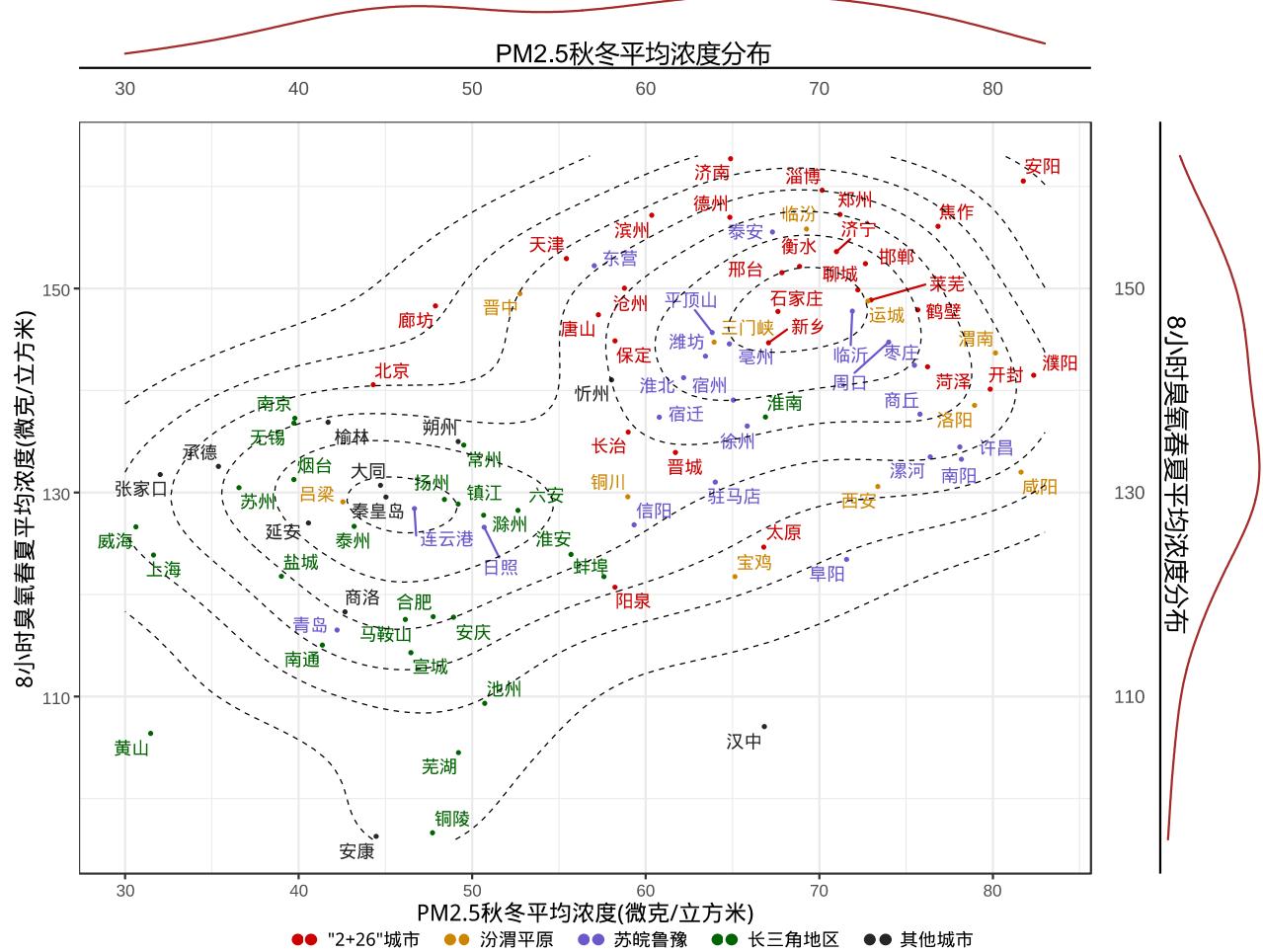


空气质量评估报告（八）

“3+95”城市 2013-2020 年区域污染状况评估

为了蓝天
让我们用数据解读污染



北京大学统计科学中心，北京大学光华管理学院

大数据分析与应用技术国家工程实验室

二零二一年五月

前言

本报告是本环境统计团队完成的第八份空气质量评估报告。前七份报告分别发布于 2015 年 3 月、2016 年 3 月、2017 年 3 月和 8 月、2018 年 4 月、2019 年 4 月、2020 年 7 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国控站点的 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 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；第七份报告[7]综合评估了“2+66”城市（相比于报告六补齐了山东、河南、山西、陕西余下的城市）354 个国控站点 2013 年 3 月至 2020 年 2 月的状态和变化趋势，此外还对新冠肺炎的影响进行了评估。本报告覆盖的城市范围在去年“2+66”城市报告[7]的基础上，增加了上海、安徽、江苏 30 个城市，共有“3+95”个城市，它们拥有全国 40% 的人口，12.5% 的国土面积。

本报告将基于这 98 个城市 524 个国控空气质量监测站点（不含背景站点）2013 年 3 月至 2021 年 2 月污染物监测数据和 111 个气象站点 2011 年 3 月到 2021 年 2 月累积十年的小时气象数据，综合评估“3+95”城市过去八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：

- 描述过去八年“3+95”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；
- 分析七省三市六种常规污染物的浓度变化趋势；
- 总结“3+95”城市空气质量情况，为七省三市大气治理提出建议；
- 给出“人努力一天帮忙”指数，分解量化气象和人为因素对空气质量的影响。

目录

一、背景介绍.....	1
二、采用数据说明.....	1
三、空气质量基本描述.....	4
四、六种常规空气污染物变化趋势.....	7
五、“3+95”城市污染物综合累计降幅与监视坐标	65
六、“人努力-天帮忙”指数	74
七、区域煤炭消耗与工业运行数据分析.....	78
八、总结与建议.....	85
参考文献.....	94

一、背景介绍

2013年9月，国务院发布《大气污染防治行动计划》[9]（简称“国十条”），对京津冀及周边地区（称“2+26”城市）大气污染治理提出要求。同时期，为贯彻落实“国十条”，加快“2+26”城市大气污染综合治理，生态环境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》[10]。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》[8]，汾渭平原地区首次被提及。2020年2月，生态环境部印发《2020年挥发性有机物治理攻坚方案》，重点强调了苏皖鲁豫交界地区和长三角地区的臭氧防治任务。

“2+26”城市包括京津冀大部分区域、山东西部、山西东部、河南北部，地处太行山与泰山之间，构成大气污染传输通道，不利于污染物的扩散。汾渭平原北接忻定盆地，东西受吕梁山脉与太行山脉地形阻隔，渭河平原南依秦岭，北仰黄土高原，西接陇山山脉，二者均沿汾渭地堑方向延伸，呈狭长形，全年风速较小，易造成污染物的聚集。近年华北江淮及长江三角洲地区臭氧污染持续严重，防治任务亟待关注。

我们去年发布的空气质量报告（七），在上述“2+26”城市和汾渭平原地区11城市外，补全河北、山东、河南、山西、陕西五省的其余城市。为了了解江淮平原地区臭氧污染现状，我们进一步将空气质量评估范围从中国北方扩展到南方，增加了上海、安徽、江苏共30个城市，总称为“3+95”城市。

自2013年1月1日起，我国建立大气污染监测网络，实时监测包括PM_{2.5}在内的六种常规污染物（PM_{2.5}、PM₁₀、二氧化硫、二氧化氮、一氧化碳和臭氧）的浓度。历经八年大气污染治理的评估与考核，华北平原地区空气质量是否改善，本报告将就此问题进行展开。基于4亿条数据，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生态环境部的国控站，共包含七省三市（即河北、河南、山东、山西、陕西、安徽、江苏七省及北京、天津、上海三市）全部“3+95”城市520个监测站点（不含背景站点），具体可细分为“2+26”城市（用红色标记）、汾渭平原11市（用黄色标记）、苏皖鲁豫交界地区（用蓝色标记）、长三角地区（不含上述区域城市，用绿色标记）以及区域内其他城市（用灰色标记），相比第七份报告新增30个城市，研究区域涵盖全国40%的人口。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
- 上海市：位于中心城区的 8 个国控空气质量监测站（不包含虹口、青浦淀山湖背景站）
- 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、南阳、商丘、信阳、周口、驻马店**）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、莱芜、青岛、枣庄、东营、潍坊、泰安、日照、临沂、烟台、威海**）共 84 个国控空气质量监测站（莱芜 2018 年并入济南市，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）
- 安徽省：16 个城市（**合肥、蚌埠、淮南、滁州、六安、马鞍山、芜湖、宣城、铜陵、池州、安庆、黄山、淮北、亳州、宿州、阜阳**）共 70 个监测站（不包含合肥瑶海区、芜湖科创中心、淮南潘集区政府、马鞍山天平服装背景站）
- 江苏省：13 个城市（**南京、无锡、常州、宿州、南通、淮安、盐城、扬州、镇江、泰州、徐州、连云港、宿迁**）共 88 个监测站（不包含泰州高港区政府）

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 2021 年 2 月。其中，河南、山东、山西、陕西、安徽和江苏部分城市在 2013 年并未开始监测，因此这些城市从开始监测的时刻算起，即使如此，我们发现部分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七份报告一致。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常规污染物： $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、二氧化硫 (SO_2)、一氧化碳 (CO)、二氧化氮 (NO_2) 和臭氧 (O_3)。



图 1 “3+95”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）

（图中红色区域为京津冀周边地“2+26”城市，黄色区域为汾渭平原 11 市，
蓝色区域为苏皖鲁豫交界地区，绿色区域为长三角地区，灰色区域为区域内其他城市）

由于气象条件对观测污染物浓度的影响很大，本报告沿用前七份报告的统计学方法，对污染物浓度进行气象调整，剔除气象因素的影响，得到可比的污染指标[16]-[20]。具体来说，我们基于 2011 年 3 月到 2021 年 2 月累积十年的小时气象数据，对“3+95”城市分别构造基准气象条件。我们之所以采用这十年的气象数据，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、陕西、安徽、江苏七省 95 个地级市的气象数据主要来源于对应城市的气象站点，南京浦口、淮安楚州区监测站匹配至较近的其它站点，共 97 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；上海市的气象数据来源于上海城区、浦东新区共 2 个气象站点。

图 1 给出了这 520 个污染物监测站点外加 24 个背景站（红色圆点）和 111 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“3+95”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[11]。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[13]。

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。对于空气质量“优”（PM_{2.5}≤35 微克/立方米）占比：受疫情影响，与 2019 年相比，2020 年“3+95”城市空气质量“优”占比普遍提高，平均提高 5.80%，只有山西运城（-2.74%）和河南新乡（-0.32%）、鹤壁（-0.11%）略有下降；安徽铜陵（20.48%）、宣城（15.62%）改善最为显著，空气质量“优”占比提高超过 15%；2020 年 42 个城市空气质量“优”占比超过 50%，这一数字在 2019、2015 年分别为 27 个和 10 个。对于重污染

