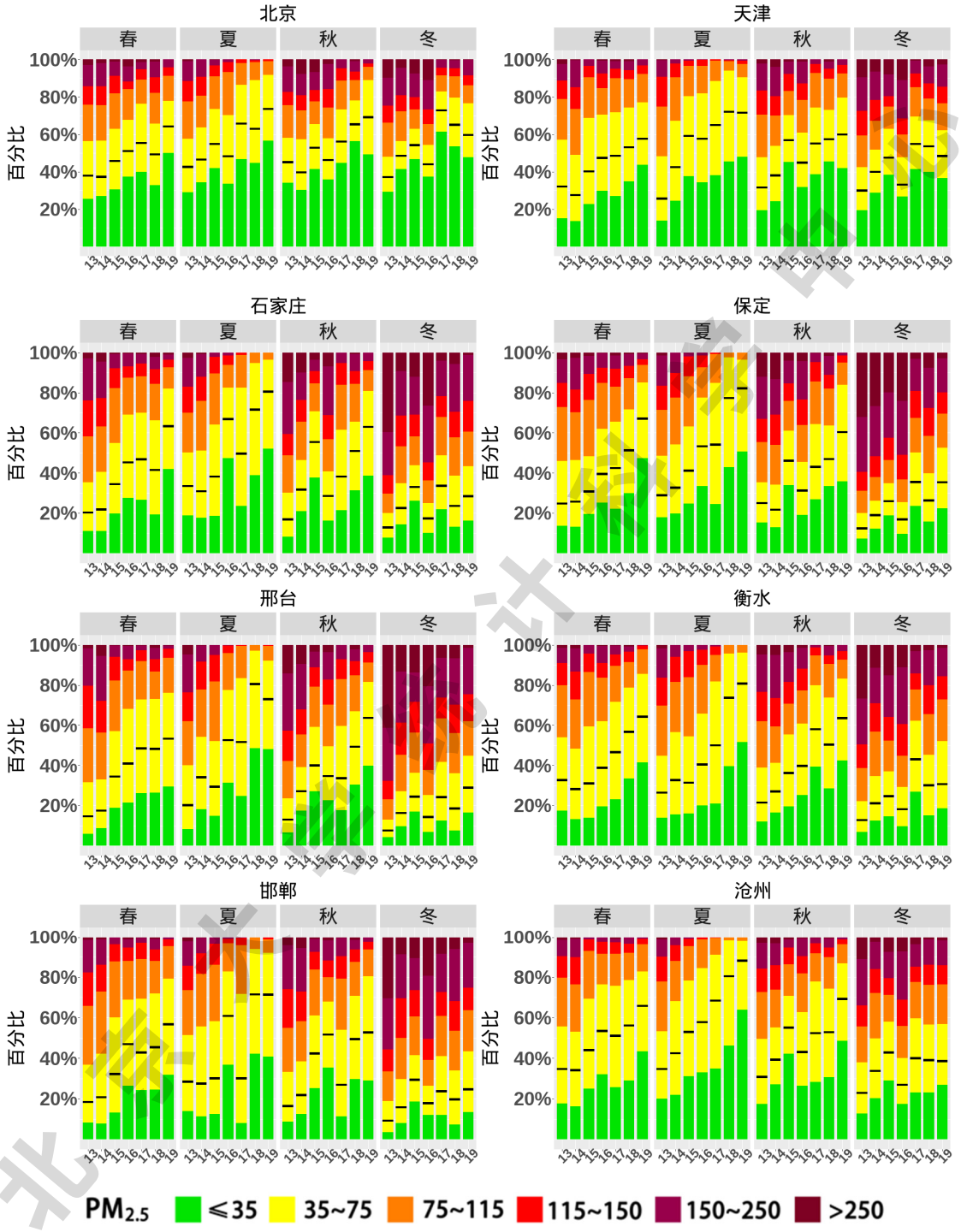


图 2 北京、天津市和河北省 6 市 2013 年至 2019 年各季节空气质量六个状态时间占比图
黑色横线代表 $PM_{2.5}$ 浓度小于 50 微克/立方米的时间占比

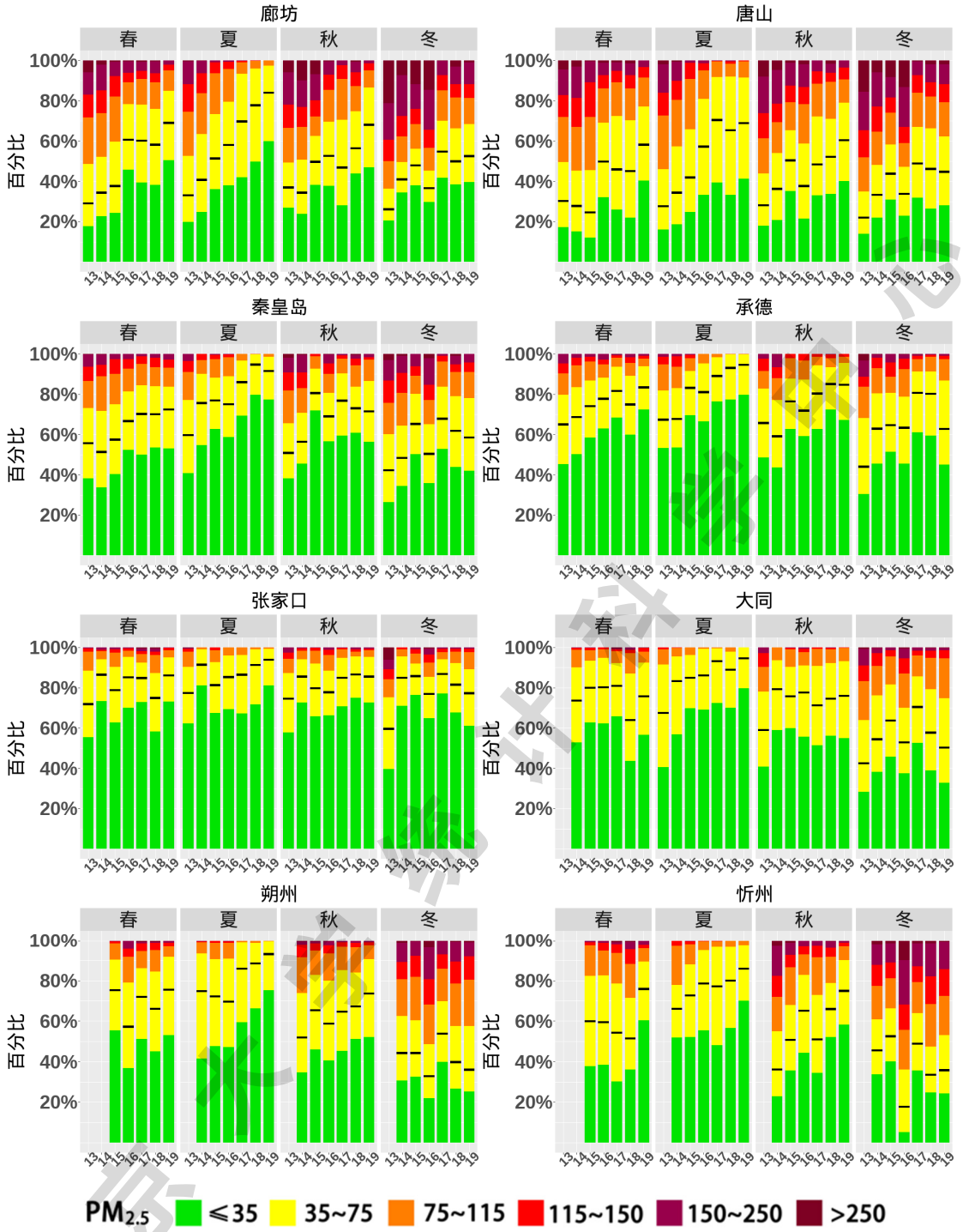


图 3 河北省 5 市和山西省 3 市 2013 年至 2019 年各季节空气质量六个状态时间占比图

黑色横线代表 $PM_{2.5}$ 浓度小于 50 微克/立方米的时间占比

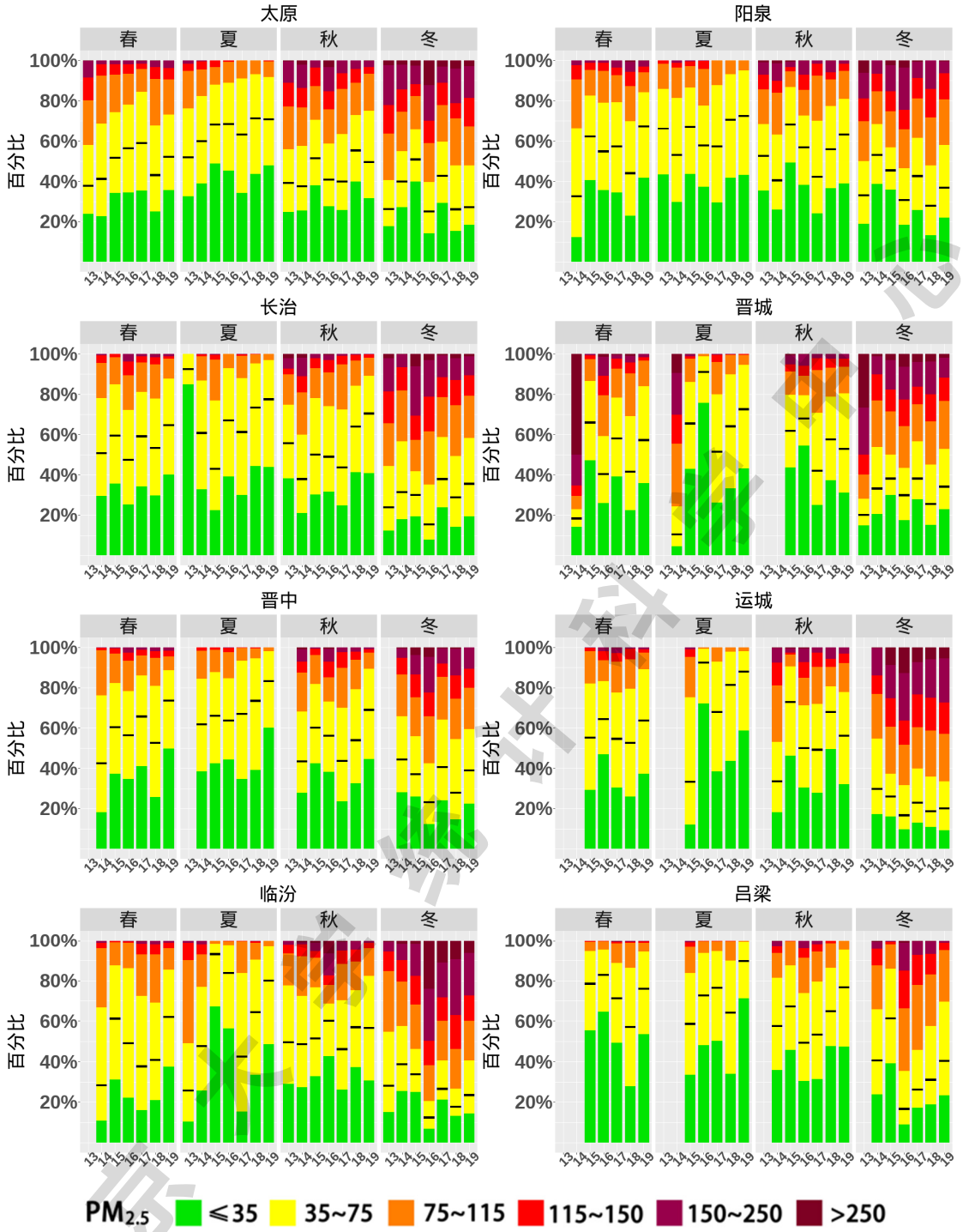


图 4 山西省 8 市 2013 年至 2019 年各季节空气质量六个状态时间占比图

黑色横线代表 $PM_{2.5}$ 浓度小于 50 微克/立方米的时间占比

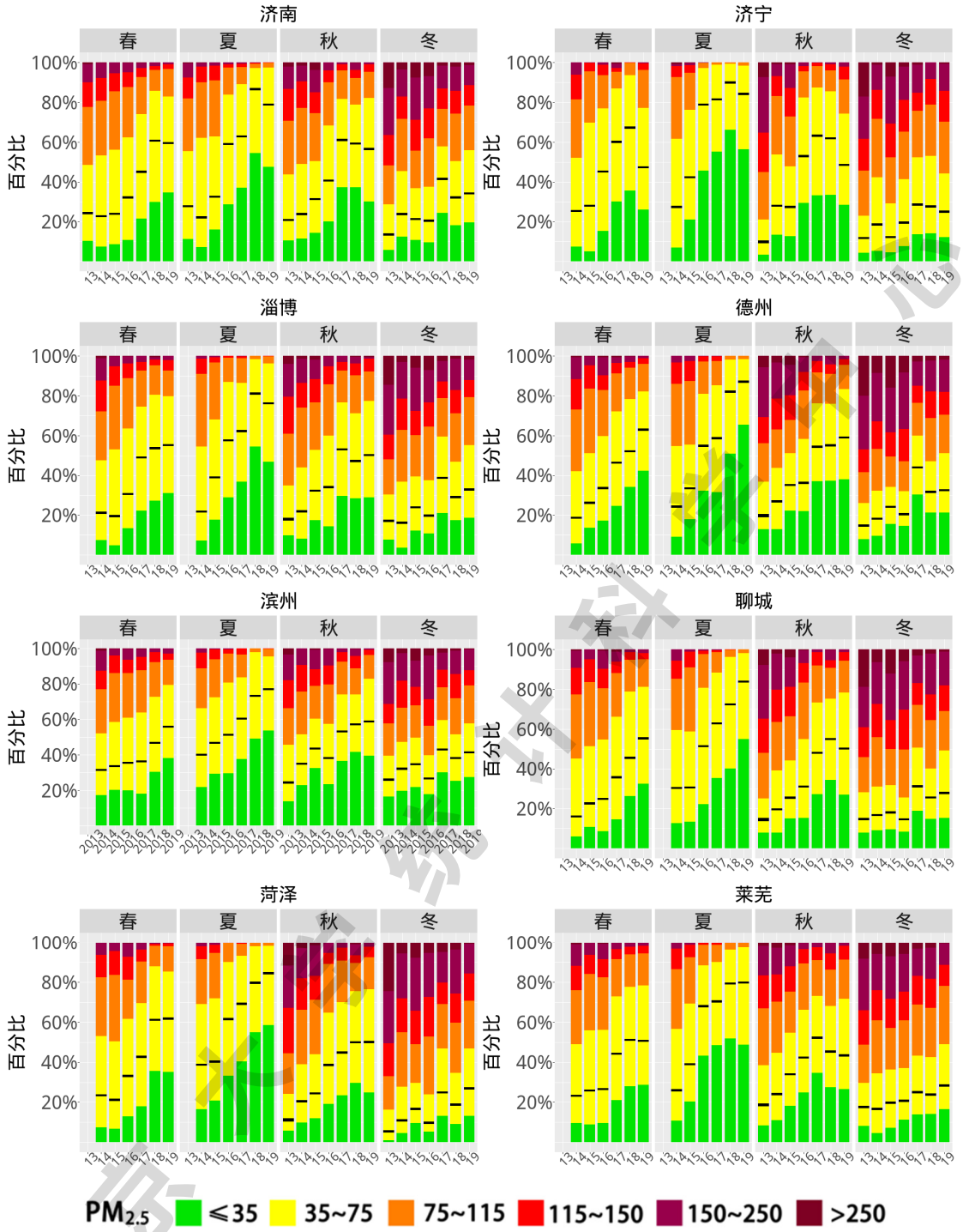


图 5 山东省 8 市 2013 年至 2019 年各季节空气质量六个状态时间占比图

黑色横线代表 $PM_{2.5}$ 浓度小于 50 微克/立方米的时间占比

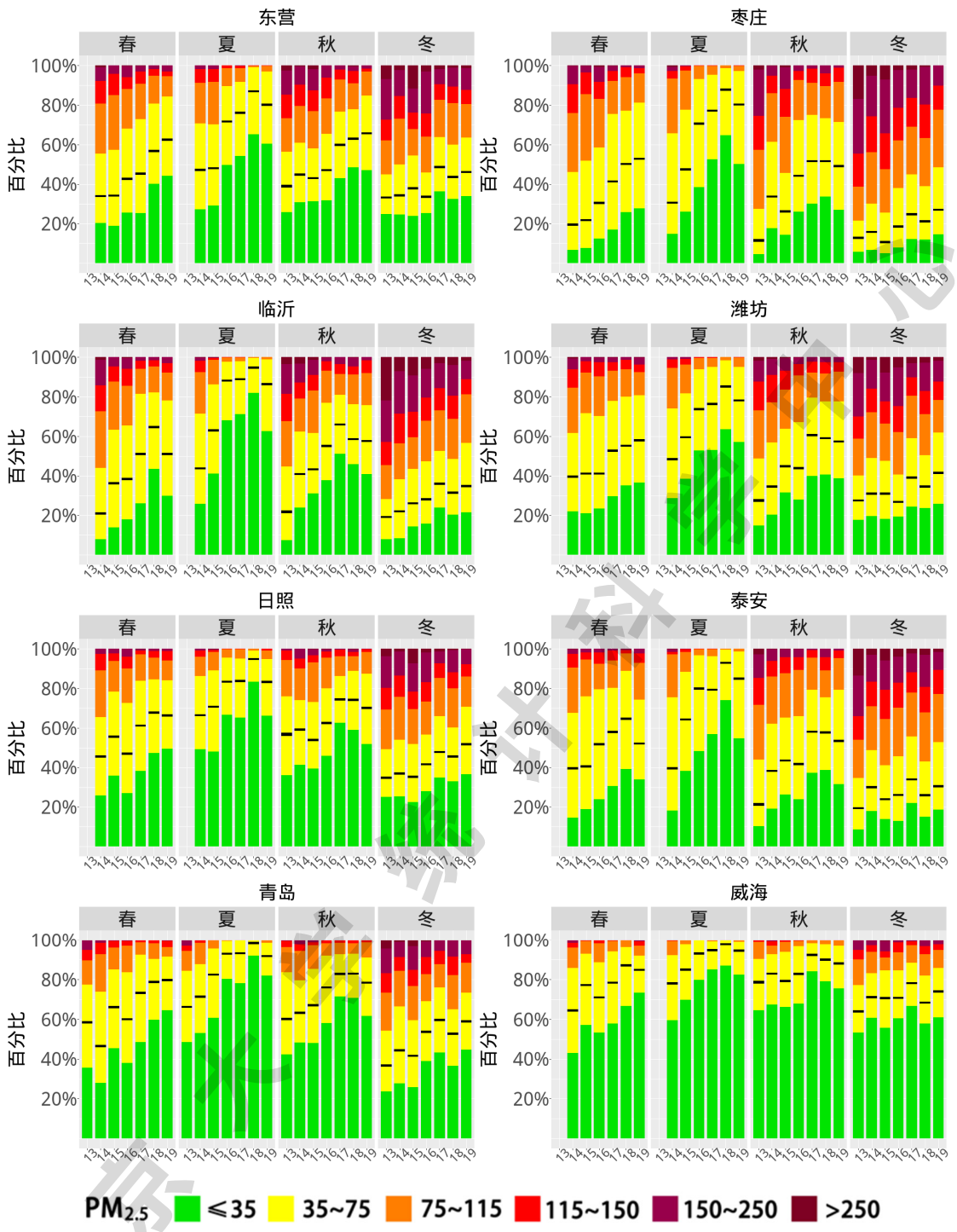


图 6 山东省 8 市 2013 年至 2019 年各季节空气质量六个状态时间占比图

黑色横线代表 $PM_{2.5}$ 浓度小于 50 微克/立方米的时间占比

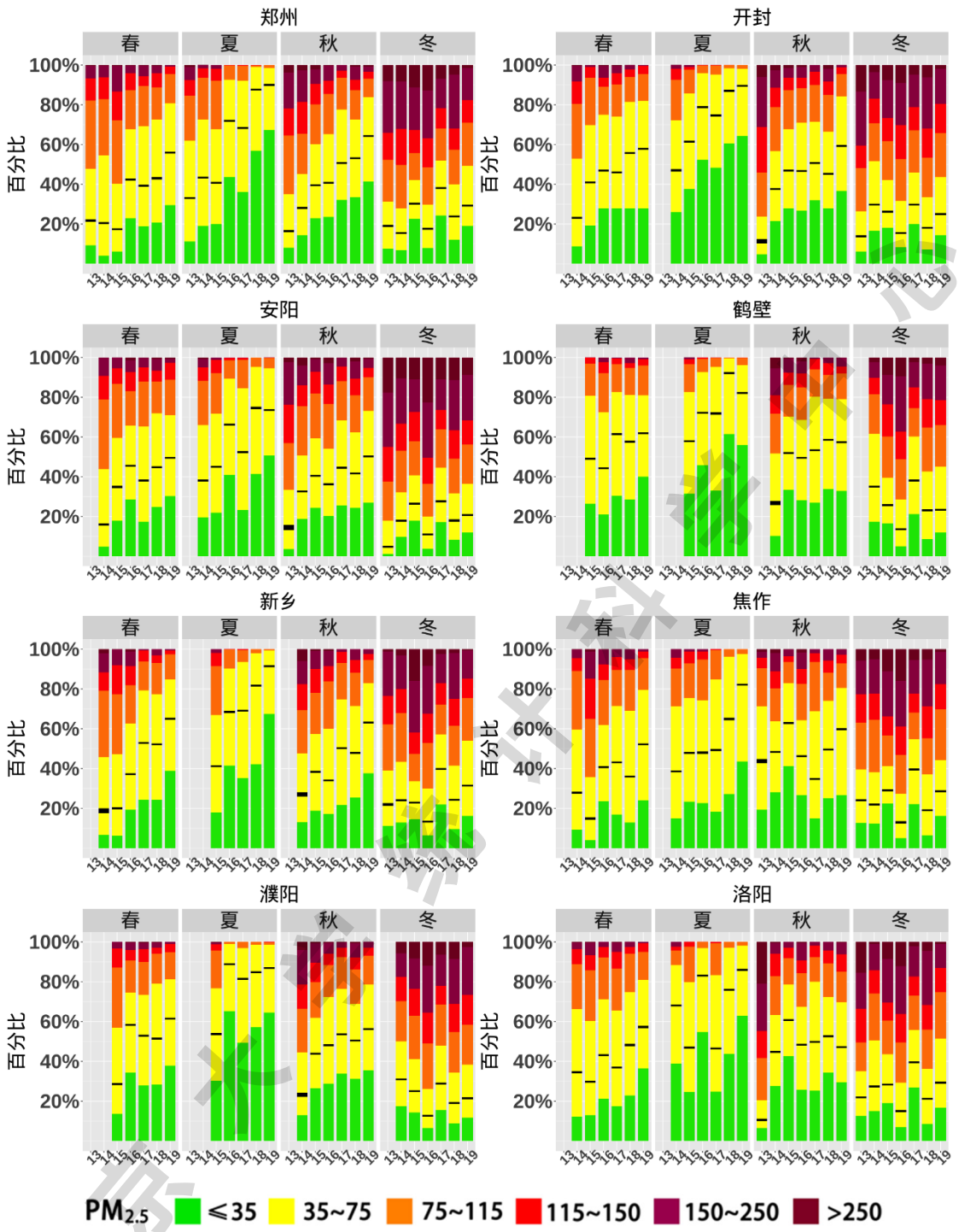


图 7 河南省 8 市 2013 年至 2019 年各季节空气质量六个状态时间占比图

黑色横线代表 $PM_{2.5}$ 浓度小于 50 微克/立方米的时间占比

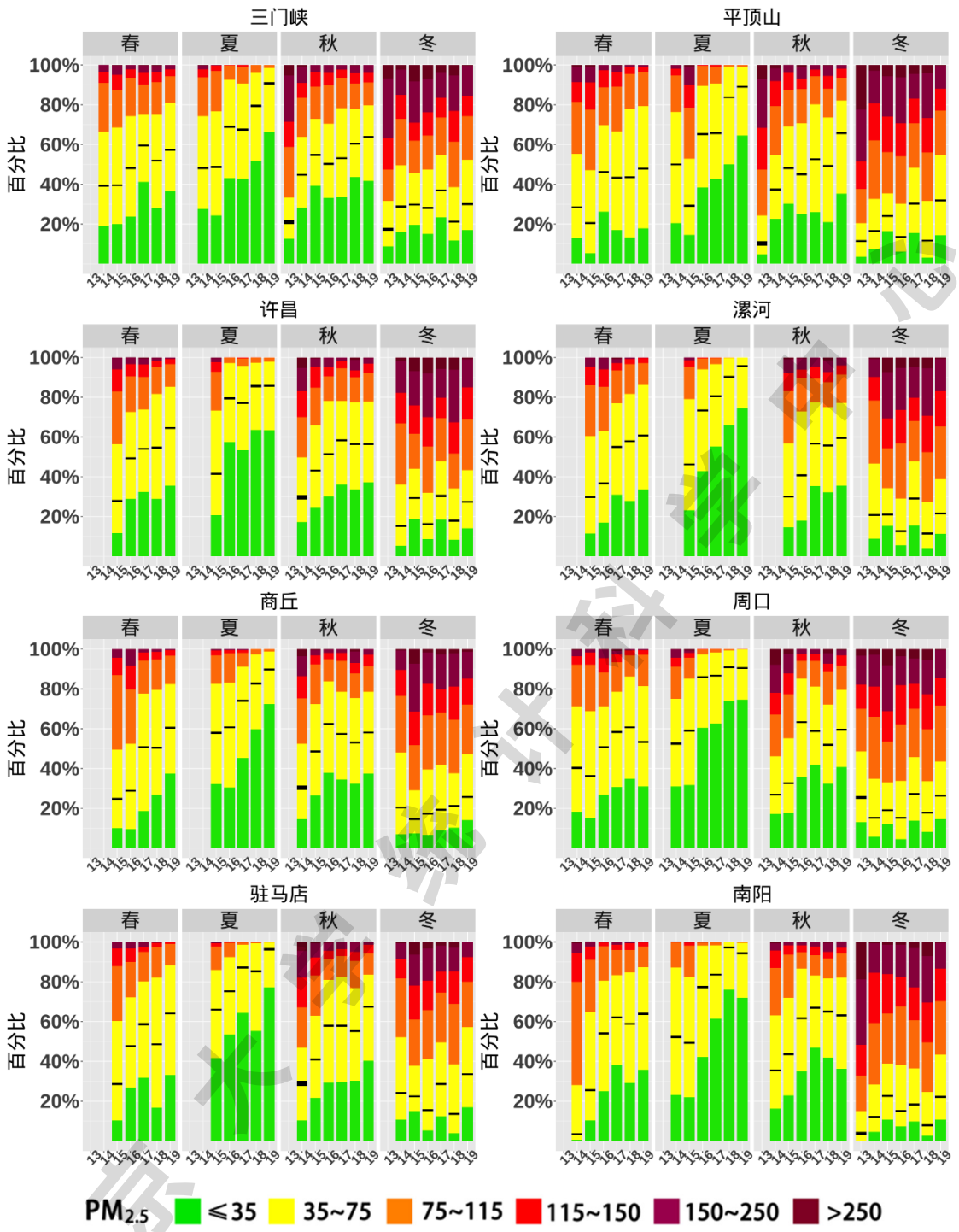


图 8 河南省 8 市 2013 年至 2019 年各季节空气质量六个状态时间占比图

黑色横线代表 $PM_{2.5}$ 浓度小于 50 微克/立方米的时间占比

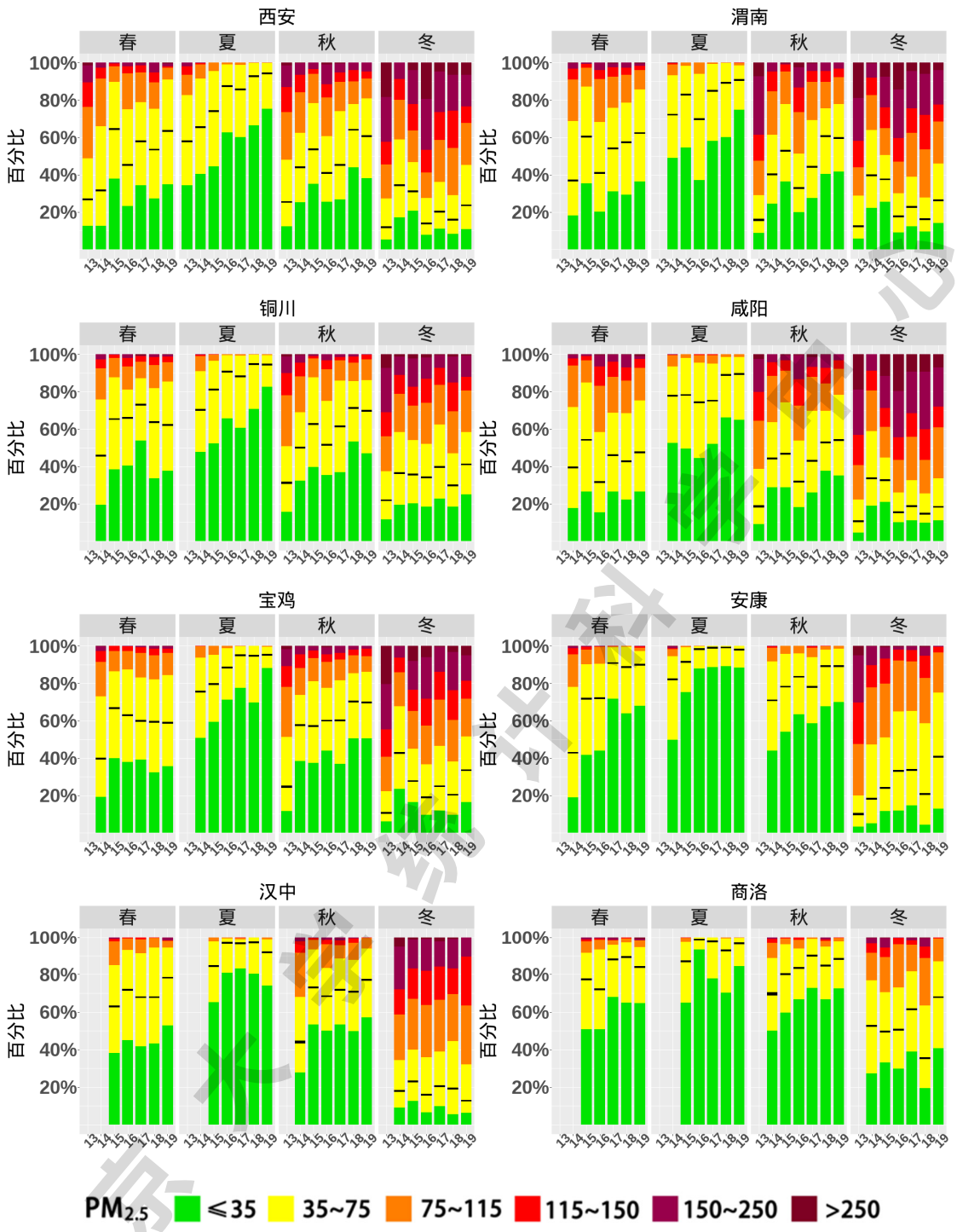


图 9 陕西省 8 市 2013 年至 2019 年各季节空气质量六个状态时间占比图

黑色横线代表 $PM_{2.5}$ 浓度小于 50 微克/立方米的时间占比

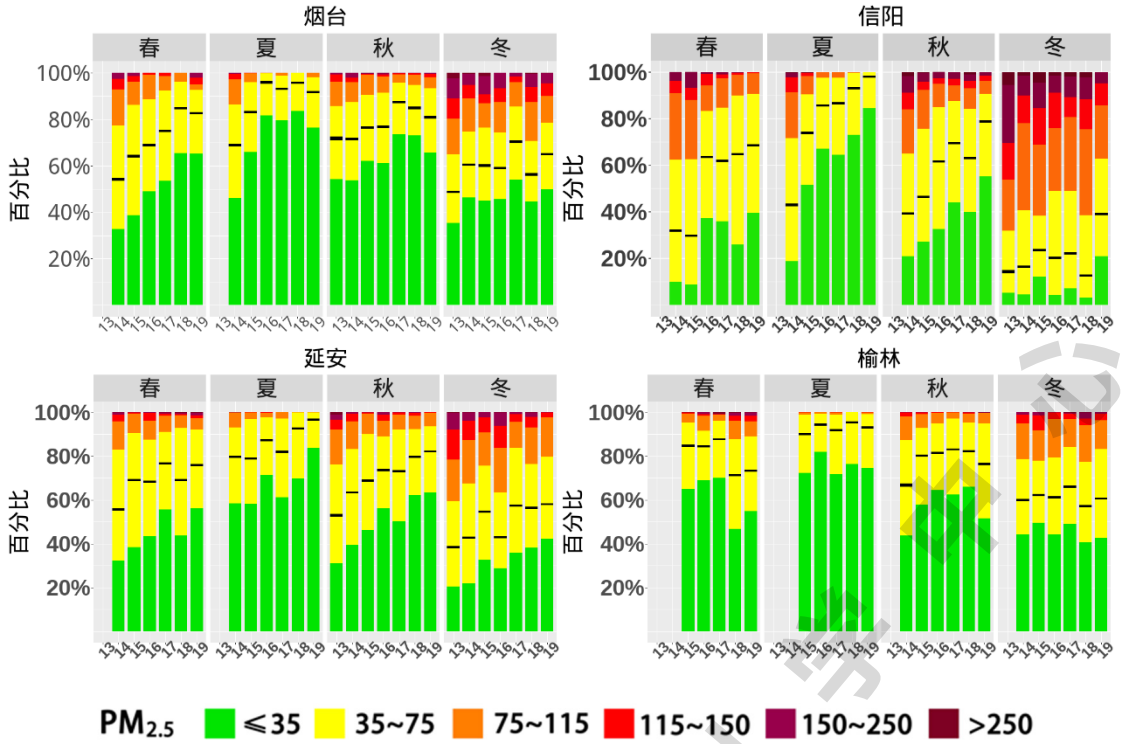


图 10 山东 1 市、河南 1 市和陕西 2 市 2013 年至 2019 年各季节空气质量六个状态时间占比图
黑色横线代表 $PM_{2.5}$ 浓度小于 50 微克/立方米的时间占比

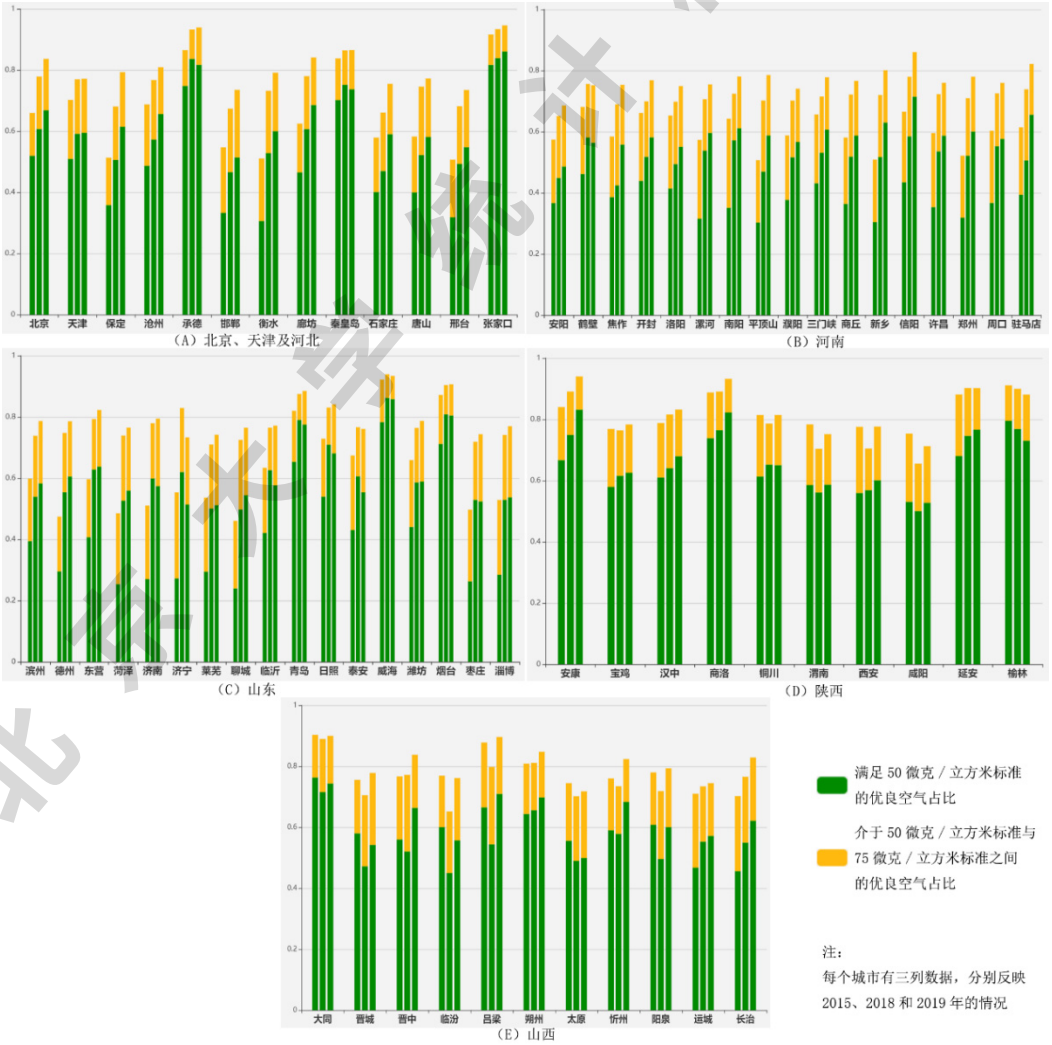


图 11 “2+66”城市在新旧标准下 2015、2018、2019 年“优良空气”占比情况图

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。本报告沿用前六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六份报告一致的调整，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[15-18]）。

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门问题。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[21]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[15-18]。

近年来有建议使用“三年滑动平均法”去除气象差异，但该方法仍存在缺陷。例如，由三年滑动平均所计算的 2019 年与 2018 年的浓度差，实际运算结果可化简为 2019 年与 2016 年浓度差的三分之一，既不能反映 2018 年到 2019 年的变化，也不能去除掉天气因素的干扰。详细讨论请参考本团队于 2018 年发表在 Atmospheric Environment 上的论文[19]。

（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 $PM_{2.5}$ 平均浓度标准如表 1 所示。

本节将给出华北地区京津冀晋鲁豫陕七省市从 2013 年 3 月到 2020 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。

北京大学统计科学中心

表 1 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	

图 12 展示了京津冀晋鲁豫陕七省市过去 28 个季节（2013 年春季至 2019 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。我们可以总结出过去六年 $PM_{2.5}$ 浓度的如下几个特征：

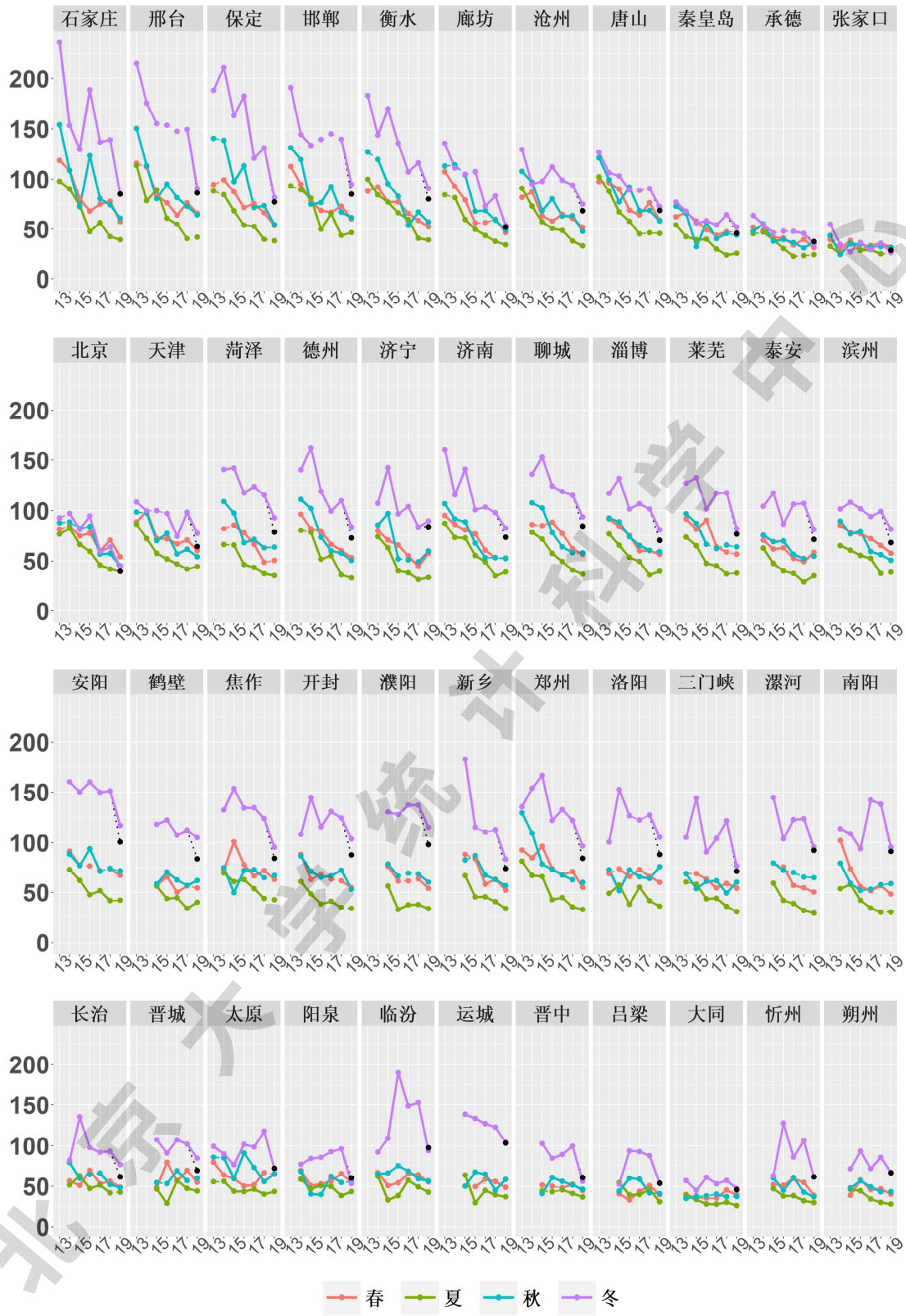
- **季节效应**

  研究区域城市中，除承德、张家口外，其余 66 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，夏季最低**。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（138.9 微克/立方米）是夏季（42.5 微克/立方米）的 3.27 倍。2019 年冬季（2019 年 12 月至 2020 年 2 月）由于疫情影响，冬季 $PM_{2.5}$ 浓度与其他季节浓度之比有所下降，如石家庄 2019 年冬季的浓度（85.4 微克/立方米）是夏季（39.4 微克/立方米）的 2.17 倍。

- **区域特征**

  根据图 12 和图 14，我们将研究区域城市划分为三个区域，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：河北沿太行山脉的保定、石家庄、邢台、邯郸和衡水五市及唐山市，河南西北部及中部的安阳、鹤壁、濮阳、新乡、焦作、洛阳、漯河、许昌八市，汾渭平原的陕西咸阳、西安、渭南三市及山西临汾、运城二市为**高浓度区域**；河北北部张家口、承德、秦皇岛三市，山西西北部大同、朔州、忻州、吕梁四市，陕西秦岭以南安康、商洛、汉中三市，北部延安、榆林、铜川三市，山东半岛东部青岛、烟台、威海三市为**低浓度区域**；北京、天津及河北廊坊、沧州，河南东部和南部其余城市，山东中西部其余十四市，陕西宝鸡，山西东南部其余五市为**中浓度区域**。据表 2，高浓度区域 2019 年平均 $PM_{2.5}$ 浓度大致高于 57 微克/立方米，低浓度区域 2019 年平均 $PM_{2.5}$ 浓度大致低于 45 微克/立方米。2019 全年平均 $PM_{2.5}$ 浓度小于 35 微克/立方米的城市有 5 个，包括张家口和承德，山东威海，陕西商洛和安康，比 2018 年多 3 个。

北京大学统计科学中心


石家庄
邢台
保定
邯郸
衡水
廊坊
沧州
唐山
秦皇岛
承德
张家口
北京
天津
菏泽
德州
济宁
济南
聊城
淄博
莱芜
泰安
滨州
安阳
鹤壁
焦作
开封
濮阳
新乡
郑州
洛阳
三门峡
漯河
南阳
长治
晋城
太原
阳泉
临汾
运城
晋中
吕梁
大同
忻州
朔州
0
50
100
150
200
13
15
17
19
春
夏
秋
冬

北京大学统计科学中心

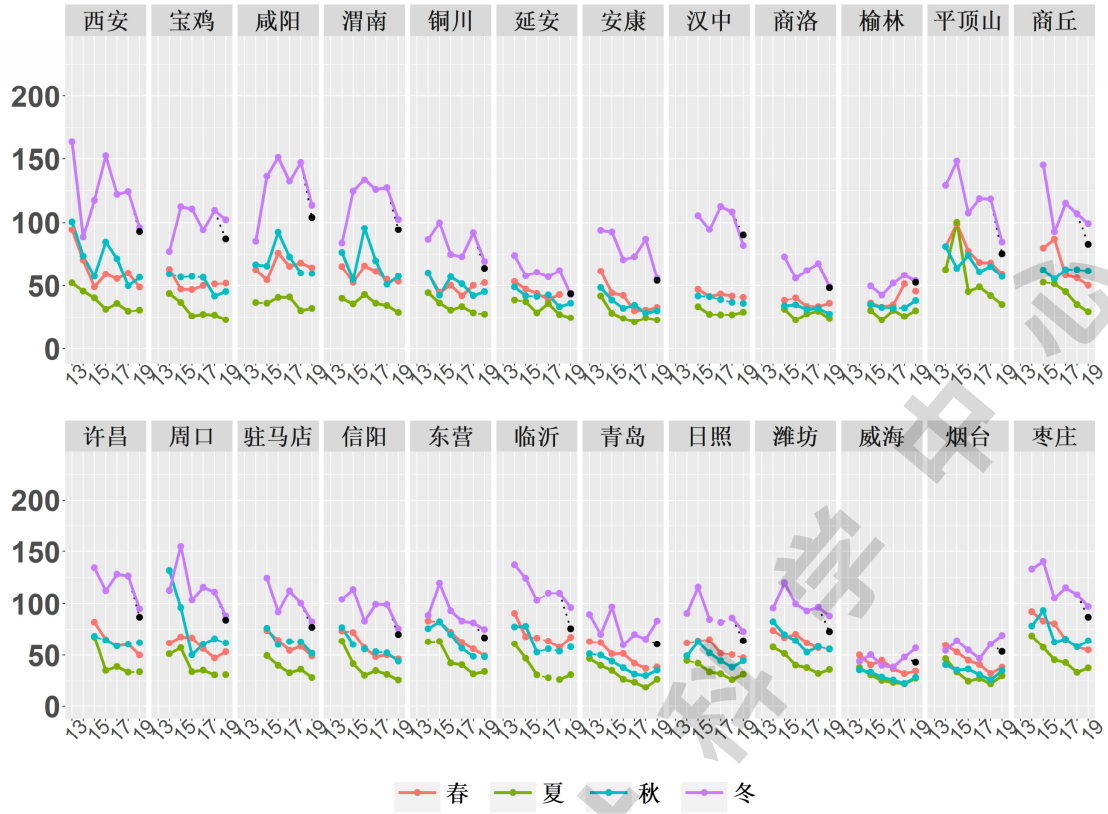
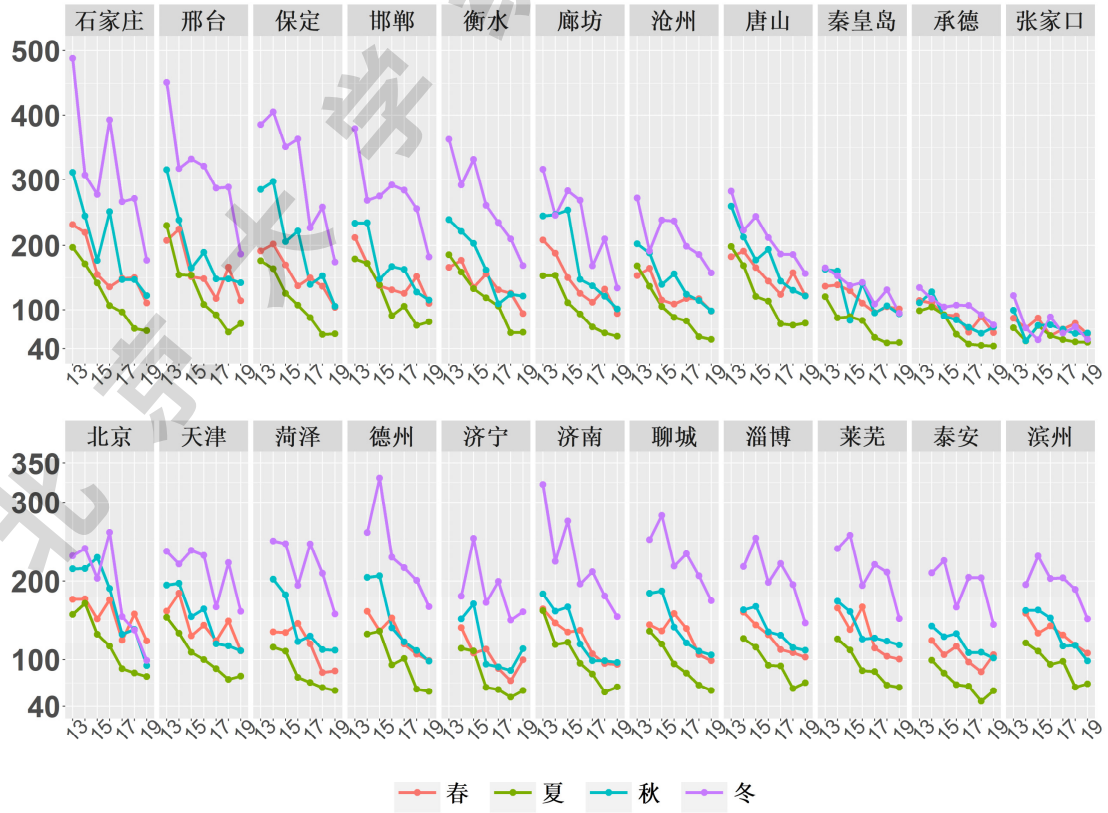