($\text{PM}_{2.5} > 150$ 微克/立方米) 占比：2020 年“3+95”城市空气重污染占比普遍下降，平均值仅为 1.88%，较之前（2019 年为 3.30%，2015 年为 6.67%）显著改善。

我们发现在目前 75 微克/立方米作为“良”的标准下，2020 年所有“3+95”城市空气质量优、良级别的占比都超过了 75%，平均值为 86.42%。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[12]。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。图 2 展示了“3+95”城市在新旧标准下 2015、2018、2019 和 2020 年的“优良空气”占比情况。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。2020 年，“3+95”城市在新旧标准下的优、良空气占比排名差别不大，仅 11 个城市在新旧标准下的排名变动绝对值超过 10 位，其中变动最大的是吕梁，在 75 微克/立方米标准下优、良空气占比排名第 3，而在 50 微克/立方米标准下优、良空气占比排名第 20，相差 17 位。在 75 微克/立方米的标准下 2020 年“3+95”城市中所有城市空气质量优、良级别的占比最低值为 76%，即图中红色虚线，新的优良率标准下，2020 年“3+95”城市中所有城市空气质量优、良级别的占比都超过了 54%，即图中的蓝色虚线，平均值为 70.45%。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能。

虽然六种空气质量时间占比在一定程度上可以反映“3+95”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，不同年气象条件不尽相同，使得这种比较不公平。我们需要用更精确的统计指标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科学的依据，相关结果将在后几章展示。

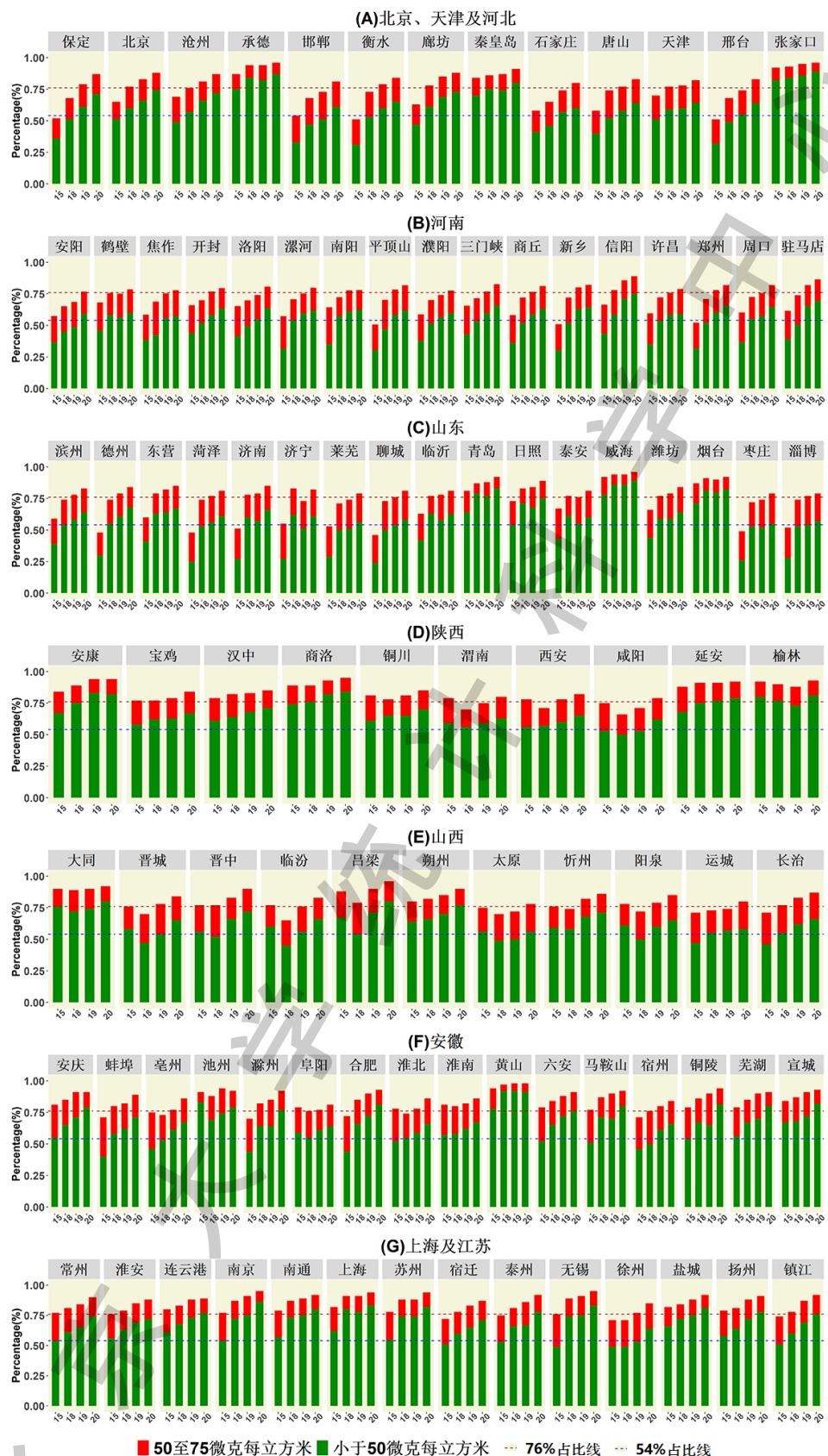


图 2 “3+95”城市分省份 PM_{2.5} 优良天数百分比（绿色代表小于 50 微克每立方米，红色代表介于 50 至 75 微克每立方米，76% 为 75 微克每立方米标准下 2020 年“3+95”城市优良天数占比最低值，54% 为 50 微克每立方米标准下 2020 年“3+95”城市优良天数占比最低值）

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。本报告沿用前七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七份报告一致的调整，具体而言，我们以 2013-2018 年各年气象交集确定每个气象变量的取值范围，并在此范围内以 2011-2020 年累计十年气象构造平均气象，计算各年污染物在此平均场下的浓度，这一调整的主要目的在于提高气象因素在不同年的可比程度。我们将计算各个城市在可比气象条件下各污染物的平均值浓度（反映一个城市空气质量的平均水平），并对其进行比较和分析（具体方法见[15,16,17]）。

关于气象调整的必要性，我们引用下例加以说明：20 世纪 60 年代，吸烟是否对人体健康有影响是一个热议的问题。有三个国家（加拿大、英国、美国）的研究各选了一组抽烟袋、一组抽卷烟的烟民和一组不吸烟的烟民进行对照实验。通过跟踪三组人群若干年后，计算出每个组的死亡率，结果发现三个国家的抽烟袋组的死亡率远远高于抽烟卷组和不吸烟者，另外吸卷烟者同不吸烟者的死亡率相差不多，有时甚至低于不吸烟者。但是统计学家 Cochran 在[20]中对该数据的进一步分析发现烟袋组的年龄高于卷烟组，烟卷组年龄又低于不抽烟组。这里吸烟引起的死亡和年龄增长的自然死亡混杂在一起了，死亡率高的部分原因是年龄因素造成的。为了去除年龄引起的混杂影响，Cochran 在每个年龄段上对比三组人群的死亡率，最后得到相反的结论。**由此可见，进行吸烟对健康影响的研究时需要控制年龄的因素。同理，在研究大气污染的年际变化时也要去除气象因素的影响。**关于气象调整的统计学原理，感兴趣的读者可以参看本团队发表的论文[15,16,17,18]。

（一）PM_{2.5}

PM_{2.5} 是指悬浮在空气中空气动力学当量直径小于或等于 2.5 微米的颗粒物，又称细颗粒物。直径为 0.5-5 微米的粒子可以直接到达肺泡内，并进入血液通往全身。大量流行病学研究发现：颗粒物浓度和发病率及死亡率有明显联系，尤其是细粒子与心肺疾病的相关性更为明显。我国目前的 PM_{2.5} 平均浓度标准如下表 1 所示。

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	

本节给出华北地区京津冀晋鲁豫陕和江淮地区苏沪皖十省市从 2013 年 3 月到 2021 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，并分析研究区域内 PM_{2.5} 变化情况。

图3、图5、图6和表2分别展示了“3+95”市PM_{2.5}经气象调整的季节平均浓度时间序列图，季节平均浓度地图，五年、三年和一年累计降幅，年度平均浓度及排名。图4还展示了PM_{2.5}经气象调整的季节90%分位数浓度时间序列图。根据上述四图一表，我们可以总结出PM_{2.5}浓度如下特征：