图 12：“2+66”城市气象调整后 2013 年至 2019 年 $PM_{2.5}$ 季节平均浓度(微克/立方米)变化序列图

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

其中 2019 年冬季也调整了新冠疫情的影响，没有经过疫情调整的值由黑点表示



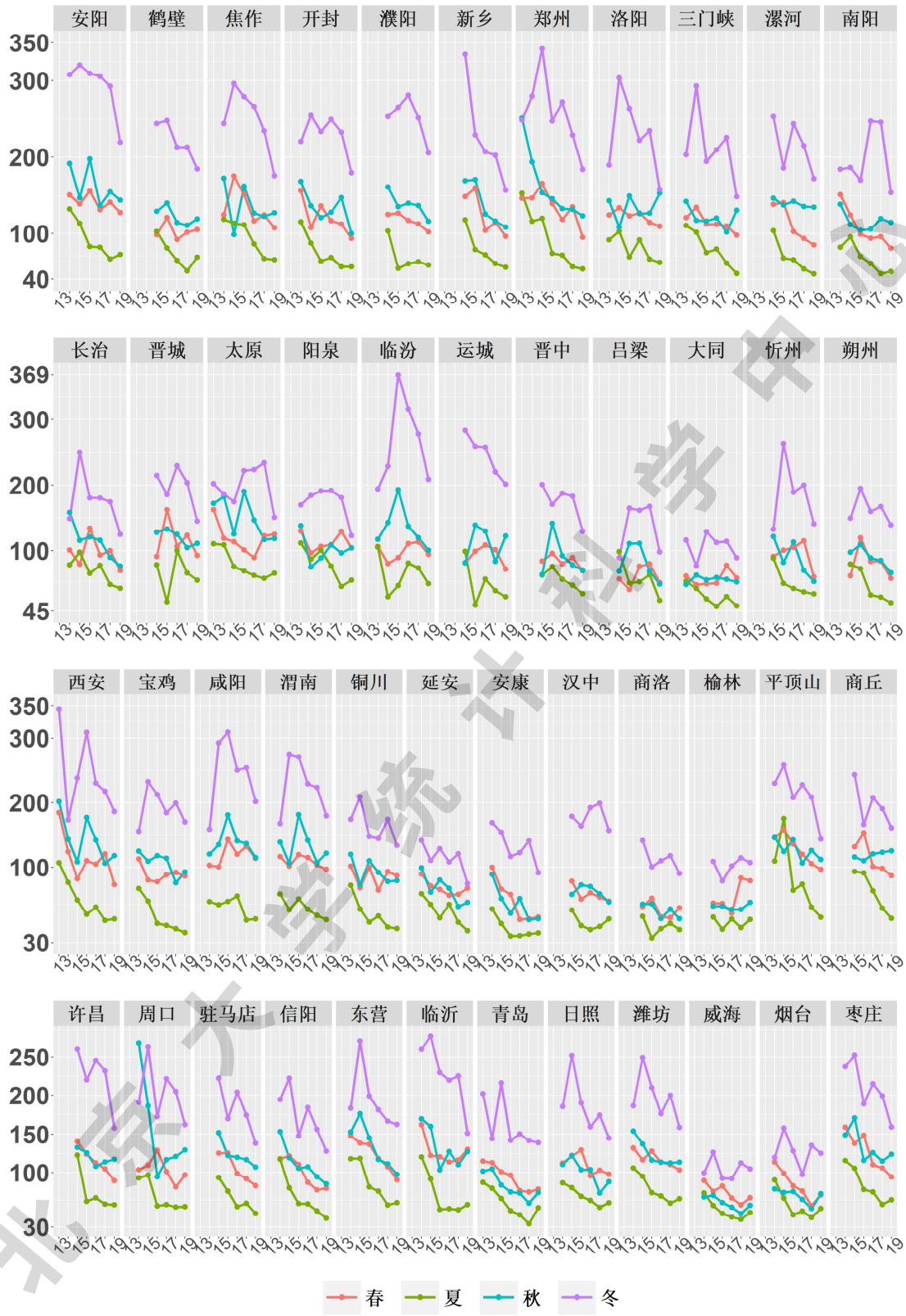


图 13：“2+66”城市气象调整后 2013 年至 2019 年 $PM_{2.5}$ 季节 90%分位数浓度(微克/立方米)变化序列图

北京大学统计科学中心

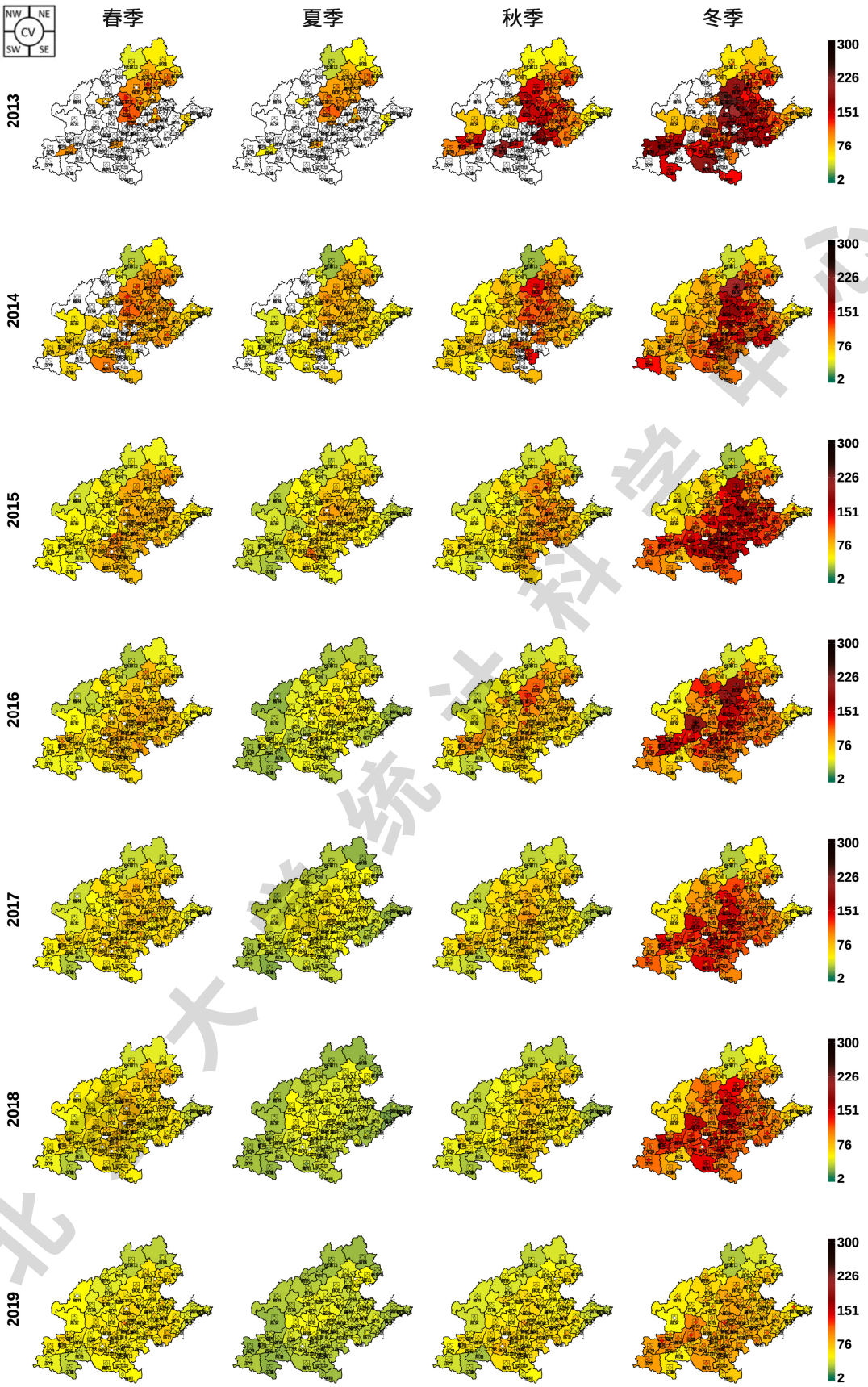


图 14：“2+66”城市气象调整后 2013 年至 2019 年 $PM_{2.5}$ 季节平均浓度(微克/立方米)地图

（清晰图参见电子版；白色代表数据过少无法得到可靠结果）

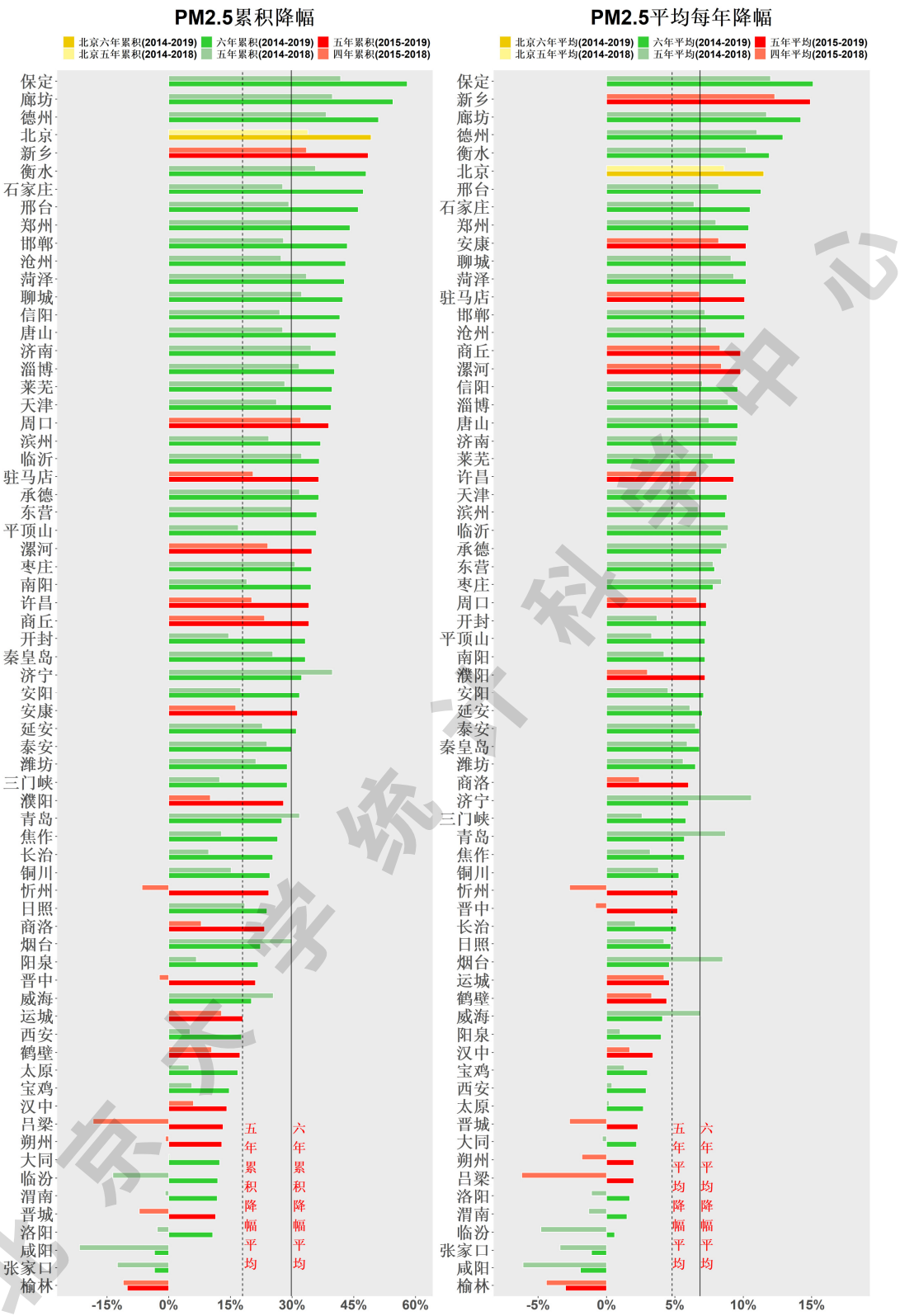


图 15：“2+66”城市气象调整后季节年 $PM_{2.5}$ 过去六/五年或过去五/四年的累积降幅及平均降幅图

（红色表示因 2013 年部分季度数据缺失而计算的五/四年累积/平均降幅）

北京大学统计科学中心

城市	2013年	排名	2014年	排名	2015年	排名	2016年	排名	2017年	排名	2018年	排名	2019年	排名
安阳	NA		103.1	(8)	91.5	(16)	94.5	(4)	86.1	(4)	85.1	(1)	70.3	(1)
咸阳	NA		62.8	(40)	73.2	(40)	90.0	(6)	77.9	(10)	76.4	(8)	65.0	(2)
洛阳	NA		72.7	(34)	83.7	(27)	75.7	(23)	79.0	(8)	74.7	(10)	64.9	(3)
邢台	148.7	(2)	120.0	(2)	102.3	(7)	96.6	(3)	87.1	(3)	84.9	(2)	64.7	(4)
焦作	NA		87.2	(23)	91.2	(18)	86.6	(9)	81.8	(6)	76.0	(9)	64.1	(5)
邯郸	132.0	(3)	112.1	(4)	91.8	(15)	83.7	(11)	92.6	(1)	80.8	(5)	63.4	(6)
临汾	NA		71.5	(35)	64.9	(47)	89.5	(7)	85.0	(5)	81.2	(4)	63.0	(7)
运城	NA		NA		75.5	(36)	70.0	(35)	73.8	(16)	65.8	(30)	61.9	(8)
濮阳	NA		NA		85.3	(24)	72.0	(30)	76.3	(13)	76.7	(7)	61.5	(9)
太原	80.0	(14)	73.7	(33)	59.7	(51)	71.7	(32)	67.4	(32)	70.1	(18)	61.3	(10)
枣庄	NA		93.1	(15)	93.5	(12)	73.4	(28)	72.2	(20)	64.5	(36)	60.8	(11)
石家庄	151.7	(1)	115.3	(3)	89.1	(20)	106.8	(1)	87.2	(2)	83.4	(3)	60.8	(12)
鹤壁	NA		NA		72.4	(41)	75.5	(24)	66.2	(36)	64.9	(32)	59.9	(13)
漯河	NA		NA		90.6	(19)	73.3	(29)	72.0	(21)	68.8	(23)	59.1	(14)
聊城	NA		102.1	(9)	103.0	(5)	87.0	(8)	77.3	(11)	69.1	(21)	58.9	(15)
莱芜	NA		97.3	(13)	91.5	(17)	76.5	(20)	72.2	(19)	69.9	(19)	58.7	(16)
济宁	NA		86.7	(25)	93.3	(13)	63.6	(44)	62.1	(43)	52.2	(55)	58.7	(17)
渭南	NA		66.3	(39)	66.9	(45)	84.4	(10)	73.2	(17)	66.9	(25)	58.5	(18)
许昌	NA		NA		88.1	(21)	69.3	(38)	71.2	(23)	70.3	(17)	58.1	(19)
临沂	NA		91.5	(18)	79.3	(32)	63.4	(46)	64.5	(41)	61.9	(40)	58.0	(20)
郑州	109.7	(9)	103.7	(7)	101.7	(8)	77.8	(17)	78.1	(9)	72.6	(13)	58.0	(21)
唐山	111.8	(7)	97.7	(12)	84.6	(26)	77.2	(19)	66.7	(34)	70.6	(15)	57.9	(22)
周口	NA		89.4	(19)	94.0	(11)	63.5	(45)	67.0	(33)	63.8	(38)	57.4	(23)
开封	NA		85.9	(26)	81.7	(28)	71.8	(31)	75.4	(14)	73.3	(12)	57.3	(24)
西安	102.7	(10)	69.5	(36)	66.0	(46)	81.9	(13)	71.2	(24)	65.9	(29)	57.2	(25)
衡水	124.4	(5)	110.0	(5)	105.1	(2)	90.6	(5)	71.7	(22)	70.7	(14)	57.2	(26)
南阳	NA		87.2	(24)	74.9	(38)	60.8	(49)	70.2	(29)	70.6	(16)	57.0	(27)
晋城	NA		NA		64.3	(48)	63.2	(47)	72.4	(18)	68.9	(22)	57.0	(28)
菏泽	NA		99.5	(11)	97.7	(9)	77.5	(18)	76.3	(12)	66.2	(27)	57.0	(29)
平顶山	NA		88.4	(20)	102.8	(6)	76.1	(21)	74.2	(15)	73.5	(11)	56.7	(30)
淄博	NA		94.4	(14)	92.6	(14)	76.0	(22)	70.4	(25)	64.5	(34)	56.4	(31)
商丘	NA		NA		85.0	(25)	71.6	(33)	70.4	(26)	65.2	(31)	56.0	(32)
保定	127.9	(4)	133.4	(1)	104.2	(4)	105.3	(2)	80.2	(7)	77.6	(6)	56.0	(33)
天津	95.4	(12)	92.3	(16)	74.9	(37)	74.5	(27)	61.3	(44)	68.1	(24)	55.8	(34)
潍坊	NA		77.4	(31)	77.2	(34)	68.5	(39)	61.3	(45)	61.0	(42)	55.1	(35)
泰安	NA		78.2	(29)	74.0	(39)	64.8	(41)	63.3	(42)	59.5	(46)	54.8	(36)
济南	112.5	(6)	91.6	(17)	95.7	(10)	75.1	(26)	66.6	(35)	59.9	(45)	54.4	(37)
新乡	NA		NA		105.1	(3)	82.8	(12)	70.3	(27)	69.9	(20)	54.1	(38)
三门峡	NA		75.8	(32)	81.2	(29)	64.6	(42)	66.0	(37)	66.4	(26)	54.0	(39)
滨州	NA		85.3	(27)	80.9	(31)	78.3	(16)	69.4	(30)	64.6	(33)	53.8	(40)
阳泉	NA		68.3	(37)	55.6	(55)	57.3	(53)	65.1	(40)	63.7	(39)	53.5	(41)
德州	NA		107.0	(6)	106.1	(1)	80.9	(14)	70.3	(28)	66.0	(28)	52.4	(42)
宝鸡	NA		60.7	(45)	63.2	(49)	60.2	(50)	57.1	(52)	57.3	(50)	51.8	(43)
驻马店	NA		NA		81.1	(30)	64.1	(43)	65.7	(38)	64.5	(35)	51.5	(44)
沧州	102.5	(11)	88.2	(21)	71.8	(43)	75.3	(25)	69.0	(31)	64.1	(37)	50.3	(45)
长治	NA		67.3	(38)	77.2	(33)	69.7	(36)	65.7	(39)	60.8	(43)	50.3	(46)
东营	NA		77.6	(30)	87.0	(23)	69.4	(37)	60.8	(47)	54.4	(52)	49.7	(47)
汉中	NA		NA		56.9	(52)	51.1	(58)	55.4	(54)	53.5	(53)	48.9	(48)
铜川	NA		62.7	(41)	55.9	(54)	53.1	(56)	50.0	(57)	53.2	(54)	47.3	(49)
晋中	NA		NA		59.8	(50)	59.7	(51)	59.7	(49)	61.2	(41)	47.2	(50)
日照	NA		61.5	(42)	71.3	(44)	58.9	(52)	52.5	(55)	50.2	(57)	46.8	(51)
信阳	NA		79.6	(28)	72.0	(42)	56.5	(55)	59.0	(50)	58.1	(49)	46.5	(52)
廊坊	110.1	(8)	99.9	(10)	87.0	(22)	70.5	(34)	60.5	(48)	60.1	(44)	45.5	(53)
北京	84.5	(13)	88.0	(22)	75.9	(35)	78.8	(15)	55.4	(53)	58.3	(48)	44.7	(54)
朔州	NA		NA		51.2	(57)	62.9	(48)	50.2	(56)	51.6	(56)	44.6	(55)
忻州	NA		NA		55.5	(56)	65.5	(40)	61.1	(46)	59.1	(47)	42.0	(56)
榆林	NA		NA		37.8	(67)	32.7	(67)	37.4	(64)	42.0	(61)	41.6	(57)
吕梁	NA		NA		47.8	(59)	56.7	(54)	58.8	(51)	56.6	(51)	41.5	(58)
秦皇岛	66.7	(15)	60.8	(44)	46.6	(60)	51.2	(57)	42.2	(59)	45.4	(58)	40.6	(59)
青岛	62.6	(16)	55.6	(46)	56.8	(53)	43.9	(59)	41.8	(60)	37.9	(64)	40.3	(60)
烟台	NA		50.3	(49)	46.5	(61)	40.3	(63)	36.4	(65)	35.2	(65)	39.1	(61)
大同	NA		42.7	(50)	38.1	(66)	40.9	(62)	39.3	(62)	42.6	(59)	37.4	(62)
延安	NA		53.6	(47)	46.1	(62)	43.6	(60)	43.7	(58)	41.4	(62)	37.0	(63)
安康	NA		61.4	(43)	50.8	(58)	42.2	(61)	39.7	(61)	42.5	(60)	34.9	(64)
商洛	NA		NA		44.2	(63)	38.4	(65)	38.5	(63)	40.7	(63)	33.9	(65)
威海	NA		41.8	(51)	38.8	(65)	34.8	(66)	31.1	(68)	31.2	(68)	33.4	(66)
承德	52.2	(17)	51.5	(48)	41.4	(64)	39.9	(64)	35.4	(66)	35.1	(66)	32.7	(67)
张家口	42.7	(18)	28.8	(52)	34.4	(68)	32.4	(68)	31.2	(67)	32.4	(67)	29.8	(68)

表 2：“2+66”城市气象调整后 2013 年至 2019 年 $PM_{2.5}$ 季节年平均浓度(微克/立方米)年际变化表

（浓度列底纹由红到绿表示各城市季节年平均浓度由大到小；排名列按浓度自大到小排名，排名位于前/中/后 1/3，分别用红/黄/绿色的圆点标记）

- **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 13 展示了研究区域城市过去 28 个季节（2013 年春季至 2019 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，各城市 $PM_{2.5}$ 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、山东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**京津冀鲁区域 90%分位数浓度下降显著，但晋豫陕下降趋势有待进一步确立，**山西省太原、临汾、吕梁等城市 2015-2018 年间还有显著恶化。2019 年春季及夏季，山东省部分城市（如济宁、菏泽、临沂、威海）污染情况出现一定程度的反弹。2019 年冬季（2019 年 12 月-2020 年 2 月）受到新冠肺炎疫情影响，全国各城市极端污染情况均出现显著下降，但这种下降并不是可持续的。

从具体数值上看，除了相对低的夏季外，90%分位数浓度在春秋季仍普遍高于 80 微克/立方米。在沿太行山东侧的河北省城市、河南省及关中平原城市，2018 年冬季 90%分位数仍高于 200 微克/立方米，而 2019 年冬季 90%分位数仍能达到 150 微克/立方米，还有很大的改善空间。

- **变化趋势**

同 2018 年相比，2019 年春季“2+66”城市 $PM_{2.5}$ 经气象调整后的浓度下降 5.5 微克/立方米，降幅达 9.72%，其中有 8 市反弹，它们是安康、济宁、临沂、商洛、泰安、威海、烟台、周口；2019 夏季“2+66”城市 $PM_{2.5}$ 经气象调整后的浓度下降 0.6 微克/立方米，降幅达 1.73%，其中有 21 市反弹，为东营、邯郸、汉中、鹤壁、济南、济宁、临沂、青岛、秦皇岛、日照、泰安、太原、天津、潍坊、威海、咸阳、阳泉、烟台、榆林、枣庄、淄博；2019 年秋季“2+66”城市 $PM_{2.5}$ 经气象调整后的浓度下降 1.2 微克/立方米，降幅达 2.24%，其中有 19 市反弹：安康、宝鸡、承德、鹤壁、济宁、洛阳、青岛、日照、三门峡、太原、铜川、威海、渭南、西安、延安、烟台、榆林、运城、枣庄；2019 年冬季（2019 年 12 月-2020 年 2 月）由于新冠肺炎疫情影响，除济宁反弹但不显著（在统计学 5%水平）外，其余各城市的 $PM_{2.5}$ 经气象调整后的浓度均有所下降，降幅达 29.75%。从全年平均角度，2019 年仅有济宁市出现显著恶化。读者还可参考第七节本团队给出的各城市的“人努力—天帮忙”指数。

华北平原大部分区域，包括北京、天津、河北中南部，山东及河南，近七年的 $PM_{2.5}$ 浓度明显下降，而山西中南部及陕西的下降趋势不明显。山西临汾在 2013 至

北京大学统计科学中心

2016 年呈现迅猛增长态势，而 2016 年以来临汾及周边城市整体污染物浓度虽有下降，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 2015 年冬季的浓度。**总体而言，京津冀区域近六年 $PM_{2.5}$ 浓度已具有明显的下降趋势；晋豫陕地区 $PM_{2.5}$ 浓度一致性的下降趋势仍有待建立。**

图 15 分别展示了“2+66”城市 $PM_{2.5}$ 年平均浓度近年来的累积降幅和平均降幅，两种降幅的计算方法不同：六年累积降幅是 2019 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。从图 15 六年累积降幅来看，“2+66”城市除张家口、榆林、咸阳外，2019 年的浓度较其观测首年均有所下降，且大部分城市下降幅度较大。保定累积降幅在所有观测城市中最高，接近 60%。去年降幅为负的城市临汾、晋城、吕梁、洛阳在 2019 年的污染情况均有所改观。截止 2019 年度累计降幅为负的城市中，张家口、榆林初始浓度较低，而咸阳的累计恶化程度虽较上年有所缓解，但仍然值得关注。

从年平均降幅来看，加上 2019 年数据之后，平均降幅亦有较大改善。新乡、保定的年平均降幅均接近 15%，其中保定市达 15.1%。“2+66”城市年平均降幅平均值是 6.84%。张家口、榆林、咸阳三市降幅为负。

2014 年至 2019 年 17 个城市的累积降幅超过 40%，其中 9 个城市位于京津冀区域；37 个城市的累积降幅超过 30%。山东省西部以济南为核心，周边城市降幅均有显著扩大，济宁市及山东半岛东部的青岛、烟台、威海三市累计降幅收窄。河南省局部的郑州、新乡区域和信阳、驻马店、周口一线改善程度稍好，但未形成区域性的下降趋势，洛阳、鹤壁等城市的降幅仍然有限。在平均降幅上，可以观测到相似的结果，京津冀地区和山东省表现最佳，而山西、陕西城市平均降幅较低。

上述关于累积降幅和平均降幅的讨论进一步说明，京津冀地区与山东省整体近年已然形成稳定的下降趋势；河南省局部改善良好，但存在个别降幅较低的城市；山西省、陕西省降幅较低，持续稳定的下降趋势仍有待建立。

根据表 2 的“2+66”城市气象调整后 $PM_{2.5}$ 季节年平均浓度排名，2019 年安阳、咸阳、洛阳的 $PM_{2.5}$ 季节年平均浓度最高。保定、平顶山在 2019 年排名相较上年下降最多，表明相对其他城市污染状况改善显著；济宁、枣庄在 2019 年排名相较上年上升最多，表明相对其他城市污染状况相对恶化。

- **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**

本报告延续第六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，这可以让我们探究各城市的污染输入和输出方向。图 14 展示了 $PM_{2.5}$ 的污染

北京大学统计科学中心

地图及不同风向下的调整浓度（请参见电子版并放大），其中 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 14 发现，由于 $PM_{2.5}$ 在静风条件下不易扩散，在各个季节静风下的 $PM_{2.5}$ 浓度都显著高于其它风向。对于北部长城一线的大同、张家口、北京、承德来说，西北风普遍最有利于 $PM_{2.5}$ 的扩散，东南风普遍不利。对于环渤海城市来说，北侧边缘的秦皇岛东面临海，东北风、东南风风力强劲，较西风更有利于 $PM_{2.5}$ 的扩散；渤海内侧的唐山、天津则与河北北部相近，在西北风下最有利于污染物扩散。河北沧州及山东半岛的滨州、东营、潍坊、烟台、威海北濒渤海、黄海，故东北风最有利于 $PM_{2.5}$ 的扩散；而日照、青岛东南面沿海，东南风最有利于 $PM_{2.5}$ 的扩散。另外，各个城市污染源分布也影响着不同风向下 $PM_{2.5}$ 的扩散情况，可参见电子版清晰地图。

（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、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+66”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%，以致我们的气象调整算法不能提供有效的调整浓度，故图 18 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。本报告将使用这一种方法[2]。另一种方法是对 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 关系进行建模，以推断出缺失的 PM_{10}。

表 3：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] PM_{10} 观测与 $PM_{2.5}$ 浓度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的 PM_{10} 数据，对倒挂的 PM_{10} 观测不作缺失处理。

北京大学统计科学中心

我国目前的 PM_{10} 平均浓度标准如表 3 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。

图 16 展示了研究区域城市过去 28 个季节经气象调整的 PM_{10} 季节平均浓度随时间变化的情况以及在每个给定季节的时间序列，我们发现过去七年 PM_{10} 浓度有如下几个特征：

- 季节效应

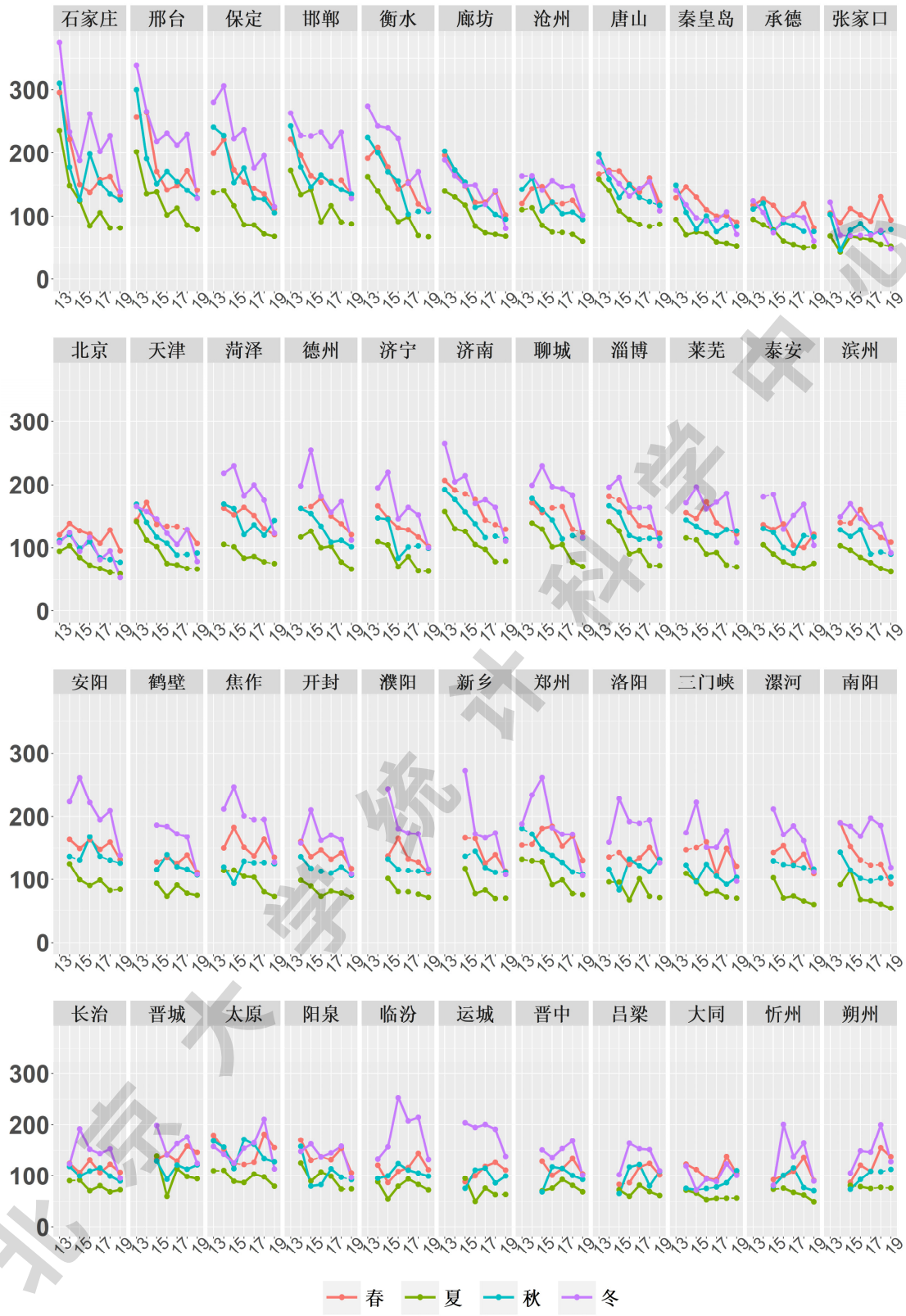
同 $PM_{2.5}$ 一样，PM_{10} 浓度也有比较明显的季节特征，夏季污染最轻。其季节效应具有地理差异：沿太行山脉城市季节效应最为明显，其次是山东、陕西、河南和环渤海，最后是山西和河北北部城市。**此外，研究区域城市 PM_{10} 污染还有独特的、不同于 $PM_{2.5}$ 的特征。一方面，PM_{10} 浓度最高的季节与城市的地理位置密切相关。**河北中南部保定、沧州、邯郸、衡水、石家庄、邢台 6 市，河南所有 17 市，山东除东营、青岛、威海、烟台外中西部 13 市，山西除大同、阳泉外中南部 9 市，以及陕西除延安、榆林外的中南部 8 市，冬季的 PM_{10} 浓度最高。然而河北北部的承德、秦皇岛、张家口及京津地区，山西北部大同市，均是春季浓度最高，陕西北部的榆林、延安冬春季 PM_{10} 浓度相差不大，这说明春季沙尘传输对北部城市的影响大于华北平原中部、南部城市。而山东半岛东部沿海各城市，PM_{10} 的季度变化与华北平原大部也不一致。**另一方面，研究区域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。

2019 年冬季，在新冠肺炎疫情的影响下，冬季的 PM_{10} 浓度相比 2018 年出现了较大幅度的下降，一些城市降至和当年春秋季相近乃至更低水平。河北邢台、邯郸、廊坊、沧州、唐山，山东除青岛外的 16 市，河南除安阳、濮阳、平顶山、驻马店、南阳、信阳外的 11 市，山西长治、晋城、太原、阳泉、晋中、朔州，陕西宝鸡、铜川、商洛、延安、榆林，均出现 2019 年冬季 PM_{10} 浓度低于当年春季或秋季的情况。

- 区域特征

研究区域城市的 PM_{10} 浓度与 $PM_{2.5}$ 具有相似的地域特征，可以将其划分为**同 $PM_{2.5}$ 类似的三个区域**：河北沿太行山脉的保定、石家庄、邢台、邯郸和衡水五市和唐山市，河南西北部的安阳、焦作、洛阳、郑州四市，陕西咸阳、西安、渭南三市，山西朔州、太原、晋城、临汾、运城五市为**高浓度区域**。河北北部的张家口、承德、秦皇岛三市及北京、天津，陕西南部秦岭以南的安康、商洛、汉中三市，北部的延安、榆林、铜川三市，山东半岛东部的青岛、烟台、威海、日照四市为**低浓度区域**。

北京大学环境科学中心


石家庄
邢台
保定
邯郸
衡水
廊坊
沧州
唐山
秦皇岛
承德
张家口
北京
天津
菏泽
德州
济宁
济南
聊城
淄博
莱芜
泰安
滨州
安阳
鹤壁
焦作
开封
濮阳
新乡
郑州
洛阳
三门峡
漯河
南阳
长治
晋城
太原
阳泉
临汾
运城
晋中
吕梁
大同
忻州
朔州
0
100
200
300
13
15
17
19
春
夏
秋
冬

北京大学统计科学中心

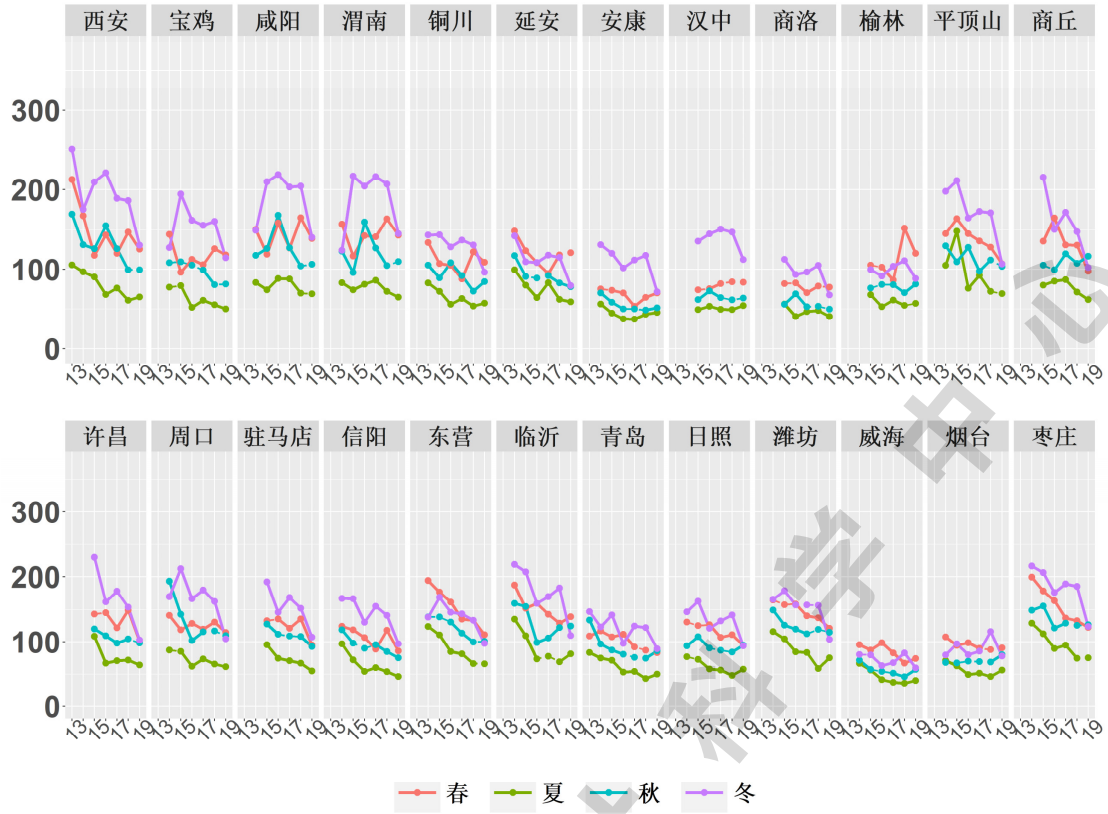
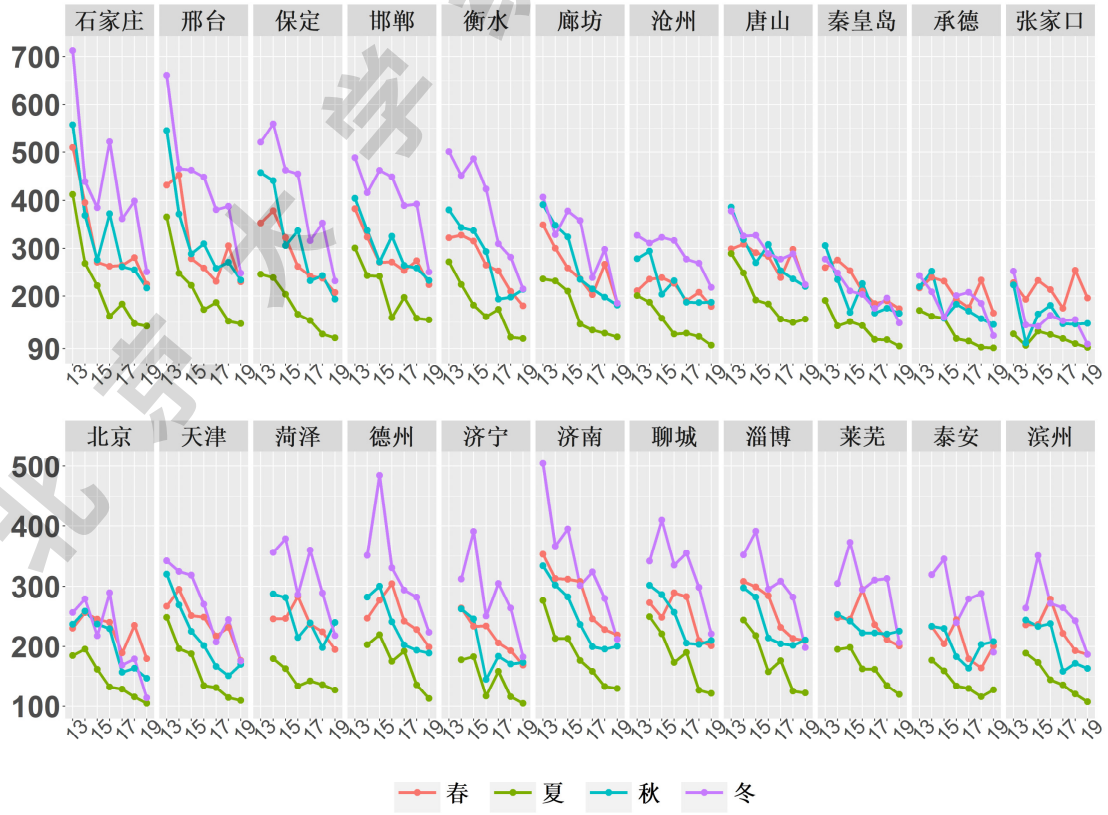


图 16：“2+66”城市气象调整后 2013 年至 2019 年 PM_{10} 季节平均浓度(微克/立方米)变化序列图

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



北京大学统计科学中心

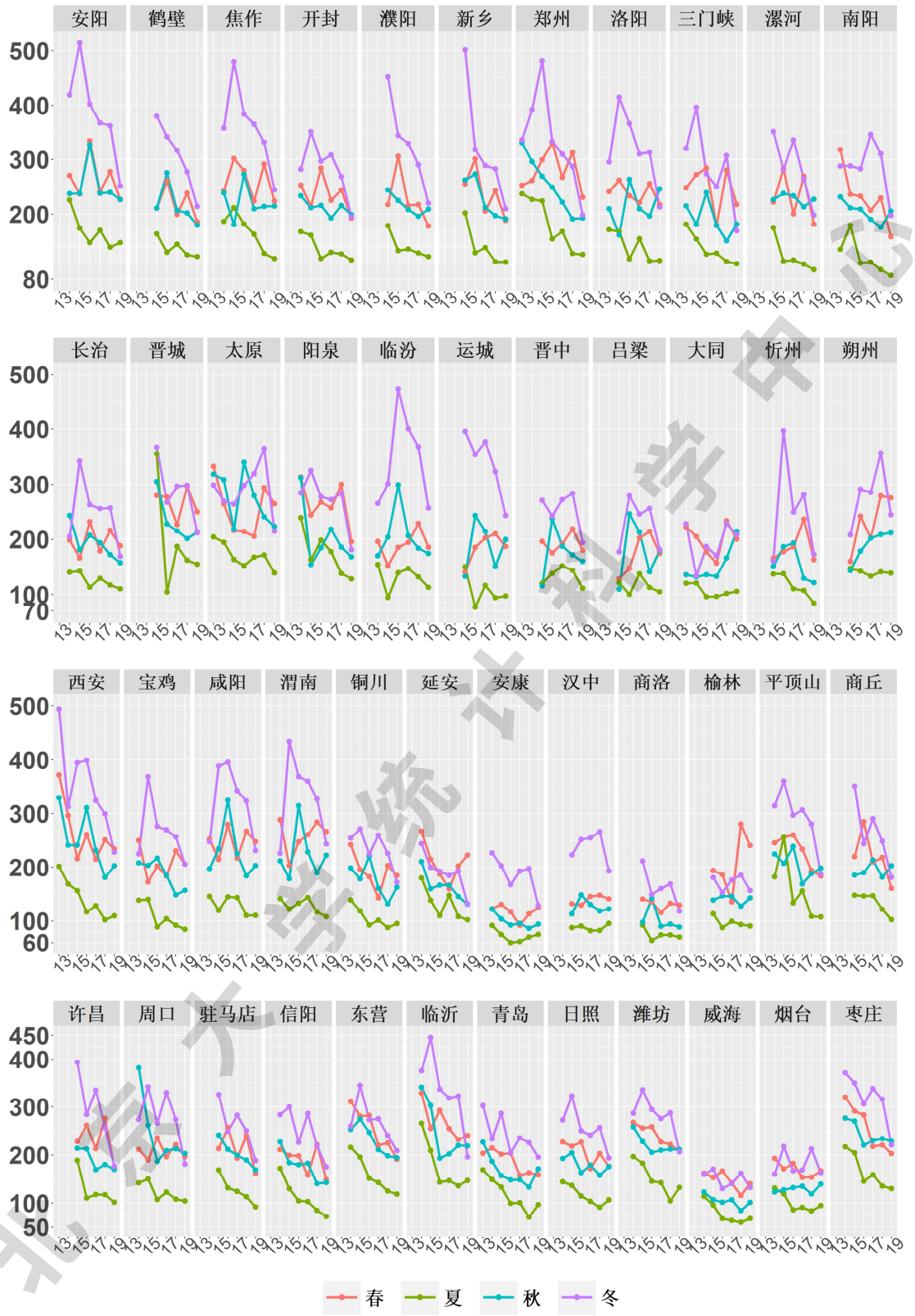


图 17：“2+66”城市气象调整后 2013 年至 2019 年 PM_{10} 季节浓度 90%分位数(微克/立方米)变化序列图

北京大学统计科学中心

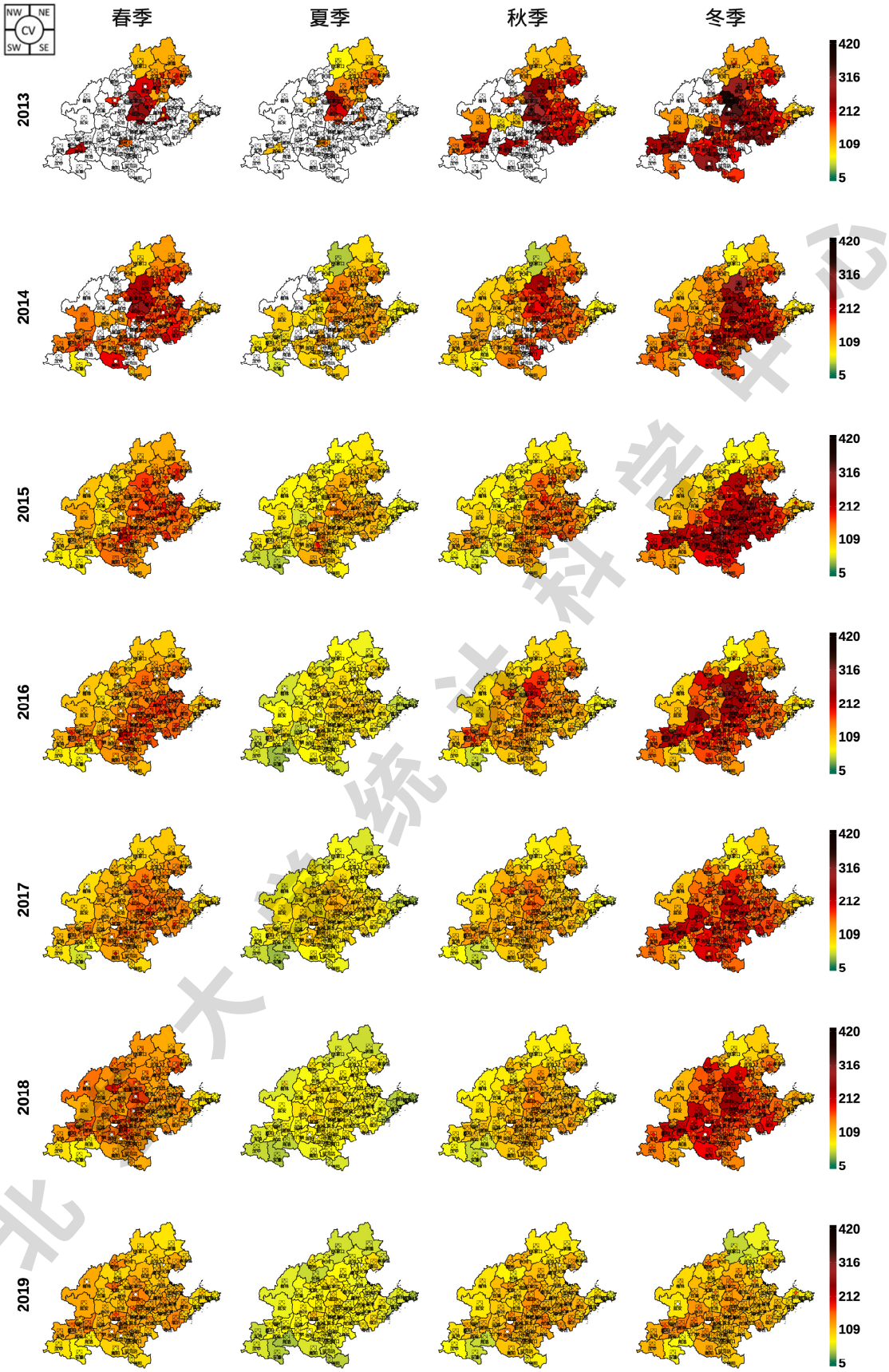


图 18：“2+66”城市气象调整后 2013 年至 2019 年 PM_{10} 季节平均浓度(微克/立方米)地图

（清晰图参见电子版；白色代表数据少，无法得到可靠结果）

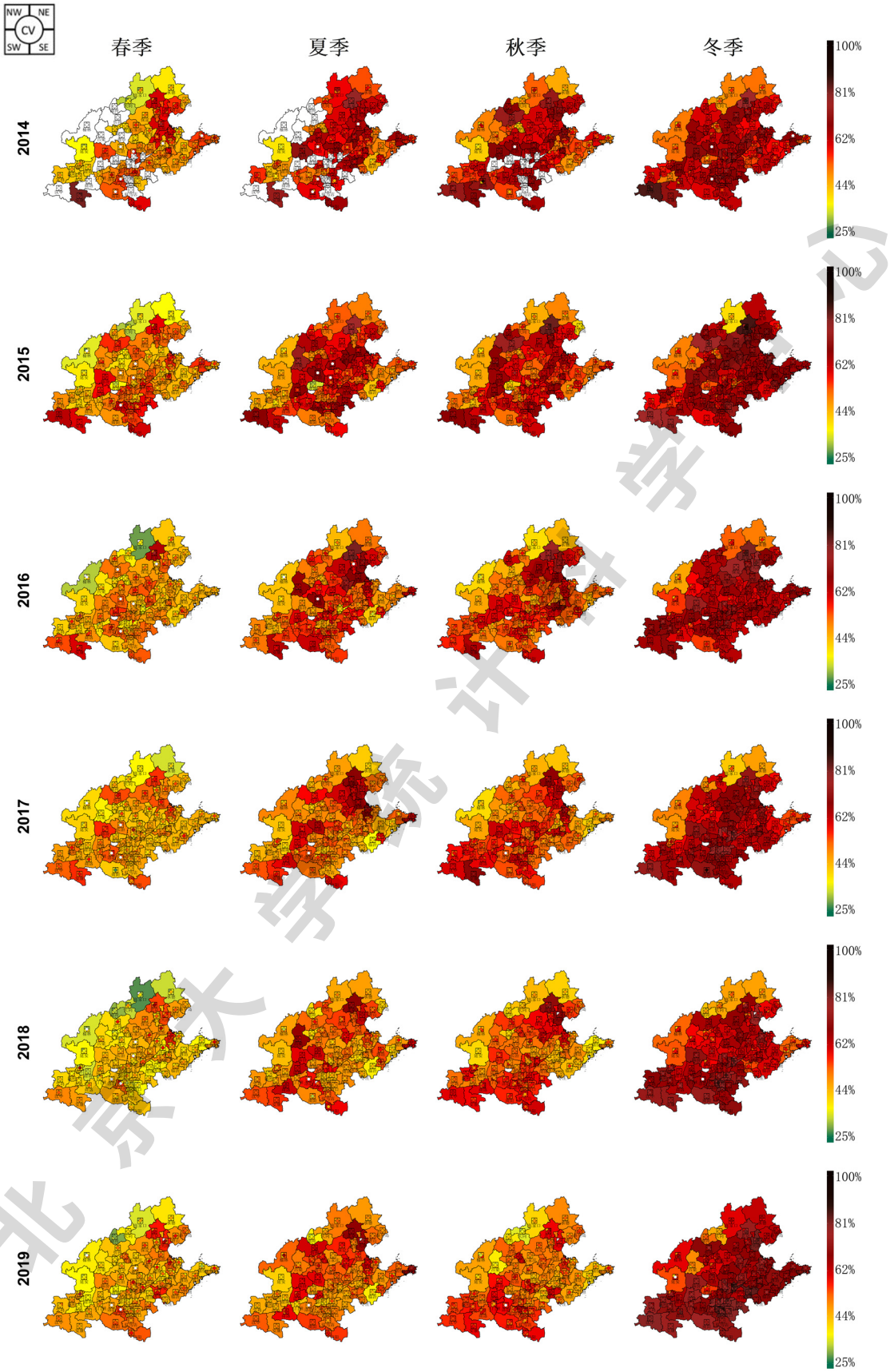


图 19：“2+66”市气象调整后 2013 至 2019 年 $PM_{2.5}$ 占 PM_{10} 的比例地图

（清晰图参见电子版；白色代表数据少，无法得到可靠结果）

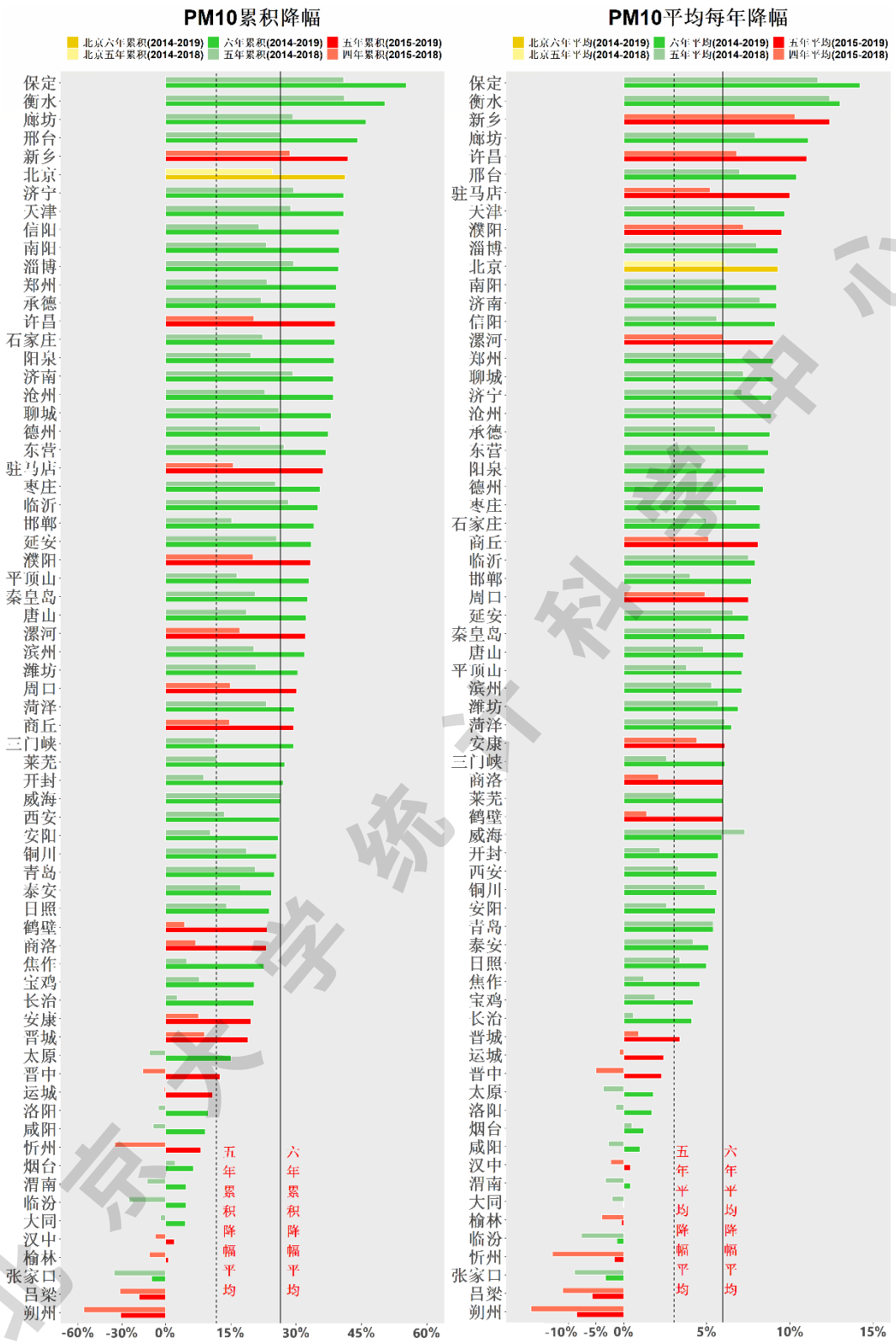


图 20：“2+66”城市气象调整后季节年 PM_{10} 过去六/五年或过去五/四年的累积降幅及平均降幅图

（红色表示因 2013 年部分季度数据缺失而计算的五/四年累积/平均降幅）

北京大学统计科学中心

城市	2013年	排名	2014年	排名	2015年	排名	2016年	排名	2017年	排名	2018年	排名	2019年	排名
晋城	NA		NA		149.7	(20)	108.8	(48)	131.6	(17)	136.2	(9)	121.3	(1)
邯郸	225.3	(3)	184.1	(5)	170.2	(6)	161.1	(4)	159.3	(1)	156.0	(2)	121.3	(2)
安阳	NA		162.0	(13)	160.3	(13)	160.7	(5)	144.5	(4)	145.3	(5)	120.1	(3)
石家庄	304.1	(1)	195.6	(4)	147.2	(22)	170.7	(1)	154.9	(3)	151.9	(4)	119.6	(4)
邢台	274.4	(2)	214.2	(2)	170.0	(7)	161.6	(3)	157.5	(2)	157.3	(1)	119.5	(5)
太原	153.6	(12)	140.0	(29)	112.9	(49)	133.5	(21)	138.9	(9)	155.6	(3)	118.8	(6)
渭南	NA		121.8	(38)	125.9	(40)	146.9	(13)	142.6	(7)	136.8	(7)	115.9	(7)
菏泽	NA		163.8	(12)	161.2	(12)	137.7	(18)	143.4	(6)	125.8	(20)	115.3	(8)
焦作	NA		149.0	(20)	159.5	(14)	146.5	(14)	140.7	(8)	141.6	(6)	115.3	(9)
洛阳	NA		126.7	(35)	137.4	(32)	129.0	(29)	136.7	(12)	132.7	(12)	114.2	(10)
咸阳	NA		125.2	(37)	132.3	(36)	158.3	(6)	136.3	(13)	135.8	(10)	113.8	(11)
临沂	NA		175.1	(7)	155.8	(16)	122.9	(34)	124.0	(30)	125.6	(21)	113.6	(12)
朔州	NA		NA		86.5	(58)	110.1	(46)	109.4	(46)	134.9	(11)	113.2	(13)
枣庄	NA		173.4	(8)	163.2	(11)	137.7	(17)	137.3	(11)	129.6	(16)	111.9	(14)
唐山	177.5	(9)	160.6	(14)	140.5	(29)	132.5	(23)	125.0	(28)	130.7	(15)	108.7	(15)
济南	205.4	(6)	175.6	(6)	170.5	(5)	147.3	(11)	133.3	(15)	124.2	(24)	107.8	(16)
莱芜	NA		146.6	(24)	147.2	(23)	137.1	(19)	130.8	(18)	129.2	(17)	106.5	(17)
聊城	NA		171.9	(10)	168.6	(8)	151.4	(8)	144.5	(5)	127.1	(18)	106.4	(18)
西安	184.4	(7)	142.7	(28)	135.9	(34)	147.0	(12)	127.9	(20)	123.4	(26)	105.3	(19)
郑州	164.2	(10)	173.0	(9)	179.9	(1)	149.3	(9)	137.9	(10)	132.6	(13)	105.1	(20)
泰安	NA		138.0	(32)	131.9	(37)	111.3	(45)	104.5	(51)	114.1	(42)	104.3	(21)
潍坊	NA		148.9	(21)	141.6	(27)	129.9	(28)	123.3	(33)	117.9	(37)	103.7	(22)
临汾	NA		108.8	(46)	99.3	(55)	141.0	(15)	132.0	(16)	136.3	(8)	103.6	(23)
淄博	NA		171.4	(11)	167.4	(9)	132.3	(24)	126.7	(26)	121.0	(30)	103.2	(24)
运城	NA		NA		115.3	(47)	113.9	(44)	127.3	(24)	116.5	(39)	102.8	(25)
濮阳	NA		NA		153.6	(18)	135.7	(20)	125.3	(27)	122.5	(28)	102.5	(26)
开封	NA		138.2	(31)	138.4	(31)	123.8	(33)	123.7	(31)	126.0	(19)	100.9	(27)
新乡	NA		NA		173.2	(4)	140.1	(16)	123.7	(32)	123.6	(25)	100.7	(28)
鹤壁	NA		NA		130.9	(38)	133.1	(22)	127.4	(22)	125.2	(22)	100.3	(29)
德州	NA		159.9	(16)	175.1	(3)	148.3	(10)	129.4	(19)	125.1	(23)	100.1	(30)
保定	214.7	(4)	224.0	(1)	166.9	(10)	163.6	(2)	134.1	(14)	132.4	(14)	100.1	(31)
漯河	NA		NA		146.6	(24)	129.9	(27)	127.0	(25)	121.5	(29)	99.5	(32)
衡水	213.5	(5)	198.2	(3)	175.4	(2)	153.5	(7)	127.5	(21)	116.7	(38)	98.3	(33)
三门峡	NA		138.6	(30)	141.5	(28)	128.1	(31)	111.8	(43)	122.8	(27)	97.9	(34)
周口	NA		147.9	(23)	139.7	(30)	114.9	(43)	122.1	(34)	118.9	(35)	97.5	(35)
平顶山	NA		144.4	(27)	158.1	(15)	128.5	(30)	124.7	(29)	120.7	(32)	96.7	(36)
吕梁	NA		NA		80.6	(62)	106.6	(52)	118.4	(39)	106.0	(49)	95.2	(37)
商丘	NA		NA		134.1	(35)	124.9	(32)	127.4	(22)	114.3	(41)	94.6	(38)
东营	NA		148.6	(22)	148.7	(21)	130.7	(25)	118.3	(40)	108.1	(48)	93.8	(39)
大同	NA		97.3	(48)	80.4	(63)	79.2	(64)	78.4	(63)	100.7	(53)	92.8	(40)
南阳	NA		153.8	(18)	141.6	(26)	117.3	(39)	120.9	(36)	118.1	(36)	92.4	(41)
阳泉	NA		150.1	(19)	115.4	(46)	115.9	(41)	122.1	(35)	120.5	(33)	92.0	(42)
许昌	NA		NA		150.2	(19)	120.9	(35)	117.1	(42)	119.7	(34)	91.6	(43)
晋中	NA		NA		104.5	(50)	107.2	(51)	118.4	(38)	120.9	(31)	91.4	(44)
济宁	NA		154.5	(17)	154.0	(17)	107.8	(50)	119.8	(37)	108.9	(47)	91.1	(45)
宝鸡	NA		114.5	(41)	120.0	(44)	108.0	(49)	105.5	(50)	105.6	(50)	91.1	(46)
长治	NA		113.8	(42)	122.1	(42)	115.5	(42)	111.2	(44)	110.6	(45)	90.7	(47)
沧州	134.4	(13)	145.9	(25)	120.7	(43)	118.9	(37)	111.2	(45)	112.7	(44)	89.6	(48)
滨州	NA		130.0	(33)	130.6	(39)	130.1	(26)	108.0	(48)	103.6	(51)	88.4	(49)
驻马店	NA		NA		137.0	(33)	116.8	(40)	117.3	(41)	115.6	(40)	87.4	(50)
榆林	NA		NA		87.4	(57)	82.0	(62)	83.2	(61)	97.0	(55)	86.8	(51)
铜川	NA		116.5	(40)	103.1	(51)	99.5	(54)	95.1	(56)	94.8	(57)	86.8	(52)
廊坊	182.0	(8)	160.2	(15)	142.2	(25)	117.7	(38)	108.3	(47)	113.4	(43)	86.4	(53)
天津	154.9	(11)	145.3	(26)	125.2	(41)	109.7	(47)	100.3	(52)	103.6	(52)	85.9	(54)
日照	NA		111.9	(43)	117.2	(45)	98.8	(55)	95.5	(55)	96.2	(56)	85.2	(55)
延安	NA		127.0	(34)	101.0	(54)	92.7	(58)	97.0	(54)	94.6	(58)	84.5	(56)
汉中	NA		NA		80.2	(65)	86.7	(59)	86.7	(57)	85.6	(62)	78.5	(57)
青岛	118.3	(15)	102.9	(47)	101.9	(52)	85.8	(60)	86.6	(58)	81.6	(64)	77.1	(58)
烟台	NA		81.5	(50)	80.3	(64)	74.6	(65)	74.1	(64)	79.6	(65)	76.2	(59)
信阳	NA		126.7	(36)	113.8	(48)	95.3	(56)	99.8	(53)	99.4	(54)	76.0	(60)
忻州	NA		NA		81.5	(61)	119.2	(36)	107.2	(49)	109.7	(46)	74.9	(61)
秦皇岛	128.7	(14)	110.4	(44)	95.4	(56)	94.1	(57)	82.1	(62)	87.6	(60)	74.3	(62)
北京	108.4	(17)	121.4	(39)	101.3	(53)	104.9	(53)	85.2	(60)	91.5	(59)	71.3	(63)
张家口	99.6	(18)	62.2	(52)	81.6	(60)	81.3	(63)	74.0	(65)	84.1	(63)	68.2	(64)
承德	112.1	(16)	110.2	(45)	86.4	(59)	85.4	(61)	85.9	(59)	86.0	(61)	67.1	(65)
安康	NA		83.2	(49)	74.3	(67)	64.8	(67)	63.2	(67)	68.6	(67)	59.7	(66)
商洛	NA		NA		76.7	(66)	71.6	(66)	66.7	(66)	71.4	(66)	58.9	(67)
威海	NA		78.5	(51)	70.1	(68)	64.3	(68)	59.9	(68)	57.8	(68)	57.8	(68)

表 4：“2+66”城市气象调整后 2013 年至 2019 年 PM_{10} 季节年平均浓度(微克/立方米)年际变化表

（浓度列底纹由红到绿表示各城市季节年平均浓度由大到小；排名列按浓度自大到小排名，排名位于前/中/后 1/3，分别用红/黄/绿色的圆点标记）

河北廊坊、沧州，河南东部和南部的其余城市，山东中西部其余十三市，陕西宝鸡、汉中，山西其余六市为**中浓度区域**。根据表 4，高浓度区域 2019 年平均 PM_{10} 浓度大致高于 110 微克/立方米，低浓度区域年平均 PM_{10} 浓度大致低于 85 微克/立方米。

- **极端污染**

我们计算了各个季节经过气象调整的 PM_{10} 浓度 90%分位数，代表 PM_{10} 的极端污染情况。图 17 展示了研究区域城市过去 28 个季节（2013 年春季至 2019 年冬季）经气象调整的 PM_{10} 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。可见，从 90%分位数角度，各城市 PM_{10} 浓度仍具有同均值浓度类似的区域和季节特征，同时分布上也更接近 $PM_{2.5}$ 的 90%分位数，因为极端污染时两者往往皆高。2019 年冬季（2019 年 12 月-2020 年 2 月）受到新冠肺炎疫情影响，全国各城市极端污染情况均出现显著下降，但这种下降并不是可持续的。

河北省太行山东侧从保定向南到河南北部、山东西部，山西临汾、运城、朔州，陕西关中平原，仍为 PM_{10} 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，晋豫陕则改善不大，太原、运城、朔州等城市自 2015 年到 2018 年还有显著恶化。除了相对低的夏季外，各城市 90%分位数浓度在秋春季仍普遍达 200 微克/立方米。2018 年冬季 90%分位数在河北沿太行山五市约为 300-400 微克/立方米，而大部分城市达到 200-300 微克/立方米；2019 年冬季，河北沿太行山五市的 PM_{10} 浓度 90%分位数下降至 250 微克/立方米附近，而大部分城市则降至 200 微克/立方米以下。PM_{10} 极端污染情况仍有很大的改善空间。

- **变化趋势**

相比去年，2019 年“2+66”城市春夏秋冬四季节下降 20.2，2.2，0.2，56.2 微克/立方米，降幅分别为 15.29%，3.23%，0.20%和 34.97%，全年平均浓度下降 17.04%。

根据图 20，从累积降幅来看，除去张家口、吕梁、朔州，其他城市 PM_{10} 浓度较其初始年份均在 2019 年有所下降。初始年份至今累计降幅超过 40%的城市有 8 个，其中保定、衡水、廊坊、邢台占据前四，北京、天津的降幅也超过 40%；累计降幅超过 30%的城市有 34 个，达到“2+66”城市的半数。所有“2+66”城市六年累计降幅的平均值为 26.4%。从年平均降幅来看，“2+66”城市大部分集中在 10%以内，平均值为 5.95%。保定、衡水、新乡、廊坊、许昌、邢台、驻马店 7 市的平均降幅超过 10%；张家口、大同、吕梁、朔州、临汾、忻州、榆林 7 市降幅为负，**累积降幅与平均降幅之间出现的差异说明了有些城市的污染物浓度在整体下降的趋势下，在个别年份存在小的增长波动。**

北京大学统计科学中心

类似 $PM_{2.5}$，京津冀地区各城市 PM_{10} 浓度累积降幅及平均降幅较大，沿太行山五市的年平均降幅在 7.5%以上。山东省西部的整体改善也较好，年平均降幅均达到 6%以上，而山东半岛东部降幅相对较低是因为初始 PM_{10} 浓度较低。河南局部地区改善明显，年平均降幅达 5%以上的城市有 16 个，但也存在洛阳这样年平均降幅不到 2%的城市。而山西 10 市中 5 市降幅为负，年平均降幅均不超过 4.1%；陕西处于高浓度区的咸阳、渭南年平均降幅不超过 1%。这印证了我们的观点，即**京津冀地区的颗粒物形成稳定下降趋势；而山西、陕西地区持续稳定的下降趋势仍有待建立。**

根据表 4 的“2+66”城市气象调整后 PM_{10} 年平均浓度排序，相比去年，2019 年排名中保定、临汾相对改善最为显著，泰安、潍坊的排名显著上升，相对其他城市有所恶化。PM_{10} 年均浓度高于 120 微克/立方米的城市从 2018 年的 33 个降至 2019 年的 3 个，而“2+66”城市中半数以上 PM_{10} 年平均浓度降至 100 微克/立方米以下。

- **$PM_{2.5}$ 占 PM_{10} 的比例**

$PM_{2.5}$ 指悬浮在空气中空气动力学当量直径不超过 2.5 微米的颗粒物，而 PM_{10} 指悬浮在空气中空气动力学当量直径不超过 10 微米的颗粒物，从定义上看 $PM_{2.5}$ 是 PM_{10} 的一部分。可把 PM_{10} 分为 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10-2.5}$ 两个部分，这两个部分的来源和健康效应有差异。来源上，我国 $PM_{2.5}$ 主要来源于气态污染物的二次反应转化，源解析表明占比较高的来源包括煤和生物质燃烧、燃油车辆等；而 $PM_{10-2.5}$ 通常主要为沙尘，北方城市冬春季风沙严重时会出现 PM_{10} 极高而 $PM_{2.5}$ 接近零的情况。健康效应上，粒径较细的 $PM_{2.5}$ 能到达呼吸系统最深处的肺泡，对健康的负面影响更加显著；粒径更粗的 $PM_{10-2.5}$ 通常在呼吸系统更浅处被清除，对健康的负面影响相对较小。

图 19 给出了“2+66”城市 2013 年至 2019 年各季节 $PM_{2.5}$ 占 PM_{10} 的比例，这一比例反映了 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10-2.5}$ 两类颗粒物对污染的贡献大小。该比例具有如下特征：

从季节分布来看：$PM_{2.5}$ 占 PM_{10} 的比例随季节变动明显。以 2019 年为例，“2+66”城市在春夏秋冬四季节 $PM_{2.5}$ 占 PM_{10} 的比例平均值分别为 46.0%、51.9%、51.8%、69.3%，春季占比最低，冬季占比最高，夏秋占比相近，介于春季和冬季之间。

从地理分布来看：地区间差异较小。2013 年至今，京津冀、山东、河南、山西、陕西五个区域全年 $PM_{2.5}$ 占 PM_{10} 的比例平均值分别为 56.8%、55.2%、57.7%、54.2%、54.3%。根据 2019 年数据，“2+66”城市中，天津、北京 $PM_{2.5}$ 占 PM_{10} 的比例最高，分别达 66.0%、64.2%；朔州、大同该比例最低，分别为 39.3%、41.2%；北京、天津，河南许昌、信阳、南阳，山东济宁、滨州等 7 市该比例超过 60%；朔州、大同、吕梁、延安 4 市则不超过 45%，不超过 50%的城市有 10 个。

北京大学统计科学中心

从年际变化来看：从 2013 年至 2018 年，$PM_{2.5}$ 占 PM_{10} 的比例逐年降低，2013 年平均值为 61.8%，2014 年平均值为 58.0%，到 2018 年逐年下降至 52.7%。**2019 年这一比例较上年有所上升**，达到 54.7%。“2+66”城市 2019 年较 2015 年 PM_{10} 平均降幅为 27%，$PM_{10-2.5}$ 为 16%，前者显著大于后者，且 12 个城市 $PM_{10-2.5}$ 浓度上升。

$PM_{2.5}$ 占 PM_{10} 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。**我们建议加强对区域内扬尘的管理。**

（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，二氧化硫的短期暴露会对人体的呼吸系统造成损害。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[20]。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。

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	

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

北京大学统计科学中心

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。

- 季节效应

根据图 21，研究区域城市具有相似的、明显的季节效应，**冬季二氧化硫浓度最高，春秋两季次之，夏季最轻。**山西省和河北沿太行山脉五市的季节差异较大；北部北京、承德等，陕西南部秦岭以南三市，以及山东半岛威海、烟台等城市的二氧化硫浓度季节差异都较小。

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最高可超过 5，如长治 2016 年的冬（138.8 微克/立方米）夏（13.1 微克/立方米）季比甚至达到 10.6。唐山市二氧化硫的季平均浓度常年处于高位，冬夏季浓度比在 1.1 到 2 之间。伴随污染治理下二氧化硫浓度降低，这种冬夏差距逐步缩小。

- 区域特征

根据图 21 和图 23，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完全按照地理连续，和城市的工业基础联系紧密，且近六年有较大变化。**2013 至 2015 年二氧化硫区域划分，尤其是对冬季的划分，以河北、河南沿太行山城市及山西省为高浓度区域；北京，河北北部，陕西为低浓度区域；其他城市为中浓度区域。2016 至 2018 年，河北、河南沿太行山城市浓度下降幅度很大。**由于太行山东侧城市二氧化硫污染的快速改善，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。2018 年至 2019 年，二氧化硫区域划分基本上以河北唐山、秦皇岛，山东淄博、山西中部和北部为高浓度区；北京、河南南部、陕西中部、山东半岛东部为低浓度区；河北北部及唐山、华北平原核心区域（包括河北河南沿太行山城市及山东省西部）、山西南部、陕西榆林为中浓度区。表 6 可见，二氧化硫高浓度区域的 2019 年平均浓度大致高于 20 微克/立方米，而低浓度区域大致在 10 微克/立方米以下。

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，如沧州、廊坊、北京和天津；考虑到唐山较为有利的大气扩散条件，这反映了其巨大的二氧化硫排放量（主要来自钢铁和焦化产业）。而山东省淄博、滨州、莱芜 3 市二氧化硫浓度居全省前三位，同样反映该区域生产活动中二氧化硫排放较高。相比其他省，**山西已成为二氧化硫浓度较高的区域，二氧化硫控制应该成为山西大气污染治理的主要议题。**

北京大学绿化科学中心

- **极端污染**

我们计算了经过气象调整的 90%分位数浓度代表各个季节二氧化硫浓度的极端污染情况。图 22 展示了研究区域城市 2013 季节年以来各季节经气象调整的二氧化硫浓度 90%分位数随时间变化的情况。可见，各城市二氧化硫 90%分位数浓度仍具有同均值浓度类似的区域和季节特征，且大部分城市也呈现出显著的降低趋势。河北省、山东省、河南省原本都是二氧化硫污染严重的区域，在近几年的治理后浓度均有显著降低，二氧化硫污染仅在唐山、淄博等工业城市局部显著。而山西省二氧化硫浓度仍然较高，尤其在冬季污染最为严重。

分季节看，各个季节的下降趋势都较为明显，春夏秋三季的 90%分位数浓度普遍降至 50 微克/立方米以下，甚至达到个位数。2018 年冬季，二氧化硫浓度 90%分位数在山西省仍然普遍在 100 微克/立方米左右，仍然有较大的改善空间，而除此之外研究区域大部分城市均降至 50 微克/立方米以下。2019 年冬季（2019 年 12 月-2020 年 2 月），由于新冠肺炎疫情影响，各城市极端污染情况也出现显著下降。

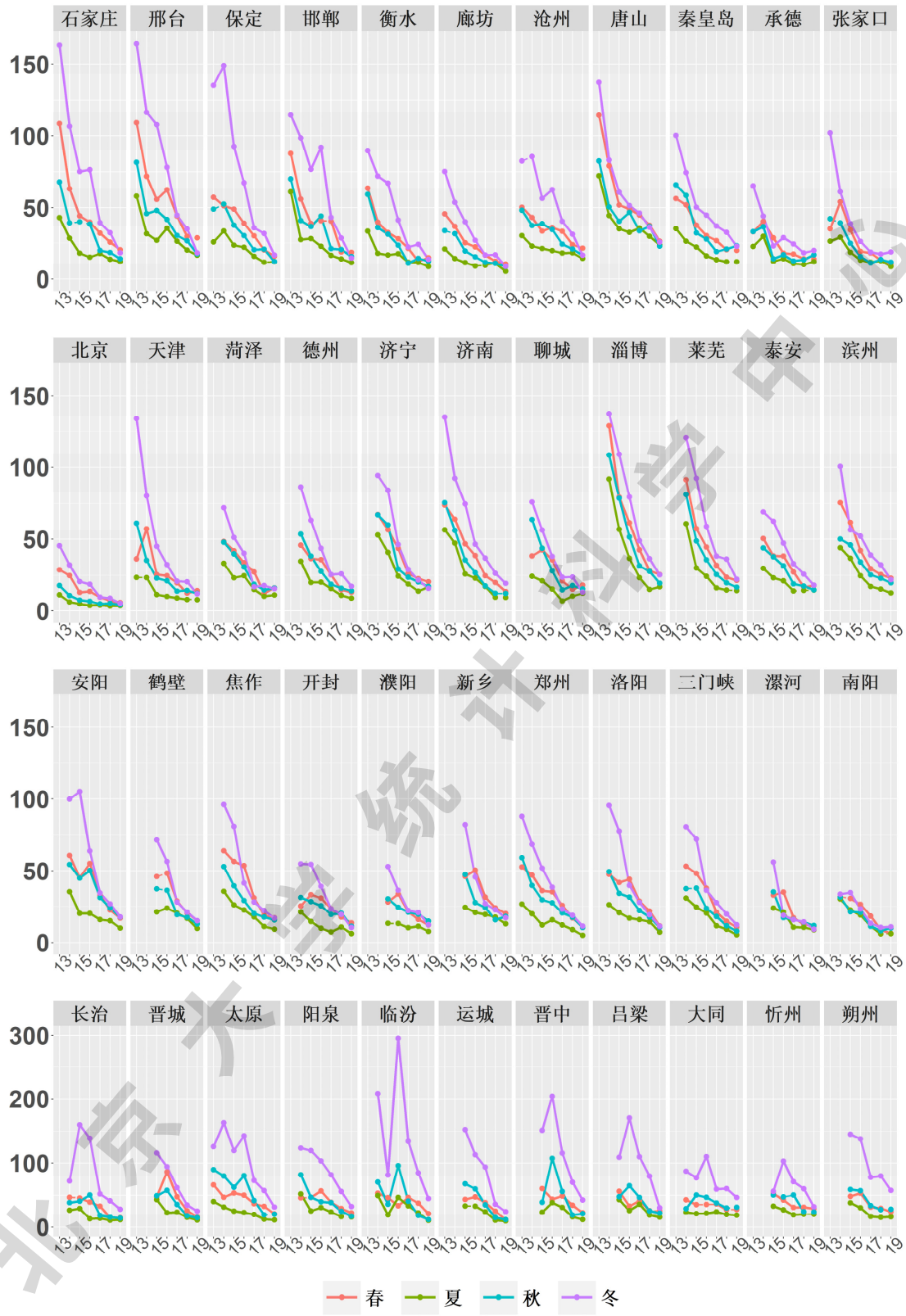
- **变化趋势**

根据图 21，过去六年区域内二氧化硫浓度整体改善显著。其中**北京市从 2017 年开始的 12 个季度的二氧化硫季节平均浓度均为个位数，达到发达国家水平**。相比 2018 年，2019 年“2+66”城市在春、夏、秋、冬四个季节二氧化硫浓度分别下降 3.4，1.8，2.8，10 微克/立方米，降幅达 17.99%，14.63%，16.87%，35.59%，全年平均下降 23.68%。2019 年 15 个城市（北京，河北廊坊、保定，山东烟台、威海、青岛、日照，河南郑州、驻马店、南阳、信阳、三门峡，陕西西安、咸阳、安康、延安）年均浓度降至 10 微克/立方米以下，比 2018 年增加 9 个，其中，北京、威海、信阳、驻马店 4 市 2019 年四个季度的二氧化硫平均浓度均降低至 10 微克/立方米以下。

根据图 24，“2+66”城市六年累积降幅平均达 67.6%，6 个城市累积降幅达 80%以上。山西各城市 2017 年以来二氧化硫浓度改善较多，2017 年至今 3 年的二氧化硫平均浓度年均降幅达到 30.1%，**但比较而言，山西二氧化硫浓度仍处于较高水平。**

根据表 6，二氧化硫的排名与 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 的排名出入较大，例如唐山市的颗粒物浓度较低，但是二氧化硫浓度在 2019 年位居第四位。朔州、大同、忻州位居 2019 年二氧化硫浓度最高的前三位，前 10 位中有 8 个城市位于山西，这也反映了山西二氧化硫浓度较高的问题。运城、延安、保定的排名下降较多，表明相对于其他城市的浓度降幅较大；汉中、商洛排名相对上升较多，表明相对其他城市有所恶化。

北京大学统计科学中心


石家庄
邢台
保定
邯郸
衡水
廊坊
沧州
唐山
秦皇岛
承德
张家口
北京
天津
菏泽
德州
济宁
济南
聊城
淄博
莱芜
泰安
滨州
安阳
鹤壁
焦作
开封
濮阳
新乡
郑州
洛阳
三门峡
漯河
南阳
长治
晋城
太原
阳泉
临汾
运城
晋中
吕梁
大同
忻州
朔州
春
夏
秋
冬

北京大学统计科学中心

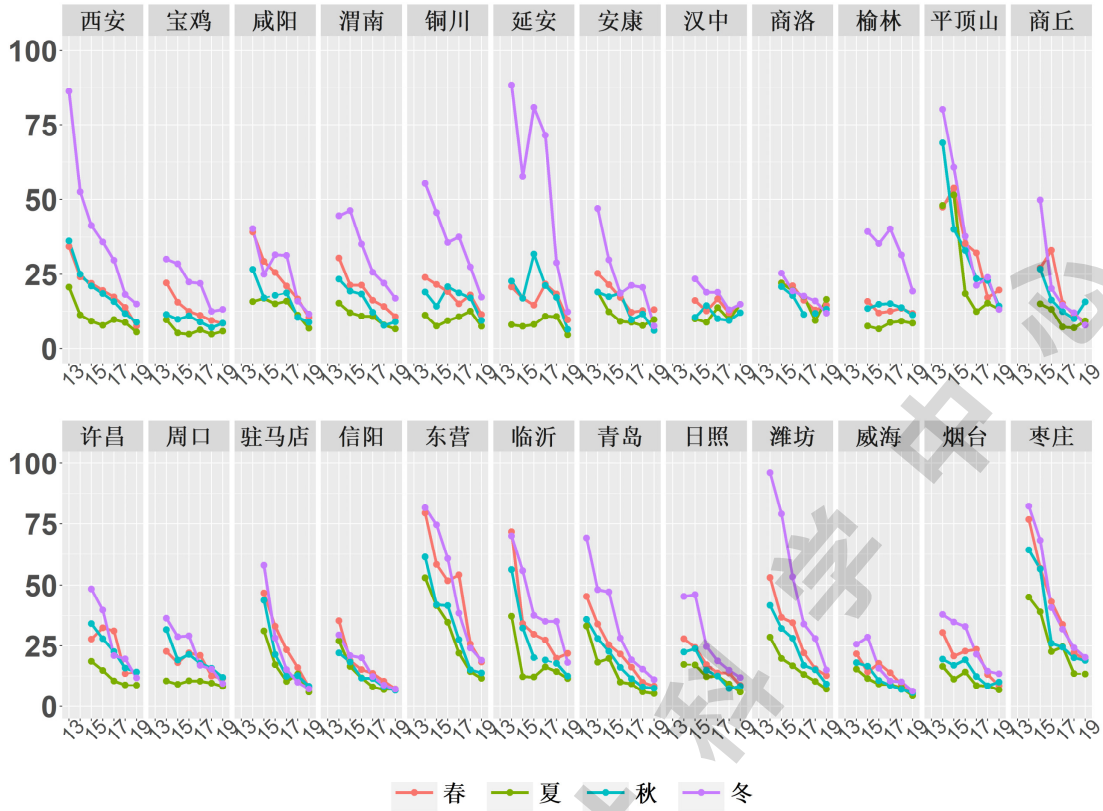
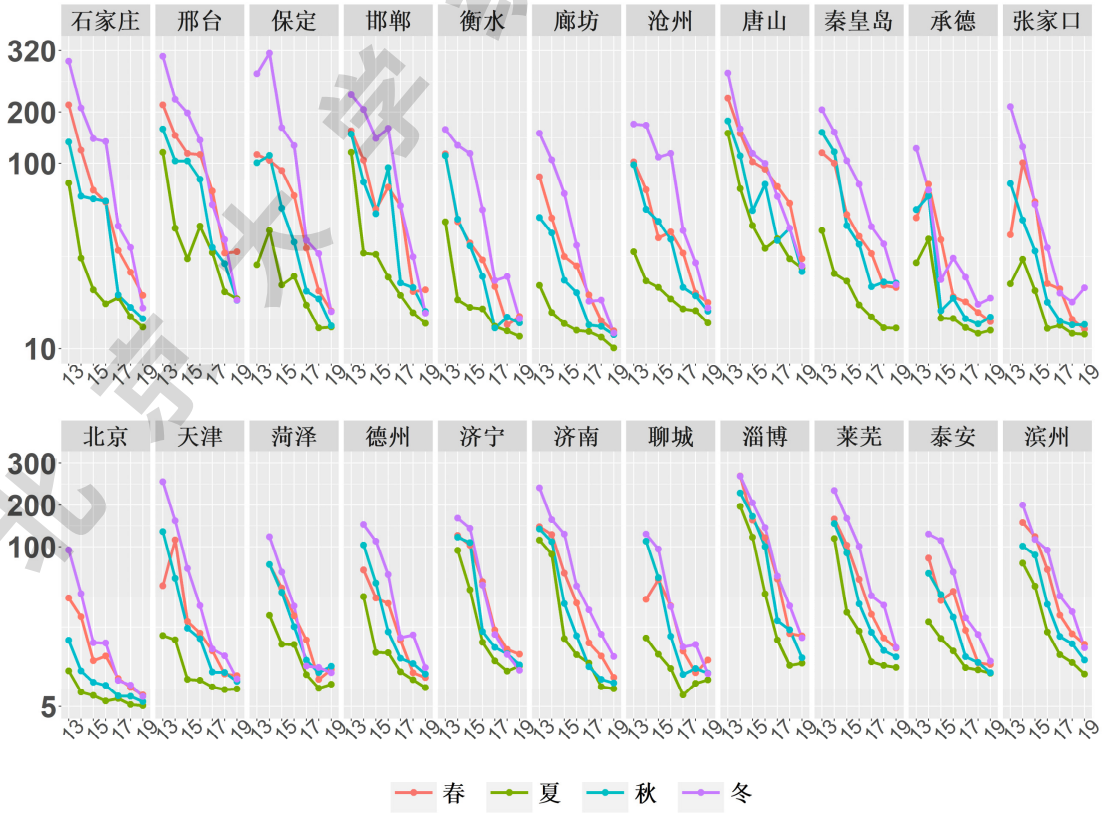