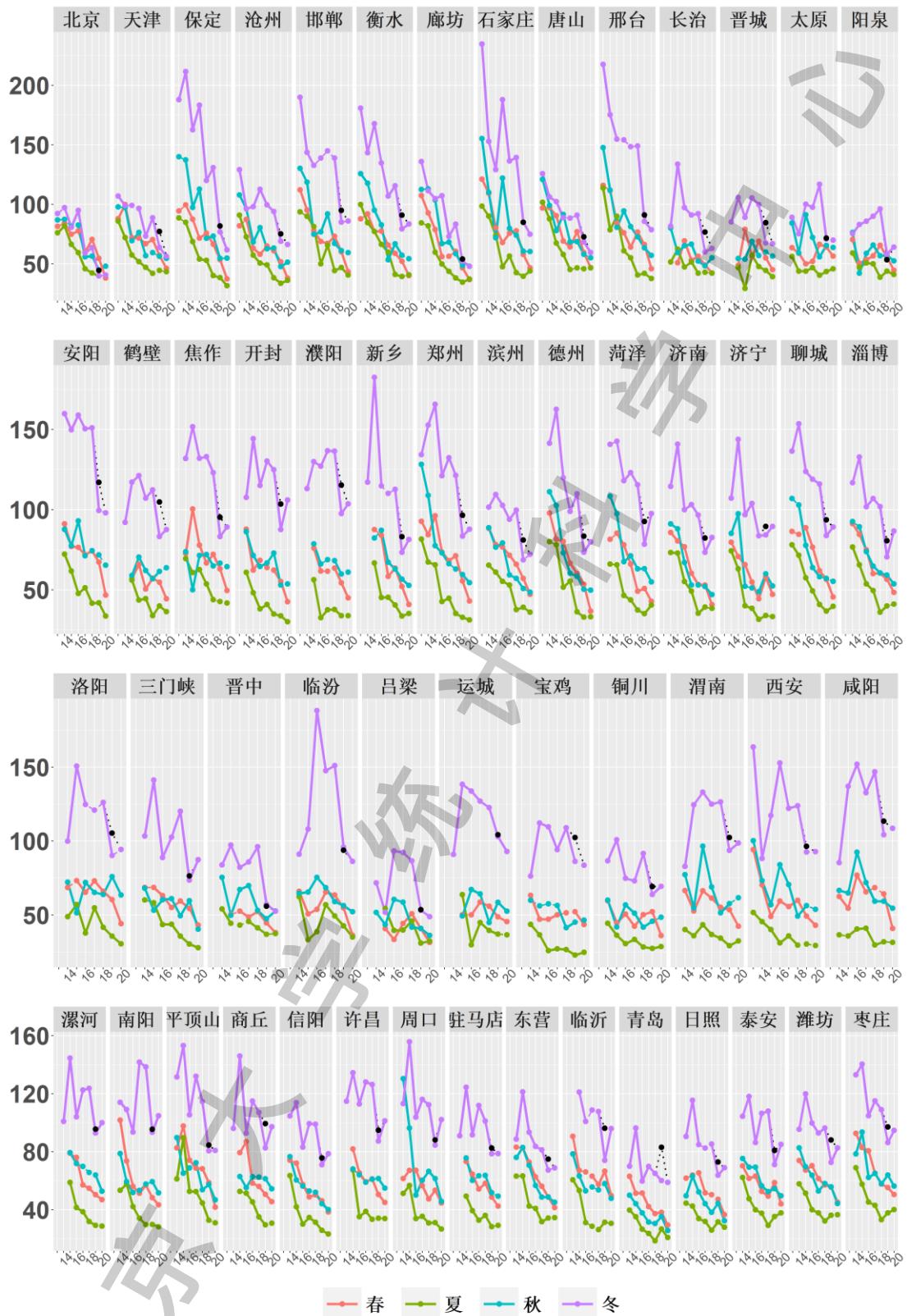
- **季度评估**

一般来讲，PM_{2.5}浓度在冬季最高，春秋两季次之，夏季最低。其中，华北地区PM_{2.5}浓度在秋季普遍高于春季，而江淮流域在春季普遍高于秋季。

2015年春季“3+95”城市PM_{2.5}浓度均值（标准误差）为61.8（1.6）微克/立方米，2019年下降至50（0.8）微克/立方米，2020年春季又降至40.4（0.6）微克/立方米。相比2019年，区域内城市除亳州、淮安之外，PM_{2.5}浓度均呈现显著下降趋势。2020年春季太原平均浓度最高，为56.5微克/立方米；承德最低，为26微克/立方米。与2019年相比，2020年春季“3+95”城市一年降幅的平均值达18.5%，咸阳降幅最高达36.3%，9个城市降幅超过30%，41个城市降幅超过20%。这一显著下降一定程度上延续了春节以来疫情防控的影响。

2015年夏季“3+95”城市PM_{2.5}浓度均值（标准误差）为49.9（1.4）微克/立方米，2019年下降至32（0.6）微克/立方米，2020年夏季降幅不大，为30.2（0.7）微克/立方米。2020年夏季唐山平均浓度最高，达46.6微克/立方米；黄山最低，为11.0微克/立方米。相比2019年夏季，“3+95”城市一年降幅的平均值为5.8%，这说明疫情影响在夏季已经很小了。2020年夏季区域内65个城市改善，其中安徽和河南各有13个城市，江苏有10个城市，山东有9个城市；但有33个城市出现反弹，主要包含山东8市（菏泽、聊城、泰安、枣庄、淄博、潍坊、东营、德州）和京津冀地区6市（石家庄、廊坊、沧州、衡水、唐山、北京），其中忻州、阜阳、菏泽、石家庄、渭南增幅超过10%。相比2015年，临汾和太原不降反升，而平顶山和黄山降幅最大，均超过60%。

2015年秋季“3+95”城市PM_{2.5}浓度均值（标准误差）为62.1（1.8）微克/立方米，2019年下降至49.9（1.1）微克/立方米，2020年秋季为45（1.1）微克/立方米。2020年秋季安阳平均浓度最高，达65.4微克/立方米，威海最低，为22.5微克/立方米，8个城市平均浓度超过60微克/立方米，其中有5个河南城市（安阳、焦作、鹤壁、洛阳、濮阳）。相比2019年秋季，2020秋季85个城市改善，共有3个城市降幅超过30%，分别为铜陵、南京、三门峡，其中三门峡改善最大，降幅达32.3%。15个城市降幅在20%至30%之间；2020秋季13个城市浓度不降反升，其中晋中、忻州、长治增幅较大，超过10%。



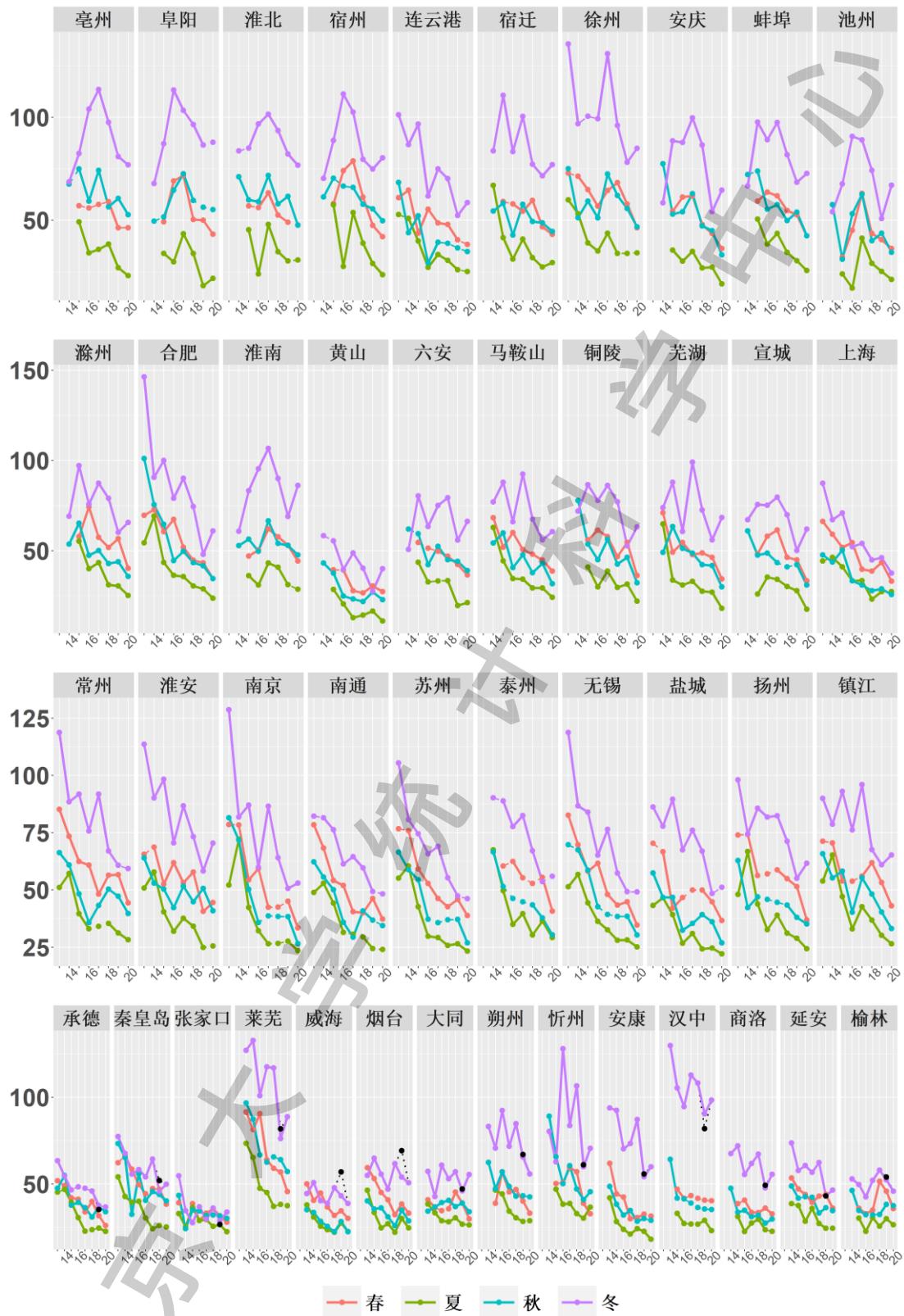
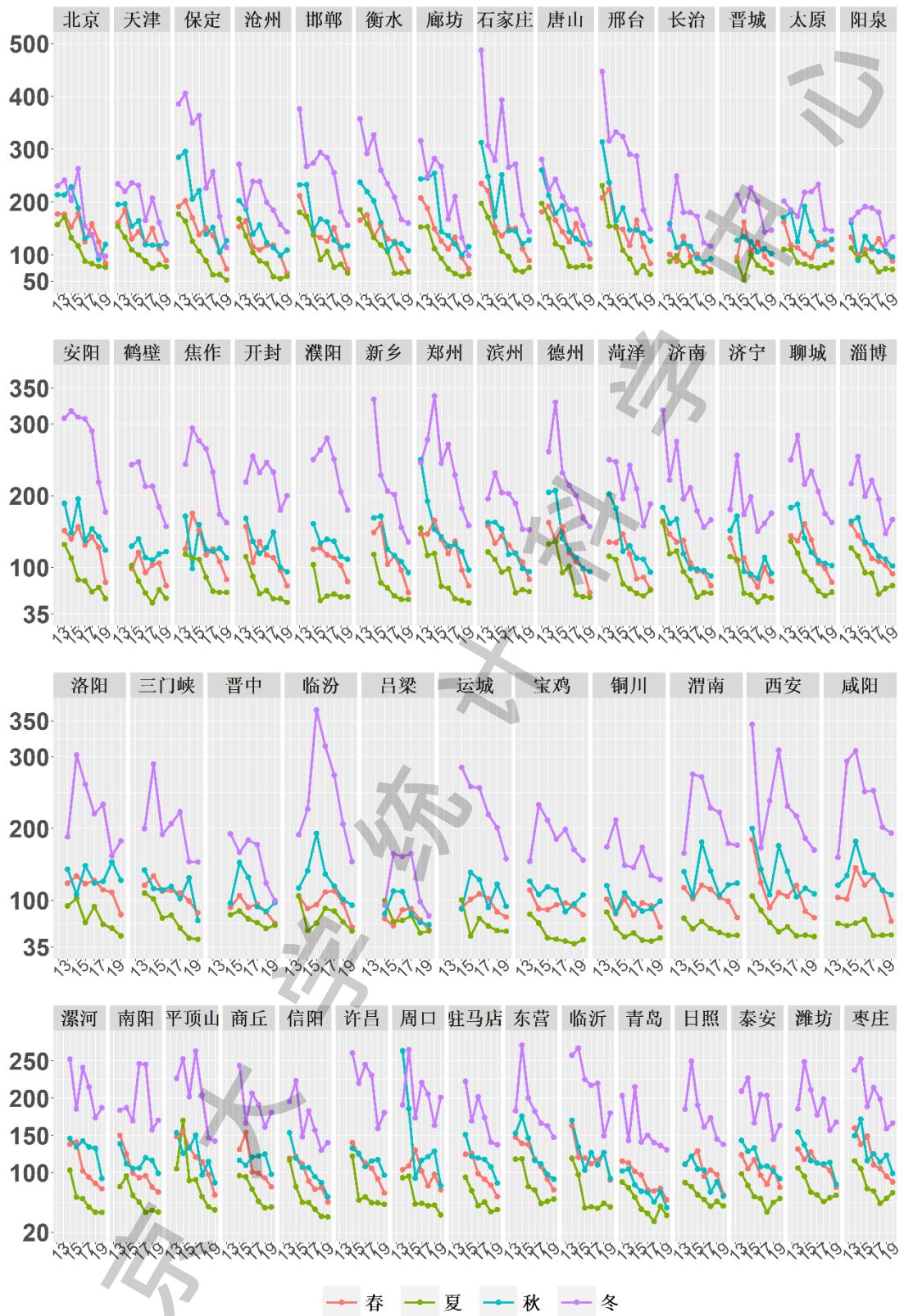