图 21：“2+66”城市气象调整后 2013 年至 2019 年二氧化硫季节平均浓度(微克/立方米)变化序列图

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



北京大学统计科学中心

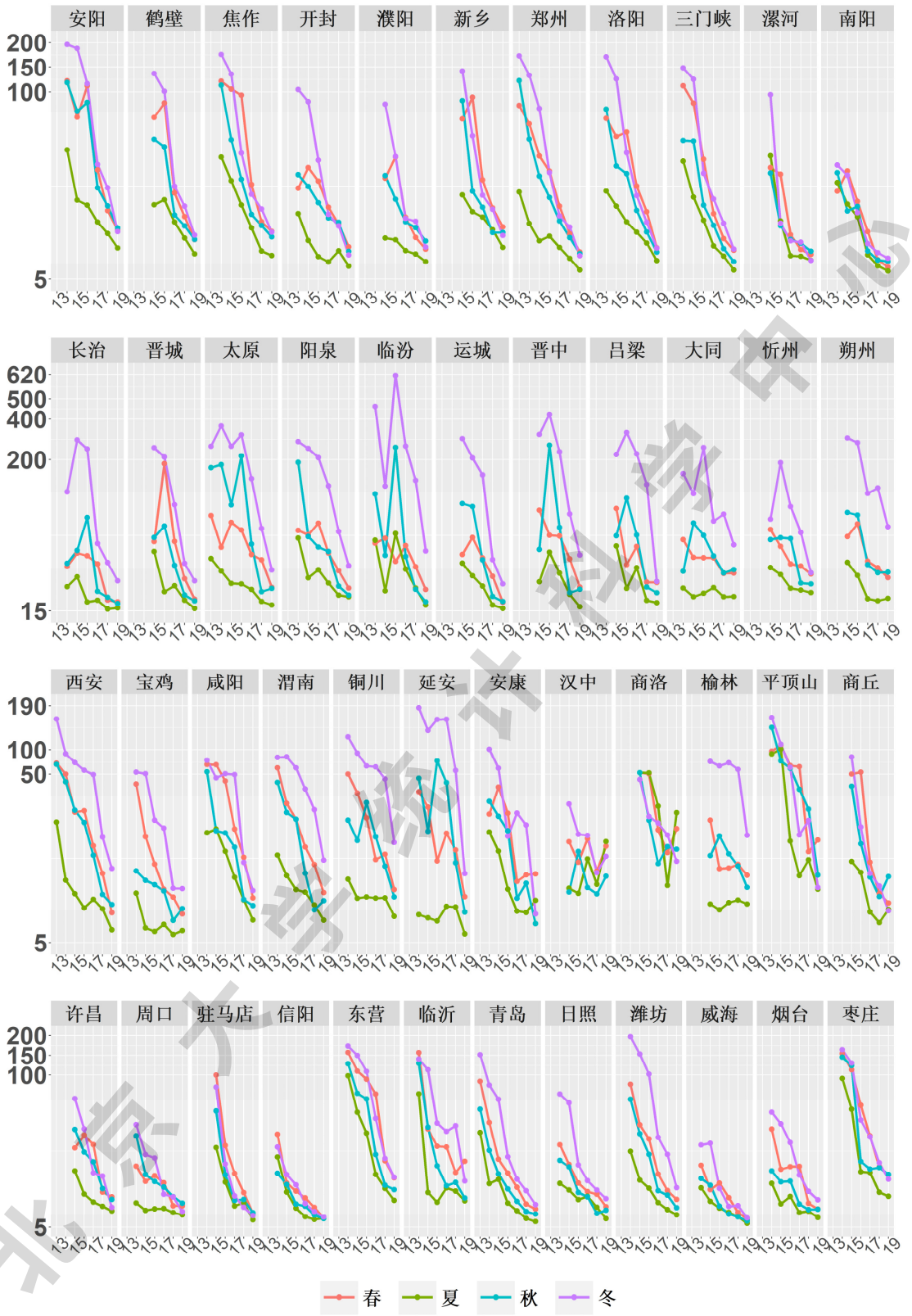


图 22：“2+66”城市气象调整后 2013 年至 2019 年二氧化硫季节 90%分位数浓度(微克/立方米)变化序列图

北京大学统计科学中心

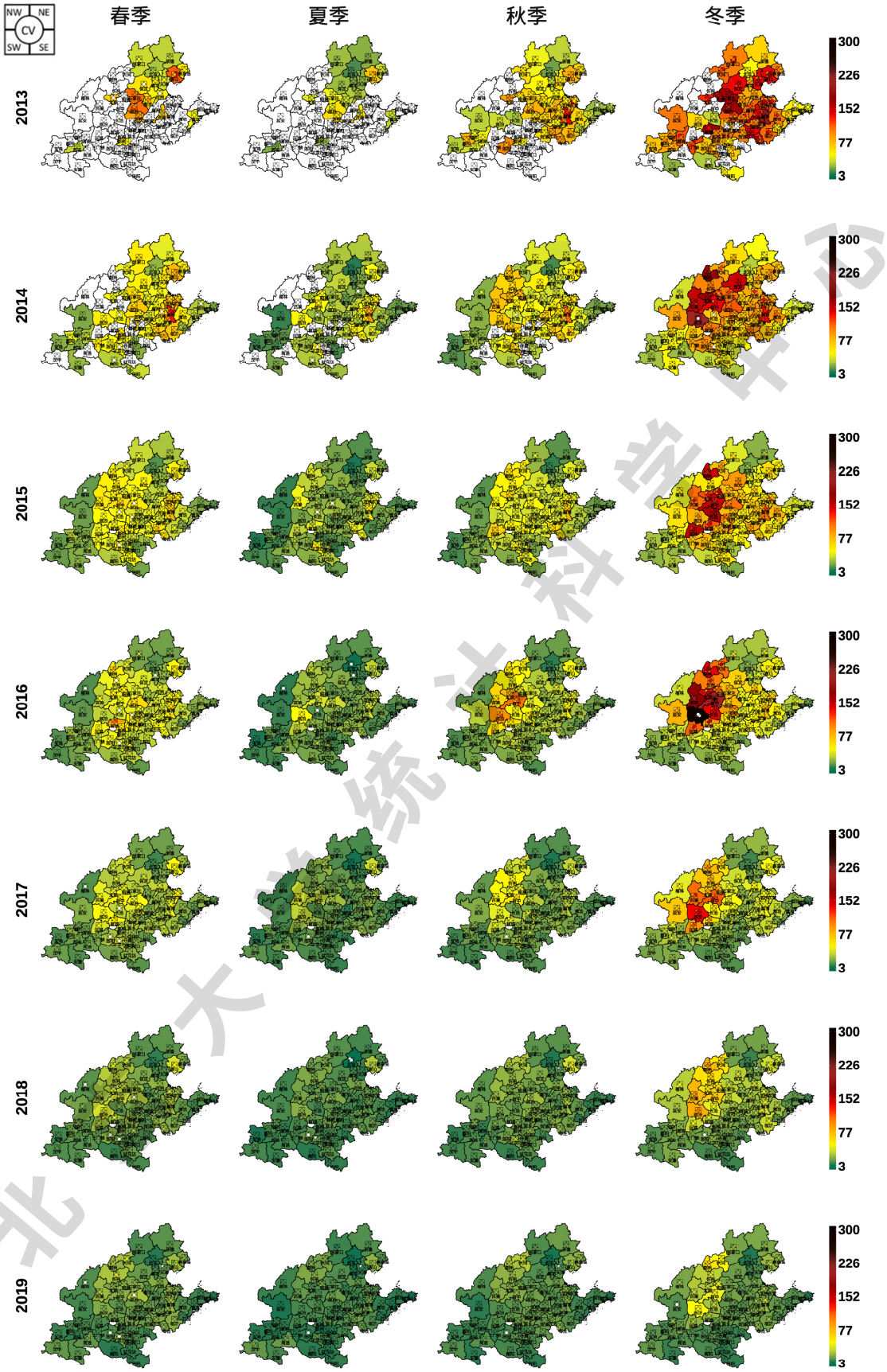


图 23：“2+66”城市气象调整后 2013 年至 2019 年二氧化硫季节平均浓度(微克/立方米)地图

（清晰图参见电子版；白色代表数据少，无法得到可靠结果）

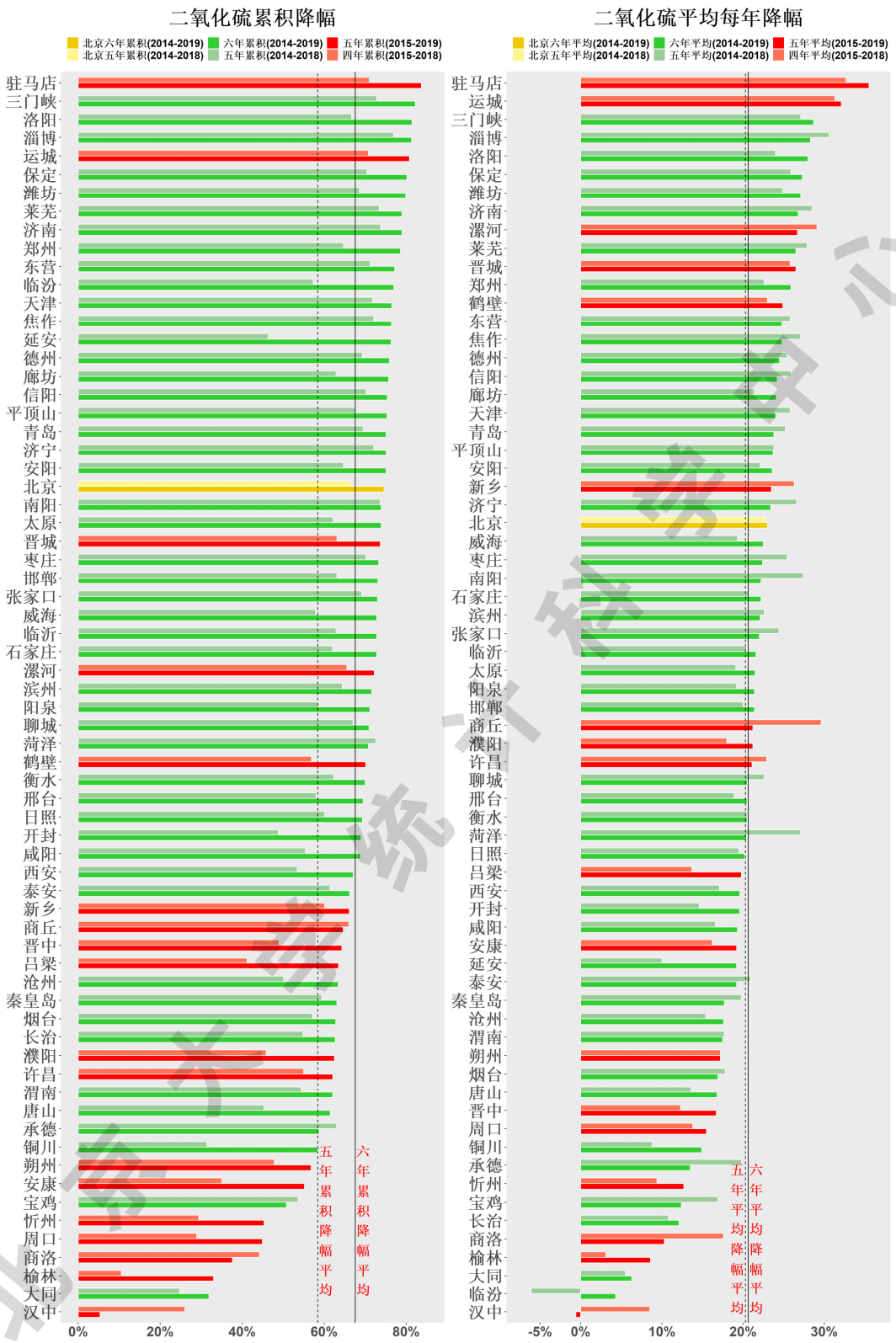


图 24：“2+66”城市气象调整后季节年二氧化硫过去六/五年或过去五/四年的累积降幅及平均降幅图

（红色表示因 2013 年部分季度数据缺失而计算的五/四年累积/平均降幅）

北京大学统计科学中心

城市	2013年	排名	2014年	排名	2015年	排名	2016年	排名	2017年	排名	2018年	排名	2019年	排名
朔州	NA		NA		72.4	(3)	69.4	(5)	39.7	(10)	37.8	(2)	31.3	(1)
大同	NA		45.4	(32)	45.6	(25)	53.3	(13)	39.2	(11)	34.2	(6)	30.9	(2)
忻州	NA		NA		47.7	(21)	54.8	(11)	42.7	(6)	33.7	(7)	26.1	(3)
唐山	101.6	(2)	64.4	(13)	47.1	(22)	45.0	(17)	40.2	(9)	35.2	(4)	24.8	(4)
晋中	NA		NA		68.3	(5)	98.2	(2)	62.5	(2)	34.8	(5)	24.4	(5)
吕梁	NA		NA		63.6	(7)	73.4	(4)	58.1	(3)	37.4	(3)	23.2	(6)
临汾	NA		95.1	(2)	45.5	(26)	117.7	(1)	63.5	(1)	40.6	(1)	21.9	(7)
阳泉	NA		75.5	(5)	59.3	(11)	57.3	(9)	45.5	(5)	31.3	(8)	21.8	(8)
淄博	NA		116.7	(1)	81.0	(1)	57.3	(10)	36.6	(12)	26.9	(11)	21.8	(9)
太原	80.2	(6)	80.1	(4)	64.8	(6)	73.7	(3)	42.6	(7)	30.3	(9)	20.9	(10)
邢台	103.3	(1)	66.5	(11)	59.7	(10)	54.5	(12)	36.4	(13)	27.9	(10)	20.3	(11)
秦皇岛	64.5	(8)	52.9	(23)	35.7	(40)	29.8	(36)	24.2	(29)	21.5	(20)	19.5	(12)
滨州	NA		67.5	(9)	50.2	(19)	38.3	(23)	27.8	(22)	24.0	(12)	19.2	(13)
莱芜	NA		88.5	(3)	57.1	(12)	40.8	(20)	28.0	(21)	23.5	(14)	18.6	(14)
枣庄	NA		67.1	(10)	55.1	(13)	33.2	(31)	28.7	(19)	20.0	(24)	17.9	(15)
济宁	NA		70.3	(7)	60.3	(9)	35.9	(26)	24.5	(27)	19.6	(28)	17.5	(16)
沧州	52.9	(12)	47.3	(29)	37.6	(37)	38.3	(22)	29.1	(18)	23.6	(13)	17.3	(17)
长治	NA		45.8	(31)	68.6	(4)	60.2	(8)	29.2	(17)	20.7	(22)	17.1	(18)
新乡	NA		NA		50.1	(20)	36.2	(25)	25.5	(25)	20.0	(25)	17.0	(19)
晋城	NA		NA		63.5	(8)	64.8	(6)	41.8	(8)	23.4	(15)	16.7	(20)
泰安	NA		48.2	(28)	40.4	(34)	34.5	(27)	23.3	(33)	18.6	(32)	16.3	(21)
石家庄	95.7	(3)	59.5	(17)	44.4	(29)	42.5	(18)	27.3	(23)	22.6	(16)	16.2	(22)
临沂	NA		58.8	(18)	33.6	(41)	24.9	(45)	24.5	(26)	21.8	(18)	16.0	(23)
东营	NA		68.8	(8)	54.1	(14)	47.2	(16)	35.5	(14)	19.8	(27)	15.7	(24)
承德	38.5	(17)	37.8	(35)	19.6	(61)	19.5	(57)	16.3	(51)	14.0	(46)	15.6	(25)
安阳	NA		62.6	(14)	53.9	(15)	47.4	(15)	28.6	(20)	22.1	(17)	15.6	(26)
平顶山	NA		61.2	(16)	51.5	(16)	31.2	(35)	22.4	(34)	19.8	(26)	15.1	(27)
邯郸	83.4	(5)	55.8	(19)	45.2	(27)	49.9	(14)	30.4	(16)	20.6	(23)	15.0	(28)
焦作	NA		62.3	(15)	50.9	(17)	36.7	(24)	24.2	(28)	17.4	(34)	14.7	(29)
菏泽	NA		50.3	(26)	39.1	(36)	32.3	(33)	19.5	(42)	13.8	(49)	14.7	(30)
聊城	NA		50.6	(25)	40.9	(33)	29.2	(38)	16.6	(48)	16.7	(41)	14.7	(31)
保定	66.8	(7)	71.6	(6)	50.7	(18)	39.8	(21)	25.6	(24)	21.2	(21)	14.2	(32)
汉中	NA		NA		15.0	(66)	13.7	(65)	14.9	(57)	11.1	(61)	14.2	(33)
运城	NA		NA		74.0	(2)	63.0	(7)	47.5	(4)	21.6	(19)	14.2	(34)
商洛	NA		NA		22.6	(56)	19.5	(56)	15.7	(54)	12.6	(58)	14.1	(35)
济南	85.2	(4)	64.9	(12)	45.7	(24)	33.7	(29)	24.0	(31)	17.0	(37)	13.6	(36)
德州	NA		55.1	(20)	39.5	(35)	31.9	(34)	21.3	(38)	16.9	(40)	13.3	(37)
鹤壁	NA		NA		44.1	(30)	41.3	(19)	24.1	(30)	19.0	(29)	13.2	(38)
榆林	NA		NA		19.1	(62)	17.2	(62)	19.2	(43)	17.1	(36)	12.8	(39)
张家口	51.5	(13)	46.0	(30)	29.2	(47)	18.6	(59)	14.9	(56)	14.2	(45)	12.4	(40)
衡水	61.6	(10)	41.4	(34)	37.0	(39)	27.7	(41)	16.6	(47)	15.6	(42)	12.4	(41)
许昌	NA		NA		32.2	(44)	28.7	(40)	21.3	(37)	14.5	(44)	12.2	(42)
濮阳	NA		NA		31.2	(45)	26.9	(42)	18.7	(44)	16.9	(39)	11.7	(43)
天津	63.7	(9)	49.0	(27)	26.2	(51)	22.1	(50)	15.8	(53)	13.8	(48)	11.5	(44)
铜川	NA		27.4	(47)	22.3	(57)	21.3	(52)	20.5	(39)	18.8	(31)	11.4	(45)
潍坊	NA		54.8	(21)	41.9	(32)	33.2	(30)	21.5	(36)	17.2	(35)	11.0	(46)
渭南	NA		28.5	(43)	24.8	(53)	21.5	(51)	16.2	(52)	13.0	(54)	10.8	(47)
商丘	NA		NA		29.7	(46)	20.7	(54)	12.4	(64)	10.1	(62)	10.5	(48)
开封	NA		33.2	(38)	32.7	(42)	26.3	(43)	18.3	(45)	17.0	(38)	10.3	(49)
周口	NA		25.3	(49)	18.7	(63)	20.8	(53)	16.6	(49)	13.3	(51)	10.3	(50)
漯河	NA		NA		37.1	(38)	23.0	(46)	14.8	(58)	12.9	(56)	10.3	(51)
洛阳	NA		54.7	(22)	43.7	(31)	33.1	(32)	23.6	(32)	18.2	(33)	10.2	(52)
烟台	NA		26.1	(48)	20.9	(59)	22.3	(49)	16.5	(50)	11.2	(60)	9.7	(53)
咸阳	NA		30.5	(41)	22.1	(58)	22.6	(47)	21.8	(35)	13.6	(50)	9.5	(54)
郑州	56.7	(11)	43.9	(33)	32.4	(43)	29.2	(39)	20.4	(40)	15.5	(43)	9.4	(55)
西安	44.4	(15)	28.3	(45)	23.4	(55)	20.5	(55)	18.2	(46)	13.2	(53)	9.3	(56)
安康	NA		27.6	(46)	20.3	(60)	15.9	(63)	13.0	(63)	13.2	(52)	9.1	(57)
三门峡	NA		50.7	(24)	45.8	(23)	29.5	(37)	19.6	(41)	13.8	(47)	9.0	(58)
宝鸡	NA		18.3	(52)	14.8	(67)	12.7	(67)	12.1	(65)	8.5	(65)	9.0	(59)
日照	NA		28.3	(44)	27.8	(49)	17.3	(61)	14.4	(59)	11.3	(59)	8.7	(60)
廊坊	43.9	(16)	34.2	(37)	24.1	(54)	18.5	(60)	13.6	(61)	12.7	(57)	8.3	(61)
南阳	NA		31.8	(40)	27.3	(50)	22.4	(48)	13.5	(62)	8.4	(67)	8.3	(62)
延安	NA		35.0	(36)	24.8	(52)	33.8	(28)	31.3	(15)	18.8	(30)	8.3	(63)
青岛	45.9	(14)	32.1	(39)	28.8	(48)	19.0	(58)	14.0	(60)	9.8	(63)	8.0	(64)
驻马店	NA		NA		44.9	(28)	25.0	(44)	15.3	(55)	13.0	(55)	7.3	(65)
信阳	NA		28.5	(42)	18.7	(64)	14.7	(64)	11.4	(66)	8.5	(64)	7.0	(66)
威海	NA		20.2	(50)	17.8	(65)	13.4	(66)	10.5	(67)	8.5	(66)	5.5	(67)
北京	25.8	(18)	18.5	(51)	11.5	(68)	10.7	(68)	7.0	(68)	6.2	(68)	4.7	(68)

表 6：“2+66”城市气象调整后 2013 年至 2019 年二氧化硫季节年平均浓度(微克/立方米)年际变化表

（浓度列底纹由红到绿表示各城市季节年平均浓度由大到小；排名列按浓度自大到小排名，排名位于前/中/后 1/3，分别用红/黄/绿色的圆点标记）

（四）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[20]，这也是其往往以毫克/立方米而非微克/立方米计量的原因。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；长期暴露于中高浓度的一氧化碳中则会增加心脏病风险。作为大气污染物的一氧化碳，其主要危害在于参与光化学烟雾的形成，其在大气中的“存活”时间为一到两个月，可以在区域内长距离的传输，造成全球性的环境问题。

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 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 25 可以发现：**一氧化碳季节分布的主要特征是冬季浓度最高，春秋季节次之，夏季浓度最低。**这个特征与 $PM_{2.5}$、PM_{10}、二氧化硫和二氧化氮相一致。此外，不同季节间的浓度差异也有比较明显的地理特征，这主要表现在冬季与其它季节浓度的差异上。河北沿太行山五市（保定、石家庄、邢台、邯郸、衡水）和秦皇岛，山东菏泽，河南鹤壁、焦作，山西省临汾、运城、晋中、忻州、大同 5 市，陕西汉中、渭南、延安，冬季一氧化碳的浓度显著高于其它三个季节，平均浓度差可达 1～2 毫克/立方米。大部分城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，且随着近年来污染治理的进一步推进，这一浓度差有所缩小。以山西晋中为例，其冬季与春夏秋季一氧化碳的平均浓度差从 2015 年的 1.66 毫克/立方米逐年下降至 2018 年的 0.72 毫克/立方米。此外，唐山、淄博、莱芜和晋城全年都处于较高水平，相较之下四季差异不大，表明其工业生产的排放量过高，例如唐山 2018 年冬季一氧化碳平均浓度达 2.05 毫克/立方米，相比之下当年春夏秋季为 1.79 毫克/立方米、1.78 毫克/立方米和 1.81 毫克/立方米，差别并不大。

北京大学统计科学中心

- **区域特征**

根据图 25 和图 27，一氧化碳区域划分近年发生变化。2015 年前以河北唐山、保定、邢台、邯郸四市，山西吕梁、临汾二市和延安为高浓度区域；2015 年后则以河北、河南沿太行山城市及唐山、秦皇岛，以及山西临汾周边城市和大同为高浓度区域；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。**根据表 8，高浓度区域 2019 年全年平均一氧化碳浓度大致高于 1.2 毫克/立方米。

- **极端污染**

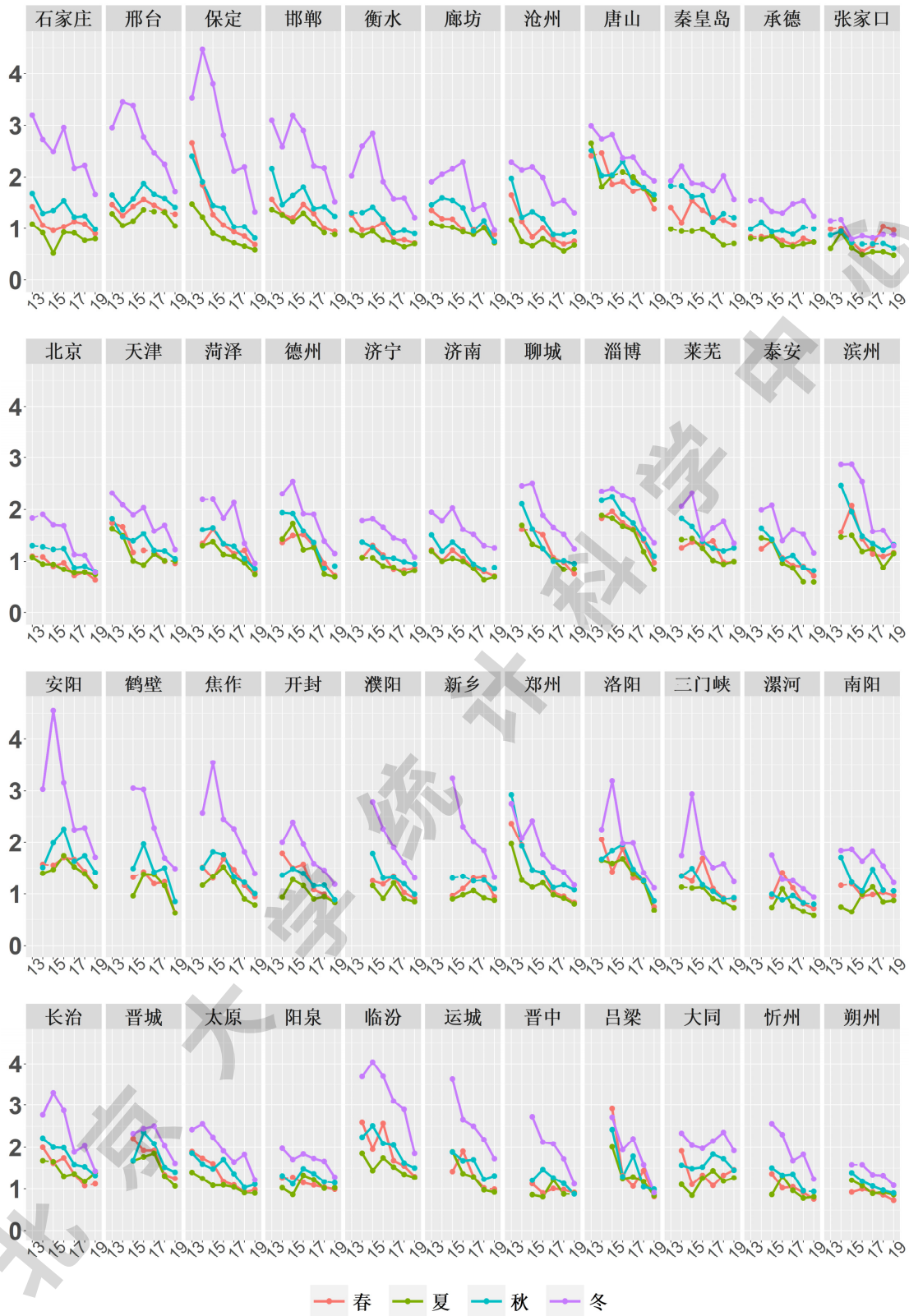
为说明各个季节一氧化碳浓度的极端污染情况，我们也计算了经过气象调整的 90%分位数浓度，它们代表了最严重的 10%污染情况。图 26 展示研究区域城市 2013 年以来经气象调整的一氧化碳浓度 90%分位数随时间变化的情况以及各季节的时间序列。各城市一氧化碳浓度 90%分位数角度仍具有同均值浓度类似的区域和季节特征。河北省太行山东部五市及唐山、河南安阳、洛阳，山西长治、临汾、运城仍为一氧化碳高浓度区域，尤其在冬季污染最为严重。2019 年冬季（2019 年 12 月-2020 年 2 月），由于新冠肺炎疫情导致污染排放减少，“2+66”城市的冬季 90%分位数均出现较为显著的下降，高于 4 毫克/立方米的城市仅有大同，而高于 3 毫克/立方米的城市有 9 个，污染较为严重的城市仍集中在河北河南太行山沿线地区和山西中部、北部城市。

从变化趋势上看，**京津冀鲁豫地区一氧化碳浓度 90%分位数基本建立起显著的下降趋势，**而山西大同的污染情况出现反复波动，甚至近年来还出现一些反弹。冬季 90%分位数在城市之间的差异比较大，2018 年 90%分位数高于 4 毫克/立方米的城市还有 6 个，高于 3 毫克/立方米的有 18 个，主要包括河北太行山沿线（邢台、石家庄、邯郸、保定），河南太行山沿线（安阳、鹤壁、焦作、新乡），山西中部（临汾、晋城、运城、长治、太原）和北部（大同、忻州），以及唐山、秦皇岛、延安等散在的资源型城市。

- **变化趋势**

相比于 2018 年，2019 年“2+66”城市在春、夏、秋、冬四个季节一氧化碳浓度分别下降 0.14，0.07，0.11，0.34 微克/立方米，降幅达 14.00%，8.14%，10.28%，21.52%，全年平均下降 15.04%。

北京大学统计科学中心


石家庄
邢台
保定
邯郸
衡水
廊坊
沧州
唐山
秦皇岛
承德
张家口
北京
天津
菏泽
德州
济宁
济南
聊城
淄博
莱芜
泰安
滨州
安阳
鹤壁
焦作
开封
濮阳
新乡
郑州
洛阳
三门峡
漯河
南阳
长治
晋城
太原
阳泉
临汾
运城
晋中
吕梁
大同
忻州
朔州
0
1
2
3
4
13
15
17
19
春
夏
秋
冬

北京大学统计科学中心

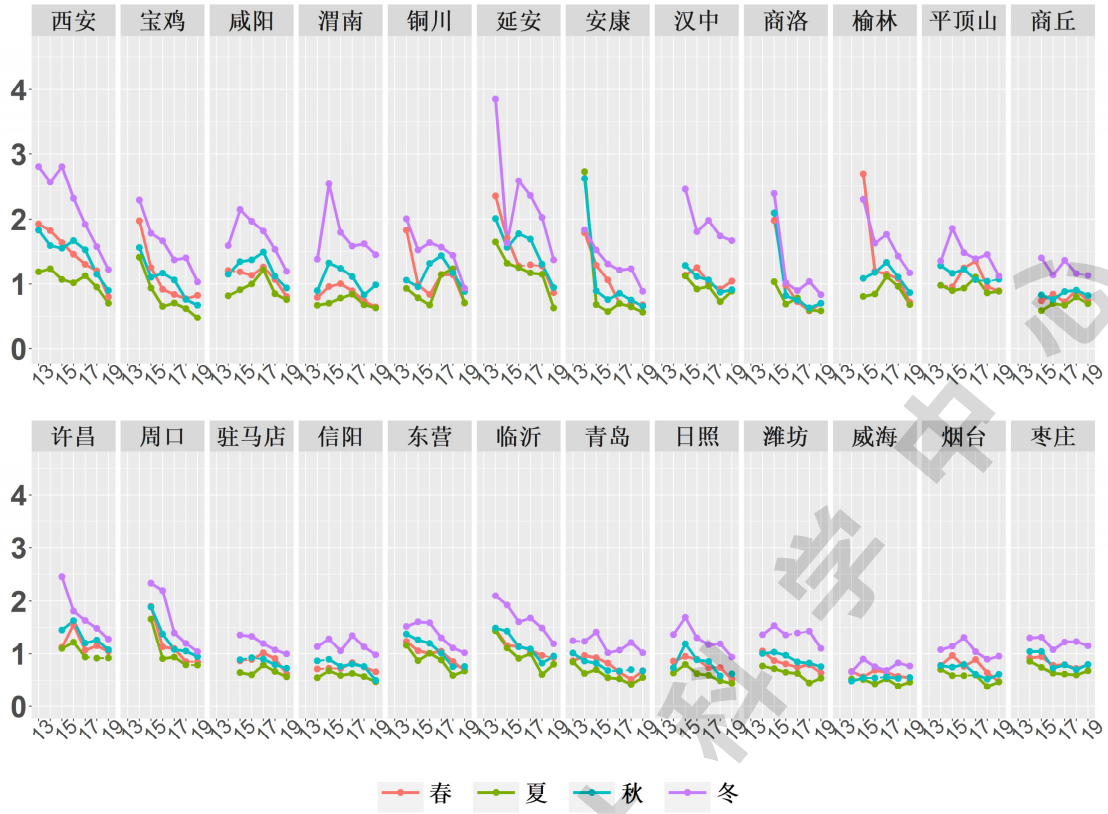
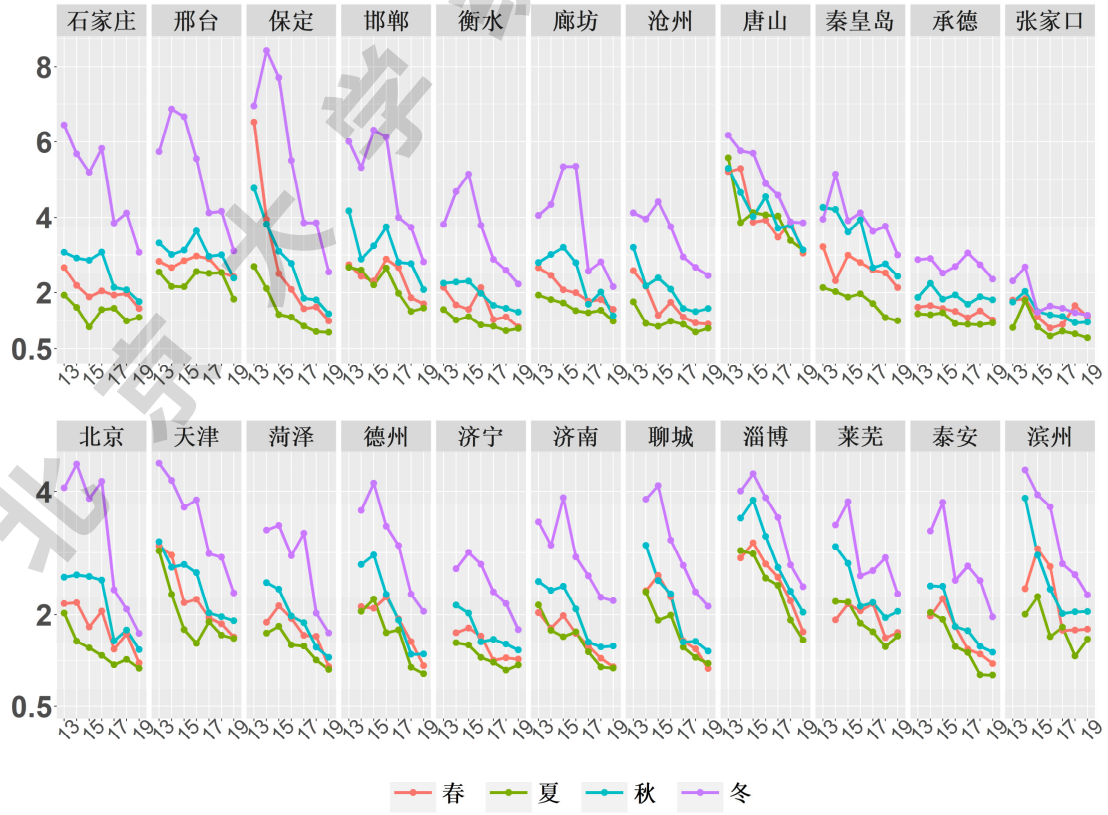


图 25：“2+66”城市气象调整后 2013 年至 2019 年一氧化碳季节平均浓度(毫克/立方米)变化序列图

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



北京大学统计科学中心

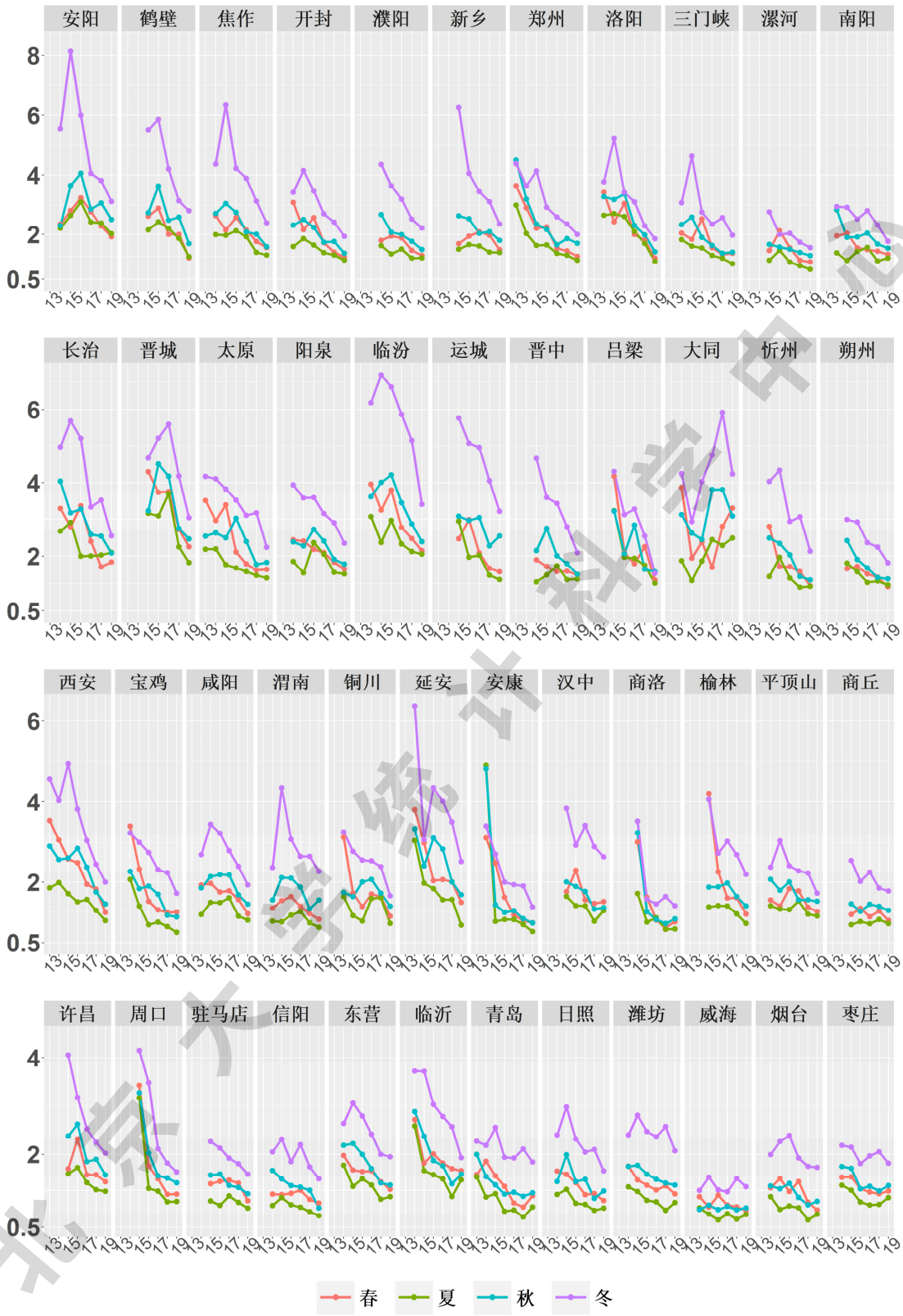


图 26：“2+66”城市气象调整后 2013 年至 2019 年一氧化碳季节 90%分位数浓度(毫克/立方米)变化序列图

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

北京大学统计科学中心

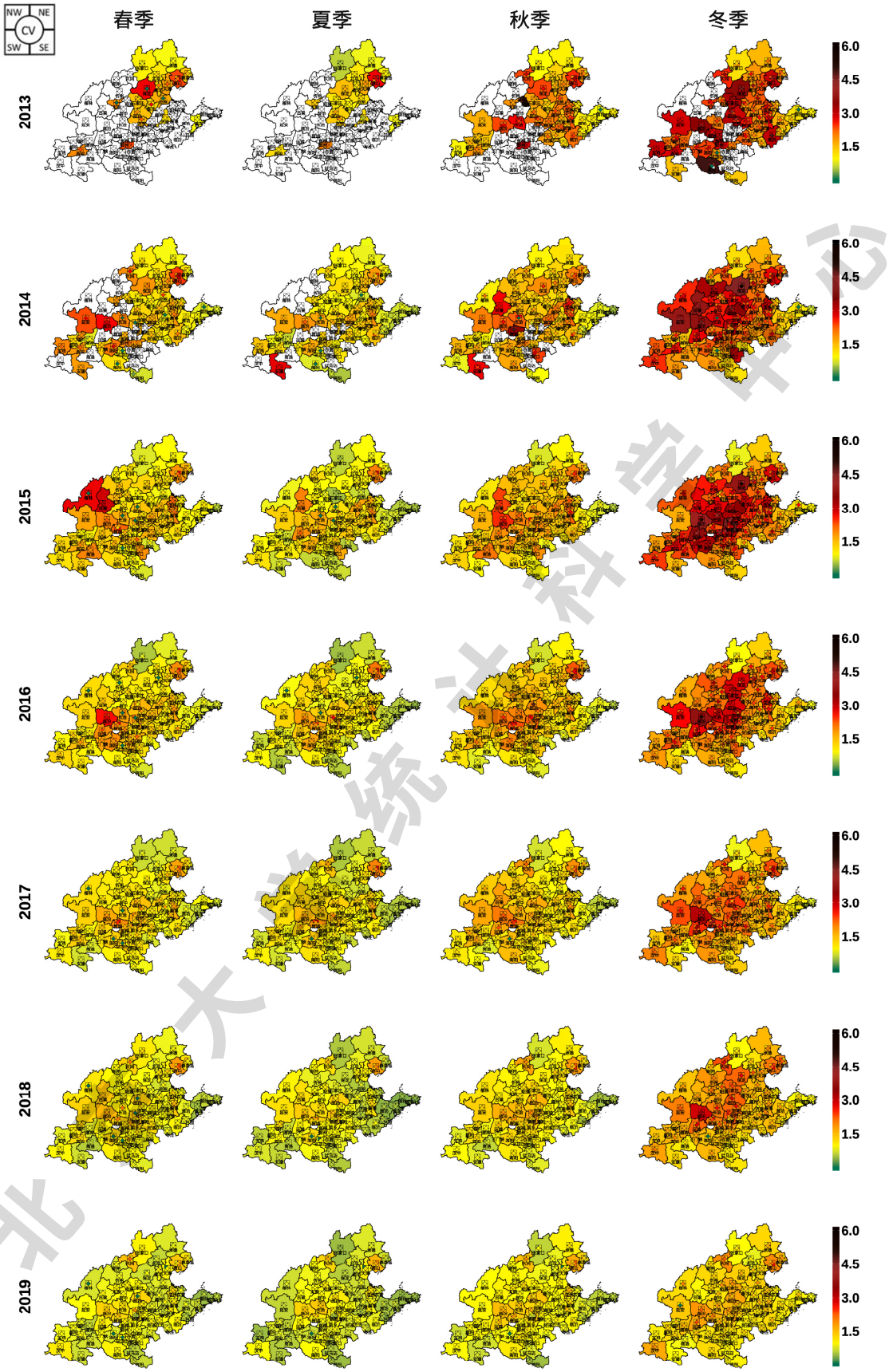


图 27：“2+66”城市 2013 年至 2019 年气象调整后一氧化碳季节平均浓度(毫克/立方米)地图

（清晰图参见电子版；白色代表数据少，无法得到可靠结果）

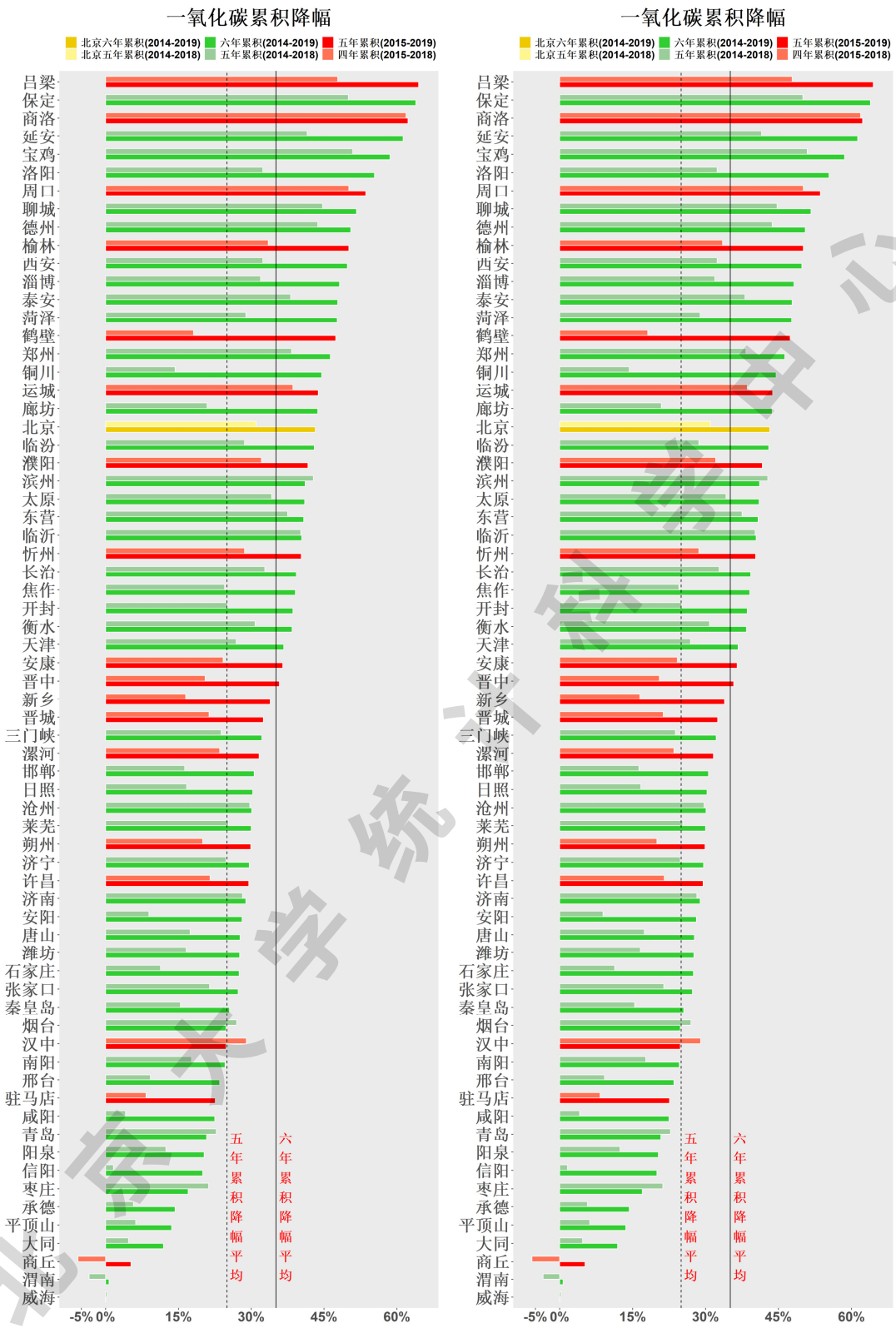


图 28：“2+66”城市气象调整后季节年一氧化碳过去六/五年或过去五/四年的累积降幅及平均降幅图

（红色表示因 2013 年部分季度数据缺失而计算的五/四年累积/平均降幅）

北京大学统计科学中心

城市	2013年	排名	2014年	排名	2015年	排名	2016年	排名	2017年	排名	2018年	排名	2019年	排名
唐山	2.64	(1)	2.26	(4)	2.19	(5)	2.17	(3)	2.00	(3)	1.87	(1)	1.63	(1)
大同	NA		1.73	(18)	1.37	(43)	1.52	(21)	1.62	(9)	1.65	(4)	1.52	(2)
临汾	NA		2.59	(1)	2.48	(2)	2.52	(1)	2.08	(2)	1.85	(2)	1.48	(3)
邢台	1.84	(9)	1.78	(15)	1.89	(14)	1.90	(8)	1.73	(6)	1.62	(5)	1.37	(4)
安阳	NA		1.88	(11)	2.39	(3)	2.22	(2)	1.77	(5)	1.71	(3)	1.35	(5)
晋城	NA		NA		1.97	(11)	2.12	(4)	2.09	(1)	1.55	(6)	1.33	(6)
长治	NA		2.16	(6)	2.14	(6)	1.97	(5)	1.54	(13)	1.45	(7)	1.31	(7)
运城	NA		NA		2.20	(4)	1.90	(8)	1.69	(7)	1.35	(12)	1.24	(8)
滨州	NA		2.09	(7)	2.10	(8)	1.66	(14)	1.32	(29)	1.20	(25)	1.23	(9)
莱芜	NA		1.64	(22)	1.70	(24)	1.34	(37)	1.33	(28)	1.23	(21)	1.15	(10)
邯郸	2.05	(4)	1.65	(21)	1.79	(17)	1.87	(11)	1.50	(15)	1.38	(11)	1.15	(11)
秦皇岛	1.54	(11)	1.53	(26)	1.50	(36)	1.46	(25)	1.23	(35)	1.29	(16)	1.14	(12)
汉中	NA		NA		1.50	(35)	1.27	(39)	1.26	(33)	1.07	(40)	1.13	(13)
阳泉	NA		1.39	(33)	1.24	(50)	1.45	(28)	1.35	(25)	1.22	(23)	1.11	(14)
石家庄	1.85	(8)	1.50	(28)	1.33	(46)	1.62	(16)	1.36	(23)	1.33	(14)	1.09	(15)
许昌	NA		NA		1.53	(34)	1.55	(18)	1.21	(36)	1.20	(24)	1.08	(16)
淄博	NA		2.06	(8)	2.11	(7)	1.90	(7)	1.79	(4)	1.41	(9)	1.07	(17)
天津	1.88	(7)	1.68	(20)	1.37	(44)	1.43	(31)	1.28	(30)	1.23	(20)	1.06	(18)
新乡	NA		NA		1.60	(28)	1.43	(30)	1.41	(21)	1.34	(13)	1.06	(19)
太原	1.89	(6)	1.78	(16)	1.60	(29)	1.47	(23)	1.28	(30)	1.17	(29)	1.05	(20)
焦作	NA		1.69	(19)	2.00	(10)	1.85	(12)	1.58	(11)	1.28	(18)	1.03	(21)
南阳	NA		1.36	(34)	1.23	(51)	1.16	(52)	1.36	(24)	1.12	(35)	1.03	(22)
濮阳	NA		NA		1.74	(20)	1.42	(32)	1.45	(19)	1.18	(26)	1.02	(23)
平顶山	NA		1.15	(41)	1.22	(52)	1.23	(42)	1.23	(34)	1.08	(39)	0.99	(24)
郑州	2.50	(3)	1.81	(13)	1.62	(27)	1.45	(26)	1.16	(41)	1.12	(37)	0.97	(25)
临沂	NA		1.62	(23)	1.40	(40)	1.20	(48)	1.21	(36)	0.97	(48)	0.97	(26)
延安	NA		2.47	(2)	1.56	(32)	1.72	(13)	1.63	(8)	1.44	(8)	0.96	(27)
聊城	NA		1.97	(9)	1.77	(18)	1.47	(23)	1.19	(39)	1.09	(38)	0.95	(28)
晋中	NA		NA		1.48	(38)	1.33	(38)	1.39	(22)	1.17	(28)	0.95	(29)
三门峡	NA		1.39	(32)	1.70	(25)	1.45	(27)	1.14	(42)	1.06	(41)	0.95	(30)
忻州	NA		NA		1.57	(31)	1.49	(22)	1.26	(32)	1.12	(36)	0.94	(31)
开封	NA		1.52	(27)	1.66	(26)	1.53	(19)	1.18	(40)	1.14	(34)	0.93	(32)
济宁	NA		1.32	(35)	1.37	(45)	1.19	(49)	1.06	(47)	1.00	(44)	0.93	(33)
渭南	NA		0.94	(46)	1.38	(42)	1.21	(45)	1.11	(45)	0.97	(50)	0.93	(34)
承德	1.04	(16)	1.08	(42)	1.00	(61)	0.93	(60)	0.93	(56)	1.02	(42)	0.93	(35)
咸阳	NA		1.19	(40)	1.40	(41)	1.37	(36)	1.45	(18)	1.14	(33)	0.92	(36)
沧州	1.77	(10)	1.31	(37)	1.25	(49)	1.25	(40)	0.96	(55)	0.92	(52)	0.92	(37)
西安	1.94	(5)	1.81	(14)	1.77	(19)	1.62	(15)	1.47	(16)	1.22	(22)	0.91	(38)
周口	NA		NA		1.94	(12)	1.40	(34)	1.13	(44)	0.97	(48)	0.90	(39)
鹤壁	NA		NA		1.71	(23)	1.95	(6)	1.57	(12)	1.40	(10)	0.90	(40)
朔州	NA		NA		1.27	(47)	1.21	(46)	1.05	(48)	1.02	(42)	0.89	(41)
吕梁	NA		NA		2.51	(1)	1.45	(29)	1.58	(10)	1.31	(15)	0.89	(42)
济南	1.47	(12)	1.25	(39)	1.42	(39)	1.22	(43)	1.05	(48)	0.90	(54)	0.89	(43)
衡水	1.39	(14)	1.44	(31)	1.56	(33)	1.25	(41)	1.00	(52)	0.99	(45)	0.88	(44)
德州	NA		1.76	(17)	1.92	(13)	1.56	(17)	1.46	(17)	0.99	(46)	0.87	(45)
榆林	NA		NA		1.72	(21)	1.21	(44)	1.34	(26)	1.15	(31)	0.86	(46)
保定	2.52	(2)	2.37	(3)	1.86	(16)	1.52	(20)	1.20	(38)	1.18	(27)	0.85	(47)
枣庄	NA		1.03	(44)	1.01	(60)	0.80	(64)	0.85	(62)	0.81	(61)	0.85	(47)
洛阳	NA		1.91	(10)	2.01	(9)	1.88	(10)	1.54	(14)	1.29	(16)	0.85	(49)
商丘	NA		NA		0.89	(65)	0.86	(63)	0.91	(57)	0.94	(51)	0.85	(50)
菏泽	NA		1.61	(24)	1.71	(22)	1.41	(33)	1.42	(20)	1.15	(32)	0.84	(51)
廊坊	1.46	(13)	1.47	(29)	1.48	(37)	1.40	(35)	1.05	(50)	1.17	(30)	0.83	(52)
泰安	NA		1.58	(25)	1.57	(30)	1.12	(53)	1.13	(43)	0.98	(47)	0.82	(53)
铜川	NA		1.46	(30)	1.06	(58)	1.12	(53)	1.33	(27)	1.25	(19)	0.81	(54)
东营	NA		1.32	(36)	1.20	(53)	1.20	(47)	1.06	(46)	0.83	(60)	0.78	(55)
潍坊	NA		1.05	(43)	1.04	(59)	0.94	(56)	0.90	(58)	0.87	(56)	0.76	(56)
漯河	NA		NA		1.11	(56)	1.17	(51)	1.03	(51)	0.85	(58)	0.76	(57)
宝鸡	NA		1.81	(12)	1.27	(48)	1.10	(55)	1.00	(53)	0.89	(55)	0.75	(58)
北京	1.33	(15)	1.31	(38)	1.20	(54)	1.19	(50)	0.88	(60)	0.90	(53)	0.74	(59)
张家口	0.91	(18)	1.01	(45)	0.72	(67)	0.65	(67)	0.69	(67)	0.80	(63)	0.74	(60)
青岛	0.99	(17)	0.92	(47)	0.96	(62)	0.77	(66)	0.73	(66)	0.71	(66)	0.73	(61)
驻马店	NA		NA		0.94	(63)	0.94	(57)	0.97	(54)	0.86	(57)	0.73	(62)
商洛	NA		NA		1.88	(15)	0.88	(61)	0.79	(64)	0.72	(65)	0.71	(63)
安康	NA		2.25	(5)	1.10	(57)	0.93	(58)	0.87	(61)	0.83	(59)	0.70	(64)
信阳	NA		0.81	(50)	0.89	(64)	0.78	(65)	0.90	(58)	0.80	(62)	0.65	(65)
日照	NA		0.90	(48)	1.16	(55)	0.93	(59)	0.84	(63)	0.75	(64)	0.63	(66)
烟台	NA		0.83	(49)	0.86	(66)	0.86	(62)	0.78	(65)	0.61	(67)	0.63	(67)
威海	NA		0.58	(51)	0.63	(68)	0.60	(68)	0.60	(68)	0.58	(68)	0.58	(68)