图 3 “3+95”城市气象调整后 2013 年至 2020 年 PM_{2.5} 季节平均浓度（微克/立方米）变化序列图

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，经过疫情调整的值由黑点表示，城市排序依次为“2+26”城市、汾渭平原 11 市、苏皖鲁豫交界地区城市、长三角地区城市、区域内其他城市



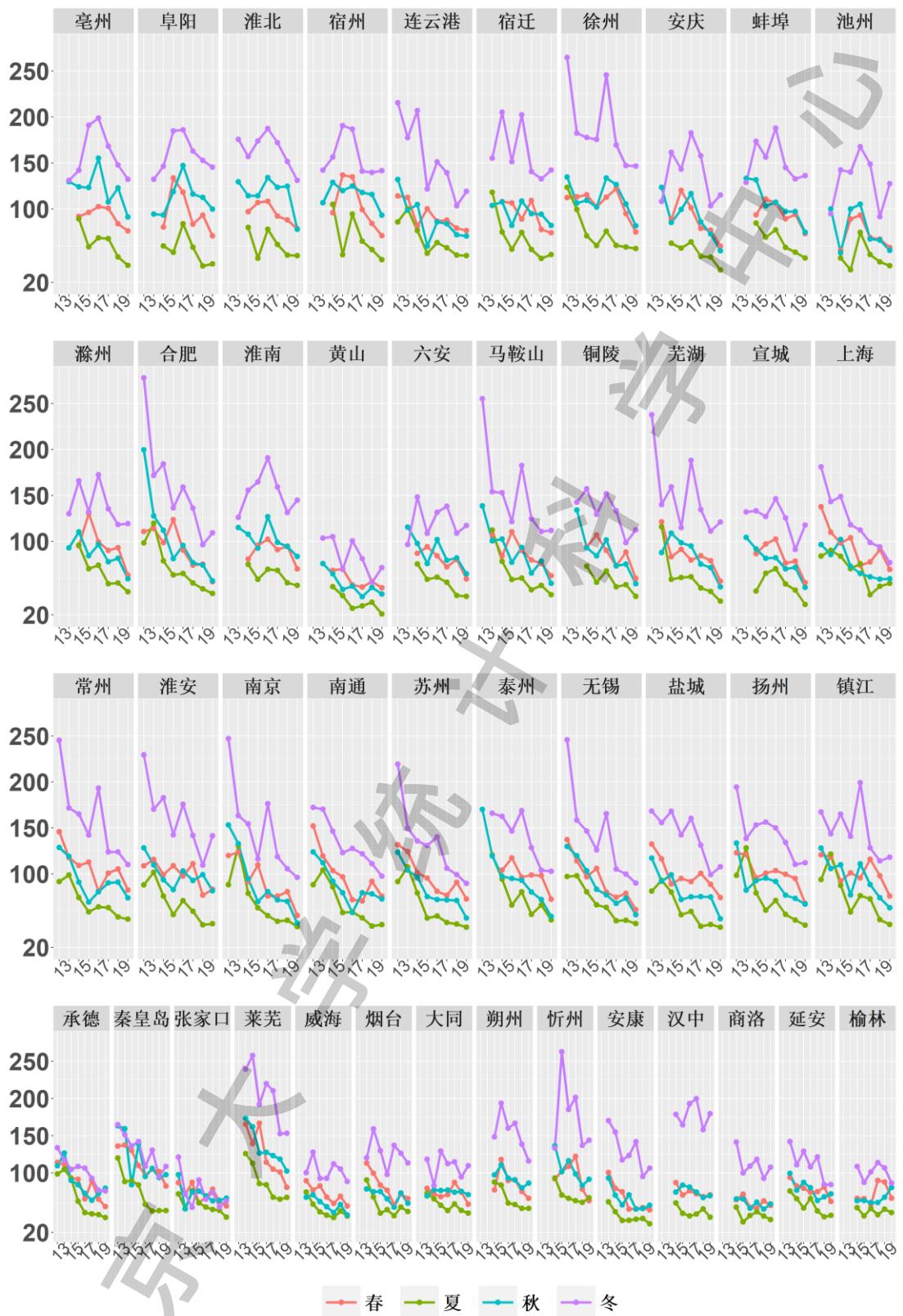


图 4 “3+95”城市气象调整后 2013 年至 2020 年 PM_{2.5} 季节 90% 分位数浓度（微克/立方米）变化序列图
城市排序同图 3

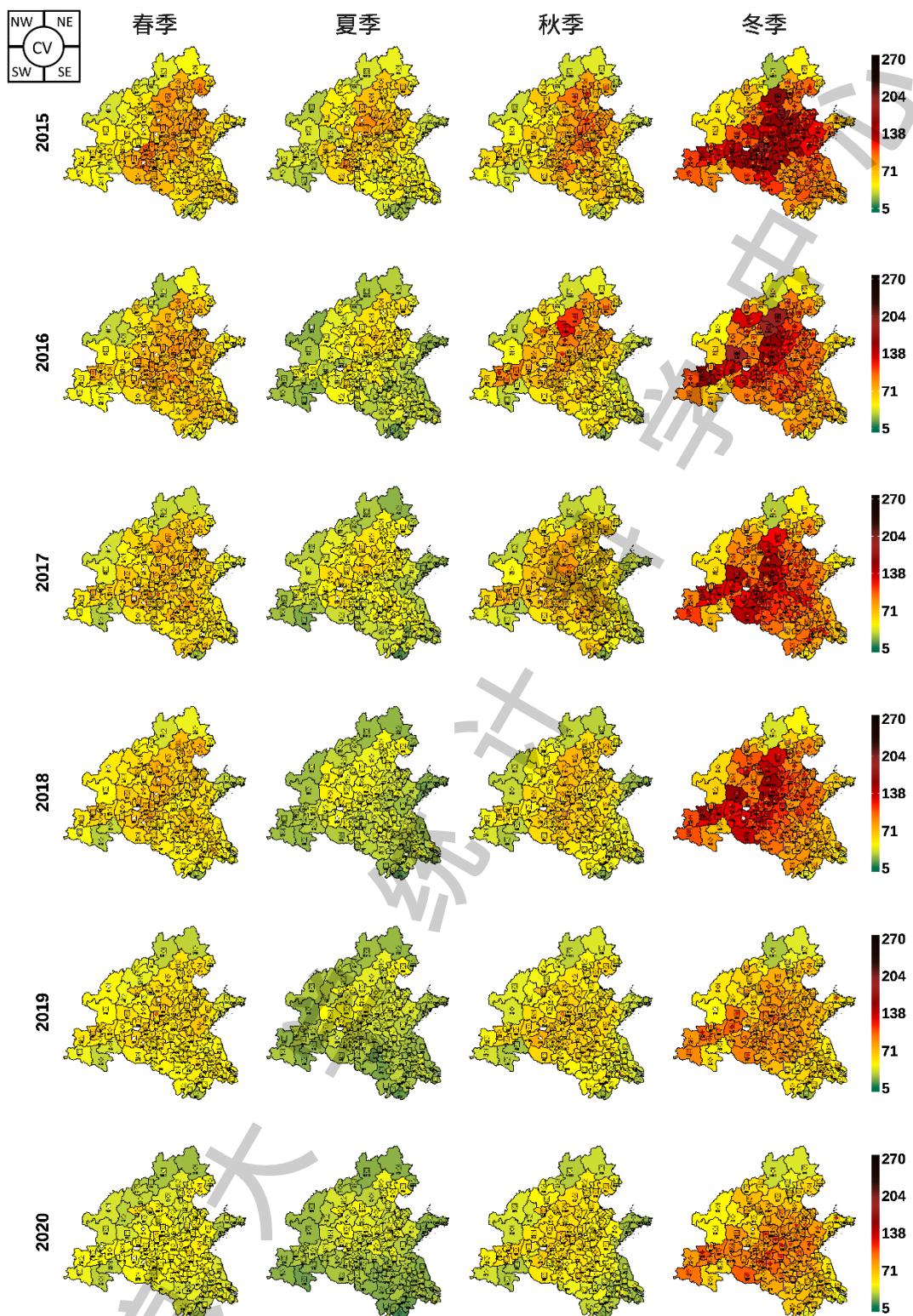


图 5 “3+95”城市气象调整后 2015 年至 2020 年 $\text{PM}_{2.5}$ 季节平均浓度(微克/立方米)地图
(清晰图及五个风向下的浓度参见电子版)

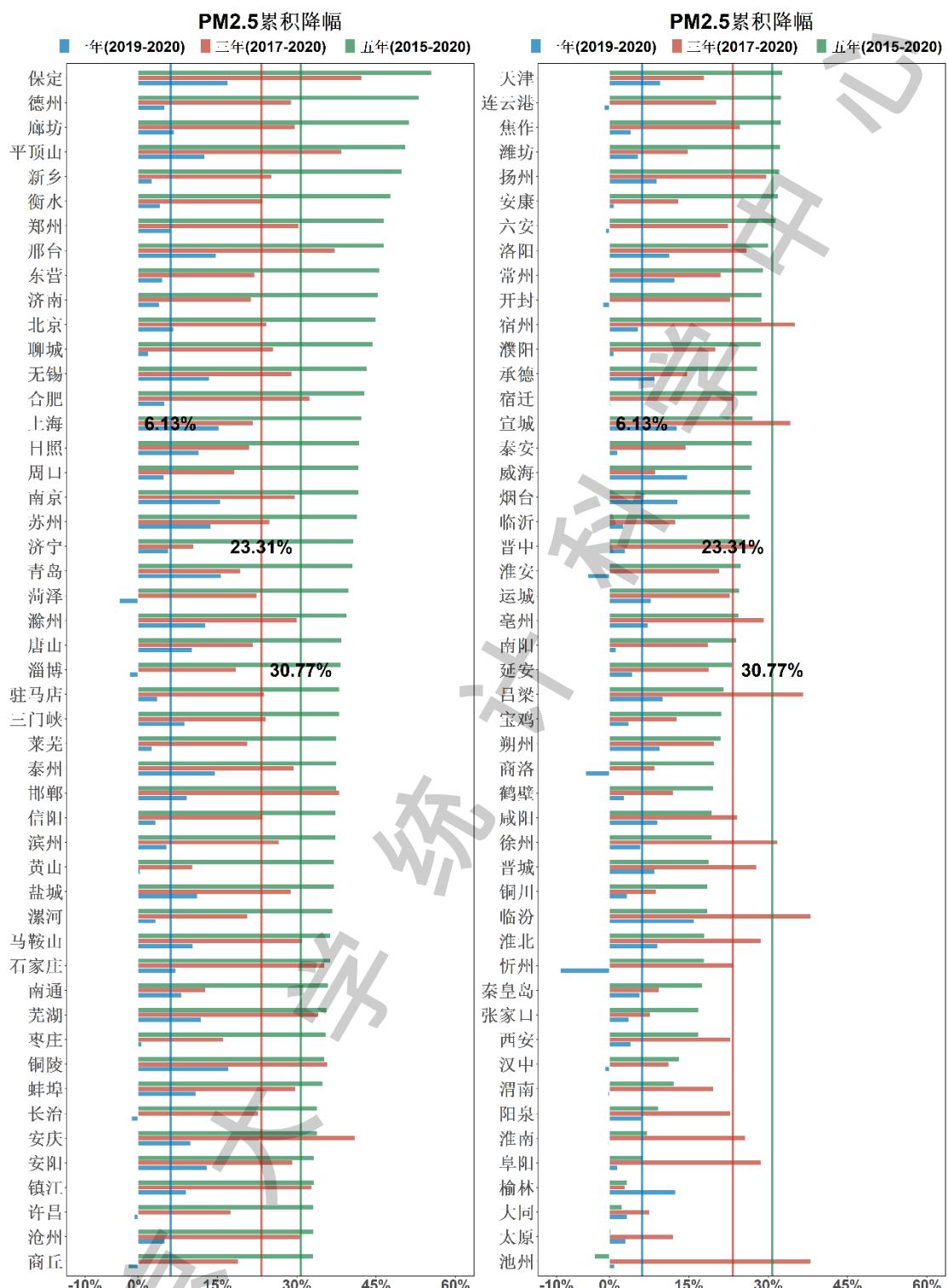


图 6 “3+95”城市气象调整后 PM_{2.5} 浓度过去一年（蓝色）、三年（红色）、五年（绿色）的累计降幅
蓝、红和绿色竖线分别代表“3+95”城市的一年、三年和五年平均降幅

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	2020年	排名
榆林	NA		NA		37.7	(96)	32.6	(96)	37.5	(93)	41.9	(87)	41.6	(75)	36.4	(81)
大同	NA		42.7	(65)	37.3	(97)	40.9	(91)	39.4	(91)	42.5	(86)	37.7	(90)	36.4	(82)
南通	68.0	(25)	64.6	(50)	56.2	(77)	45.1	(84)	41.3	(88)	42.5	(85)	39.2	(86)	36.0	(83)
宣城	NA		NA		49.4	(86)	54.3	(68)	54.7	(74)	46.9	(78)	41.3	(77)	36.0	(84)
延安	NA		53.6	(62)	46.1	(90)	43.9	(85)	43.6	(85)	41.4	(89)	37.0	(91)	35.4	(85)
商洛	NA		NA		43.9	(91)	38.4	(94)	38.5	(92)	40.5	(90)	33.7	(94)	35.2	(86)
无锡	80.1	(18)	70.2	(38)	61.3	(60)	51.5	(74)	49.1	(81)	41.8	(88)	40.2	(82)	34.8	(87)
安康	NA		61.6	(54)	50.8	(84)	42.2	(90)	39.8	(89)	42.7	(84)	34.9	(93)	34.6	(88)
烟台	NA		50.2	(64)	46.8	(88)	40.4	(92)	36.5	(94)	35.5	(93)	39.4	(85)	34.3	(89)
盐城	64.3	(27)	59.5	(59)	54.4	(82)	43.3	(89)	48.1	(83)	45.1	(82)	38.5	(89)	34.2	(90)
南京	85.1	(15)	76.0	(33)	58.5	(69)	46.8	(82)	48.5	(82)	42.9	(83)	40.4	(80)	34.1	(91)
苏州	76.0	(20)	69.0	(41)	57.7	(73)	46.4	(83)	45.0	(84)	40.2	(91)	39.2	(87)	33.8	(92)
青岛	62.7	(28)	55.7	(60)	56.7	(75)	43.9	(86)	41.8	(87)	37.8	(92)	40.0	(84)	33.7	(93)
上海	61.4	(29)	54.1	(61)	53.5	(83)	43.3	(88)	39.5	(90)	33.7	(95)	36.5	(92)	30.9	(94)
承德	52.0	(30)	51.4	(63)	41.5	(92)	39.9	(93)	35.1	(95)	35.1	(94)	32.7	(96)	29.9	(95)
张家口	42.6	(31)	28.7	(67)	34.4	(98)	32.3	(97)	31.0	(97)	32.3	(96)	29.7	(97)	28.6	(96)
威海	NA		41.9	(66)	39.0	(94)	34.8	(95)	31.2	(96)	31.1	(97)	33.4	(95)	28.5	(97)
黄山	NA		NA		40.2	(93)	31.1	(98)	28.2	(98)	25.7	(98)	25.4	(98)	25.3	(98)

表 2 “3+95”城市气象调整后 2013 年至 2020 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)

2015 年冬季“3+95”城市 PM_{2.5} 浓度均值（标准误差）为 105.9 (3.3) 微克/立方米，2019 年为 68.2 (1.7) 微克/立方米，2020 年反弹 6% 到 72.3 (1.9) 微克/立方米。这种反弹是由 2019 年冬季新冠疫情以及 2020 年冬季工业生产恢复、背景排放增加所导致。相比 2015 年，大同、张家口、忻州、淮南和阜阳不降反增；保定、新乡、廊坊、长治、德州和衡水降幅最大，均超过 50%。相比 2019 年冬季，2020 年冬季“3+95”城市 70 个城市反弹，仅 28 个城市继续改善。京津冀地区 8 个城市（保定、唐山、石家庄、天津、廊坊、邢台、沧州、承德）改善，5 个城市（邯郸、北京、衡水、秦皇岛、张家口）恶化；山东 3 个城市（威海、烟台、青岛）改善，其余 14 市恶化。河南除安阳改善外，其余 16 市均恶化；山西改善幅度不大（1.5%），2020 年冬季 11 市中 4 市恶化，其中大同、忻州、阳泉增幅超过 10%，其余 7 市改善；陕西除榆林、宝鸡外均有显著恶化；上海 2019 年恶化（2.7%），2020 年改善（18.6%）；江苏 4 市（苏州、常州、南通和无锡）改善，其余 9 市均恶化；安徽淮北和亳州改善，其余 14 市均恶化。

• 年度变化趋势

根据图 6，相比 2015 年，2020 年“3+95”城市 PM_{2.5} 累计降幅均值为 30.8% (1.2%)；相比 2017 年，2020 年累计降幅均值为 23.3% (0.9%)。相比 2019 年，2020 年累计降幅均值为 6.1% (0.6%)。“3+95”城市共 14 个城市（菏泽、淄博、长治、许昌、商丘、连云港、六安、开封、淮安、淮南、商洛、忻州、汉中、渭南）2019-2020 一年降幅为负，即使在春夏季节持续受到新冠疫情影响，上述城市年均浓度较前一年仍未有下降。

从五年累计降幅来看，“3+95”城市除池州增加 2.8% 外，其他城市 2020 年的浓度均小于 2015 年的浓度，太原、大同和榆林降幅最小，均低于 5%；保定五年累计降幅最高，达到 55.5%，德州、廊坊和平顶山也超过 50%。2015 年至 2020 年有 21 个城市的累计降幅超过

40%，其中 7 个城市位于山东省，5 个城市位于京津冀区域；56 个城市的累计降幅超过 30%，分别有 13 个城市位于山东、河南省，10 个城市位于京津冀区域。2017 年至 2020 年有保定、安庆两个城市的累计降幅超过 40%，20 个城市的累计降幅超过 30%，其中有 8 个位于安徽，5 个位于河北。河南局部的郑州、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。

相比于 2015 年，降幅最小的前二十个城市中分别有 6、6 和 4 个城市位于山西、陕西和安徽，这三个省累计降幅也相对较低，分别为 18.7%、18.0% 和 28.2%。此外，降幅最小的前二十个城市中有 9 个城市（太原、阳泉、渭南、西安、铜川、临汾、晋城、咸阳、鹤壁）属于“2+26”和汾渭平原城市，这些城市较早开始污染治理，但改善相对不足。然而在降幅最大的前二十个城市中分别有 6 个和 5 个城市位于山东和京津冀地区，这两个地区累计降幅相对较高，分别为 38.8% 和 40.4%；此外，降幅最大的前二十个城市中有 9 个城市（平顶山、东营、无锡、合肥、上海、日照、南京、周口、苏州）不属于“2+26”城市和汾渭平原，非早期重点关注区域城市，但仍改善显著。

上述关于累计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；山西省和陕西省降幅较低，持续稳定的下降趋势仍有待建立；江淮地区改善较小但污染水平较低。

• 年度污染状态与相对排名

根据表 2，2015 年“3+95”城市 PM_{2.5} 年均浓度均值（标准误差）为 69.9（1.9）微克/立方米，2019 年下降至 50（0.9）微克/立方米，2020 年为 47（0.9）微克/立方米。焦作、安阳、濮阳的 2020 年 PM_{2.5} 季节年平均浓度最高，均超过 60 微克/立方米，有 44 个城市季节年平均浓度超过 50 微克/立方米；黄山、威海、张家口和承德季节年平均浓度最低，低于 30 微克/立方米，仅 12 个城市季节年平均浓度低于 35 微克/立方米。

2015-2020 年排名升高（相对恶化）最多的前 20 个城市中，太原、渭南、阳泉、咸阳、西安、鹤壁、临汾、濮阳、铜川、晋城、开封和洛阳这 12 个城市属于“2+26”城市或位于汾渭平原，值得关注；排名下降最多的前 20 个城市中，平顶山、东营、无锡、合肥、日照、南京、滁州、信阳、苏州、青岛这 10 个城市不属于“2+26”城市且不位于汾渭平原，非重点关注区域城市，仍改善显著。2015 年以来，焦作、汉中排名持续升高，太原、鹤壁、临沂、泰安、潍坊、铜川近四年排名持续升高，改善幅度滞后于其他城市。石家庄排名持续降低，邯郸、郑州、平顶山、沧州、安庆近四年排名持续降低，改善速度领先其他城市。值得一提的是，邢台 2013-2019 年排名均在前十，而 2020 年降至第 26 位；保定 2013-2018 年排

名均在前十，而 2019 和 2020 年降至第 34 和 56 位，位于京津冀的这两个城市呈现出良好的改善态势。

• 极端污染

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。极端污染是衡量空气质量的另一重要标准，如美国的考核指标为 PM_{2.5} 日均浓度 98% 分位数浓度不超过 35 微克/立方米。图 4 展示了研究区域城市过去 32 个季节（2013 年春季至 2020 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、山东西部和河南、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，江淮地区整体浓度较低，污染较轻。

2015 年“3+95”城市 PM_{2.5} 的 90% 分位数浓度均值（标准误差）为 132.8（3.6）微克/立方米，2019 年下降至 95.6（1.8）微克/立方米，2020 年仍达到 86.6（1.6）微克/立方米。近年来京津冀鲁区域 90% 分位数浓度下降显著，晋豫陕下降趋势有待进一步确立，沪苏皖部分城市反弹，改善不大。