表 8：“2+66”城市气象调整后 2013 年至 2019 年一氧化碳季节年平均浓度(微克/立方米)年际变化表

（浓度列底纹由红到绿表示各城市季节年平均浓度由大到小；排名列按浓度自大到小排名，排名位于前/中/后 1/3，分别用红/黄/绿色的圆点标记）

从图 28 五年累积降幅来看，“2+66”城市累积降幅平均值达 35.1%；“2+66”城市较其初始年份均有改善；吕梁累积降幅最高，达 64.5%；吕梁、保定、商洛、延安四市降幅超过 60%，宝鸡、洛阳、周口、聊城、德州、榆林六市居于 50%～60%；27 个城市累积降幅大于 40%。从年平均降幅来看：降幅平均值为 8.66%，威海、渭南年平均降幅为负。整体来看，一氧化碳改善显著，但低于二氧化硫的改善程度。

如表 8 所示，在各城市一氧化碳的 2019 年平均浓度排名变化中，唐山、大同、临汾、邢台、安阳、晋城、长治位列前七，与去年前七位的城市范围完全相同。鹤壁、吕梁、洛阳和铜川相较上年排名下降较多，表明其相较其他城市改善较明显；滨州、临沂、汉中、渭南相较上年排名上升较多，表明其相较其他城市有恶化倾向。

（五）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，在大气中会转化为 $PM_{2.5}$ 的重要组分之一的硝酸盐，对人体的呼吸系统有一定损害。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”。二氧化氮还可直接影响人的身体健康，伤害呼吸道，短期暴露于 NO_2 会引起呼吸系统疾病。

表 9：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	

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污染物（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

北京大学统计科学中心

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 9 所示，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）。

- 季节效应

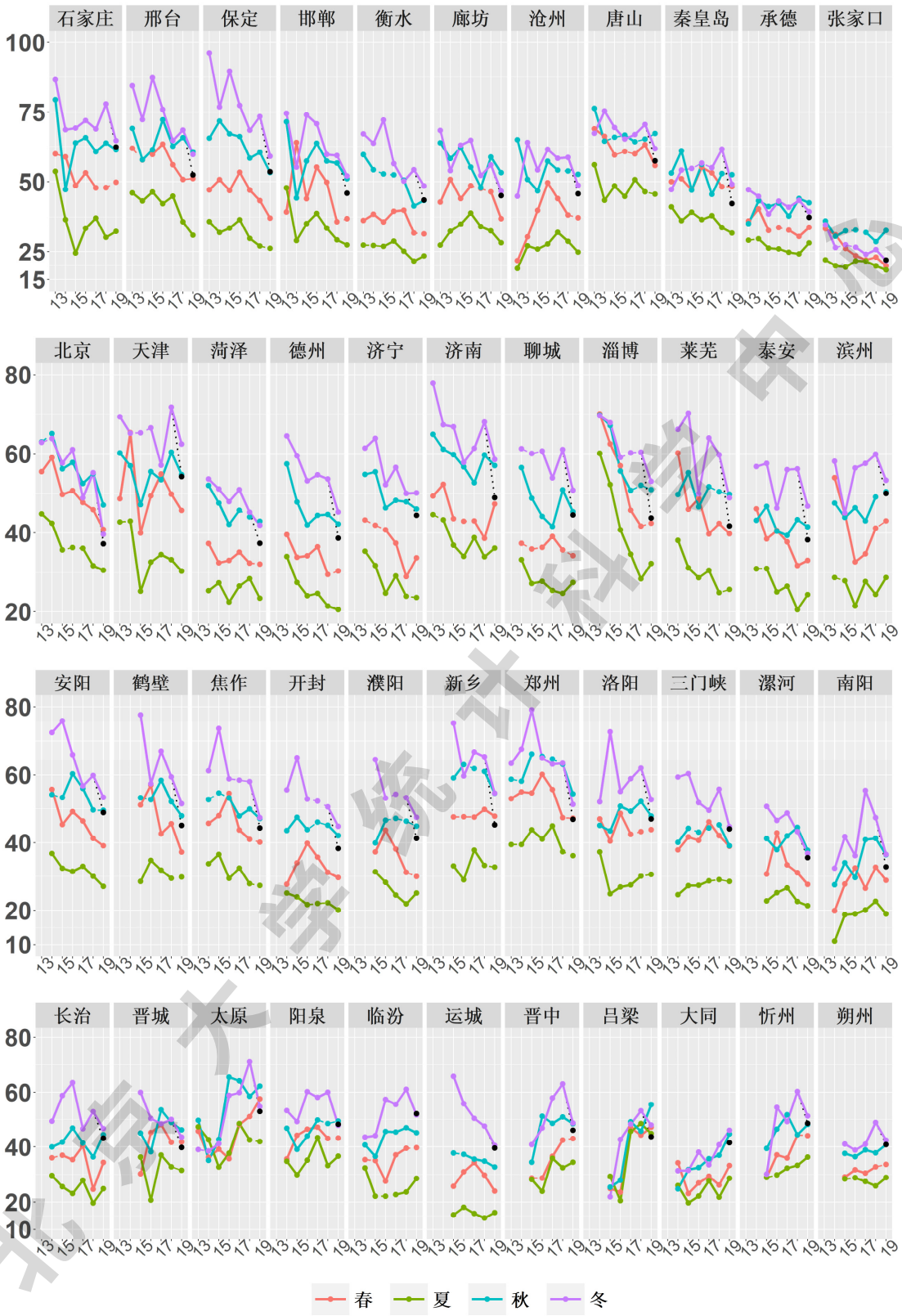
研究区域城市的二氧化氮也具有明显的季节特征。根据图 29 可见，**二氧化氮浓度冬季最高，夏季最低。**京津冀除北部张家口和承德外，其它 11 市冬季二氧化氮浓度一般在 50～80 微克/立方米，夏季一般在 20～50 微克/立方米，且各城市间夏季浓度的差异相对较小。**唐山市夏天二氧化氮浓度较高，过去两年内均达到 40 微克/立方米以上，需要引起关注。**张家口和承德的二氧化氮浓度是京津冀 13 个城市中最低的，季节效应明显。山西季节效应较其余研究区域城市更不明显，主要体现在中部和北部大同、朔州、忻州、吕梁、太原、阳泉 6 市整体年度差异较小，例如 2017 年大同夏季和冬季二氧化氮浓度分别为 27.7 微克/立方米和 33.5 微克/立方米；山西 11 市夏季浓度在 20～50 微克/立方米，**太原、吕梁夏天二氧化氮浓度也达到 40 微克/立方米以上，**而冬季浓度除大同较低外，一般在 40～70 微克/立方米。山东除了济南、莱芜和淄博冬季存在超过 70 微克/立方米的情况外，其余城市的冬季二氧化氮浓度在 45～70 微克/立方米；除济南、淄博外，夏季二氧化氮浓度均低于 40 微克/立方米。河南 17 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。陕西省城市间差异较大，安康、汉中、商洛整体较好，二氧化氮浓度在 25-50 微克/立方米；其余城市冬季集中在 40-75 微克/立方米。

- 区域特征

根据图 29 和图 31，二氧化氮以河北、河南沿太行山城市与唐山市及山西省太原、吕梁市为高浓度区域；河北北部张家口，河南南部信阳、南阳、驻马店、周口四市，山东东部威海、烟台，陕西汉中平原安康、商洛、汉中三市为低浓度区域；其他城市则差别不大，为中浓度区域。根据表 10，高浓度区域在 2019 年的全年平均二氧化氮浓度大致高于 40 微克/立方米，低浓度区域大致低于 30 微克/立方米。

研究区域内“2+66”城市的二氧化氮浓度下降微弱，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、吕梁已经加入高浓度区域，阳泉、晋中等正在加入高浓度区域。**另外，各省的省会城市近年来二氧化氮污染均较为严重，这与二氧化氮排放大量来源于移动源（车辆）的特点是吻合的。太原、石家庄、西安、济南、天津、郑州均位列 2019 年全年平均二氧化氮浓度排名前十，2019 年全年平均二氧化氮浓度均高于 45 微克/立方米。

北京大学统计科学中心


石家庄
邢台
保定
邯郸
衡水
廊坊
沧州
唐山
秦皇岛
承德
张家口
北京
天津
菏泽
德州
济宁
济南
聊城
淄博
莱芜
泰安
滨州
安阳
鹤壁
焦作
开封
濮阳
新乡
郑州
洛阳
三门峡
漯河
南阳
长治
晋城
太原
阳泉
临汾
运城
晋中
吕梁
大同
忻州
朔州
春
夏
秋
冬

北京大学统计科学中心

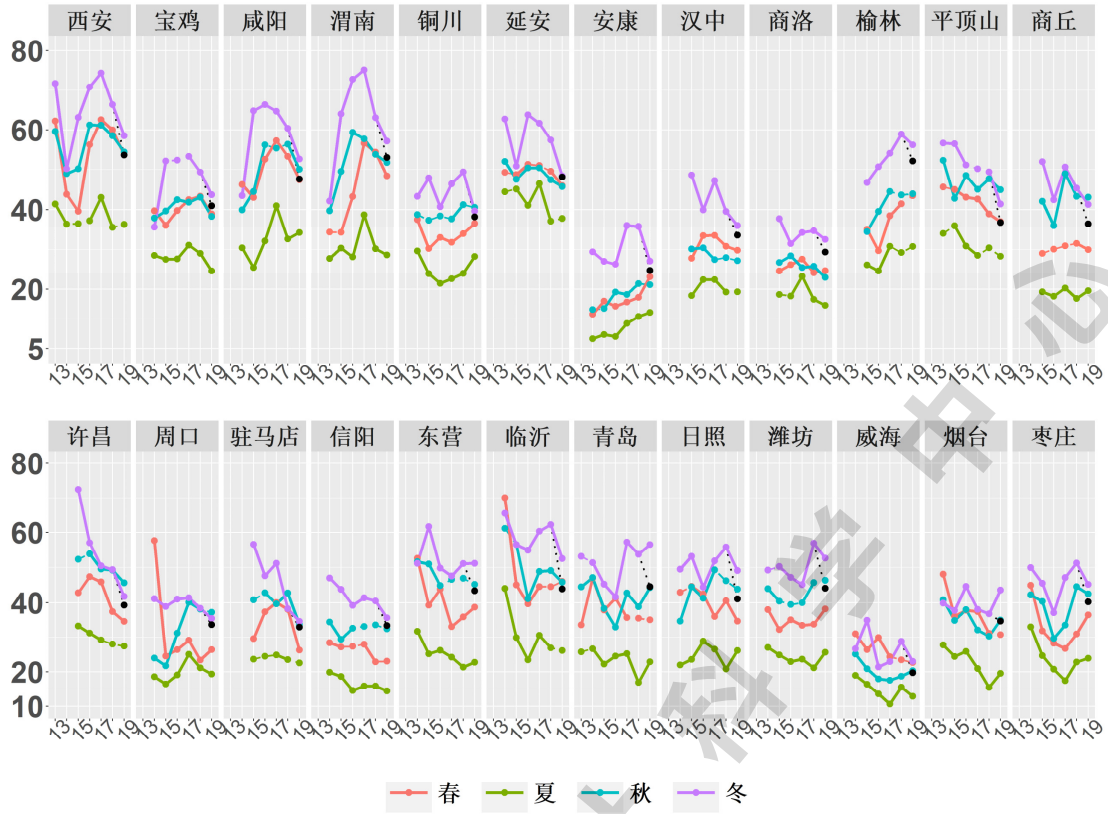
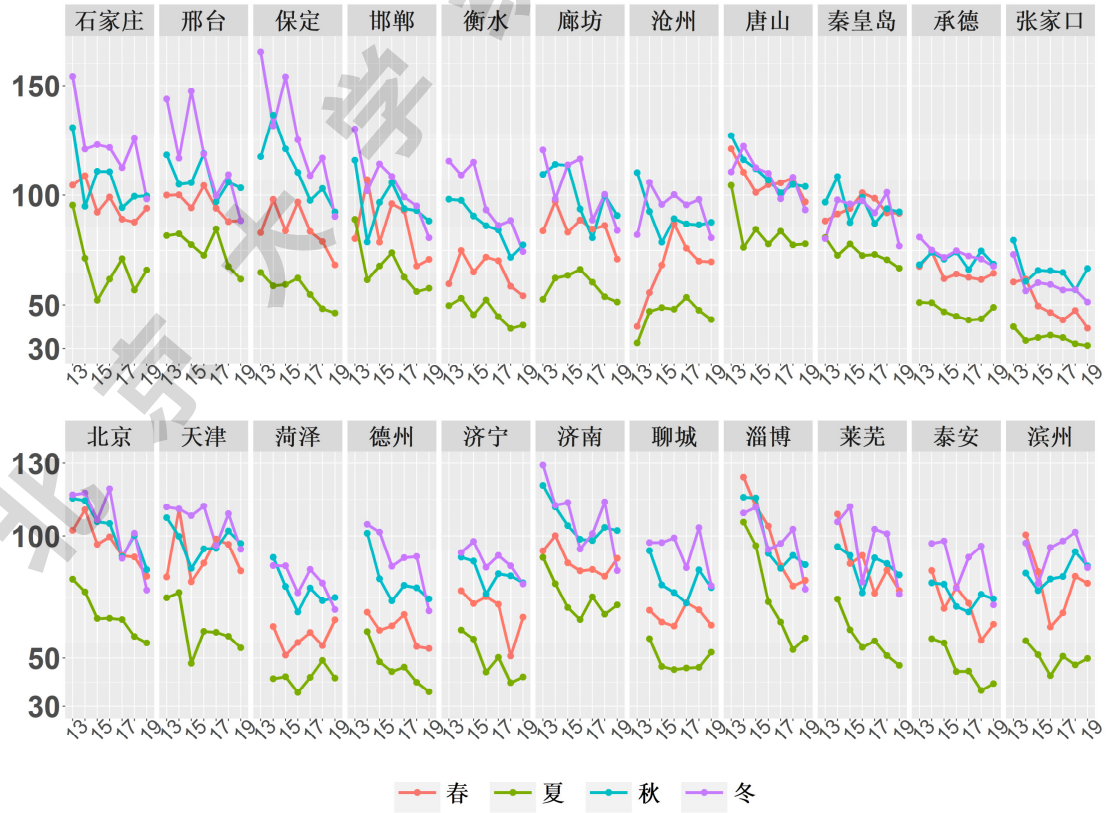


图 29：“2+66”城市气象调整后 2013 年至 2019 年 NO_2 季节平均浓度(微克/立方米)变化序列图

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

其中 2019 年冬季也调整了新冠疫情的影响，没有经过疫情调整的值由黑点表示



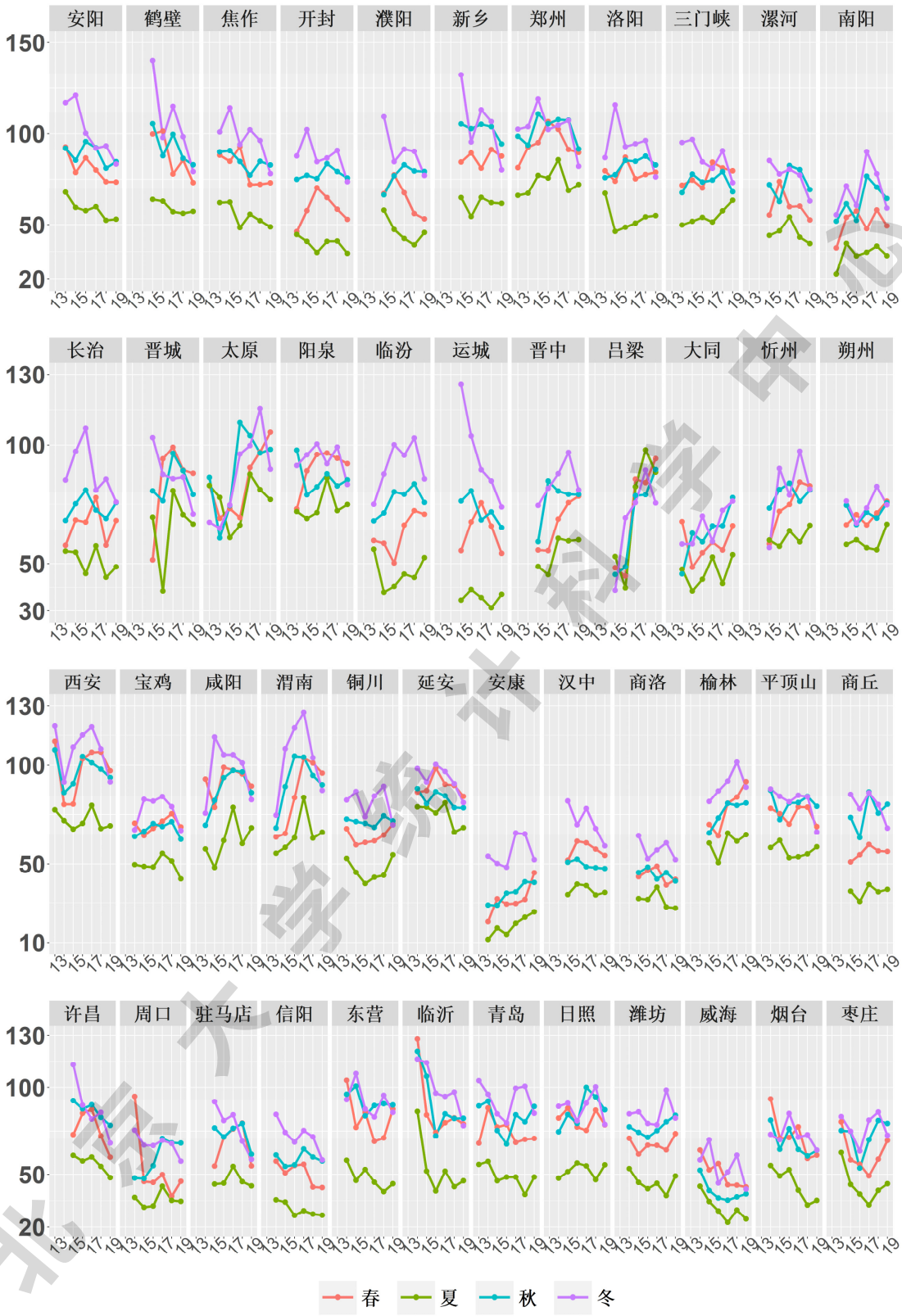


图 30：“2+66”城市气象调整后 2013 年至 2019 年二氧化氮季节浓度 90%分位数(微克/立方米)变化序列图

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

北京大学环境设计研究中心

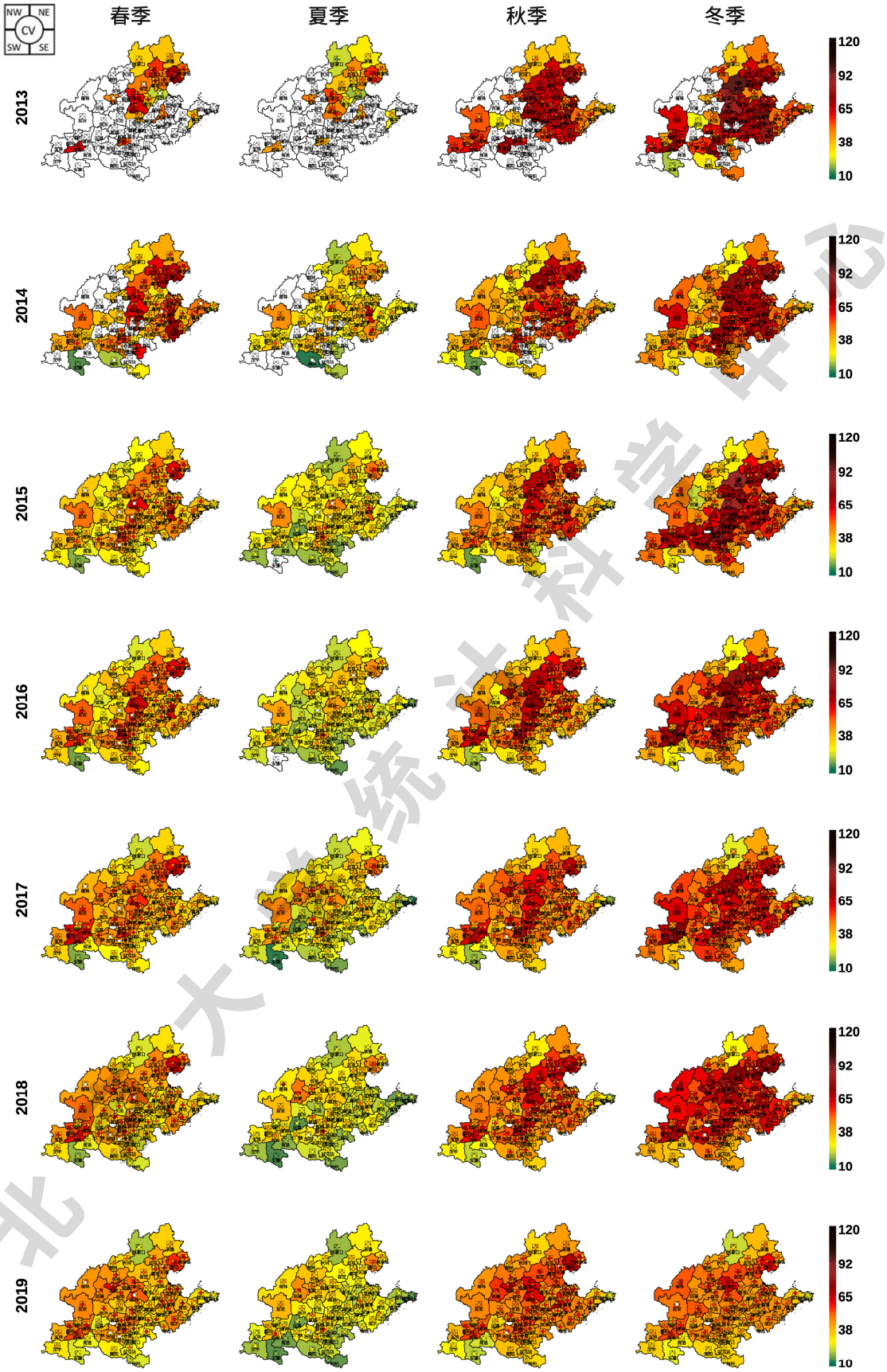


图 31：“2+66”城市 2013 年至 2019 年气象调整后二氧化氮季节平均浓度(微克/立方米)地图

（清晰图参见电子版；白色代表数据少，无法得到可靠结果）

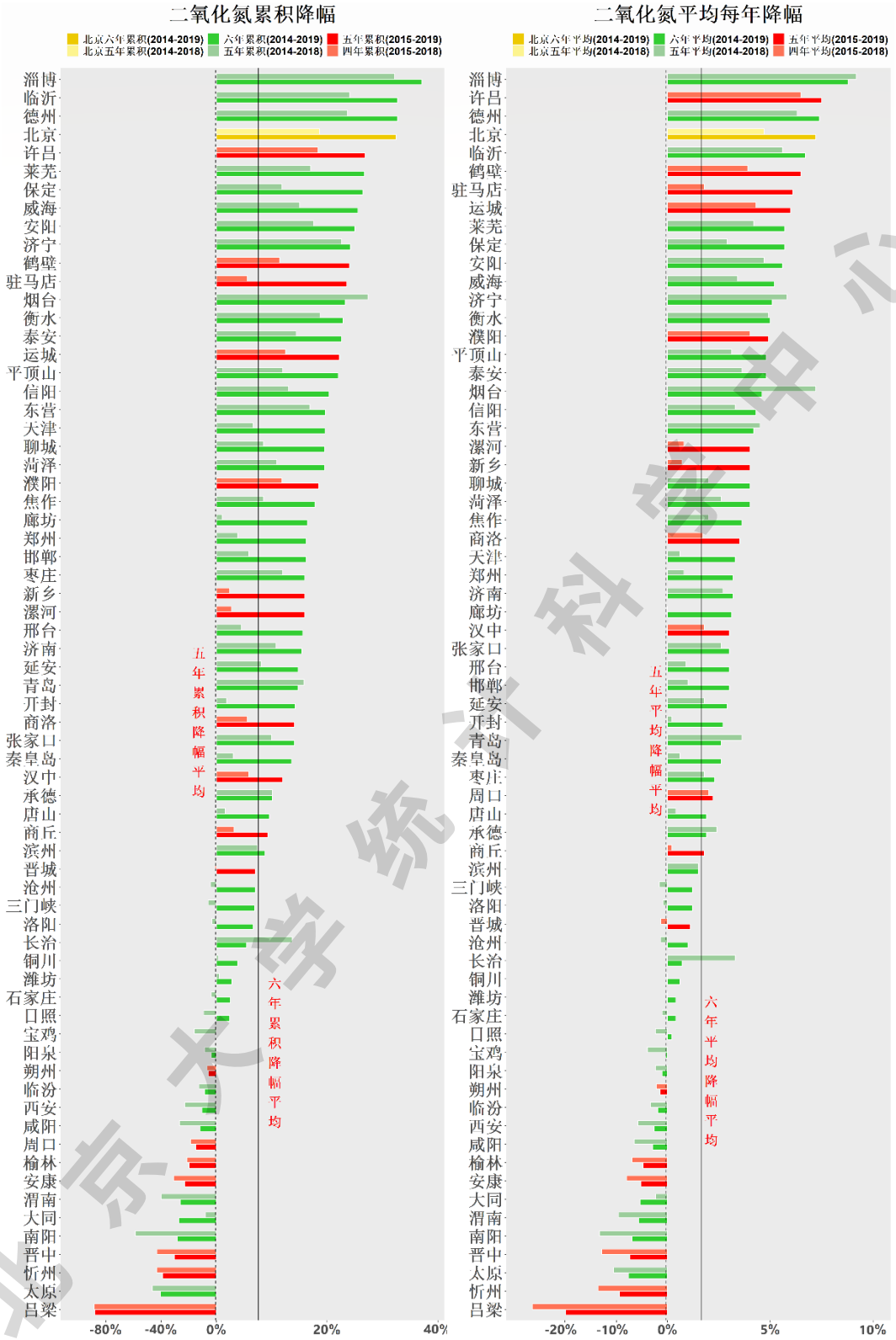


图 32：“2+66”城市气象调整后季节年二氧化氮过去六/五年或过去五/四年的累积降幅及平均降幅图

（红色表示因 2013 年部分季度数据缺失而计算的五/四年累积/平均降幅）

北京大学统计科学中心

城市	2013年	排名	2014年	排名	2015年	排名	2016年	排名	2017年	排名	2018年	排名	2019年	排名
唐山	67.2	(2)	62.4	(2)	60.9	(4)	59.4	(2)	60.4	(1)	61.4	(1)	56.5	(1)
太原	45.4	(14)	38.1	(39)	38.9	(42)	49.4	(19)	55.1	(6)	55.8	(2)	53.6	(2)
石家庄	69.9	(1)	52.8	(12)	51.6	(12)	56.1	(7)	53.6	(8)	54.9	(5)	51.5	(3)
西安	58.8	(6)	44.8	(26)	47.4	(19)	56.4	(6)	60.3	(2)	55.1	(4)	49.5	(4)
邢台	65.4	(3)	57.8	(5)	63.7	(1)	63.5	(1)	57.1	(4)	55.2	(3)	48.8	(5)
吕梁	NA		NA		25.4	(66)	28.7	(63)	47.5	(20)	47.9	(15)	47.8	(6)
济南	59.2	(5)	56.0	(8)	51.7	(10)	47.9	(22)	49.0	(16)	50.0	(12)	47.4	(7)
天津	55.2	(9)	57.6	(6)	44.4	(27)	51.0	(15)	50.0	(13)	53.8	(6)	46.3	(8)
郑州	53.7	(10)	55.0	(9)	60.9	(3)	58.0	(4)	57.2	(3)	52.9	(7)	46.1	(9)
渭南	NA		36.0	(44)	44.6	(25)	50.9	(16)	57.0	(5)	50.4	(11)	45.4	(10)
新乡	NA		NA		53.7	(6)	49.9	(18)	53.5	(9)	52.4	(8)	45.1	(11)
咸阳	NA		40.0	(34)	44.5	(26)	51.8	(10)	54.6	(7)	50.7	(10)	44.8	(12)
延安	NA		52.1	(13)	48.0	(18)	51.6	(12)	52.4	(10)	47.9	(16)	44.4	(13)
阳泉	NA		42.6	(30)	40.6	(39)	46.4	(24)	49.6	(15)	46.2	(21)	44.3	(14)
忻州	NA		NA		31.8	(58)	41.9	(32)	42.3	(32)	45.5	(24)	44.2	(15)
秦皇岛	47.9	(12)	50.6	(14)	47.0	(20)	51.1	(14)	47.9	(18)	49.1	(13)	43.7	(16)
滨州	NA		47.1	(21)	40.4	(40)	39.2	(39)	40.8	(40)	43.6	(30)	43.0	(17)
晋中	NA		NA		33.0	(57)	37.7	(47)	44.7	(28)	47.2	(17)	43.0	(18)
榆林	NA		NA		35.6	(49)	36.1	(51)	42.0	(35)	43.3	(32)	42.6	(19)
保定	61.2	(4)	57.8	(4)	59.3	(5)	58.3	(3)	50.9	(11)	51.0	(9)	42.5	(20)
淄博	NA		67.3	(1)	62.4	(2)	53.1	(8)	47.8	(19)	45.6	(23)	42.3	(21)
洛阳	NA		45.3	(25)	45.4	(23)	45.3	(25)	44.5	(29)	46.9	(19)	42.3	(22)
临汾	NA		38.0	(41)	34.4	(54)	38.2	(43)	40.2	(42)	42.8	(35)	41.3	(23)
安阳	NA		54.8	(10)	51.7	(11)	51.7	(11)	48.0	(17)	45.2	(26)	41.1	(24)
廊坊	50.6	(11)	48.9	(15)	51.0	(13)	51.8	(9)	45.5	(27)	48.5	(14)	40.9	(25)
临沂	NA		60.2	(3)	47.0	(21)	39.8	(37)	46.0	(25)	45.7	(22)	40.5	(26)
邯郸	58.3	(7)	48.1	(19)	52.6	(8)	57.1	(5)	50.1	(12)	45.3	(25)	40.3	(27)
沧州	37.6	(16)	43.1	(28)	41.7	(36)	49.0	(20)	47.1	(21)	44.9	(27)	40.1	(28)
鹤壁	NA		NA		52.6	(9)	50.4	(17)	50.0	(14)	46.6	(20)	40.0	(29)
晋城	NA		NA		42.8	(33)	38.6	(41)	46.8	(22)	43.3	(31)	39.8	(30)
焦作	NA		48.3	(18)	53.2	(7)	49.0	(21)	45.6	(26)	44.2	(29)	39.7	(31)
莱芜	NA		53.5	(11)	50.6	(14)	43.5	(27)	46.5	(23)	44.4	(28)	39.2	(32)
北京	56.5	(8)	57.6	(7)	49.8	(16)	51.5	(13)	46.3	(24)	46.9	(18)	38.9	(33)
潍坊	NA		39.6	(35)	37.0	(45)	36.1	(52)	35.5	(54)	39.4	(40)	38.5	(34)
聊城	NA		47.1	(22)	43.0	(32)	42.2	(30)	40.0	(44)	43.1	(33)	37.9	(35)
三门峡	NA		40.5	(33)	43.4	(30)	40.8	(35)	42.2	(34)	43.0	(34)	37.7	(36)
东营	NA		46.7	(23)	44.3	(28)	41.2	(33)	37.8	(50)	38.8	(41)	37.5	(37)
大同	NA		29.1	(48)	26.5	(63)	29.9	(59)	31.5	(62)	31.4	(60)	37.0	(38)
济宁	NA		48.7	(17)	48.2	(17)	41.0	(34)	42.8	(31)	37.7	(44)	36.9	(39)
平顶山	NA		47.2	(20)	45.1	(24)	43.4	(28)	41.6	(36)	41.6	(36)	36.8	(40)
许昌	NA		NA		50.2	(15)	47.3	(23)	43.8	(30)	41.0	(38)	36.7	(41)
青岛	39.2	(15)	43.0	(29)	35.9	(48)	35.1	(54)	40.2	(41)	36.2	(52)	36.7	(42)
长治	NA		38.7	(38)	40.8	(38)	42.2	(31)	39.0	(47)	33.4	(58)	36.6	(43)
日照	NA		37.3	(43)	41.4	(37)	39.2	(40)	40.9	(39)	40.8	(39)	36.4	(44)
朔州	NA		NA		34.0	(55)	33.9	(55)	34.4	(56)	36.3	(51)	36.0	(45)
铜川	NA		37.3	(42)	34.9	(52)	33.4	(56)	34.7	(55)	37.2	(50)	35.9	(46)
枣庄	NA		42.5	(31)	35.6	(51)	28.9	(62)	31.2	(63)	37.4	(46)	35.7	(47)
宝鸡	NA		35.5	(45)	38.9	(43)	40.5	(36)	42.2	(33)	41.2	(37)	35.7	(48)
承德	36.9	(17)	39.5	(36)	34.7	(53)	36.3	(50)	34.1	(57)	35.5	(55)	35.5	(49)
衡水	47.6	(13)	45.9	(24)	46.9	(22)	44.3	(26)	41.4	(37)	37.3	(49)	35.4	(50)
濮阳	NA		NA		43.3	(31)	42.9	(29)	41.0	(38)	38.2	(42)	35.3	(51)
泰安	NA		44.3	(27)	43.4	(29)	38.1	(46)	39.9	(45)	37.9	(43)	34.3	(52)
菏泽	NA		42.1	(32)	39.7	(41)	36.4	(49)	39.6	(46)	37.5	(45)	33.9	(53)
德州	NA		48.9	(16)	42.2	(35)	38.3	(42)	40.1	(43)	37.3	(47)	32.9	(54)
开封	NA		38.0	(40)	42.6	(34)	39.6	(38)	39.0	(48)	37.3	(48)	32.6	(55)
商丘	NA		NA		35.6	(50)	31.7	(57)	37.7	(51)	34.5	(57)	32.3	(56)
漯河	NA		NA		36.4	(46)	38.1	(44)	37.7	(52)	35.4	(56)	30.6	(57)
烟台	NA		39.1	(37)	33.2	(56)	36.6	(48)	32.1	(61)	28.4	(63)	30.0	(58)
南阳	NA		22.7	(51)	30.6	(60)	29.3	(61)	35.7	(53)	36.0	(53)	29.3	(59)
周口	NA		35.3	(46)	25.4	(65)	29.4	(60)	33.9	(59)	30.2	(61)	29.2	(60)
驻马店	NA		NA		37.7	(44)	38.1	(45)	38.9	(49)	35.6	(54)	28.8	(61)
运城	NA		NA		36.1	(47)	35.5	(53)	34.0	(58)	31.6	(59)	28.1	(62)
汉中	NA		NA		31.2	(59)	31.6	(58)	32.7	(60)	29.4	(62)	27.5	(63)
信阳	NA		32.4	(47)	29.7	(61)	28.4	(64)	29.6	(64)	28.2	(64)	25.8	(64)
商洛	NA		NA		27.0	(62)	26.1	(66)	27.7	(65)	25.5	(65)	23.2	(65)
张家口	31.5	(18)	27.0	(49)	26.4	(64)	26.1	(65)	24.9	(66)	24.3	(66)	23.2	(66)
安康	NA		16.4	(52)	16.9	(68)	17.3	(68)	20.7	(67)	22.1	(67)	20.8	(67)
威海	NA		25.4	(50)	24.7	(67)	20.7	(67)	18.9	(68)	21.6	(68)	18.9	(68)

表 10：“2+66”城市 2013 至 2019 年气象调整后二氧化氮季节年平均浓度(微克/立方米)年际变化表

（浓度列底纹由红到绿表示各城市季节年平均浓度由大到小；排名列按浓度自大到小排名，排名位于前/中/后 1/3，分别用红/黄/绿色的圆点标记）

- **极端污染**

为说明各个季节二氧化氮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 30 展示了研究区域城市2013 年以来经气象调整的二氧化氮浓度 90%分位数随时间变化的情况以及给定季节的时间序列。可见，二氧化氮污染问题比较普遍地存在于观测区域的各个城市，其中河北省太行山东侧及唐山、山东西部、山西省大部及各省会城市仍为二氧化氮高浓度区域，重污染冬季最重，秋季、春季次之，夏季最轻。“2+66”城市二氧化氮90%分位数浓度在秋春季一般不超过 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 100 微克/立方米，仍有很大的改善空间。

整体来看，过去几年二氧化氮污染的改善不大。除北京、河北沿太行山五市和唐山、山东淄博和莱芜、山西运城、河南许昌二氧化氮极端污染水平有显著的下降趋势外，大部分城市二氧化氮极端污染水平相比首次观测年份没有显著的下降或波动较大，而太原、吕梁、忻州、榆林等地均出现逐年恶化的趋势。京津冀及山西省2018 年冬季极端污染水平均出现反弹，山东省各城市、山西北部在 2019 年春夏季节污染情况均出现一定程度的反弹，陕西省中部和北部 2019 年夏天出现一定反弹。

受疫情影响，2019 季节年冬季二氧化氮极端污染情况显著下降，但这并不能反映全年的污染物变化趋势。因此，我们选取 2019 季节年的春秋两季对近期的极端污染变化进行分析。“2+66”城市中，2018 年、2019 年春季二氧化氮浓度 90%分位数均值分别为 72.9 微克/立方米、72.0 微克/立方米，秋季分别为 81.7 微克/立方米、79.3 微克/立方米，整体来看略有改善；春秋两季均相比上年有所上升的城市有 11个，主要集中在山西省和山东半岛东部，大同春秋两季平均增幅最高，达 18.2%。

- **变化趋势**

2019 年“2+66”城市在春、夏、秋、冬四个季节二氧化氮浓度分别下降 0.7，-0.4，1.6，11.4 微克/立方米，下降 1.82%，-1.49%，3.42%，21.55%，全年平均下降8.17%。根据图 29，受疫情影响，2019 季节年“2+66”城市冬季二氧化氮平均污染情况显著下降。为排除该项干扰，我们选取 2019 年春秋季节对“2+66”城市的二氧化氮浓度变化趋势进行分析。2019 年，京津冀区域二氧化氮污染状况整体都有所好转。山东省春夏季节二氧化氮污染情况出现回升，但秋季污染状况相较上年优化。河南省除漯河、驻马店、南阳二氧化氮污染有显著下降外，其余城市春秋季较上年变化不大。山西省除运城在春季有所改善外，其余城市在春夏秋季均出现显著恶化或无显著改善。陕西省西安、宝鸡、咸阳、渭南春秋季的改善较为显著，铜川、安康和榆林春季反弹，其他城市和季节的变化较不显著。

北京大学统计科学中心

从图 32 的累积降幅来看，**“2+66”城市的累积降幅平均值只有 7.55%**。其中淄博降幅最高，达 37.1%，德州、临沂、北京 3 市均超过 30%，降幅前三名均为山东城市。共有 18 个城市降幅超过 20%，40 个超过 10%；共有 16 个城市 2019 年二氧化氮浓度高于其初始年份的二氧化氮浓度，其中山西省 8 个、陕西省 6 个、河南省 2 个，最末四位为山西吕梁、太原、忻州、晋中，其中吕梁 2019 年平均二氧化氮浓度较 2014 年有 88.2%的上升。从年均降幅来看，淄博、许昌、德州、北京、临沂仍居于前五；年降幅为负的 15 个城市与累积降幅为负的基本一致，仍以山西吕梁、太原、忻州、晋中四市居末位。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 31。

根据表 10，廊坊、北京 2019 年平均二氧化氮浓度的排名相较上年下降最多，表明相较其他城市的改善较明显；大同、长治、榆林、临汾的排名上升最多，表明相较其他城市有一定恶化。

（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[20]。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。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：$NO_2 + O_2 \xrightarrow{紫外光} NO + O_3$。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：$NO + O_3 \longrightarrow NO_2 + O_2$。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 19 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 33 可以看出，臭氧具有明显的季节效应，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**，夏季臭氧的浓度一般是冬季的 2 到 4 倍。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。研究区域各城市 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。2019 年夏季，68 个城市中有 47 个城市的 8 小时臭氧平均浓度超过 150 微克/立方米。可以说，夏季臭氧污染已经成为研究区域城市大气污染的一个突出问题。

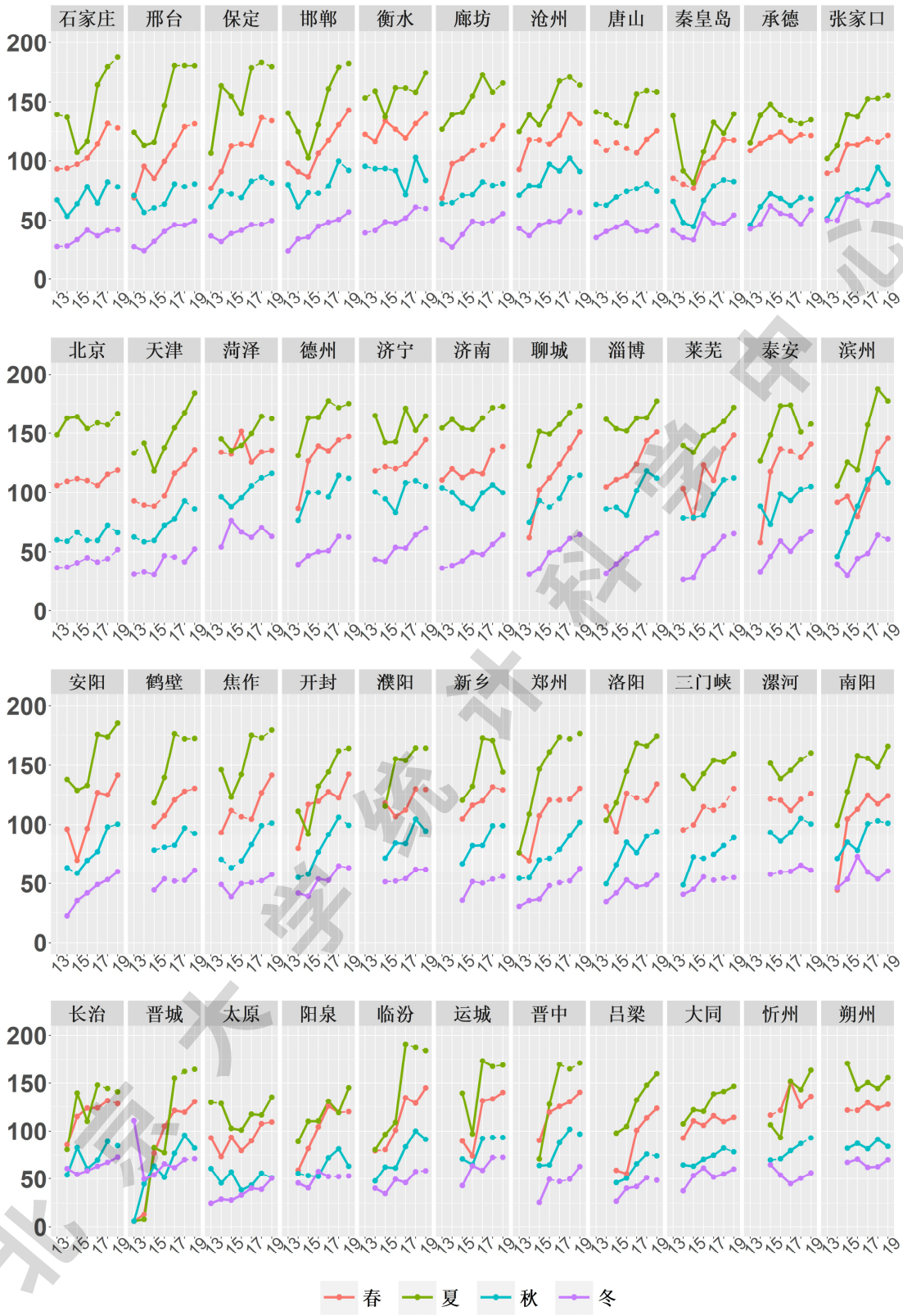
- **区域特征**

  从图 35，我们发现“2+66”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，夏春分区是以天津，河北、河南沿太行山城市，山西临汾，山东淄博、滨州为高浓度区域，其他城市为中浓度区。