从具体数值上看，2020 年 90% 分位数年均浓度以太原最高，达 117.6 微克/立方米，洛阳次之，达 110.3 微克/立方米，共 9 个城市（石家庄、安阳、淄博、濮阳、渭南、枣庄、咸阳、焦作、邢台）90% 分位数年均浓度在 105-110 微克/立方米，29 个城市 90% 分位数年均浓度超过 100 微克/立方米。除相对低的夏季外，90% 分位数浓度在秋春季仍普遍高于 60 微克/立方米。在沿太行山东侧的河北城市、河南及关中平原城市，2018 年冬季 90% 分位数曾高于 200 微克/立方米，而 2019 和 2020 年冬季 90% 分位数仍能达到 150 微克/立方米，如河南 2019 和 2020 年冬季 90% 分位数浓度平均值分别为 167.6 和 167.4 微克/立方米，还有很大改善空间。

• 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

本报告延续从第五份报告开始计算的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。通过图 5（可以通过 pdf 版放大），我们发现由于 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，平时东风较强，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、威海北邻渤海、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。对

于江淮地区临海城市，由于东临黄海、东海，故东风最有利于 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（可通过图 5 查阅各城市细节）。

（二）PM₁₀

PM₁₀ 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，PM₁₀ 是我国使用的主要空气质量指标，用于计算城市的蓝天数。2013 年 PM_{2.5} 取代 PM₁₀ 成为大气污染的主要指标。2014 年及以后，PM₁₀ 缺失比例有所下降。PM₁₀ 数据缺失高的一个原因是 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 数值可能会发生“倒挂”，即 PM₁₀ 的观测值低于 PM_{2.5} 的观测值。因为 PM_{2.5} 是 PM₁₀ 的重要组成部分，PM₁₀ 的浓度值应该大于 PM_{2.5}。但实际观测中由于观测误差可能出现倒挂现象。一种处理数据倒挂的方法是用 PM_{2.5} 的观测浓度对 PM₁₀ 的缺失进行插补，这样做会低估 PM₁₀ 浓度，但比直接将倒挂的 PM₁₀ 观测设为缺失的计算误差小。本报告将使用这一方法¹。另一种方法是对 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 关系进行建模，以推算缺失的 PM₁₀ 水平。

我国目前的 PM₁₀ 平均浓度标准如表 3 所示。美国环境保护署关于 PM₁₀ 的一、二级标准均是 24 小时平均浓度 150 微克/立方米，但其明确规定 3 年内平均每年不达标的次数不能超过一次。这实际上是非常严格的标准。

表 3：我国目前 PM₁₀ 平均浓度标准

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

图 7、图 8、图 10 和表 4 分别展示了“3+95”市 PM₁₀ 经气象调整的季节平均浓度时间序列图，季节平均浓度地图，五年、三年和一年累计降幅，年度平均浓度及排名。图 9 还展示了 PM₁₀ 中 PM_{2.5} 以外颗粒物浓度季节平均地图。根据上述四图一表，我们可以总结出 PM₁₀ 浓度如下几个特征：

- **季度评估**

同 PM_{2.5} 一样，PM₁₀ 浓度也有比较明显的季节特征，其中夏季污染最轻，冬季或春季最严重。此外，PM₁₀ 还有独特的、不同于 PM_{2.5} 的特征。一方面，PM₁₀ 浓度最高的季节与城市的地理位置密切相关。河北中南部、河南、山东中西部、山西中南部、陕西中南部、安徽中北部，冬季的 PM₁₀ 浓度最高；河北北部及京津地区、山西北部，春季浓度最高；陕西北

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

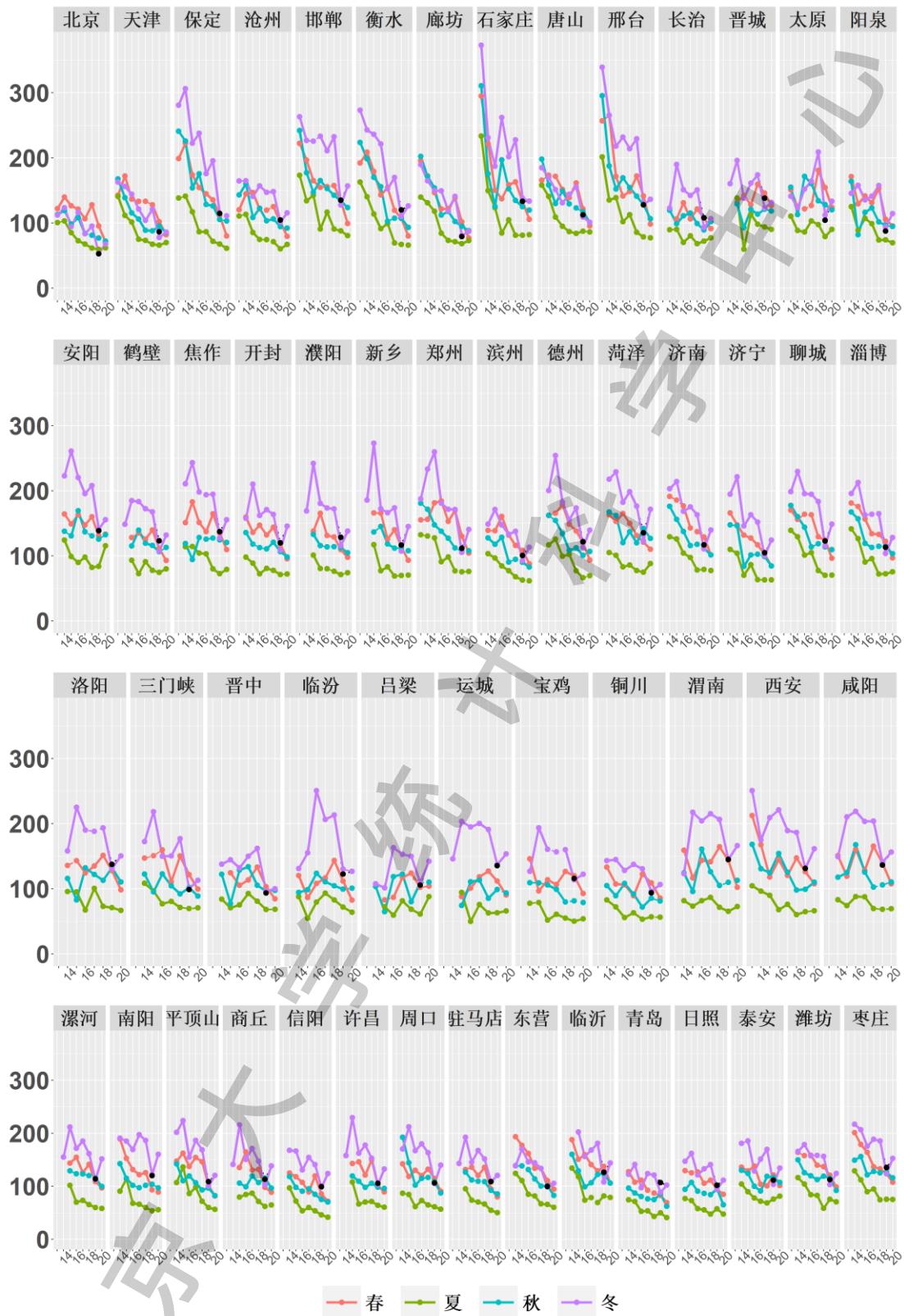
部，苏沪城市冬春季 PM₁₀ 浓度相差不大。另一方面，研究区域城市绝大部分城市和年份春季 PM₁₀ 浓度要高于秋季。

2015 年春季“3+95”城市 PM₁₀ 浓度均值（标准误差）为 119.9（3.4）微克/立方米，2019 年浓度均值为 102.5（2.2）微克/立方米，2020 年春季已降至 85.0（1.7）微克/立方米。2020 年春季安阳平均浓度最高，为 133.4 微克/立方米；黄山最低，为 43.6 微克/立方米。相比 2019 年，“3+95”城市一年降幅的平均值为 16.71%。2020 年春季所有城市中 96 个城市改善，仅安阳和吕梁两个城市恶化，增幅均低于 2%。

2015 年夏季“3+95”城市 PM₁₀ 浓度均值（标准误差）为 85.6（2.5）微克/立方米，2019 年下降至 60.9（1.3）微克/立方米，2020 年夏季略微改善，下降至 59.3（1.7）微克/立方米。2020 年夏季安阳平均浓度最高，为 115.6 微克/立方米；黄山最低，为 23.2 微克/立方米。相比 2015 年，吕梁、临汾、安阳和太原恶化，除了太原增幅均超过 15%，平顶山、滁州、宣城和南阳降幅最大，均超过 50%。相比 2019 年，“3+95”城市一年降幅的平均值仅 3.6%。2020 年夏季 58 个城市改善，40 个城市不降反增，其中，滨州 2014-2020 年浓度持续降低，京津冀、河南和安徽部分城市如临汾、保定、晋城、平顶山、信阳、周口、驻马店、阜阳、安庆、蚌埠、池州、滁州、马鞍山近四年浓度持续下降，改善显著。

2015 年秋季“3+95”城市 PM₁₀ 浓度均值（标准误差）为 104.6（3.0）微克/立方米，2019 年下降至 96.0（2.1）微克/立方米，2020 年秋季降至 86.0（2.3）微克/立方米，改善显著。2020 年秋季安阳平均浓度最高，为 132.6 微克/立方米；黄山最低，为 39.5 微克/立方米。相比 2019 年，“3+95”城市一年降幅的平均值为 10.8%。2020 年秋季相比夏季改善情况有所好转，84 个城市改善，仅 14 个城市（长治、西安、商洛、鹤壁、德州、安阳、咸阳、渭南、汉中、安康、临汾、晋中、吕梁、郑州）恶化。

2015 年冬季“3+95”城市 PM₁₀ 浓度均值（标准误差）为 159.5（5.3）微克/立方米，2019 年为 95.5（2.5）微克/立方米，2019 年冬季新冠疫情影响导致大幅度下降，2020 年冬季反弹至 116.2（2.9）微克/立方米。2020 年冬季菏泽平均浓度最高，为 171.6 微克/立方米；黄山最低，为 54.1 微克/立方米。相比 2015 年，忻州、大同、吕梁、阜阳、朔州、亳州、淮北、淮南、宿州、池州、榆林、太原、承德不降反增，忻州和大同增幅甚至超过 70%，保定降幅最大，达到 50.1%。相比 2019 年，“3+95”城市一年降幅的平均值为 22.7%。2020 年冬季仅 5 个城市（安徽马鞍山，京津冀地区的唐山、石家庄、保定，山西临汾）改善，93 个城市恶化。这也与新冠疫情后工业生产恢复，背景排放增加有关。



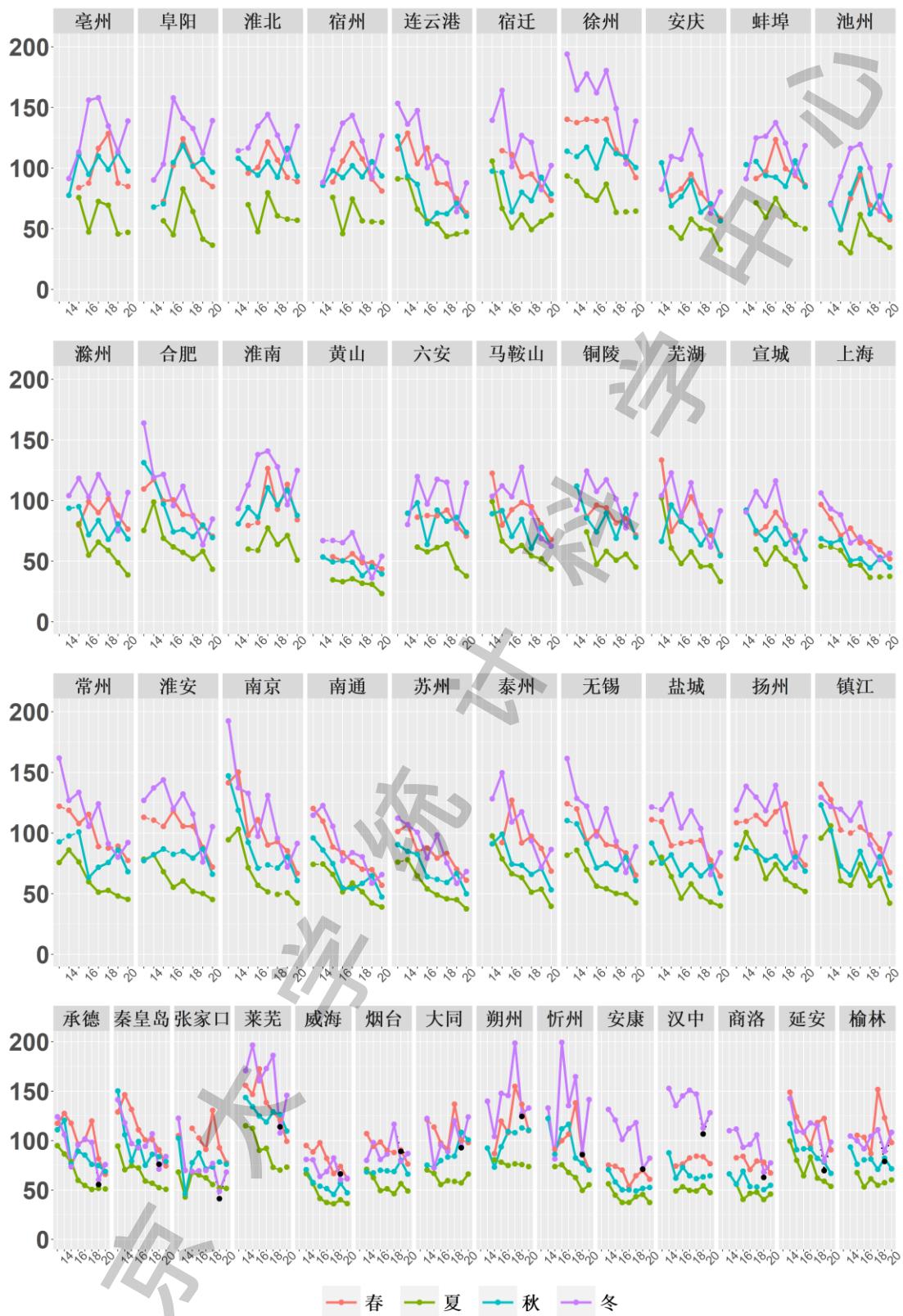


图 7 “3+95”城市气象调整后 2013 年至 2020 年 PM₁₀季节平均浓度（微克/立方米）变化序列图

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，经过疫情调整的值由黑点表示，城市排序依次为“2+26”城市、汾渭平原 11 市、苏皖鲁豫交界地区城市、长三角地区城市、区域内其他城市

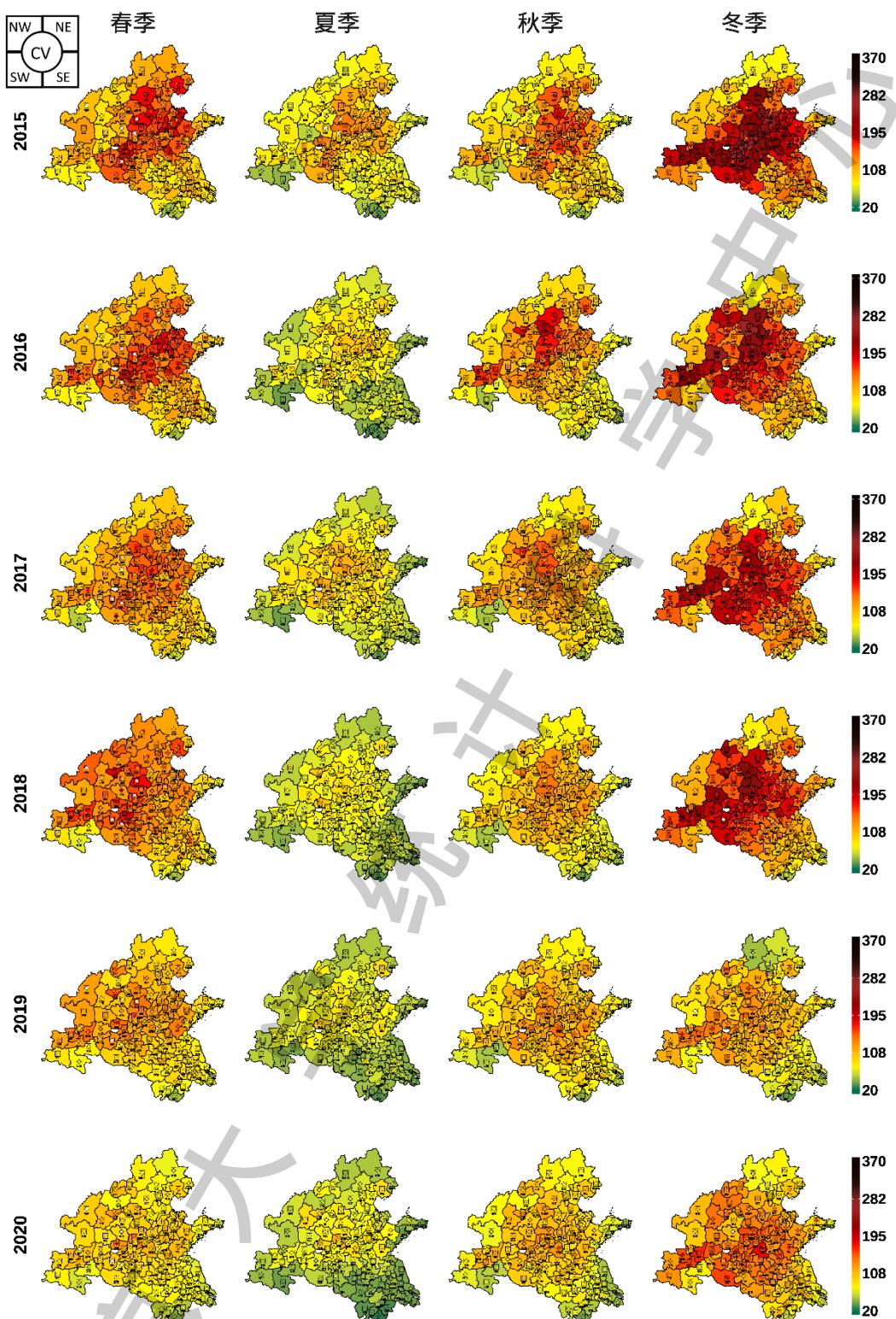


图 8 “3+95”城市气象调整后 2015 年至 2020 年 PM_{10} 季节平均浓度(微克/立方米)地图
(清晰图及五个风向下的浓度参见电子版)