- **极端污染**

  图 34 展示了研究区域城市 2013 年以来经气象调整的臭氧浓度 90%分位数给定季节的时间序列。“2+66”城市普遍臭氧浓度水平很高，季节特征显著，夏季最高。

北京大学统计科学中心


石家庄
邢台
保定
邯郸
衡水
廊坊
沧州
唐山
秦皇岛
承德
张家口
北京
天津
菏泽
德州
济宁
济南
聊城
淄博
莱芜
泰安
滨州
安阳
鹤壁
焦作
开封
濮阳
新乡
郑州
洛阳
三门峡
漯河
南阳
长治
晋城
太原
阳泉
临汾
运城
晋中
吕梁
大同
忻州
朔州
200
150
100
50
0
13
15
17
19
春
夏
秋
冬

北京大学统计科学中心

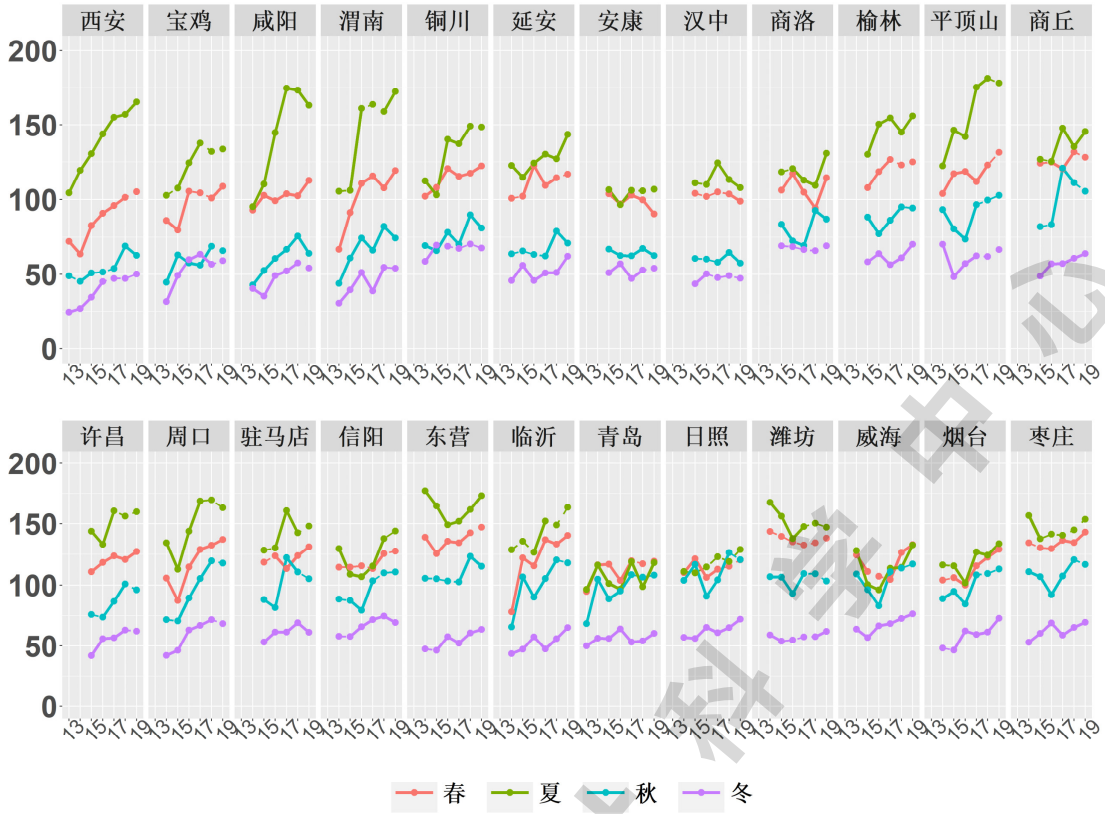
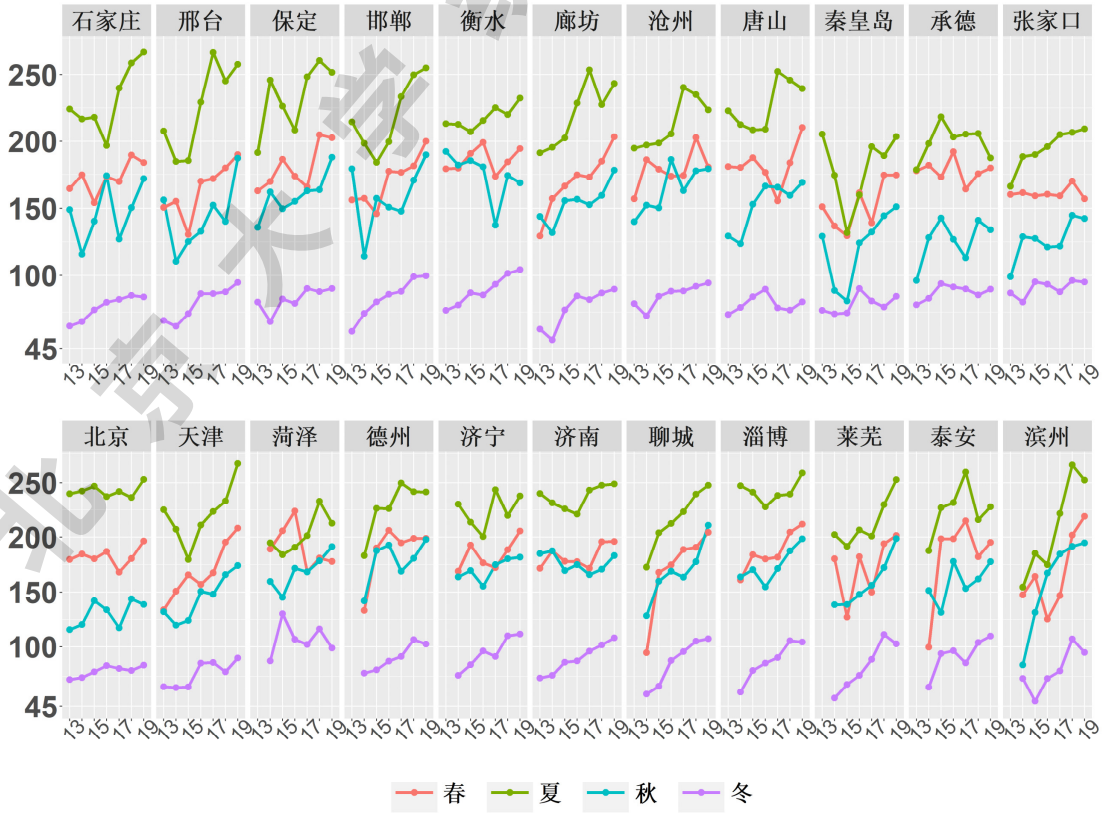


图 33：“2+66”城市气象调整后 2013 至 2019 年 8 小时臭氧季节平均浓度(微克/立方米)的变化序列图

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



北京大学统计科学中心

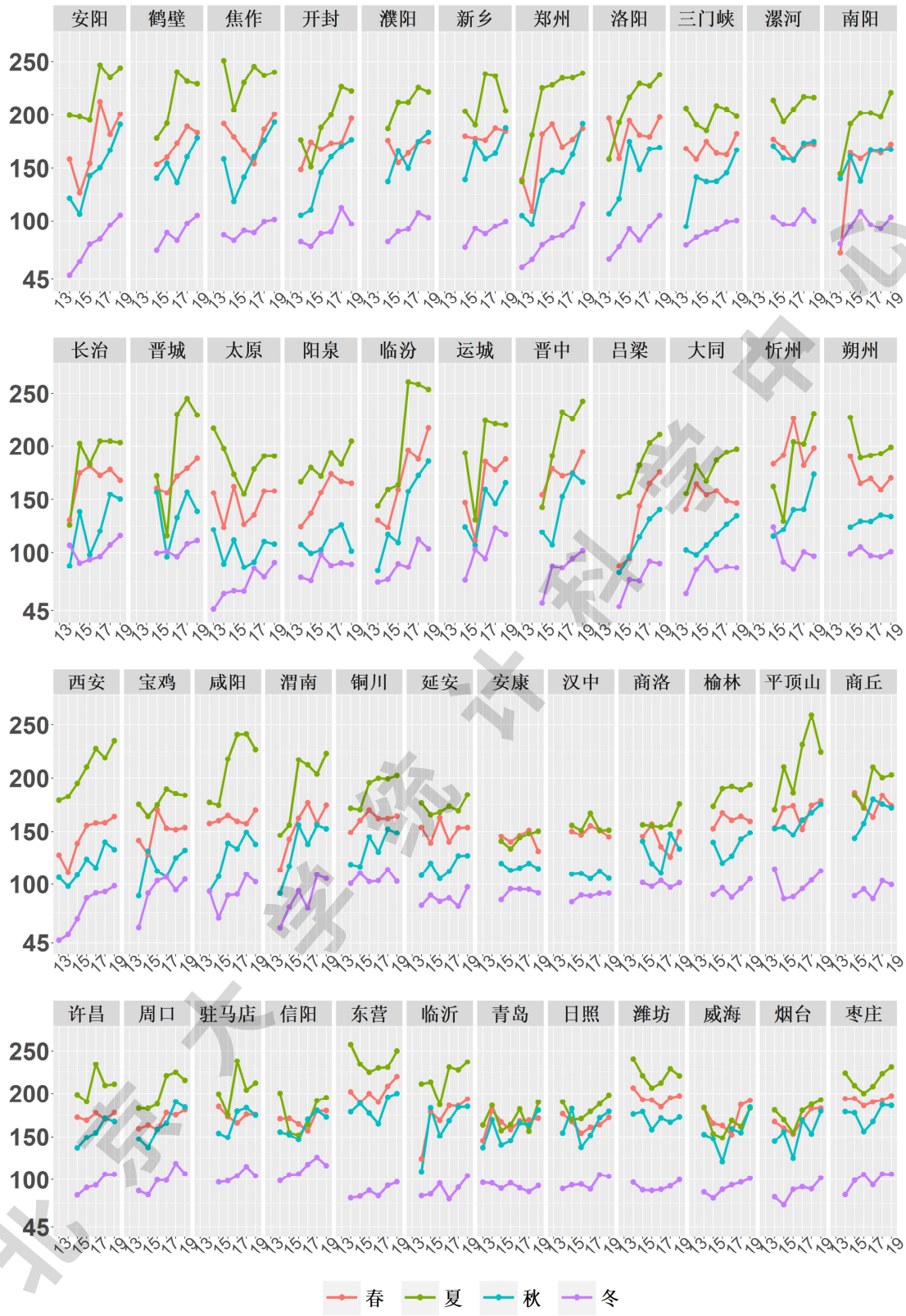


图 34：“2+66”城市气象调整后 2013 至 2019 年 8 小时臭氧季节浓度 90%分位数(微克/立方米)变化序列图

北京大学统计科学中心

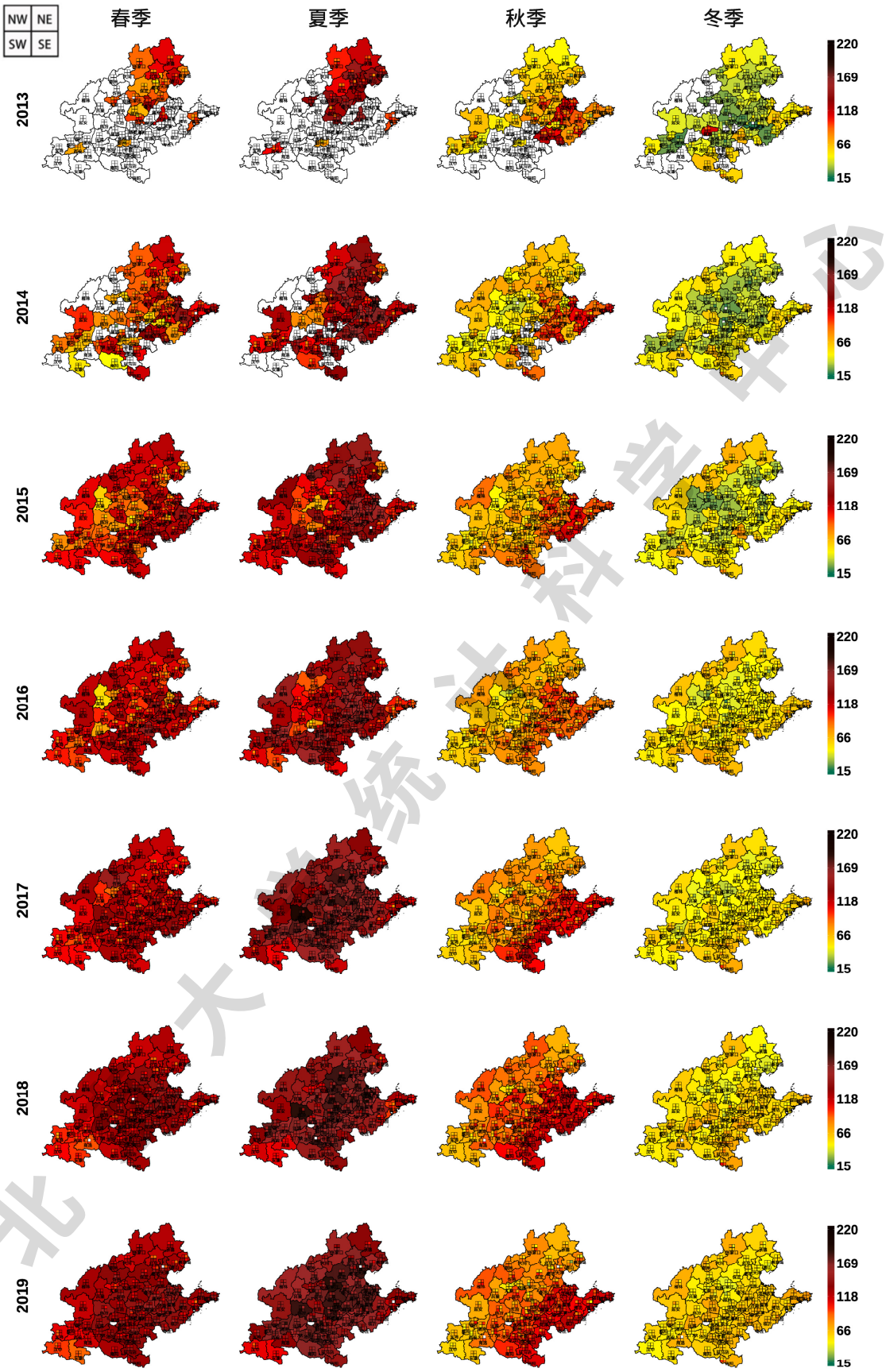


图 35：“2+66”城市 2013 年至 2019 年气象调整后 8 小时臭氧季节平均浓度(微克/立方米)地图

（清晰图参见电子版；白色代表数据少，无法得到可靠结果）

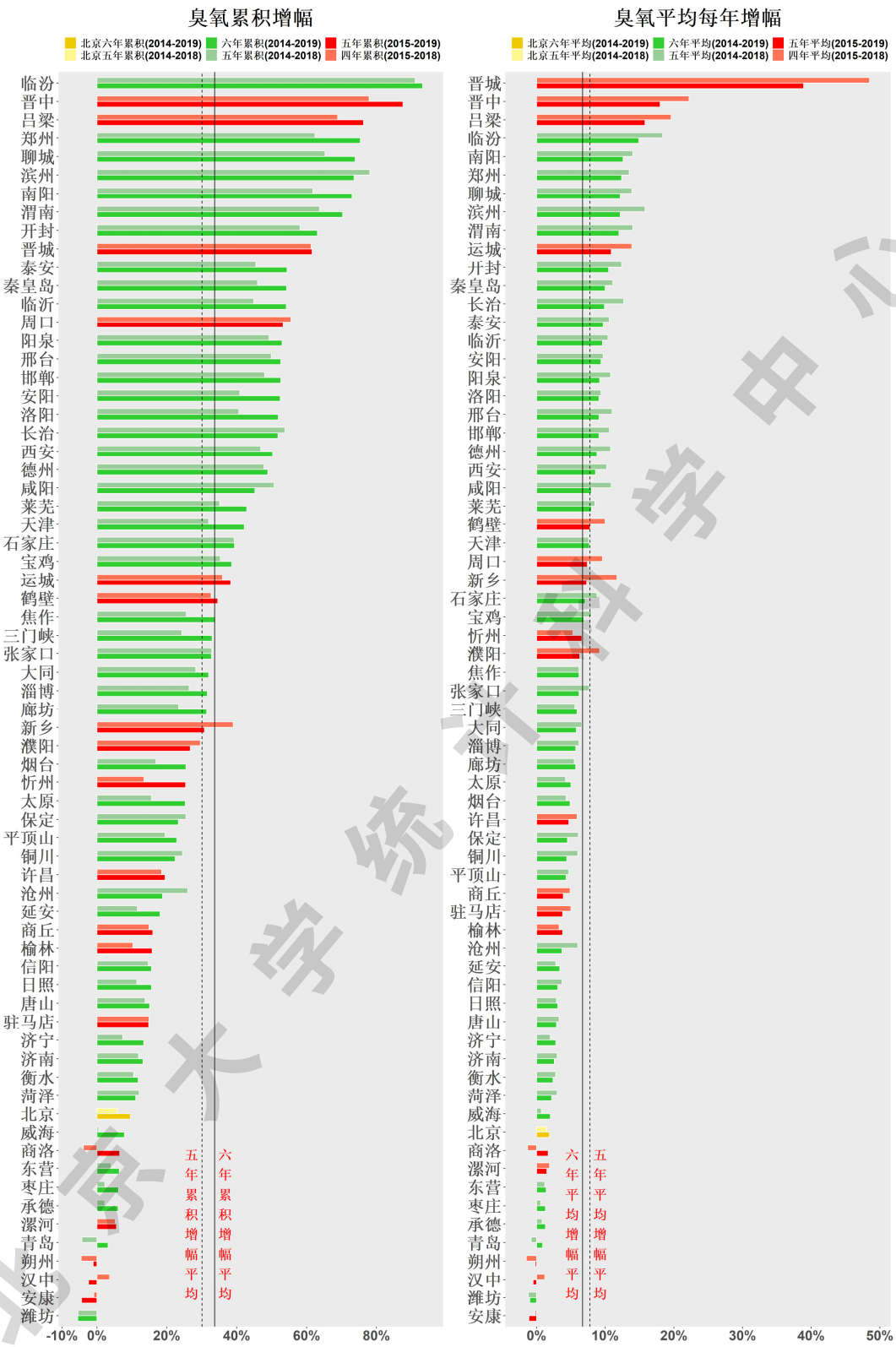


图 36：“2+66”城市气象调整后季节年 8 小时臭氧过去六/五年或过去五/四年的累积降幅及平均降幅图

（红色表示因 2013 年部分季度数据缺失而计算的五/四年累积/平均增幅）

北京大学环境科学中心

城市	2013年	排名	2014年	排名	2015年	排名	2016年	排名	2017年	排名	2018年	排名	2019年	排名
淄博	NA		96.1	(11)	98.1	(16)	98.8	(24)	110.4	(14)	121.5	(5)	126.5	(1)
聊城	NA		72.4	(37)	95.7	(21)	99.7	(19)	107.0	(22)	119.7	(7)	125.9	(2)
东营	NA		117.2	(2)	110.4	(2)	111.4	(4)	110.2	(15)	122.0	(4)	124.7	(3)
莱芜	NA		87.1	(22)	79.7	(49)	99.5	(20)	103.6	(35)	117.7	(9)	124.5	(4)
德州	NA		83.4	(24)	109.0	(4)	113.2	(3)	114.9	(2)	123.3	(2)	124.2	(5)
滨州	NA		70.9	(40)	79.5	(50)	82.9	(58)	104.8	(31)	126.3	(1)	123.1	(6)
临沂	NA		79.0	(31)	102.8	(9)	97.4	(28)	110.5	(13)	114.5	(18)	121.8	(7)
安阳	NA		79.8	(30)	73.0	(61)	85.1	(55)	107.0	(20)	112.4	(25)	121.7	(8)
周口	NA		88.3	(20)	79.3	(51)	102.7	(10)	117.5	(1)	123.3	(3)	121.6	(9)
济宁	NA		106.9	(5)	100.2	(12)	99.9	(18)	114.0	(4)	114.8	(17)	121.2	(10)
枣庄	NA		113.7	(3)	108.7	(5)	108.1	(5)	110.8	(11)	116.3	(14)	120.8	(11)
焦作	NA		89.7	(18)	84.1	(44)	91.9	(40)	103.2	(37)	112.7	(24)	119.9	(12)
平顶山	NA		97.5	(13)	98.1	(15)	97.9	(26)	111.6	(9)	116.5	(13)	119.8	(13)
临汾	NA		62.0	(50)	68.5	(65)	80.2	(63)	113.7	(6)	118.5	(8)	119.8	(14)
菏泽	NA		107.3	(4)	108.0	(6)	113.3	(2)	110.7	(12)	120.3	(6)	119.2	(15)
济南	101.4	(2)	105.1	(7)	100.1	(13)	101.7	(14)	106.7	(24)	117.6	(11)	119.0	(16)
运城	NA		NA		85.8	(41)	75.0	(65)	114.0	(5)	116.6	(12)	118.7	(17)
邯郸	85.7	(5)	77.7	(33)	74.6	(57)	88.6	(47)	101.4	(41)	115.0	(16)	118.6	(18)
泰安	NA		76.3	(34)	96.4	(19)	117.0	(1)	113.1	(7)	111.0	(32)	117.8	(19)
晋中	NA		NA		62.8	(66)	90.3	(43)	107.5	(18)	111.7	(29)	117.8	(20)
郑州	59.2	(18)	67.1	(44)	90.1	(34)	100.2	(17)	105.7	(28)	109.0	(35)	117.7	(21)
开封	NA		71.9	(39)	76.4	(52)	95.4	(32)	103.9	(33)	113.7	(19)	117.3	(22)
洛阳	NA		75.6	(36)	80.0	(47)	102.1	(12)	103.5	(36)	106.3	(44)	114.8	(23)
威海	NA		106.3	(6)	91.1	(30)	88.3	(50)	99.3	(49)	106.8	(40)	114.7	(24)
天津	79.8	(9)	80.6	(29)	74.2	(59)	88.4	(49)	98.6	(50)	106.4	(43)	114.6	(25)
衡水	102.6	(1)	102.5	(8)	103.4	(8)	107.0	(6)	101.1	(43)	113.3	(21)	114.6	(26)
鹤壁	NA		NA		84.7	(42)	95.3	(34)	107.7	(17)	112.4	(26)	114.0	(27)
南阳	NA		65.2	(46)	92.6	(28)	105.4	(8)	110.1	(16)	105.5	(46)	112.8	(28)
信阳	NA		97.6	(10)	92.1	(29)	91.9	(39)	101.0	(44)	111.9	(27)	112.8	(29)
濮阳	NA		NA		88.9	(36)	99.5	(21)	100.9	(45)	115.2	(15)	112.6	(30)
潍坊	NA		119.2	(1)	114.1	(1)	105.2	(9)	111.7	(8)	112.8	(23)	112.6	(31)
忻州	NA		NA		89.4	(35)	84.9	(56)	106.8	(23)	101.5	(50)	112.1	(32)
烟台	NA		89.3	(19)	90.7	(32)	87.1	(53)	102.5	(40)	104.4	(48)	112.1	(33)
晋城	32.1	(19)	28.9	(52)	69.3	(64)	74.9	(66)	103.6	(34)	111.8	(28)	112.0	(34)
漯河	NA		NA		106.0	(7)	101.1	(16)	102.6	(39)	111.6	(30)	111.9	(35)
榆林	NA		NA		96.2	(20)	102.5	(11)	106.1	(26)	106.1	(45)	111.4	(36)
驻马店	NA		NA		97.0	(18)	99.1	(23)	114.5	(3)	111.5	(31)	111.4	(37)
许昌	NA		NA		93.1	(27)	95.2	(35)	107.0	(21)	110.3	(33)	111.3	(38)
保定	70.4	(16)	90.2	(17)	94.6	(24)	91.2	(41)	105.4	(29)	113.2	(22)	111.2	(39)
沧州	82.9	(6)	93.3	(14)	93.3	(26)	101.7	(15)	107.4	(19)	117.6	(10)	110.8	(40)
商丘	NA		NA		95.5	(23)	97.7	(27)	111.6	(10)	109.7	(34)	110.8	(41)
邢台	72.9	(15)	72.4	(38)	73.5	(60)	87.7	(52)	105.2	(30)	108.5	(37)	110.5	(42)
日照	NA		95.5	(12)	100.9	(10)	94.3	(37)	100.2	(46)	106.4	(42)	110.4	(43)
朔州	NA		NA		110.4	(3)	105.7	(7)	105.8	(27)	105.4	(47)	109.2	(44)
石家庄	81.8	(8)	78.1	(32)	75.4	(53)	84.7	(57)	94.9	(57)	108.8	(36)	108.9	(45)
三门峡	NA		81.5	(27)	86.9	(39)	96.1	(30)	98.3	(51)	101.3	(52)	108.4	(46)
廊坊	73.2	(14)	82.2	(26)	87.9	(37)	96.1	(31)	104.0	(32)	101.4	(51)	108.0	(47)
张家口	73.2	(13)	80.8	(28)	98.9	(14)	98.5	(25)	102.6	(38)	107.4	(39)	107.3	(48)
新乡	NA		NA		81.8	(46)	95.4	(33)	106.2	(25)	113.7	(20)	107.0	(49)
长治	NA		70.3	(41)	98.0	(17)	88.2	(51)	101.2	(42)	108.1	(38)	106.7	(50)
渭南	NA		61.7	(51)	74.5	(58)	99.4	(22)	96.1	(53)	101.0	(53)	105.1	(51)
铜川	NA		85.7	(23)	86.6	(40)	102.0	(13)	97.6	(52)	106.7	(41)	104.9	(52)
吕梁	NA		NA		57.5	(68)	62.8	(68)	85.1	(65)	97.1	(56)	101.4	(53)
青岛	77.4	(11)	98.3	(9)	90.7	(31)	89.9	(44)	100.0	(47)	94.1	(58)	101.4	(54)
唐山	89.0	(3)	87.7	(21)	90.3	(33)	90.6	(42)	95.2	(56)	99.8	(54)	100.9	(55)
北京	87.8	(4)	92.0	(15)	95.7	(22)	92.2	(38)	91.4	(59)	97.3	(55)	100.8	(56)
商洛	NA		NA		94.3	(25)	94.7	(36)	88.4	(62)	90.6	(64)	100.4	(57)
大同	NA		75.6	(35)	87.3	(38)	89.6	(45)	95.2	(55)	97.0	(57)	99.8	(58)
秦皇岛	82.7	(7)	63.9	(47)	59.2	(67)	81.9	(60)	90.6	(60)	93.3	(60)	98.6	(59)
咸阳	NA		67.9	(43)	75.2	(54)	88.4	(48)	99.4	(48)	102.3	(49)	98.6	(60)
延安	NA		83.3	(25)	84.7	(43)	89.1	(46)	88.2	(63)	93.0	(62)	98.4	(61)
西安	62.5	(17)	63.8	(48)	74.7	(56)	82.9	(59)	88.1	(64)	93.7	(59)	95.9	(62)
承德	78.1	(10)	90.3	(16)	100.6	(11)	96.8	(29)	91.9	(58)	92.4	(63)	95.8	(63)
阳泉	NA		62.3	(49)	71.5	(62)	81.3	(61)	95.2	(54)	93.0	(61)	95.3	(64)
宝鸡	NA		66.3	(45)	74.9	(55)	86.9	(54)	90.4	(61)	89.7	(65)	91.9	(65)
太原	77.1	(12)	69.1	(42)	70.4	(63)	63.1	(67)	72.7	(68)	79.9	(68)	86.6	(66)
安康	NA		NA		82.1	(45)	78.4	(64)	79.7	(67)	81.4	(67)	78.5	(67)
汉中	NA		NA		79.8	(48)	80.6	(62)	83.9	(66)	82.7	(66)	77.9	(68)

表 11 “2+66”城市气象调整后 2013 至 2019 季节年 8 小时臭氧年平均浓度(微克/立方米)年际变化表

（浓度列底纹由红到绿表示各城市季节年平均浓度由大到小；排名列按浓度自大到小排名，排名位于前/中/后 1/3，分别用红/黄/绿色的圆点标记）

除秦岭以南的安康、汉中及山东沿海青岛、日照、威海、烟台外，绝大部分城市臭氧污染严重，且保持迅猛增长态势。北京近七年夏天 90%分位数始终保持在 250 微克/立方米左右。天津、河北、河南沿太行山城市以及山西中部城市，山东西部各城市恶化趋势明显，尤其体现在夏季臭氧浓度上。

2018 年，“2+66”城市中，夏季 90%分位数超过 230 微克/立方米的有 24 个，超过 200 微克/立方米的有 50 个，其中滨州、保定超过 260 微克/立方米，平顶山、石家庄、临汾超过 250 微克/立方米；2019 年“2+66”个城市中，夏季 90%分位数超过 230 微克/立方米的有 27 个，较上年增加 3 个，超过 200 微克/立方米的有 52 个，较上年增加 2 个，其中天津、石家庄二城市超过 260 微克/立方米；北京，河北保定、邢台、邯郸，山东莱芜、滨州、淄博，山西临汾等 8 市超过 250 微克/立方米，较上年增加 5 个。

- **变化趋势**

相比于 2018 年，2019 年“2+66”城市在春、夏季节臭氧浓度分别增长 6.0，6.0 微克/立方米，增幅达 4.85%，3.92%。如图 36 所示，与前五种污染物总体都有改善的状况不同，“2+66”城市中 **64 市在 2019 年的臭氧浓度较其初始年份上升，其中部分城市增幅较大，临汾五年累积增幅甚至达 93.2%。**截至 2019 年，共有 10 个城市累积增幅超过 60%，分别是山西临汾、晋中、吕梁、晋城，河南郑州、开封、南阳，山东聊城、滨州，陕西渭南；共有 21 个城市累积增幅超过 50%，较 2018 年增加了 11 个。“2+66”城市六年年平均增幅平均值达 6.71%，较五年平均 7.76%有所回落，但增长态势仍十分显著。**11 个城市年平均增幅超过 10%**，38 个城市年平均增幅超过 5%，这表明**臭氧污染应该成为“2+66”城市下一步大气治理的关键命题**。

通过表 11 发现，安阳、南阳、洛阳 2019 全年平均八小时臭氧浓度的排名上升最多，表明其相较其他城市恶化较为明显，且安阳在臭氧、细颗粒物、可吸入颗粒物、一氧化碳四项污染中均居于“2+66”城市前五，初步呈现出复合污染的态势；新乡、沧州、保定排名下降最多，表明其相较其他城市有一定改善。**“2+66”城市中，2019 年有 53 个城市年均臭氧浓度较上年有所上升**。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，2019 年臭氧浓度前 7 名为淄博、聊城、东营、莱芜、德州、滨州、临沂，均为山东城市；前 11 名包含 9 个山东城市（8-11 名分别为河南安阳、周口，山东济宁、枣庄），这说明**山东省大气治理应尤其要关注臭氧污染**。

北京大学统计科学中心

五、“2+66”城市污染物综合累积降幅与监视坐标

表 12 给出每个城市过去六年气象调整后，及去除新冠疫情对 $PM_{2.5}$、PM_{10}、二氧化硫、一氧化碳、二氧化氮影响后的综合改善情况。由于 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 有重合部分，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。我们的方法去除了气象因素的干扰和新冠疫情的影响，所以表 12 给出的是各城市污染物受人为影响的下降比例。

根据表 12，大部分城市在去除新冠疫情之后，六年综合累积降幅相比于去除新冠疫情影响前的降幅均有所降低，这说明新冠疫情中停工停产、出行限制等举措使空气质量有所好转；8 个城市（忻州、临汾、榆林、咸阳、晋中、大同、渭南、吕梁）去除新冠疫情影响后的六年综合累积降幅减少低于 10%。改善排名前三分之一的城市中包含 11 个非“2+26”城市和汾渭平原十一市（东营、延安、驻马店、信阳、漯河、潍坊、许昌、枣庄、临沂、青岛、莱芜），改善排名后三分之一的城市中包含 12 个“2+26”城市和汾渭平原十一市（洛阳、宝鸡、长治、西安、阳泉、晋城、太原、咸阳、临汾、晋中、渭南、吕梁）。对于 68 城市的数值变化及综合改善情况，可具体查看表 12。

为了方便各级部门了解 2019 年的六种污染物情况，同时考虑过去六年的浓度变化（“人努力”）情况，找到每个城市突出的污染问题，我们绘制了六种污染物气象调整后浓度的监视坐标图（图 37 至图 39）**和“2+66”城市 2019 年超标污染物情况的汇总表**（表 13）。为了剔除 PM_{10} 中 $PM_{2.5}$ 的部分，我们将 PM_{10} 替换成了 $PM_{10\text{-}2.5}$。$PM_{10\text{-}2.5}$ 是 PM_{10} 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 PM_{10} 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（$PM_{10\text{-}2.5}$）、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，左下象限的城市情况相对较好，图中箭头代表过去六年某污染物已有显著下降。

由表 13 可知，邢台市有五种污染物过高，大同、石家庄、太原、唐山 4 市有四种污染物过高，另有 10 个城市（安阳、邯郸、焦作、济南、晋城、临汾、吕梁、朔州、渭南和枣庄）三种污染物过高，安康、汉中、青岛 3 市无超标污染物。我们希望图 37 至图 39 和表 13 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。

北京大学数计科学中心

表 12 “2+66”城市六种污染物气象调整后去除疫情影响前（后）浓度六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	排名	城市	降幅百分比
1	保定	43.4(42.9)	24	濮阳	26.2(24.1)	47	烟台	19.0 (15.5)
2	北京	38.5(37.9)	25	平顶山	26.2(25.3)	48	秦皇岛	19.0 (17.5)
3	衡水	36.3(35.1)	26	唐山	26.1(25.7)	49	洛阳	18.7(16.8)
4	淄博	35.9(34.0)	27	商洛	25.7(24.7)	50	宝鸡	17.6(16.0)
5	廊坊	34.2(34.0)	28	承德	25.4(25.8)	51	长治	16.9(14.9)
6	东营	34.0 (32.4)	29	石家庄	24.9(25.0)	52	西安	16.7(16.0)
7	菏泽	33.2(31.4)	30	郑州	24.8(23.9)	53	周口	16.6(16.0)
8	延安	33.1(33.7)	31	焦作	24.8(23.6)	54	阳泉	15.8(16.8)
9	德州	33.1(31.5)	32	聊城	24.8(23.5)	55	晋城	13.7(11.6)
10	济南	31.6(29.9)	33	鹤壁	24.6(21.9)	56	太原	13.5(13.6)
11	济宁	31.5(30.2)	34	三门峡	24.4(24.2)	57	南阳	11.9(10.8)
12	驻马店	31.3(31.0)	35	邢台	24.4(23.6)	58	张家口	11.4(12.6)
13	信阳	30.3(29.8)	36	邯郸	24.1(22.9)	59	朔州	10.7(10.4)
14	漯河	30.2(29.9)	37	运城	22.9(23.0)	60	汉中	10.1(11.0)
15	新乡	29.3(27.8)	38	威海	22.8(19.8)	61	忻州	8.9(8.6)
16	潍坊	29.2(26.8)	39	泰安	22.8(20.9)	62	咸阳	6.6(5.7)
17	许昌	28.7(28.0)	40	铜川	22.4(22.1)	63	榆林	6.4(5.9)
18	天津	28.5(26.7)	41	日照	22.4(20.1)	64	临汾	5.8(6.6)
19	枣庄	28.4(26.5)	42	安阳	22.2(20.8)	65	晋中	2.6(3.2)
20	临沂	27.2(25.1)	43	商丘	21.1(19.3)	66	大同	0.3(-1.1)
21	沧州	27.2(26.2)	44	安康	20.7(19.7)	67	渭南*	-2.8(-3.7)
22	青岛	26.7(22.2)	45	开封	19.8(17.8)	68	吕梁*	-6.9(-7.3)
23	莱芜	26.7(25.6)	46	滨州	19.5(18.0)			

注：括号外为六种污染物 2014 年到 2019 年经气象调整后的六年累积降幅的平均值，括号内为 2014 年到 2019 年去除新冠疫情影响的浓度六年累积降幅平均值。绿色表示排名前三分之一的非“2+26”城市及汾渭平原 11 市，红色表示排名后三分之一的“2+26”城市和汾渭平原 11 市。星号（*）表示该城市不去除疫情影响的六年综合累积降幅为负，即空气质量无改善。新乡、鹤壁、濮阳、晋城、晋中、运城、吕梁、汉中、漯河、商洛、商丘、朔州、忻州、许昌、榆林、周口、驻马店、安康 18 市，因 2014 年部分季度数据缺失而只计算了六种污染物原始浓度（去除疫情影响）的五年累积降幅的平均值。

北京大学统计科学中心

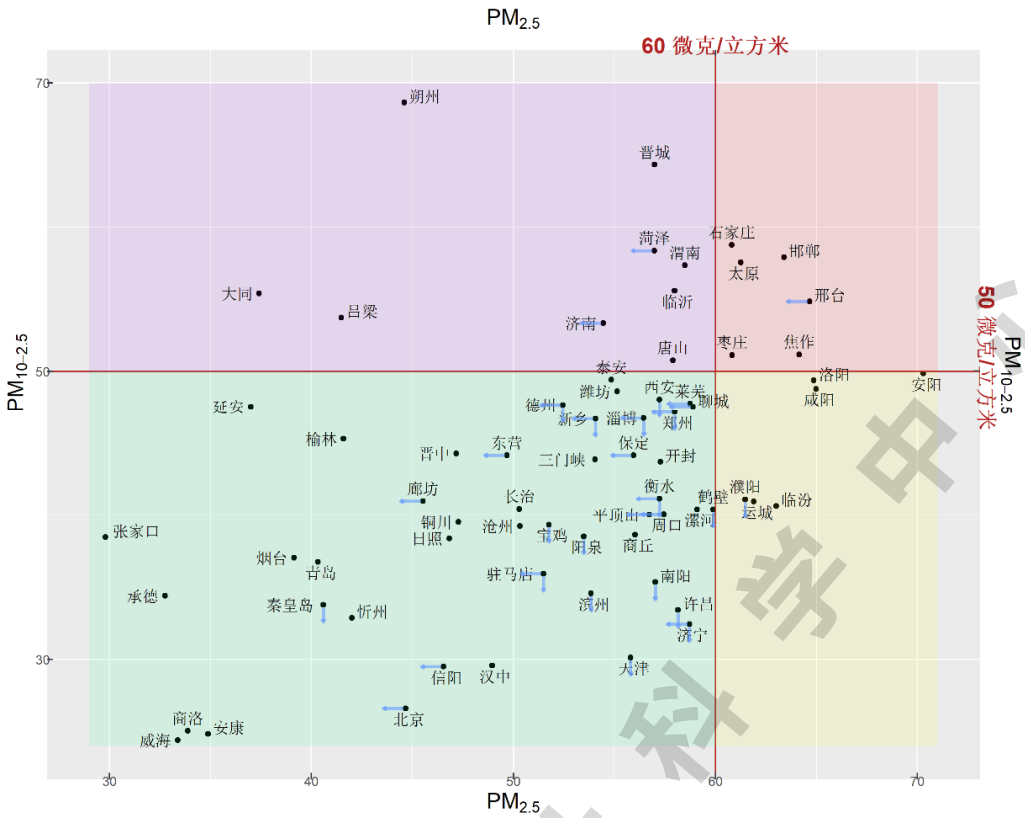


图 37 “2+66”城市 2019 年 $PM_{10\text{-}2.5}$ 和 $PM_{2.5}$ 的监视坐标图

（纵向箭头表示该城市六年内 $PM_{10\text{-}2.5}$ 降幅至少 30%，横向箭头小时该城市六年内 $PM_{2.5}$ 降幅至少 35%）

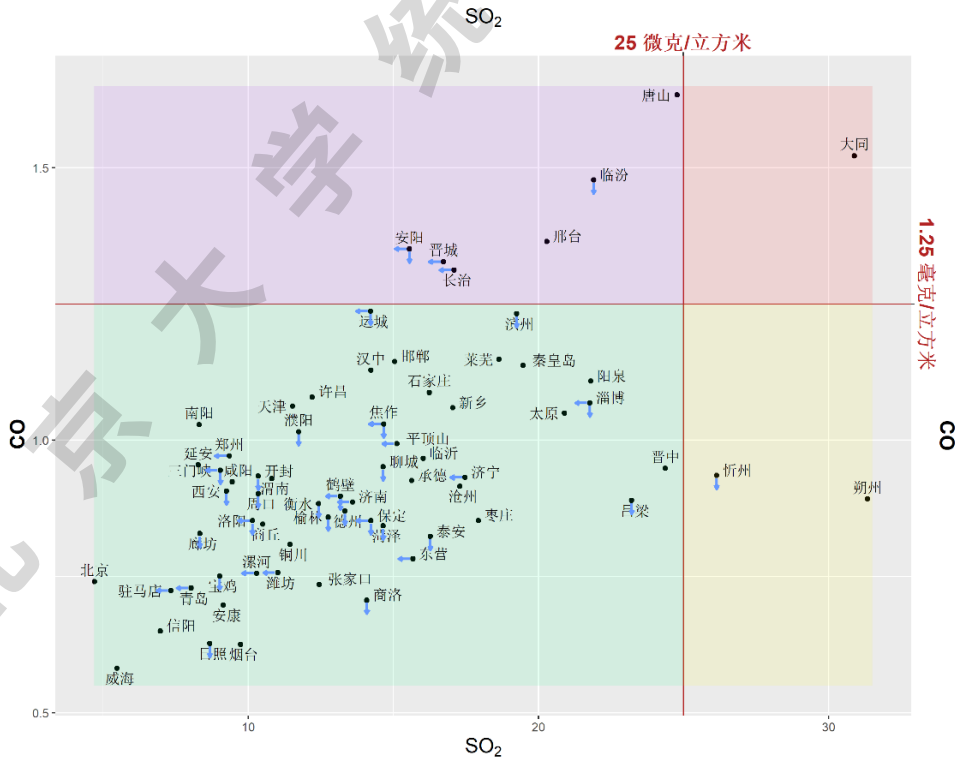


图 38 “2+66”城市 2019 年一氧化碳和二氧化硫的监视坐标图

（纵向箭头表示该市六年内一氧化碳降幅至少 40%，横向箭头表示该市六年内二氧化硫降幅至少 70%）

北京大学统计科学中心

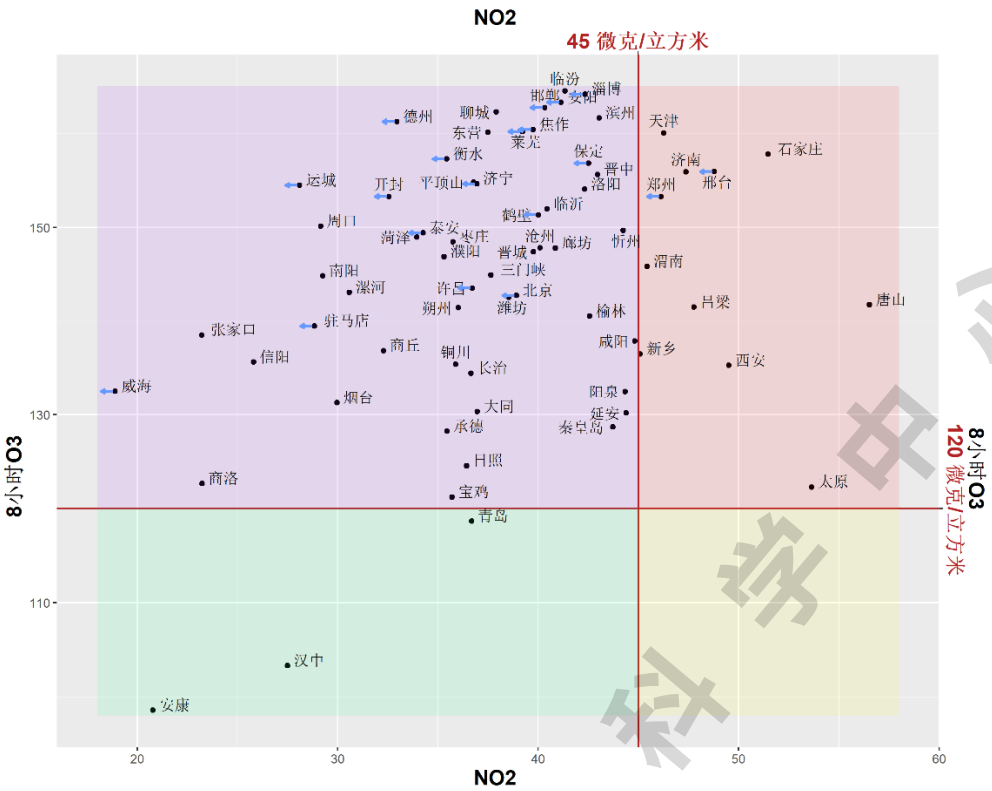


图 39 “2+66”城市 2019 年二氧化氮和春夏两季 8 小时臭氧的监视坐标图

（横向箭头表示该城市六年内二氧化氮降幅至少 20%，春夏两季 8 小时臭氧未用箭头标记降幅）

表 13：“2+66”城市 2019 年超标污染物情况汇总

（“×”代表污染物过高且去除疫情影响后仍过高，“(×)”代表去除疫情影响后污染物过高）

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	邢台	×	×		×	×	×
2	大同		×	×	×		×
3	石家庄	×	×			×	×
4	太原	×	×			×	×
5	唐山		×		×	×	×
6	安阳	×			×		×
7	邯郸	×	×				×
8	焦作	×	×				×
9	济南		×			×	×
10	晋城	(×)	×		×		×
11	临汾	×			×		×

北京大学统计科学中心

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）
12	吕梁		×			×	×
13	朔州		×	×			×
14	渭南	(×)	×			×	×
15	枣庄	×	×				×
16	长治				×		×
17	菏泽	(×)	×				×
18	临沂	(×)	×				×
19	洛阳	×					×
20	濮阳	×					×
21	天津					×	×
22	西安					×	×
23	咸阳	×				(×)	×
24	新乡					×	×
25	忻州			×			×
26	运城	×					×
27	郑州	(×)				×	×
28	鹤壁	(×)					×
29	济宁	(×)					×
30	开封	(×)					×
31	莱芜	(×)					×
32	聊城	(×)					×
33	秦皇岛					(×)	×
34	商丘	(×)					×
35	许昌	(×)					×

保定、宝鸡、北京、滨州、沧州、承德、德州、东营、衡水、晋中、廊坊、漯河、南阳、平顶山、日照、三门峡、商洛、泰安、铜川、潍坊、威海、信阳、延安、阳泉、烟台、榆林、张家口、周口、驻马店、淄博	8 小时臭氧（春夏）超标
安康、汉中、青岛	无超标

注：表格中文字颜色代表经气象调整后的浓度下城市污染物超标个数：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。

北京大学统计科学中心

六、“人努力—天帮忙”指数

不同于常用的基于原始污染物浓度计算年际变化率的方法，本报告通过结合原始污染物浓度与气象调整后的污染物浓度，计算“人努力—天帮忙”指数，更为客观、准确地衡量污染物浓度的年际变化情况。我们知道，两年的污染物浓度变化由两方面因素决定：该年度与上一年度的气象条件变化（所谓“天帮忙”或“天不帮忙”，即气象干扰）；该年度与上一年度的背景浓度变化（所谓“人努力”或“人不努力”，即排放水平）。我们基于原始浓度与气象调整后浓度，分解原始浓度年际变化率，分别度量气象影响与排放水平变化对原始浓度变化的贡献。具体来说，就是用该年原始浓度与调整后浓度差值衡量该年气象影响（“天是否帮忙”），用两年调整后浓度差值衡量两年排放水平变化（“人是否努力”），并基于此构建“人努力—天帮忙”指数。

以 $PM_{2.5}$ 为例，我们用$x_1, \tilde{x}_1, x_2, \tilde{x}_2$分别代表 $PM_{2.5}$ 上一年某季节原始浓度、上一年度调整后浓度、本年同一季节原始浓度、本年同一季节调整后浓度，对 $PM_{2.5}$ 浓度该季节原始浓度年际变化率$\frac{x_2-x_1}{x_1}$做如下分解：

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

其中，$\frac{x_2-\tilde{x}_2}{x_1}$反映本年该季节气象因素对原始浓度变化比率的影响，$\frac{\tilde{x}_1-x_1}{x_1}$反映上一年该季节气象因素影响，而$\frac{\tilde{x}_2-\tilde{x}_1}{x_1}$则衡量了两年间人为排放水平变化的贡献。基于此，我们构建本年该季节“天帮忙”指数 $\frac{x_2-\tilde{x}_2}{x_1}\times 100\%$，正值表示气象条件不利，即“天不帮忙”，负值表示气象条件有利，即“天帮忙”；“人努力”指数 $\frac{\tilde{x}_2-\tilde{x}_1}{x_1}\times 100\%$，正值代表背景浓度上升，即“人不努力”，负值代表背景浓度下降，即“人努力”。

图 40 和图 41 给出了 68 个城市 2018 年与 2019 年四个季节 $PM_{2.5}$“人努力”指数与“天帮忙”指数地图。整体上看，相较 2018 年，2019 年春季大部分地区人努力程度显著提升，而夏季人努力程度有所下降；2019 年气象条件普遍更为有利，且相对影响程度减弱。区别于前一章逐年的评价指标，“人努力-天帮忙”地图将更精细化地给出各城市各季度治理情况的衡量。

- **2019 年“人努力”情况**

北京大学统计科学中心

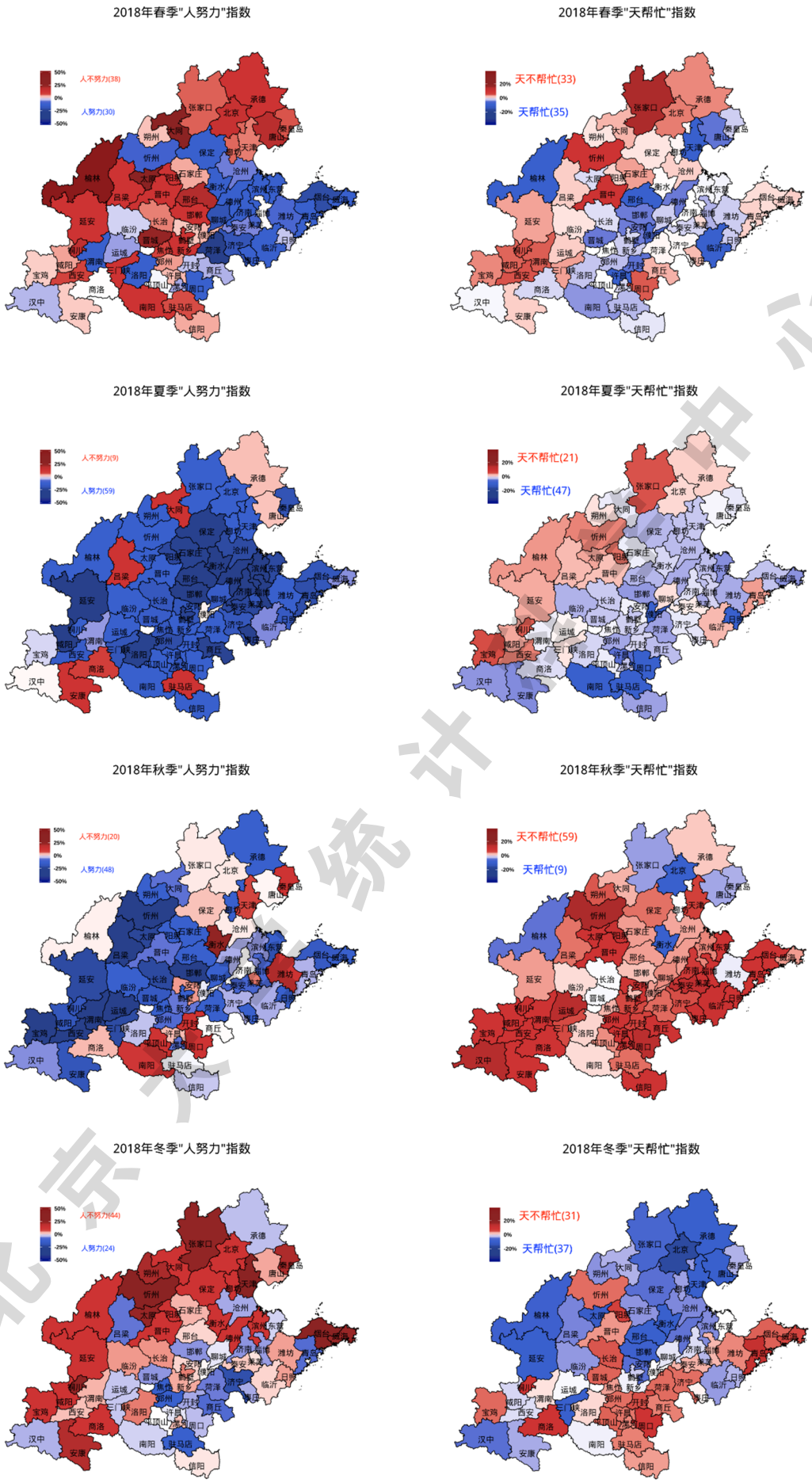


图 40：“2+66”城市 2018 年各季节 $PM_{2.5}$“人努力”指数与“天帮忙”指数地图

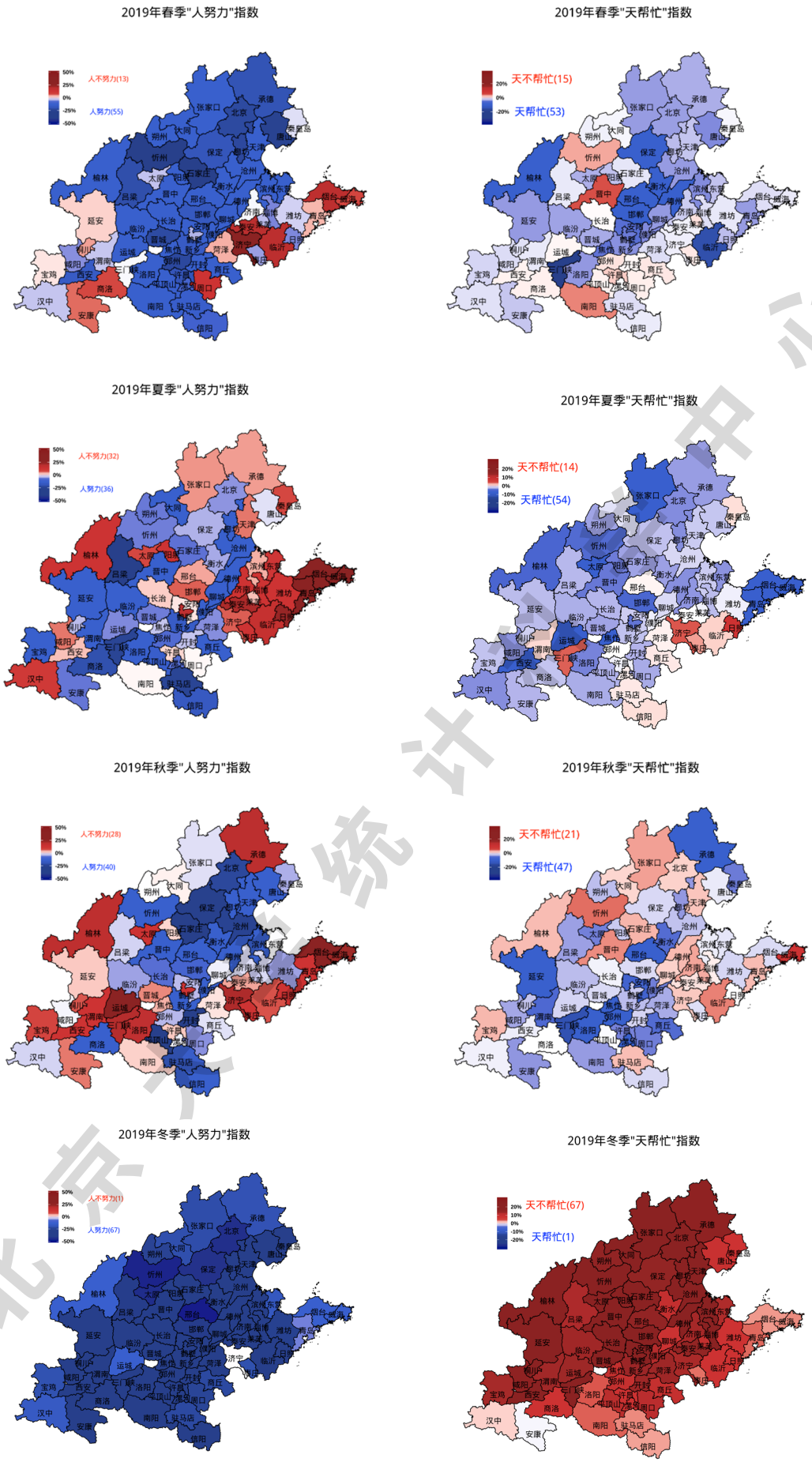


图 41：“2+66”城市 2019 年各季节 $PM_{2.5}$“人努力”指数与“天帮忙”指数地图

图 41 左侧四图反映 2019 年 68 个城市各季节“人努力”情况。我们可以看到，2019 年春季绝大多数城市（55/68）背景浓度下降，减排有一定效果，其中以忻州、石家庄、唐山、郑州最为明显，调整后浓度下降超过 20%；而山东、陕西部分城市有所恶化，排放水平上升。夏季情况不容乐观，32 个城市均属“人不努力”，尤其山东省几乎全境 $PM_{2.5}$ 背景浓度上升，烟台、青岛上升比率超过 30%；秋季有所好转，但烟台、威海排放水平依然相较 2018 年秋天显著上升，陕西省商洛排放水平下降、汉中变化不大，其余各市排放水平均有所上升；冬季由于疫情影响，2 月份大范围停工停产和交通限制，除济宁市几乎没有改善外，67 个市 $PM_{2.5}$ 排放均明显减少。

- **2019 年“天帮忙”情况**

图 41 右侧四图反映 2019 年 68 个城市各季节“天帮忙”情况。我们可以看到，2019 年春季绝大多数城市（53/68）气象条件也较为有利，除忻州、晋中、南阳气象条件相对不利于 $PM_{2.5}$ 扩散，其他“天不帮忙”城市对整体浓度变化影响不大；夏季情况与春季类似，54 个城市属于“天帮忙”状态，“天不帮忙”城市中仅济宁、日照和三门峡气象条件较为不利；秋季气象情况变化较大，北部、东部部分城市与西部宝鸡、南部驻马店气象均较为不利；而冬季一般气象条件会相对不利，19 年此现象更加显著，除安康市调整前后差别不大外，其余 66 市均为“天不帮忙”。

因此，鉴于气象因素对污染物浓度的影响不可忽略，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，更为准确评估大气减排的真实效果。

- **疫情调整后“人努力-天帮忙”指数**

由于疫情爆发，2019 年冬季停工停产和交通管制导致 66 个城市排放水平下降，为了评估基于去除疫情影响因素后真实排放水平的“人努力-天帮忙”指数，用 $\tilde{x}'_2$ 表示去除疫情影响后的气象调整前浓度和气象调整后浓度。以 $PM_{2.5}$ 为例，用 $x_1, \tilde{x}_1, x_2, \tilde{x}_2$ 分别代表 $PM_{2.5}$ 上一年某季节原始浓度、上一年度调整后浓度、本年同一季节原始浓度、本年同一季节调整后浓度，对 $PM_{2.5}$ 浓度该季节原始浓度年际变化率 $\frac{x_2-x_1}{x_1}$ 重新分解：

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

其中，“天帮忙”指数为 $\frac{x_2-\tilde{x}_2}{x_1}\times 100\%$，保持不变，“人努力”指数为 $\frac{\tilde{x}'_2-\tilde{x}_1}{x_1}\times 100\%$，因此仅考虑 2019 年冬季“人努力”指数即可。

北京大学统计科学中心

图 42 反映 2019 年 68 个城市冬季节“人努力”情况。我们可以看到，由疫情调整前的 67 变为 64 个城市背景浓度下降，其中，除济宁仍旧是“人不努力”城市且红色显著变深外，山东省青岛、烟台、威海三市由“人努力”变为“人不努力”。部分城市“人努力”指数有所降低，颜色显著变浅的有山东省大部分城市以及山西省长治、晋城，河南省商丘、驻马店、洛阳、开封，陕西省渭南、宝鸡。经过疫情调整后，“人不努力”城市增多，“人努力”指数整体有所下降，能够更加客观反映冬季除去疫情影响后人为排放水平的变化情况。

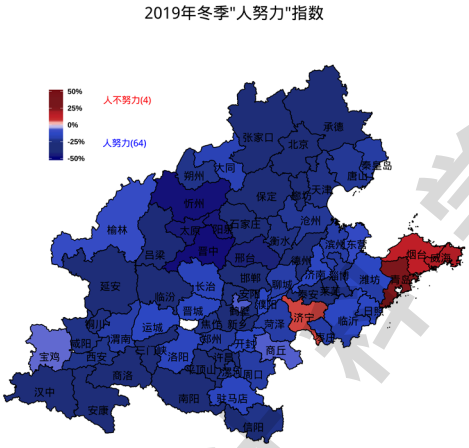


图 42：“2+66”城市 2019 年冬季去除疫情影响后 $PM_{2.5}$“人努力”指数地图

- **2019 年冬季情况**

本报告发现经过气象和新冠疫情调整后的主要污染物浓度在 2019 年冬季有显著下降，尽管在原始浓度中并未显示这一大范围下降。2019 年 12 月至 2020 年 1 月污染物浓度仅受到气象因素影响，而 2020 年 2 月，污染物浓度同时受到气象因素与疫情因素的影响，这使得 2019 年冬季污染物本地排放水平难以衡量，需要更加细致的评估。对于气象因素，如图 41 所示，2019 年冬季主要以不利气象为主，除安康市气象影响较小外，其他城市均为“天不帮忙”，大部分城市存在露点温度同期高于往年的现象。综合考虑气象和疫情因素，具体以 $PM_{2.5}$ 和 NO_2 为例（见图 12 和图 29），我们仍能观测到 2019 年冬季相比 2018 年冬季的显著下降。

具体而言，2019 年冬季共有 64 个城市的 $PM_{2.5}$ 浓度下降（除去济宁、威海、青岛、烟台）。相比于 2018 年冬季，京津冀地区沿太行山五城市、环渤海五城市和河北北部三城市 2019 年冬季 $PM_{2.5}$ 浓度分别下降 46.3、21.3 和 10.7 微克/立方米，降幅分别为 34.3%、24.8%和 22.0%，若不考虑气象和疫情调整，则原始浓度分别下降 17、0.6 和-4.4 微克/立方米，降幅为 14.7%、0.8%和-10.5%；河南、山东、山西、山西 2019 年冬季 $PM_{2.5}$ 浓度分别下降 26.1、11.8、31.9 和 21.5 微克/立方米，降幅分别

北京大学统计科学中心

为 21.6%、12.5%、31.3%和 21.9%，若不考虑气象和疫情调整，则原始浓度分别下降 22.6、9.1、8.8 和 11.8 微克/立方米，降幅为 19.5%、10.6%、9.5%和 12.6%。

除济宁、大同、东营、青岛、烟台外，其余 63 个城市冬季二氧化氮浓度均下降，相比于 2018 年冬季，京津冀地区沿太行山五城市、环渤海五城市和河北北部三城市 2019 年冬季二氧化氮浓度分别下降 9.9、10.6 和 6.9 微克/立方米，降幅分别为 14.8%、17.0%和 15.8%，京津冀各城市均达到过去五年最低值，若不考虑气象和疫情调整，则原始浓度分别下降 12.6、7.9 和 2.9 微克/立方米，降幅为 19.9%、13.8%和 7.2%；河南、山东、山西、陕西 2019 年冬季二氧化氮浓度分别下降 7.6、5.2、7.9 和 6.3 微克/立方米，降幅为 14.7%、9.7%、14.3%和 12.2%，若不考虑气象和疫情调整，则原始浓度下降 13、11.6、6.4 和 9.1 微克/立方米，降幅为 25.4%、22.1%、12.0%和 18.2%。

调整后污染物浓度的显著下降是 12 月和 1 月的冬季大气污染排放的有效治理和经济生产所带来的排放减少造成的，同期排放水平较往年有所降低。《京津冀及周边地区 2019-2020 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》继续推进清洁取暖，散煤替代，严防散煤复烧等主要任务。根据各地上报情况，2019 年 10 月底前，“2+26”城市累计完成散煤替代 524 万户。其中天津市 36.3 万户、河北省 203.2 万户、山西省 39.7 万户、山东省 114.3 万户、河南省 130.7 万户。相较于 2018 年 10 月底散煤替代 362 万户的目标，2019 年散煤控制又有大幅提升，其中天津市增加 17.3 万户，河北省增加 29.2 万户，山西省增加 11.7 万户；山东省增加 69.3 万户；河南省增加 49.7 万户。这与 2019 年五省二市的其它类煤炭消费量下降趋势基本吻合。这反映了各地的散煤燃烧控制政策已取得显著成效，对大气污染物浓度下降起到促进作用。同时，具体分析 2019 年冬季的情况发现，2019 年 12 月和 2020 年 1 月五省二市的其它类煤炭消费量较上年同月都有较明显的下降。因此，同时去除气象和疫情因素后，我们仍认为 2019 年冬季体现出显著的治理成效。

七、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。

北京大学统计科学中心

2020 年是打赢蓝天保卫战三年行动计划的目标年、关键年。据预测，受厄尔尼诺影响，2019-2020 年秋冬季气象条件整体偏差，不利于大气污染物扩散，第六节 2019 年冬季天帮忙指数也佐证了这一点。为了抵消不利气象条件带来的负面影响，生态环境部、国家发展和改革委员会、工业和信息化部等 16 部联合印发《京津冀及周边地区 2019-2020 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》的通知，要求京津冀及周边地区扎实推进各项任务措施，稳中求进，推进环境空气质量持续改善，全面完成 2019 年环境空气质量改善目标，协同控制温室气体排放，秋冬季期间（2019 年 10 月 1 日至 2020 年 3 月 31 日）$PM_{2.5}$ 平均浓度同比下降 4%，重度及以上污染天数同比减少 6%。方案指出，主要任务包括调整优化产业结构，加快调整能源结构（有效推进清洁取暖，严防散煤复烧，严格控制煤炭消费总量）等。

同时，2020 年也是不平凡的一年，1 月 23 日武汉封城，全国人民开始了一场没有硝烟的防疫战争。这场突如其来的新型冠状病毒肺炎（以下简称“新冠肺炎”）疫情影响到国民经济领域方方面面，对全国经济的宏观、中观以及微观层面都有重大的影响。人们待在家里，本该欢聚的春节假期变得冷清和肃然，单位推迟复工时间，各大企业纷纷开起“云办公”模式。为了反映华北地区的秋冬季大气污染综合治理工作的成效和新冠肺炎疫情的影响，图 43 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。从图中可以发现，2019 年春夏秋三季各省市的生铁、粗钢、水泥产量和发电量均与上年同期水平相比基本持平。与 2018 年冬季相比，各省市在 2019 年冬季的生铁产量和粗钢产量都基本保持不变或略有上升，水泥产量则有显著下降的趋势。而各省市在 2019 年冬季的发电量也与 2018 年冬季基本持平，只有陕西省存在明显上升的趋势。

为了进一步分析新冠肺炎疫情对各行业的影响，我们通过分析 2017-2019 年冬季各月（当年 12 月至次年 2 月）的主要工业产品产量发现，2019 年 12 月，河北和山西省的生铁和粗钢产量比上年同月有同比上升，天津市、河南和陕西省产量基本持平，只有山东省产量比 2017 年和 2018 年 12 月的产量都要低。而 2020 年 1-2 月中，河北省的生铁和粗钢产量持续高于 2019 年同月水平，山东省逆势上升，超过 2018 年同月水平，其他省市则与 2019 年同月产量基本持平。从这些数据中看不出此次新冠肺炎对钢铁行业的影响。然而，据中国铁合金网分析[23]，不同钢铁企业受疫情的影响不同，受疫情影响较大的企业约占 30%。大型钢铁企业因为有较为充足的原料储备和较强的资金能力，生产一直保持稳定。据中国钢铁工业协会统计，2020 年 1 月下旬，全国共生产粗钢 2938.71 万吨，环比增长 0.56%；生产生铁 2457.55 万吨，环比增长 3.71%；生产钢材 3687.48 万吨，环比增长 0.37%，除湖北省钢铁企业受该影响较大之外，大部分钢铁生产企业均能实现稳定生产。而 2 月上旬，全国共生产粗钢 2656.71 万吨，环比下降 2.18%，同比增长 8.67%；生产生铁 2154.15 万吨，环比下降 0.85%，

图 43：京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

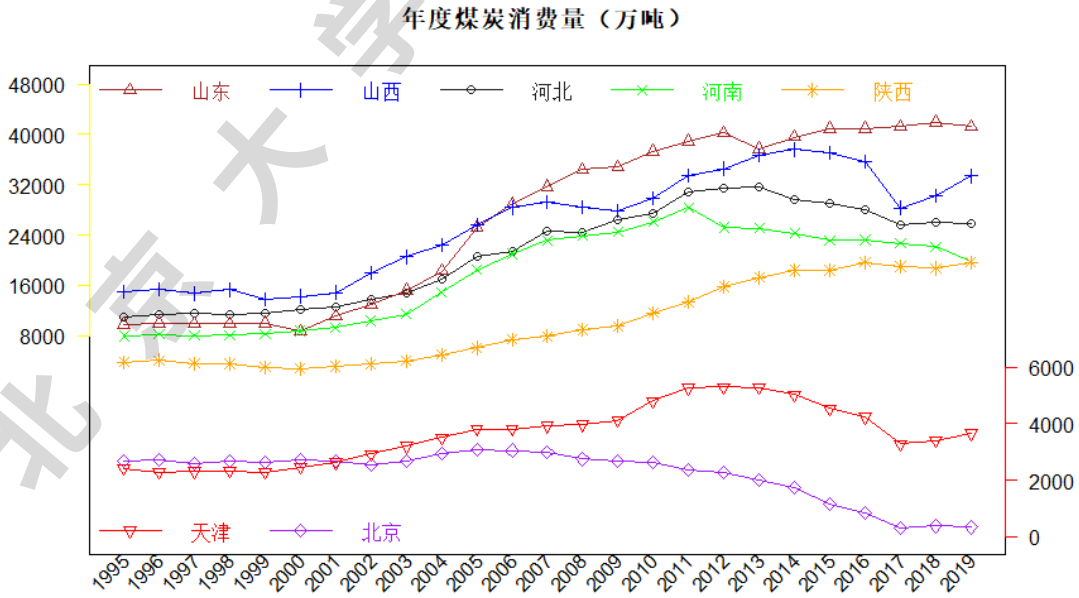


图 44：京津冀晋鲁豫陕五省二市自然年年度煤炭消费总量(万吨)

（1995-2016 年数据来自国家统计局网站，2017-2019 年数据来自中国煤炭资源网）

北京大学统计科学中心

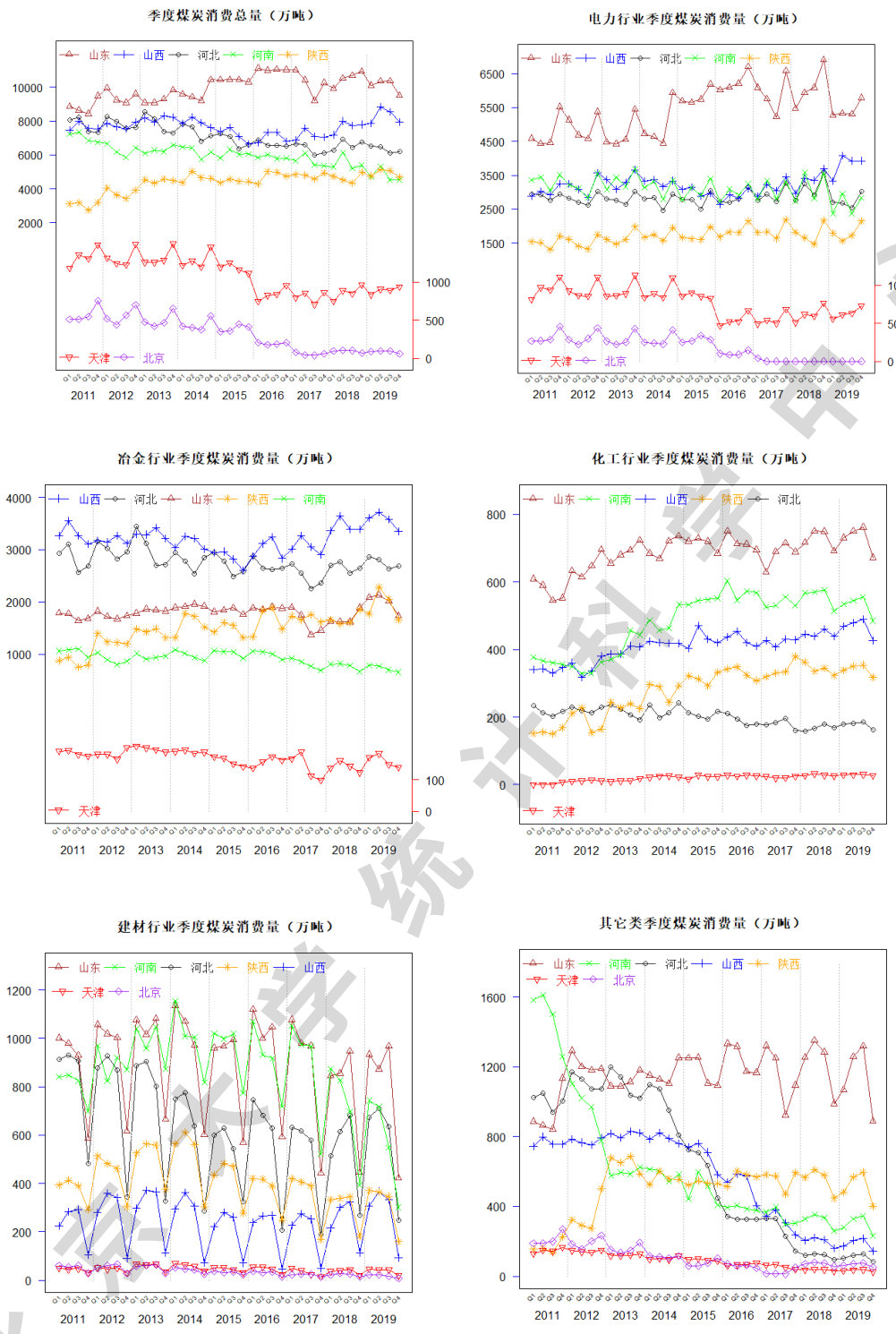


图 45：京津冀晋鲁豫陕五省二市季度分行业煤炭消费量

同比增长 5.62%；生产钢材 3339.98 万吨，环比下降 7.64%，同比增长 5.65%。全国粗钢在 2 月上旬比 1 月日产水平下降 4.11%，生铁日产水平下降 3.46%，钢材日产水平下降 6.97%，呈现短期波动态势。此次疫情对钢铁行业的影响还体现在下游复工延迟，钢材需求滞后，钢铁企业库存压力不断增大等方面。对建材行业而言，2020 年 1-2 月各省市的水泥产量比上

北京大学统计科学中心

年同期均明显下降，但下降幅度并不大。由于疫情期正处于建材行业生产淡季，疫情对建材行业的影响被冲淡。疫情期间，受物流运输和人员流动限制影响，建材行业需求端受到较大影响。预计从第二季度复工复产后情况将会得到显著的改善。同时，受疫情影响，由于部分企业不能正常开工复工，2020 年 1-2 月各地发电量也均有所下降。

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 44 给出了京津冀晋鲁豫陕五省二市 1995-2019 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北京奥运会之前的 2007 年就开始稳步下降，2017 年北京市大规模取消燃煤锅炉，加大清洁能源采暖比重。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，2017 年的煤炭消费总量比 2016 年下降了 63.6%。与此同时，天津市和河北省也开始大力推广清洁能源。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左右的最低水平，这体现了京津冀地区空气污染治理措施的巨大成效。2017 年，京津冀周边地区也加入蓝天保卫战。其中，山西和河南省自 2013 年起煤炭消费总量逐年下降。山东省每年煤炭消费总量约 4 亿吨，位居全国首位，煤炭在全省能源消费总量中比重达到 80%左右。2019 年 7 月 22 日，山东省发展和改革委员会发布关于对《山东省煤炭消费压减工作总体方案(2019-2020 年)》征求意见的函，制定了山东省 2019-2020 年煤炭消费压减工作的总体方案。经过一年的努力，山东省 2019 年的煤炭消费总量较 2018 年有所下降。经过 2017 年的停工限产令后，2018 和 2019 年各省市的工业生产煤炭消耗总量较 2017 年均有所上升，但上升幅度并不大。

为进一步了解京津冀晋鲁豫陕五省二市的煤炭消费量，图 45 分别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 45 的煤炭消费总量趋势图可以看出，2017 年秋冬两季山东省煤炭消费总量比上年同期同比下降了 11.8%，达到近三年来最低水平；2018 年有所回升，这主要由电力行业和冶金行业的煤耗量上升引起；2019 年夏秋冬三个季度中，山东省煤炭消费总量均较 2018 年同期水平下降 6.0%。这与华北及周边地区持续调整优化产业结构有直接关系。山东省主要通过压减焦化产能和提升清洁能源使用比例，这也体现在山东省各行业的煤炭消费量中。图 45 显示，山东省的电力行业和其它类耗煤量较 2018 年各季度均有明显下降趋势，这反映了调整能源结构等举措的有效性。山东省冶金行业的煤炭消费压减工作也还在持续进行中，2020 年是收官之年，值得我们持续关注。

除了山东省，河北和河南 2019 年各季度的煤炭消费总量也比 2018 年有明显下降，其中河北 2019 年夏秋冬三季的煤炭消费总量均下降超过了 5%，河南省 2019 年四个季度下降均

超过了 10%，这主要得益于电力行业的耗煤量下降。而它们的发电量没有很大的下降（如图 43），因此电力行业的耗煤量下降主要与之前提到的大力提升清洁能源使用比例的举措直接相关。而天津市、山西和陕西省的电力行业煤炭消费量却逆势上升，其中天津市 2019 年春秋两季电力行业煤炭消费量均同比上升超过 5%，山西省春夏秋冬三季上升超过 10%，陕西省秋季上升 17.8%，这是由于它们 2019 年的发电量明显上升（如图 43 所示）。受到新冠肺炎疫情的影响，2019 年冬季各地化工和建材行业煤耗量下降明显，这与上文中的分析一致。值得提出的是河南省，2018 年全年建材行业煤炭消费量为历年来最低，2019 年电力、冶金、化工与建材行业及全年的煤炭消费量都较 2018 年有明显下降。其中建材行业下降最多，是由建材产品产量的下降引起。冶金行业的煤炭消费量也有明显下降，但图 43 显示河南省的生铁和粗钢产量比 2017 和 2018 年还有所上升，这说明河南的煤炭消费减量工作成效明显。

图 45 也展示了其它类煤炭消费量的情况，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燃烧的治理情况。从图 45 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 年冬季至今。受到新冠肺炎疫情的影响，2019 年冬季各地其它类煤炭消费量下降明显。同时，《京津冀及周边地区 2019-2020 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》再次明确了有效推进清洁取暖，严防散煤复烧等主要任务。报告指出，根据各地上报情况，2019 年 10 月底前，“2+26”城市完成散煤替代 524 万户。其中，天津市 36.3 万户、河北省 203.2 万户、山西省 39.7 万户、山东省 114.3 万户、河南省 130.7 万户。这些举措有效地降低了各地的其它类煤炭消费量，京津冀晋鲁豫陕五省二市 2019 全年其它类煤炭消费量同比下降了 9.4%至 10.2%，取得不错的成果，值得继续关注。

为了进一步分析新冠肺炎疫情对煤炭消费量的影响，我们也分析了 2017-2019 年冬季各月（当年 12 月至次年 2 月）的分行业煤炭消费量。由于受到疫情影响，各省市各行业 2020 年 2 月的煤炭消费量均有所下降，尤其是山东省和河南省（疫情较严重地区）。这与上文的分析与经济形势都相符。

八、总结与建议

总体来看，2019 年“2+66”城市大气中颗粒物、二氧化硫和一氧化碳污染状况在扣除气象和疫情影响后有大幅度改善，京津冀“2+8”城市及河南的二氧化氮开始出现改善迹象，而臭氧的污染进一步恶化。由于我国大气监测网络始建于 2013 年，许多“2+66”城市 2013 的数据不全，我们的结果汇总集中于 2014 年到 2019 年的六年。通过汇总第二到第七节的分

北京大学能源研究中心

析结果，我们对“2+66”城市过去六年的空气质量状况及变化趋势得到一些结论，并提出建议供有关部门参考。

（一）$PM_{2.5}$和PM_{10}

2019 年 $PM_{2.5}$ 浓度在扣除气象和疫情影响后下降显著，京津冀位于华北平原的“2+8”市下降了 14.7 微克/立方米（20.2%）， 这一下降幅度超过上一次 2015 年的 15.5%的降幅。河南、山西 2019 年 $PM_{2.5}$ 也下降显著，河南下降了 13.7%，山西下降 17.3%。以上下降幅度是通过去除气象干扰后计算得出，原始的污染物浓度并不能反映出来。2019 年 $PM_{2.5}$ 的下降是二氧化硫、一氧化碳和二氧化氮的大幅下降所致，详见之后小节。2019 年大气污染的大幅度改善一个主要原因是过去几年在京津冀和周边地区推行的散煤替代改气、改电对大气污染的力度在逐年加大造成，详见报告第 6-7 节。

如图 46 所示，**经过近六年的治理，京津冀 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染已经有了明显改善。**京津冀平原地区“2+8”市 $PM_{2.5}$ 累积降幅达到 51.9%。**山东，河南改善幅度次之，分别为 32.5%和 30.5%；山西和陕西的改善程度较低，**累积降幅分别为 20.7%和 22.3%。PM_{10} 累积降幅京津冀平原地区“2+8”市为 49.4%；山东和河南次之，分别为 30.9%和 30.8%；陕西、山西较低，分别为 26.5%和 18.8%。**山西最近两年、陕西最近三年 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 才有下降趋势。**

2015 年“2+66”城市气象调整后的 $PM_{2.5}$ 年平均浓度最高的十个城市中，山东有 4 个城市，河北、河南分别有 3 个城市。在 2019 年平均 $PM_{2.5}$ 浓度最高的前十个城市中，已没有山东城市，河北省降至 2 个城市；河南省增加至 4 个城市，山西、陕西省分别有 3 个和 1 个城市列入前十。**这说明河北、山东在颗粒物治理上走在前面，山西、河南、陕西需尽快赶上。**

尽管过去六年 PM_{10} 显著下降，但 PM_{10} 中直径粗于 2.5 微米的颗粒物 $PM_{10-2.5}$ 的下降速度低于 $PM_{2.5}$ 的下降速度。图 47 显示了“2+66”城市 2019 年疫情调整之后相比 2015 年，$PM_{10-2.5}$ 年均浓度变化情况，其中 10 个城市的 $PM_{10-2.5}$ 浓度上升。**“2+66”城市 $PM_{2.5}$ 五年平均降幅为 24.6%，而 $PM_{10-2.5}$ 的下降幅度只有 18.5%，显著小于前者。因此我们建议加强对区域内扬尘的管理，有效减少 $PM_{10-2.5}$ 的浓度。**

（二）“十三五”$PM_{2.5}$达标进展

按照“十三五”规划要求，$PM_{2.5}$ 未达标（35 微克/立方米）地级及以上城市，其 $PM_{2.5}$ 年均浓度到 2020 年应该比 2015 年降低 18%。 五省二市“2+66”城市 2015 年 $PM_{2.5}$ 未达标的城市有 67 个。经过气象及疫情调整后的计算，到 2019 年有 46 个在 2015-2019 年间 $PM_{2.5}$ 年平均浓度的累计降幅已经达到 18%，**但仍有 21 个城市未实现。未达标城市主要分布在山**

西和陕西，具体分布为河北 1 个、河南 3 个、山东 2 个、山西 8 个、陕西 7 个。具体城市达标情况名单参见附表 3。

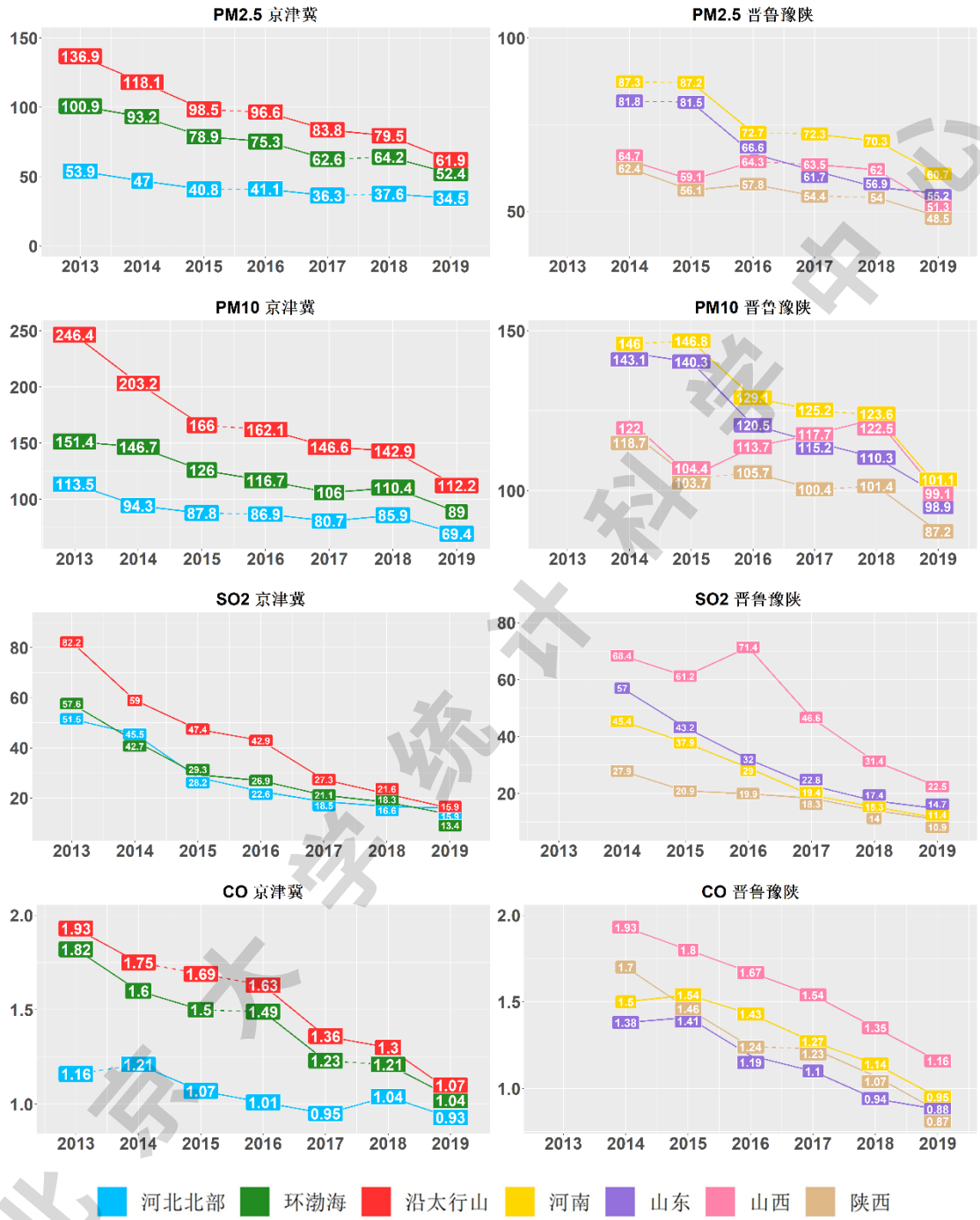


图 46：“2+66”城市去除气象和疫情因素影响后 $PM_{2.5}$、PM_{10}、二氧化硫和一氧化碳年平均浓度时间序列

（一氧化碳的单位为毫克/立方米，其余污染物的单位为微克/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

其中河北北部：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。

北京大学统计科学中心

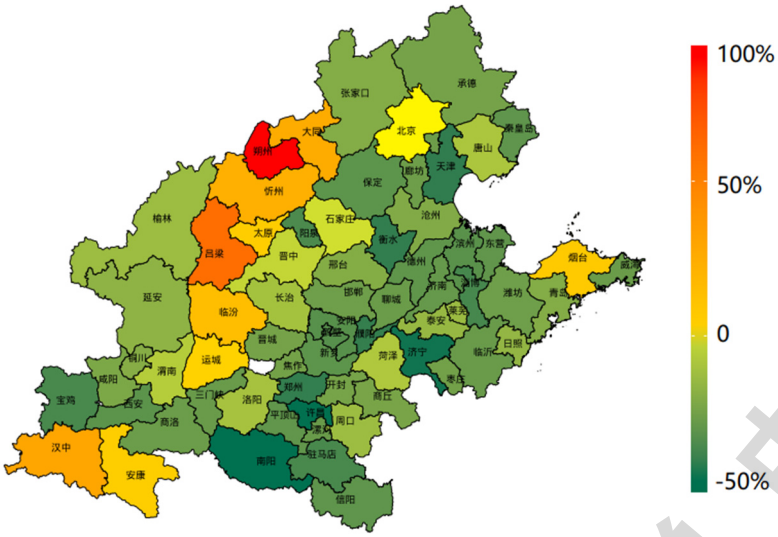


图 47：2015 至 2019 季节年 $PM_{10-2.5}$ 平均浓度累计变化率（红/绿色表示浓度升高/降低）

（三）二氧化硫和一氧化碳

各城市近几年逐渐推行“煤改气”、“煤改电”和燃煤脱硫等举措，得益于此**“2+66”城市二氧化硫浓度近六年稳步显著下降，京津冀、山东、河南、山西和陕西累积降幅均超过50%，**其中京津冀、河南、山东、山西、陕西过去六年分别降低 72.8%、74.2%、74.9%、67.1%、60.9%。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六年大气污染治理的最大亮点，也是区域范围颗粒物浓度显著下降的主要动力。

如图 46 所示，京津冀平原“2+8”城市 2019 年二氧化硫平均浓度已降至 14.65 微克/立方米，山西、山东、河南、陕西二氧化硫浓度在 2019 年分别降至 22.5、14.7、11.4、10.9 微克/立方米。2019 年持续过去六年下降的势头，相比 2018 年又有大幅下降，其中京津冀平原“2+8”城市下降 26.6%，河南、山东、山西、陕西分别下降 25.5%、15.5%、28.3%、22.1%。

一氧化碳的下降幅度要小于二氧化硫的下降幅度。京津冀、河南、山东、山西、陕西过去六年分别降低 43.7%、36.7%、36.2%、39.9%、48.8%。2019 年**一氧化碳年均浓度也有显著下降。**相比于 2018 年，京津冀平原“2+8”城市、河南、山东、山西、陕西 2019 年平均浓度分别下降 15.9%、16.7%、6.4%、14.1%、18.7%。

山西近六年二氧化硫和一氧化碳虽然下降明显，但是山西这六年均是五省二市七个区域中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五市。同时唐山、临汾、大同等焦化、钢铁重工业城市仍全年保持较高污染水平，以上地区一氧化碳仍需进一步治理。**由于一氧化碳也会促进臭氧的生成，我们建议通过有效减少机动车排放、生物质燃烧和一般工业排放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。**

北京大学统计科学中心

（四）二氧化氮

“2+66”城市二氧化氮改善程度一直不及二氧化硫和一氧化碳，但2019年开始在京津冀、河南出现改善迹象。过去六年京津冀平原“2+8”市、山东和河南分别累积下降了20.5%、17.2%和12.1 %，远远低于二氧化硫和一氧化碳的下降程度；陕西、山西2019年较2014年污染水平上升0.01%、11.5%。其中，山西仅在2015年和近两年出现微弱下降，而陕西仅在2018和2019年有所下降。其余地区2019年虽然有所下降，但下降幅度较小。

2019年二氧化氮在京津冀平原“2+8”城市、河南、陕西出现改善迹象，分别下降4.7、3.6、2.5微克/立方米，降幅达9.3%、8.9%和6.2%，这是一个可喜的迹象。然而山东、山西只下降0.7、0.3微克/立方米，仅下降了1.8%、0.7%。山东、山西过去三年二氧化氮浓度分别减少0.3、-3.2微克/立方米，这两个省还没有找到减少二氧化氮的有效方案。

2015年，在“2+66”城市气象调整后的NO_2年平均浓度最高的排名前十位中，山东有2个城市，河北、河南分别有4个城市。2019年，山东、河北、河南省均有改善，年平均浓度最高的排名前十位中，分别占1、3、1个城市，与$PM_{2.5}$情况相似，山西、陕西省分别有2个城市出现在前十位，天津市排名第八，此“二省一市”亟需防控。

鉴于本研究涉及的国控站点多在城市中心区，其所度量的二氧化氮主要源于机动车排放，故机动车排放的控制应是下一步大气治理的重点。由于二氧化氮是臭氧的前体物，减少二氧化氮也是遏制区域内臭氧增加的有效手段。我们建议各省市采取措施有效减少机动车所生成的二氧化氮浓度，这在遏制臭氧的上升同时也为颗粒物浓度下降提供新的路径。

（五）8小时臭氧

“2+66”城市所在的五省二市过去六年8小时臭氧浓度均呈现上升的趋势，2019年持续恶化且未有减缓趋势，臭氧污染加重的问题日益突出。京津冀平原上“2+8”市、山东、山西、河南、陕西过去六年累积增幅分别为33.1%、24.4%、74.6%、40.7%和34.9%，其中山东增幅较低是由于其基数较高。**“2+66”城市中有21个城市累积增幅超过50%，10个城市超过60%。**同样地，在臭氧浓度最高的春夏两季，京津冀平原上“2+8”市、山东、山西、河南、陕西增幅分别为34.5%、20.7%、91.3%、37.5%和30.4%。山西的春夏平均臭氧浓度几乎翻倍，在逼近山东、河南的水平，情况令人担忧。

“2+66”城市2019年臭氧浓度保持增长趋势。相较于2018年，京津冀平原“2+8”城市、河南、山东、山西、陕西2019年平均浓度分别上升1.6%、2.6%、3.6%、3.4%、1.7%；春夏平均浓度则上升3.1%、3.6%、5.2%、5.6%、4.4%。

2015 年在“2+66”城市气象调整后的 O_3 年平均浓度最高的前十个城市中，山东占其中 7 个城市，河北、河南、山西分别有 1 个。**2019 年浓度最高的前 8 个城市均在山东省**，其余 2 个在河南省，**山东省应尽快采取有效措施加快治理臭氧的步伐。**

臭氧上升的一个原因是由于作为主要前体物之一的二氧化氮在“2+66”城市改善不大[3]。区域内气温上升也促进了臭氧生成的效率。我们建议像管控 $PM_{2.5}$ 一样，对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，避免部分地区面临颗粒物和臭氧双重污染的局面。

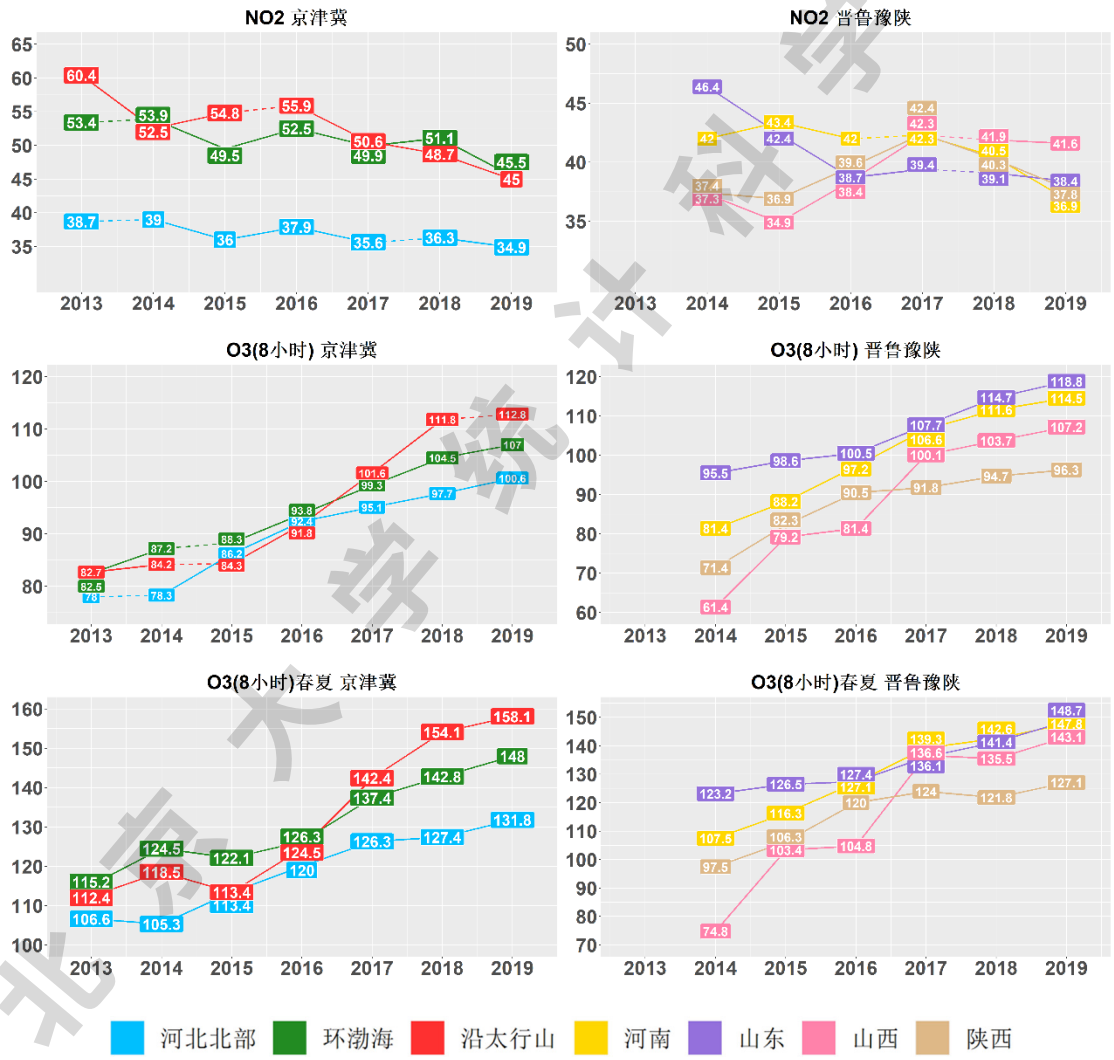


图 48：“2+66”城市去除气象和疫情因素影响后二氧化氮和臭氧 8 小时年（或春夏）平均浓度时间序列（微克/立方米）实线（虚线）代表在 5%统计学显著水平比上年有（无）显著增加或减少，图例同图 46

[3] 臭氧的另一类前体物是挥发性有机物（VOC），但我们没有这方面的数据，故其近几年的情况不得而知。

（六）疫情影响评价

受疫情因素影响，1 月 23 日武汉封城后全国迅速采取大规模人群居家隔离、复工延迟等举措以控制疫情。疫情防控举措对大气污染有何影响？为此我们做了统计学的准实验。尽管 1 月 23 日武汉封城，但考虑到春节在 1 月 25 日，在去除春节前后 7 天之后，我们选定 2020 年 2 月为研究区间，同时对照疫情开始之前从 12 月到 1 月及去年同期的数据，计算疫情管控的影响；具体方法和结果见[24]。我们提出了 Difference in adjusted-Difference 方法来估计 2020 年 2 月的污染物浓度在不受疫情防控措施影响下的预期水平。具体而言，我们假设在不受疫情管控影响且气象条件相同的前提下，相较于冬季前两个月（12 月、1 月）的污染物平均浓度，2 月的污染平均浓度的相对变化在 2019 年和 2020 年是相同的。在该假设之下，对于每一个给定的气象条件，我们都可以得到 2020 年 2 月所对应的无管控条件下预期浓度，进而可以得到均衡气象条件下的平均浓度。该方法去除了污染物浓度水平固有的年际变化趋势、以及不同的时间阶段气象分布不同带来的混杂影响。2019 年冬季疫情调整的平均浓度由 12 月至 1 月 30 日气象调整后浓度与疫情调整后浓度按天数加权平均所得，季节年平均浓度由气象和疫情调整后的冬季浓度与其他季节气象调整后的浓度平均所得。

“2+66”城市 2020 年 2 月疫情调整前后主要污染物的平均浓度降幅如图 49 所示。对于颗粒物浓度，受疫情影响，五省二市中共 57 个城市有额外下降，导致 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 在 2020 年 2 月平均浓度降幅平均值达 29.8 和 17.8 微克/立方米，降幅分别为 30.9%和 14.3%，其中浓度降低超过 30 微克/立方米的城市分别有 32 个和 23 个。对于 $PM_{2.5}$，山东，河南受疫情影响降幅较大，浓度分别降低 42.6、39.2 微克/立方米，降幅达 43.9%和 38.7%。京津冀、陕西、山西则平均下降 20.6、19.3、16.0 微克/立方米，降幅分别为 25.4%、16.4%、18.2%。PM_{10} 方面，河南、山东受疫情影响下降较多，分别下降 27.9 和 32.9 微克/立方米，降幅可达 24.0%和 32.7%。

二氧化氮受疫情影响最为显著，五省二市 2020 年 2 月平均浓度一致下降，降幅平均值为 16.9 微克/立方米（39.6%）。**这是由于二氧化氮主要污染来源之一为城市交通**，后者因疫情管控受到严格控制。山东受疫情影响差异最大，下降 24.2 微克/立方米，降幅为 51.8%，京津冀、河南、山西、陕西分别下降 18.6、17.1、7.9、12.2 微克/立方米，降幅分别是 40.3%、44.3%、19.3%、32.5%。

北京大学数学计算中心

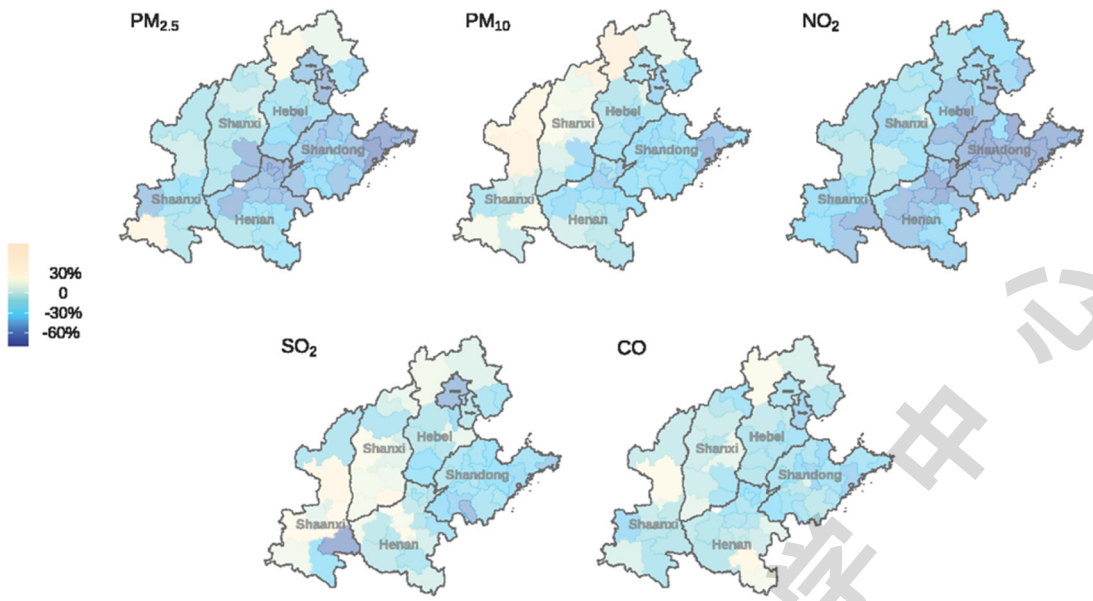


图 49：“2+66”城市 2020 年 2 月疫情调整前后主要污染物平均浓度降幅（负数表示调整后浓度上升）

二氧化硫和一氧化碳浓度受疫情影响相对较小。五省二市 2020 年 2 月二氧化硫平均浓度降幅平均值为 1.7 微克/立方米，降幅为 10.0%，其中 10 个城市浓度影响幅度不超过 1 微克/立方米，52 个城市浓度影响幅度在 5 微克/立方米以内；一氧化碳 2020 年 2 月平均浓度降幅平均值为 0.19 毫克/立方米，降幅为 13.9%。其中 21 个城市浓度影响幅度不超过 0.1 毫克/立方米。

由于二月份疫情期间主要重工业品的产量，除了建材和发电外，同去年同期和疫情爆发前的 12 月和 1 月均没有太大变化，有的品种甚至增加（具体见报告第七节）。我们认为疫情期间 $PM_{2.5}$ 的下降主要是由于人群隔离所导致的二**氧化氮下降所产生的。**

新冠疫情为我们提供了获得冬季中国北方地区大气污染的下界的机会。从以上汇总的污染物受疫情影响的下降的百分比值，我们得到在目前供暖、电力和基本生产的排放模式下，中国北方冬季 $PM_{2.5}$ 最多还有 30.9%的下降空间，**二氧化氮最多 39.6%，而二氧化硫和一氧化碳的下降空间最小，分别只有** 10.0%和 13.9%。

但由于在一般情况下并无法实施疫情期间的防控措施，所以以上下界并不能轻易达到。这说明，北方地区在目前的排放模式下达到 $PM_{2.5}$ 达到 35 微克/立方米以下的目标，会有相当大的挑战。我们注意到北方地区在过去几年开始的散煤替代、煤改气、煤改电所带来的大气污染的改善已经有相当多的释放（见上面（一）分析）。所以产业结构的改善和升级应该是改善北方地区大气污染的途径。

北京大学统计科学中心

（七）煤炭消耗

我国的煤炭消耗与工业生产密切相关。2019 年春夏秋冬四个季度，各省市的生铁和粗钢产量均与上年同期水平相比基本持平或略有上升。其中增加最多的是天津市（生铁产量共增加 378 万吨，同比上升 22.1%；粗钢产量共增加 164 万吨，同比上升 8.1%）和山西省（生铁产量共增加 373 万吨，同比上升 7.6%；粗钢产量共增加 403 万吨，同比上升 7.2%），增加最少是山东省和陕西省。与此同时，除北京市和河南省下降外，2019 年四个季度各省市的水泥产量和发电量也都在上升。山西省水泥产量同比上升幅度最大，达到 16%；陕西省发电量同比上升幅度最大，达到 15%。

为了研究新冠肺炎疫情对我国工业生产的影响，我们重点分析了 2019 年冬季的工业产品产量。与 2018 年冬季相比，各省市在 2019 年冬季的生铁产量和粗钢产量都基本保持不变或略有上升。而各省市的水泥产量在 2019 年冬季均下降超过 5%，天津市、山西省和陕西省下降超过 10%，北京市和河南省下降超过 20%。2019 年冬季，北京市、河南省和山东省的发电量下降幅度也是最大的（超过 5%），河北省和山西省基本保持不变，陕西省发电量则同比上升 13.8%。这反映出**此次疫情对建材行业和电力行业的影响较大。**

对煤炭消费量而言，京津冀地区 2019 年煤炭消耗量为 2.99 亿吨，相较 2017 年的 2.92 亿吨上涨 2.4%。该涨幅主要来源于天津和河北的电力行业和冶金行业煤耗量上升。晋鲁豫陕四省 2019 年的煤炭消耗总量为 11.4 亿吨，相较 2017 年的 11.1 亿吨上涨了 2.7%。其中，山西省 2019 年消费煤炭总量为 3.3 亿吨，比 2017 年的 2.8 亿吨上涨了 17.9%，主要上涨在电力和冶金行业。**从图 43（见第七节）可以看出，2019 年各季度山西省的发电量和生铁、粗钢产量均比 2017 年和 2018 年有所上升，这是引起煤炭消费量增加的重要原因。而河南省是这五省二市中唯一一个自 2017 年起煤炭消费总量逐年下降的省份，**从 2017 年到 2019 年下降了 13%。河南省煤耗量中下降最多的是建材行业，这主要是由于其建材产品产量降低；其冶金行业煤耗量也下降明显，但生铁和粗钢产量反而还有所上升，说明河南省的煤炭消费减量工作成效明显。

值得提出的是，**2019 年各省市的“其它类”煤炭消费量都在持续下降，**其中河北省从 2017 年的 1100 万吨下降到 500 万吨以下，山西省从 2017 年的 1300 万吨下降到 800 万吨以下。之前受到我们关注的山东省“其它类”耗煤量也有所下降。**这说明五省二市对煤炭消费减量工作和散煤燃烧控制等工作的成效非常明显。**

北京大学统计科学中心

受到新冠肺炎疫情影响，各行业的工业产品产量受到一定的影响，尤其是冶金和建材行业。这使得各省市 2020 年 2 月的煤炭消费量均有所下降，尤其是山东省和河南省。**但总体而言，疫情对工业产品产量和煤炭消费量的影响不大。**

（八） “2+66”城市过去两年污染物变化情况

为了了解近两年的大气污染改善情况，我们在图 50 给出了 2019 季节年相比 2017 年“2+66”城市污染物浓度变化幅度的分布。如图 50 所示，2017-2019 年，$PM_{2.5}$ 浓度降幅最大的是山西省忻州市（31.4%），增幅最大的是山东省威海市（18.6%）。$PM_{2.5}$ 浓度降幅超过 20%的城市有 16 个，其中京津冀地区 6 个（保定、石家庄、邯郸、沧州、廊坊、邢台），河南省 2 个（郑州、平顶山），山东省 3 个（德州、聊城、菏泽），山西省 5 个（忻州、吕梁、临汾、晋中、阳泉）；$PM_{2.5}$ 浓度不降反增的城市有 4 个，其中山东省 3 个（青岛、威海、烟台），陕西省 1 个（榆林）。$PM_{2.5}$、$PM_{10-2.5}$ 的改善幅度相近，经疫情调整后各城市降幅均值接近 15%，且 $PM_{2.5}$ 的下降幅度比 $PM_{10-2.5}$ 变异更小。$PM_{10-2.5}$ 降幅较大的城市主要位于河南，而山西北部晋城、朔州、大同，陕西安康和山东泰安 $PM_{10-2.5}$ 出现显著恶化，增幅最大的是大同（35.8%）。**山东 2019 年颗粒物污染有所反弹，尤其是春夏两季 $PM_{2.5}$ 浓度有所增加，两季平均浓度较去年提高 1.78 微克/立方米（4.3%）。**

2017-2019 年，“2+66”城市臭氧污染情况明显恶化。68 个城市中有 62 个城市臭氧浓度增加，增幅最大的是山东省莱芜市（20.2%），增幅最小的是陕西省汉中市，减少 7.2%。臭氧浓度增幅超过 15%的城市有 9 个，其中京津冀地区 2 个（天津、邯郸），河南省 1 个（焦作），山东省 4 个（莱芜、聊城、滨州、威海），山西省 2 个（吕梁、太原）。

2017-2019 年，“2+66”城市平均来看二氧化氮污染情况改善较为轻微，局部地区有恶化。二氧化氮浓度降幅最大的是河南省驻马店市（24.7%），增幅最大的是山西省大同市（21.0%）。降幅超过 15%的城市有 11 个，其中京津冀地区 1 个（邯郸），河南省 5 个（驻马店、漯河、郑州、鹤壁、南阳），山西省 1 个（运城），陕西省 4 个（渭南、西安、咸阳、延安）。二氧化氮浓度不降反增的城市有 16 个，其中京津冀地区 1 个（承德），山东省 7 个（烟台、济南、威海、东营、滨州、潍坊、枣庄），山西省 5 个（吕梁、临汾、朔州、忻州、大同），陕西省 3 个（榆林、安康、铜川）。

2017-2019 年二氧化硫、一氧化碳的改善情况较好。所有城市的二氧化硫年平均浓度都有改善，其中降幅最大的是延安（74.1%），降幅超过 50%的城市有 14 个，主要位于山西、河南。一氧化碳年平均浓度除张家口、青岛、枣庄 3 市外都有改善，降幅最大的是洛阳（44.7%），降幅超过 30%的城市有 15 个，分布在晋鲁豫陕四省。

北京大学统计科学中心

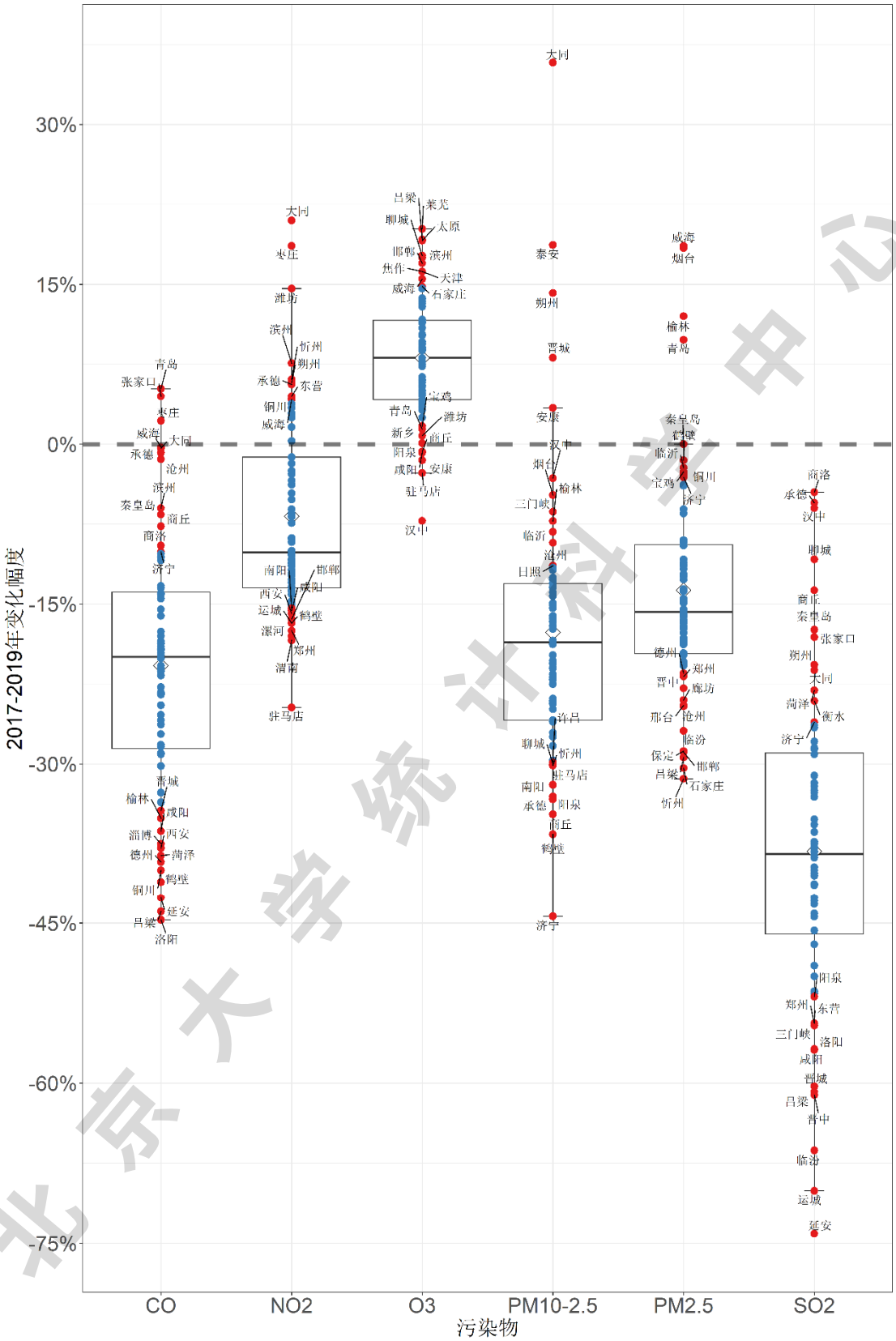


图 50：“2+66”各城市 2017 至 2019 季节年大气污染物年均浓度变化幅度对比

（2019 年除臭氧外的各污染物浓度均经过疫情调整）

北京大学统计科学中心

（九）提高空气质量“良”的标准

通过分析京津冀晋鲁豫陕五省二市过去六年的空气优良率，中国空气质量已有非常显著的改善。“2+66”城市 $PM_{2.5}$ 年中位数浓度已从 2015 年的 76.6 微克/立方米，降至 2019 年的 55.5 微克/立方米。**我们认为目前以 $PM_{2.5}$ 为 75 微克/立方米作为空气质量“良”的上限已过于宽松**。我们注意到印度和孟加拉国 $PM_{2.5}$ “良”的标准分别为 60 和 65 微克/立方米，均比中国目前使用的 WHO“过渡时期”的初级指标所建议的 75 微克/立方米严格。**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，以减少中国公民的长期污染暴露水平。**

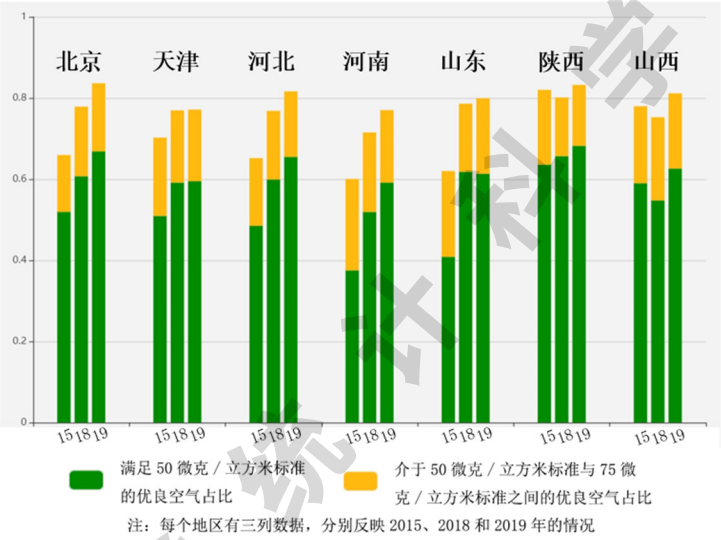


图 51：$PM_{2.5}$ 在 50 和 75 微克/立方米标准下，2015、2018 和 2019 年各地区平均优良率占比情况

如图 51 所示，在 50 微克/立方米为“良”标准下，虽然各城市优良空气占比平均下降 17.45%，但所有城市“优良空气”占比都超过 48%，其中 22 个城市优良空气占比在 60%以上。**各城市的“蓝天”天数仍然会保持在 50%以上。**大量科学研究发现长期暴露在 $PM_{2.5}$ 浓度 35 微克/立方米至 75 微克/立方米的空气中会对人体健康造成危害。**使用 50 微克作为“良”的上界，将提高中国手机、网页污染等级提示的标准，将使中国人群能实行更有效的保护措施，减少我国人群污染暴露水平。提高“良”的标准也会降低未来个人及国家的医疗健康开支，也将为下一步大气污染防治行动计划提供更高的目标和新的动能。**

（十）使用气象调整方法评估大气污染

本报告发现经过气象和新冠疫情调整后的主要污染物浓度在 2019 年冬季有显著下降。但这一大范围下降在原始浓度中并未显示。具体而言，相比于 2018 年冬季，京津冀地区沿

北京大学环境科学中心

太行山五城市、环渤海五城市和河北北部三城市 2019 年 12 月和 2020 年 1 月疫情开始之前 $PM_{2.5}$ 浓度分别下降 49.5、27.1 和 12.3 微克/立方米，降幅分别为 35.3%、29.5%和 23.7%，然而三个区域未去除气象影响的原始浓度分别只下降-0.3、-4.4 和-3.6 微克/立方米，降幅为-0.3%、-6.1%和-10.8%；河南、山东、山西、陕西 $PM_{2.5}$ 浓度分别下降 33.6、18.7、40.8 和 33.9 微克/立方米，降幅分别为 27.0%、19.0%、37.0%、31.8%，但未去除气象影响的原始浓度分别下降 5.0、-5.0、-0.5 和 4.0 微克/立方米，降幅为 4.4%、-5.9%、-0.6%和 4.2%，这体现了气象调整前后污染排放变化的显著区别。这一大的差异是由于 2019 年冬季“天不帮忙”，气象条件不利于污染扩散。

由于气象因素对污染物浓度的影响不可忽略，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，更为准确评估大气减排的真实效果。

北京大学统计科学中心

附录

附表 1：“2+66”城市 2015 至 2019 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		2019 年	
1	保定	17.71%	石家庄	23.71%	咸阳	10.56%	咸阳	13.62%	安阳	9.93%
2	德州	16.43%	保定	20.86%	邯郸	10.18%	安阳	13.54%	咸阳	9.05%
3	新乡	15.58%	邢台	18.43%	邢台	9.09%	石家庄	11.78%	石家庄	7.99%
4	衡水	15.55%	安阳	17.92%	安阳	9.01%	保定	11.42%	运城	7.92%
5	聊城	15.22%	邯郸	17.15%	临汾	8.84%	邢台	11.29%	西安	7.73%
6	郑州	14.45%	临汾	16.88%	西安	8.32%	邯郸	11.21%	濮阳	7.64%
7	菏泽	14.38%	咸阳	16.07%	石家庄	8.14%	临汾	11.09%	邢台	7.57%
8	焦作	13.39%	衡水	15.69%	保定	8.07%	郑州	10.87%	邯郸	7.39%
9	廊坊	13.27%	西安	14.99%	渭南	7.77%	开封	10.63%	临汾	7.36%
10	济南	12.86%	渭南	14.45%	郑州	7.57%	濮阳	10.45%	渭南	6.83%
11	邢台	12.78%	焦作	14.41%	运城	7.24%	许昌	10.27%	鹤壁	6.78%
12	石家庄	12.65%	北京	13.98%	开封	7.19%	焦作	9.85%	太原	6.47%
13	枣庄	12.59%	唐山	13.86%	焦作	7.13%	洛阳	9.76%	保定	6.23%
14	北京	12.21%	德州	13.73%	濮阳	7.12%	漯河	9.45%	郑州	5.41%
15	莱芜	12.19%	天津	13.08%	漯河	6.91%	南阳	9.18%	焦作	5.40%
16	平顶山	12.15%	新乡	12.39%	菏泽	6.75%	渭南	8.81%	聊城	5.38%
17	周口	11.73%	郑州	12.23%	南阳	6.63%	西安	8.73%	天津	5.37%
18	淄博	11.36%	廊坊	12.14%	许昌	6.41%	新乡	8.40%	开封	5.31%
19	济宁	11.34%	洛阳	11.98%	聊城	6.24%	平顶山	8.36%	漯河	5.31%
20	漯河	11.24%	鹤壁	11.94%	洛阳	6.09%	菏泽	8.32%	三门峡	5.30%
21	唐山	10.94%	聊城	11.88%	商丘	6.08%	运城	7.90%	德州	5.24%
22	东营	10.67%	太原	11.85%	莱芜	5.76%	周口	7.81%	洛阳	5.06%
23	临沂	10.52%	滨州	11.40%	平顶山	5.67%	三门峡	7.69%	宝鸡	4.99%
24	邯郸	10.44%	运城	11.37%	三门峡	5.60%	聊城	7.40%	衡水	4.83%
25	安阳	10.30%	濮阳	11.31%	周口	5.58%	太原	7.23%	唐山	4.78%
26	洛阳	10.11%	沧州	10.84%	德州	5.38%	衡水	7.20%	潍坊	4.74%
27	商丘	9.91%	开封	10.83%	晋城	5.36%	商丘	6.84%	许昌	4.73%
28	濮阳	9.74%	菏泽	10.05%	沧州	5.35%	宝鸡	6.77%	菏泽	4.72%
29	滨州	9.61%	晋城	9.98%	临沂	5.29%	晋城	6.74%	周口	4.53%
30	三门峡	9.47%	平顶山	9.73%	驻马店	5.24%	莱芜	6.64%	商丘	4.53%
31	许昌	9.28%	漯河	9.66%	枣庄	5.23%	鹤壁	6.62%	新乡	4.51%
32	开封	8.78%	许昌	9.53%	衡水	5.22%	忻州	6.59%	忻州	4.50%
33	驻马店	8.52%	莱芜	9.21%	太原	4.89%	临沂	6.52%	东营	4.30%

北京大学城市环境研究中心

排名	重度及以上污染状态占比									
	2015 年		2016 年		2017 年		2018 年		2019 年	
34	长治	8.34%	东营	9.13%	滨州	4.84%	阳泉	6.47%	济宁	4.18%
35	咸阳	8.23%	忻州	9.02%	新乡	4.78%	德州	6.27%	南阳	4.16%
36	潍坊	8.12%	阳泉	8.33%	淄博	4.72%	唐山	6.26%	滨州	4.11%
37	鹤壁	8.10%	济南	8.25%	唐山	4.58%	枣庄	6.22%	沧州	4.09%
38	天津	7.96%	枣庄	8.17%	济宁	4.56%	廊坊	6.07%	晋城	4.05%
39	运城	7.35%	宝鸡	8.17%	宝鸡	4.54%	泰安	6.03%	临沂	3.98%
40	沧州	7.10%	晋中	8.15%	忻州	4.50%	天津	6.02%	淄博	3.94%
41	日照	7%	淄博	8.08%	济南	4.40%	沧州	5.78%	廊坊	3.88%
42	泰安	6.83%	潍坊	7.75%	汉中	4.35%	淄博	5.71%	北京	3.82%
43	信阳	6.64%	三门峡	7.33%	鹤壁	4.08%	北京	5.40%	莱芜	3.81%
44	西安	6.57%	临沂	7.17%	廊坊	3.84%	潍坊	5.27%	平顶山	3.71%
45	宝鸡	6.50%	长治	7.04%	潍坊	3.80%	滨州	5.23%	泰安	3.52%
46	渭南	6.43%	商丘	7.01%	天津	3.78%	驻马店	5.16%	济南	3.32%
47	晋城	6.22%	驻马店	6.87%	东营	3.65%	济南	5.03%	晋中	3.32%
48	临汾	5.88%	朔州	6.59%	北京	3.63%	晋中	4.48%	枣庄	3.14%
49	南阳	5.11%	周口	6.22%	信阳	3.62%	铜川	4.43%	长治	3.06%
50	阳泉	5.10%	泰安	5.79%	阳泉	3.56%	汉中	4.33%	铜川	2.92%
51	忻州	4.90%	秦皇岛	5.73%	长治	3.46%	信阳	3.96%	阳泉	2.85%
52	铜川	4.70%	日照	5.59%	泰安	3.32%	长治	3.86%	汉中	2.84%
53	汉中	4.40%	济宁	5.47%	晋中	2.93%	东营	3.83%	朔州	2.46%
54	太原	4.38%	南阳	4.86%	吕梁	2.57%	日照	3.68%	日照	2.32%
55	青岛	4.35%	汉中	4.78%	朔州	2.44%	朔州	3.31%	秦皇岛	2.30%
56	晋中	3.77%	吕梁	4.78%	铜川	2.40%	秦皇岛	2.40%	驻马店	2.25%
57	烟台	2.79%	铜川	4.60%	日照	2.17%	济宁	2.31%	青岛	2%
58	朔州	2.50%	信阳	3.03%	青岛	1.54%	青岛	2.30%	烟台	1.79%
59	秦皇岛	2.31%	青岛	2.48%	秦皇岛	0.80%	吕梁	1.82%	信阳	1.56%
60	安康	1.80%	延安	1.99%	张家口	0.72%	烟台	1.60%	榆林	0.99%
61	商洛	1.73%	烟台	1.82%	大同	0.72%	商洛	1.50%	威海	0.76%
62	威海	1.67%	大同	1.56%	商洛	0.66%	安康	1.31%	商洛	0.55%
63	承德	1.56%	承德	1.40%	安康	0.54%	榆林	1.17%	延安	0.53%
64	延安	0.71%	张家口	1.35%	延安	0.45%	张家口	0.97%	承德	0.52%
65	张家口	0.63%	安康	0.54%	承德	0.44%	威海	0.85%	张家口	0.48%
66	大同	0.52%	威海	0.51%	烟台	0.42%	延安	0.81%	大同	0.44%
67	榆林	0.48%	榆林	0.27%	榆林	0.40%	大同	0.81%	吕梁	0.33%
68	吕梁	0.39%	商洛	0.16%	威海	0.27%	承德	0.64%	安康	0.08%

北京大学统计科学中心

附表 2：“2+66”城市中 2015 至 2019 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		2018 年		2019 年	
1	济宁	88.99%	聊城	86.11%	邯郸	85.97%	焦作	81.95%	焦作	72.05%
2	聊城	87.68%	淄博	82.92%	焦作	81.63%	平顶山	78.02%	邯郸	70.87%
3	菏泽	87.55%	济南	82.48%	临汾	80.12%	安阳	74.92%	枣庄	69.74%
4	济南	87.38%	菏泽	82.07%	邢台	79.52%	新乡	74.32%	安阳	69.65%
5	淄博	86.82%	衡水	81.19%	安阳	78.93%	石家庄	73.96%	莱芜	69.17%
6	枣庄	86.53%	焦作	80.19%	石家庄	76.30%	邯郸	73.69%	济宁	68.79%
7	莱芜	86.14%	邢台	79.13%	洛阳	76.26%	临汾	73.44%	淄博	68.26%
8	新乡	85.43%	漯河	78.90%	菏泽	75.90%	驻马店	73.43%	聊城	67.13%
9	衡水	83.81%	新乡	78.68%	聊城	75.65%	晋城	72.67%	临汾	66.84%
10	漯河	83.71%	商丘	78.66%	保定	75.49%	洛阳	72.40%	菏泽	66.66%
11	南阳	83.40%	枣庄	78.47%	平顶山	74.47%	晋中	71.68%	平顶山	66.62%
12	平顶山	83.20%	德州	78.16%	新乡	73.97%	邢台	71.40%	济南	66.53%
13	邯郸	82.47%	渭南	78.13%	商丘	72.94%	阳泉	71.07%	晋城	66.42%
14	德州	82.46%	保定	77.78%	运城	72.24%	唐山	70.88%	太原	66.28%
15	郑州	82.01%	咸阳	77.73%	淄博	72.22%	聊城	70.70%	邢台	66.07%
16	许昌	80.95%	莱芜	77.40%	衡水	72.13%	衡水	70.47%	运城	65.27%
17	商丘	80.81%	滨州	77.01%	郑州	71.91%	莱芜	69.20%	咸阳	65.08%
18	周口	80.64%	安阳	76.26%	鹤壁	71.72%	保定	69.04%	泰安	64.80%
19	邢台	80.36%	平顶山	75.64%	沧州	71.65%	郑州	68.77%	鹤壁	64.39%
20	安阳	79.38%	郑州	75.19%	枣庄	71.61%	开封	68.69%	开封	63.80%
21	濮阳	78.69%	济宁	75.11%	长治	71.52%	太原	68.66%	长治	63.59%
22	驻马店	77.67%	鹤壁	74.65%	阳泉	71.30%	濮阳	68.17%	洛阳	63.26%
23	焦作	77.04%	石家庄	74.26%	咸阳	70.72%	吕梁	67.67%	阳泉	63.19%
24	保定	75.52%	长治	73.73%	晋城	70.22%	淄博	67.60%	石家庄	62.24%
25	泰安	75.39%	洛阳	72.41%	莱芜	70.10%	商丘	67.46%	濮阳	62.11%
26	洛阳	75%	沧州	72.37%	济南	69.60%	沧州	67.33%	唐山	62.10%
27	信阳	74.77%	唐山	72.32%	滨州	69.14%	漯河	67.31%	许昌	62.01%
28	临沂	74.53%	泰安	72.30%	晋中	68.79%	长治	67.26%	衡水	60.97%
29	石家庄	74.19%	南阳	72.23%	德州	68.78%	菏泽	67.14%	漯河	60.89%
30	唐山	74.11%	邯郸	72%	太原	68.53%	运城	67.08%	南阳	60.87%
31	开封	73.98%	三门峡	70.90%	濮阳	68.02%	鹤壁	66.42%	临沂	60.74%
32	三门峡	73.98%	开封	70.82%	开封	67.55%	许昌	66.17%	保定	60.42%
33	东营	73.95%	驻马店	70.76%	渭南	67.37%	三门峡	66.08%	郑州	60.17%
34	运城	73.91%	西安	69.78%	唐山	67.13%	枣庄	65.48%	潍坊	59.98%
35	滨州	73.78%	太原	69.21%	西安	66.51%	咸阳	65.43%	滨州	59.94%
36	长治	72.82%	天津	68.93%	济宁	66.48%	渭南	64.66%	西安	59.92%

北京大学统计科学中心

排名	污染状态占比									
	2015 年		2016 年		2017 年		2018 年		2019 年	
37	鹤壁	72.79%	潍坊	68.60%	漯河	65.43%	济南	64.53%	新乡	59.55%
38	潍坊	72.37%	许昌	68.34%	驻马店	65.05%	信阳	64.26%	周口	59.31%
39	咸阳	68.15%	周口	67.56%	许昌	64.54%	德州	63.59%	商丘	59.28%
40	沧州	67.82%	临汾	67.51%	三门峡	64.33%	滨州	62.93%	三门峡	59.24%
41	廊坊	65.52%	阳泉	67.31%	天津	63.29%	西安	62.92%	渭南	58.58%
42	西安	65.08%	晋中	67.27%	泰安	62.82%	周口	62.54%	德州	57.75%
43	天津	63.60%	东营	66.53%	潍坊	62.76%	南阳	62.42%	驻马店	57.64%
44	日照	63.10%	濮阳	65.77%	忻州	62.51%	济宁	62.11%	天津	56.96%
45	晋中	62.64%	临沂	64.64%	吕梁	62.50%	宝鸡	58.83%	晋中	55.29%
46	铜川	61.95%	信阳	64.11%	周口	62.27%	潍坊	58.69%	沧州	53.76%
47	渭南	61.66%	忻州	63.70%	廊坊	61.83%	天津	58.11%	铜川	53.08%
48	宝鸡	61.30%	北京	63.52%	信阳	61.62%	泰安	57.65%	东营	53.06%
49	临汾	60.50%	朔州	62.93%	南阳	60.41%	忻州	57.09%	宝鸡	52.57%
50	北京	59.42%	廊坊	61.74%	东营	59.76%	廊坊	57.03%	吕梁	50.57%
51	太原	59.39%	吕梁	61.48%	宝鸡	58.01%	铜川	55.36%	汉中	50.41%
52	晋城	58.65%	运城	59.60%	临沂	56.34%	汉中	54.60%	廊坊	50.24%
53	忻州	58.13%	铜川	59.44%	铜川	55.86%	东营	52.79%	信阳	49.35%
54	阳泉	57.25%	宝鸡	58.74%	汉中	52.35%	北京	52.64%	北京	48.50%
55	汉中	57.16%	日照	57.64%	北京	51.27%	朔州	52.15%	日照	48.38%
56	吕梁	56.12%	晋城	56.20%	朔州	50.53%	临沂	51.38%	朔州	48.04%
57	延安	55.70%	汉中	53.71%	日照	49.22%	大同	47.27%	忻州	46.23%
58	青岛	54.18%	延安	49.50%	延安	48.71%	延安	46%	榆林	46.15%
59	朔州	53.84%	秦皇岛	48.53%	秦皇岛	41.49%	日照	43.61%	大同	43.36%
60	安康	53.56%	安康	47.50%	安康	40.79%	商洛	43.44%	秦皇岛	42.18%
61	商洛	47.24%	青岛	45.55%	青岛	38.94%	安康	42.94%	延安	40.42%
62	烟台	46.49%	大同	43.23%	大同	38.79%	榆林	41.89%	安康	36.50%
63	秦皇岛	43.15%	承德	40.71%	榆林	35.96%	秦皇岛	39.84%	青岛	36.04%
64	大同	39.87%	烟台	39.90%	商洛	34.85%	青岛	34.42%	商洛	35.38%
65	承德	38.82%	商洛	39.11%	烟台	34.05%	烟台	32.44%	烟台	34.98%
66	榆林	38.21%	榆林	34.35%	承德	32.12%	承德	32.03%	承德	33.18%
67	威海	37.11%	威海	33.96%	张家口	27.28%	张家口	31.15%	张家口	27.17%
68	张家口	31.25%	张家口	31.68%	威海	25.86%	威海	26.53%	威海	26.06%

北京大学统计科学中心

附表 3：“2+66”城市 2015 至 2019 季节年气象和疫情调整后 $PM_{2.5}$ 累计降幅指标实现情况

项目 区域	已经实现 2015-2019 年 $PM_{2.5}$ 累计下降 18%的城市		尚未实现 2015-2019 年 $PM_{2.5}$ 累计下降 18%的城市	
京津冀	北京、天津、承德、邯郸、沧州、唐山、邢台、衡水、石家庄、保定、廊坊	11	秦皇岛	1
河南	郑州、濮阳、开封、焦作、平顶山、三门峡、驻马店、南阳、商丘、许昌、漯河、信阳、周口、新乡	14	洛阳、鹤壁、安阳	3
山东	济南、青岛、临沂、潍坊、泰安、日照、滨州、枣庄、莱芜、济宁、淄博、菏泽、东营、聊城、德州	15	威海、烟台	2
山西	晋中、忻州、长治	3	太原、临汾、晋城、大同、阳泉、吕梁、运城、朔州	8
陕西	延安、商洛、安康	3	西安、咸阳、宝鸡、铜川、榆林、渭南、汉中	7

注：张家口市在 2015 年就已经达标，不纳入该指标的考核范围。

北京大学统计科学中心

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.songxichen.com/Uploads/Files/Report/Air_Quality_Assessment_Report_I.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://www.songxichen.com/Uploads/Files/Report/Air_Quality_Assessment_Report_II.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://www.songxichen.com/Uploads/Files/Report/Air_Quality_Assessment_Report_III.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://www.songxichen.com/Uploads/Files/Report/Air_Quality_Assessment_Report_IV.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 年区域污染状况评估, 2018 年 4 月. (http://www.songxichen.com/Uploads/Files/Report/Air_Quality_Assessment_Report_V.pdf)

[6] 北京大学统计科学中心环境统计组(2019). 空气质量评估报告(六): "2+43"城市 2013-2018 年区域污染状况评估, 2019 年 4 月. (http://www.songxichen.com/Uploads/Files/Report/Air_Quality_Assessment_Report_VI.pdf)

[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, P. J., Weichenthal, S. A., Crouse, D., Miller, A. B., To, T., Martin, R. V., . . . Burnett, R. T. (2015). Long-term exposure to fine particulate matter air pollution and mortality among canadian women. *Epidemiology*, 26(4), 536-545.

[13] Shi, L., Zanobetti, A., Kloog, I., Coull, B. A., Koutrakis, P., Melly, S. J., . . . & Schwartz, J. D. (2016). Low-concentration PM2.5 and mortality: Estimating acute and chronic effects in a population-based study. *Environmental Health Perspectives*, 124(1), 46-52.

[14] Di, Q., Wang, Y., Wang, Y., Zanobetti, A., Koutrakis, P., Choirat, C., . . . Schwartz, J. D. (2017). Air pollution and mortality in the medicare population. *The New England Journal of Medicine,* 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)

北京大学统计科学中心

[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: 10.1002/2016 D024877. (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] 张澍一,陈松蹊,郭斌,王恒放,林伟(2020).气象调整下的区域空气质量评估.中国科学:数学, 50(4):527-558.

[19] 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)

[20] 唐孝炎,张远航,邵敏(2016), 大气环境化学: 第二版, 365-446.

[21] Cochran, W.G. (1968). The effectiveness of adjustment by subclassification in removing bias in observational studies, *Biometrics*, 295-313, 24(2).

[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.

[23] 中国铁合金网(2020). 浅谈 2020 年疫情对钢铁业的影响及应对措施. 2020 年 2 月 21 日.(http://www.ferro-alloys.cn/News/Details/281929)

[24] Zheng X., Guo B., He J., and Chen S.X. (2020). Effects of COVID-19 Control Measures on Air Quality in North China (manuscript in submission)

北京大学统计科学中心

课题组成员

孙浩轩，北京大学前沿交叉学科研究院硕士研究生

游威，北京大学光华管理学院本科生

郭斌，西南财经大学统计学院副教授

罗山杉，北京师范大学数学学院本科生

郑翔宇，北京大学光华管理学院博士研究生

韩天实，北京大学光华管理学院硕士研究生

王心怡，北京大学元培学院本科生

刘睿，北京大学数学科学学院本科生

黄雅轩，北京大学元培学院本科生

何婧，西南财经大学统计学院助理教授

陈力，北京大学前沿交叉学科研究院硕士研究生

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 和国家自然科学基金重点项目 71532001, 71973005 和 11701466 的资助，及北京大学光华管理学院、北京大学统计科学中心和教育部数理经济与数理金融重点实验室的支持。感谢中国环境监测总站，青悦开放环境数据中心和中国气象局气象数据中心为本次报告提供数据。感谢北京大学荣誉教授刁锦寰先生，中国科学院数学与系统科学研究院马志明院士的长期指导。感谢环境监测总站李健军总工程师、王帅博士的帮助与讨论，北京大学张远航院士、陶澍院士、朱彤、胡敏教授，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。感谢光华管理学院对外关系团队王奂然、晏琴的安排，及统计中心李楠、王彦懿的协助。

往期报告：

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.songxichen.com/Uploads/Files/Report/Air_Quality_Assessment_Report_I.pdf

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.songxichen.com/Uploads/Files/Report/Air_Quality_Assessment_Report_II.pdf

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://www.songxichen.com/Uploads/Files/Report/Air_Quality_Assessment_Report_III.pdf

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://www.songxichen.com/Uploads/Files/Report/Air_Quality_Assessment_Report_IV.pdf

空气质量评估报告(五): “2+31”城市 2013-2017 年区域污染状况评估, 2018 年 4 月.

http://www.songxichen.com/Uploads/Files/Report/Air_Quality_Assessment_Report_V.pdf

空气质量评估报告(六): “2+43”城市 2013-2018 年区域污染状况评估, 2019 年 4 月.

http://www.songxichen.com/Uploads/Files/Report/Air_Quality_Assessment_Report_VI.pdf

Song Xi Chen Lab: www.songxichen.com

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