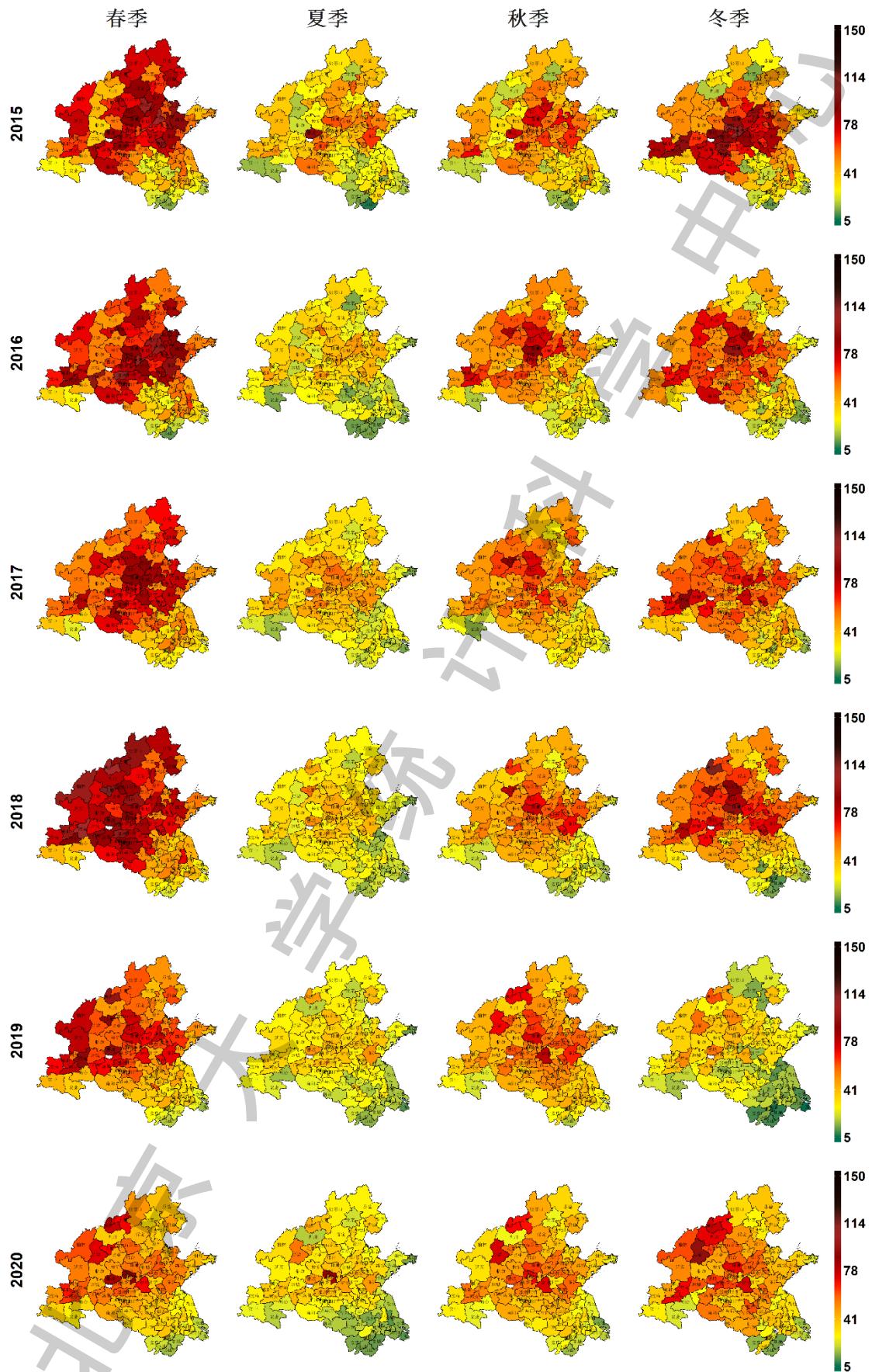


图 9 “3+95”城市气象调整后 2015 年至 2020 年 $\text{PM}_{10-2.5}$ 季节平均浓度(微克/立方米)地图

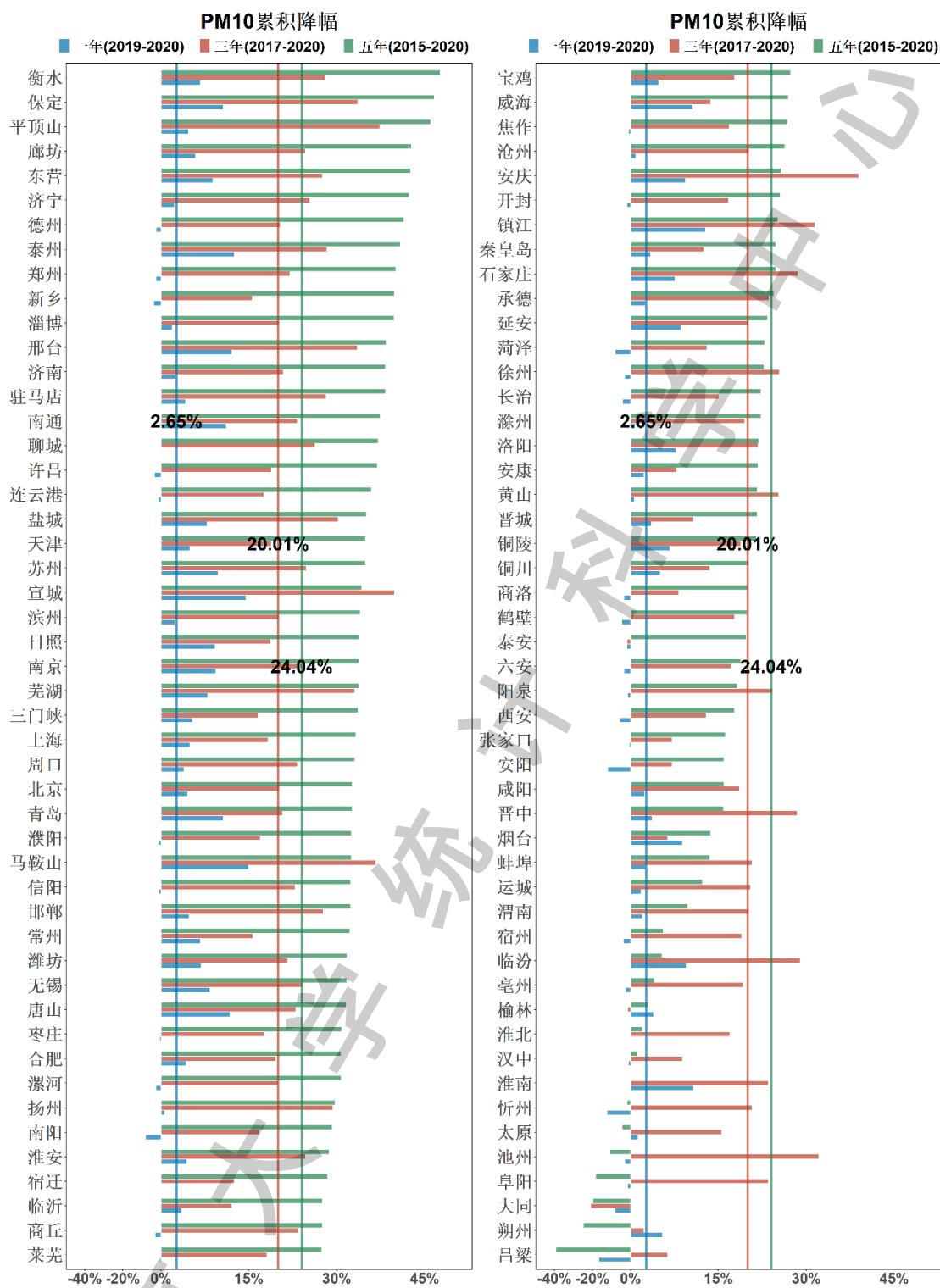


图 10 “3+95”城市气象调整后 PM₁₀过去一年（蓝色）、三年（红色）、五年（绿色）的累计降幅

蓝、红和绿色竖线分别代表“3+95”城市的一年、三年和五年平均降幅

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	2020年	排名
南京	143.7	(13)	127.3	(34)	98.7	(63)	84.1	(73)	86.6	(76)	77.4	(80)	72.1	(77)	65.3	(81)
承德	111.7	(24)	110.1	(51)	86.5	(80)	85.2	(72)	85.6	(81)	86.0	(71)	67.0	(85)	65.3	(82)
连云港	121.6	(19)	112.6	(47)	100.9	(61)	81.9	(79)	78.5	(89)	74.3	(87)	63.9	(87)	64.7	(83)
无锡	118.3	(21)	110.3	(49)	94.1	(70)	81.6	(81)	84.8	(83)	75.7	(84)	70.2	(81)	64.3	(84)
池州	NA		NA		57.6	(97)	75.1	(89)	93.7	(67)	69.3	(91)	61.8	(90)	63.6	(85)
泰州	NA		NA		104.9	(52)	94.2	(61)	86.5	(78)	77.0	(81)	70.9	(80)	62.0	(86)
商洛	NA		NA		76.5	(92)	71.7	(92)	66.7	(94)	71.4	(89)	59.2	(94)	61.2	(87)
盐城	99.8	(26)	96.0	(61)	92.0	(73)	76.8	(86)	85.7	(80)	77.5	(79)	64.8	(86)	59.7	(88)
马鞍山	NA		103.5	(56)	87.5	(77)	81.1	(84)	93.3	(69)	75.0	(86)	69.5	(83)	59.1	(89)
芜湖	NA		101.4	(58)	88.7	(76)	76.3	(88)	87.7	(74)	69.5	(90)	63.8	(88)	58.7	(90)
安康	NA		83.3	(63)	74.4	(94)	64.6	(95)	63.2	(95)	68.7	(93)	59.6	(93)	58.2	(91)
安庆	NA		NA		76.7	(91)	77.2	(85)	93.4	(68)	76.0	(83)	62.9	(89)	57.0	(92)
苏州	94.9	(30)	94.1	(62)	83.2	(83)	71.2	(93)	72.1	(92)	65.9	(94)	60.1	(92)	54.2	(93)
南通	101.1	(25)	98.2	(59)	83.7	(82)	66.8	(94)	68.2	(93)	65.1	(95)	58.9	(95)	52.3	(94)
宣城	NA		NA		78.8	(90)	72.2	(91)	86.2	(79)	68.9	(92)	60.6	(91)	51.8	(95)
威海	NA		78.2	(65)	70.7	(96)	64.2	(96)	59.8	(96)	57.6	(96)	57.7	(96)	51.6	(96)
上海	83.3	(31)	76.2	(66)	71.5	(95)	59.9	(97)	58.4	(97)	52.0	(97)	50.2	(97)	47.7	(97)
黄山	NA		NA		51.2	(98)	49.8	(98)	53.7	(98)	43.0	(98)	40.4	(98)	40.1	(98)

表 4 “3+95”城市气象调整后 2013 年至 2020 年 PM₁₀ 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)

• 年度变化趋势

根据图 10, 相比 2015 年, 2020 年“3+95”城市 PM₁₀ 平均累计降幅(标准误差)为 24.0% (1.6%); 相比 2017 年, 2020 年平均累计降幅(标准误差)为 20.0% (0.9%); 相比 2019 年, 2020 年平均累计降幅(标准误差)为 2.7% (0.6%)。从 PM₁₀ 的 2015-2020 年累计降幅来看, 除去淮南、忻州、太原、池州、阜阳、大同、朔州、吕梁, 其他城市 2020 年 PM₁₀ 浓度较 2015 年均有所下降。五年累计降幅超过 40% 的城市有 9 个(衡水、保定、平顶山、廊坊、东营、济宁、德州、泰州、郑州), 其中衡水、保定、平顶山、廊坊占据前四; 累计降幅超过 30% 的城市有 42 个, 接近“3+95”城市的半数。相比 2017 年, 淮南、太原、朔州、吕梁、忻州、池州、阜阳 7 市五年累计降幅为负(浓度增加)但三年累计降幅为正且改善较大, 而大同三年累计降幅依然为负, 五年改善较大的泰安三年累计降幅为负, 说明这两个城市近年来污染加重, 值得关注。

相比于 2015 年, 降幅最小的前二十个城市中分别有 8、7 和 4 个城市位于山西、安徽和陕西省, 这三个省累计降幅相对较低, 分别为 3.7%、15.4% 和 16.4%; 此外, 降幅最小的前二十个城市中有 7 个城市(吕梁、太原、临汾、渭南、运城、晋中、咸阳)属于“2+26”及汾渭平原城市, 这些城市较早开始污染治理, 但改善相对不足。降幅最大的前二十个城市中分别有 6、5、5 个城市位于山东、河南和京津冀地区, 这三个地区累计降幅相对较高, 分别为 33.0%、31.5% 和 34.3%; 此外, 降幅最大的前二十个城市中有 8 个城市(盐城、连云港、许昌、南通、驻马店、泰州、东营、平顶山)不属于“2+26”和汾渭平原城市, 这些非重点治理区域城市改善同样显著。

相较于 2017 年，河南改善明显， PM_{10} 三年累计降幅达 15% 以上的城市有 16 个，除此之外安阳累计降幅为 7.1%。山西大同三年累计降幅为负，吕梁和朔州降幅不超过 10%；陕西仅渭南、延安三年累计降幅超过 20%；安徽三年累计降幅达 30% 以上的城市有 5 个，且最低的累计降幅也达到了 17%；江苏三年累计降幅超过 20% 的有 10 个；上海三年累计降幅达到 18.3%。这进一步印证我们的观点，即京津冀地区的颗粒物形成稳定下降趋势；而山西、陕西持续稳定的下降趋势仍有待建立。

• 年度污染状态与相对排名

2015 年“3+95”城市 PM_{10} 年均浓度均值（标准误差）为 117.4（3.3）微克/立方米，2019 年下降至 88.7（1.9）微克/立方米，2020 年为 86.6（2.0）微克/立方米。安阳和菏泽的 2020 年 PM_{10} 季节年平均浓度最高，分别为 134.3 和 124.3 微克/立方米。有 30 个城市季节年平均浓度超过 100 微克/立方米；黄山、上海、威海、宣城、南通和苏州季节年平均浓度最低，低于 55 微克/立方米，“3+95”城市中仅 16 个城市季节年平均浓度低于 65 微克/立方米。 PM_{10} 年平均浓度高于 120 微克/立方米的城市数量从 2019 年的 3 个减少到 2020 年的 2 个，而“3+95”城市中三分之二以上（68 个） PM_{10} 年平均浓度降至 100 微克/立方米以下。

根据表 4，2015-2020 年排名升高（相对恶化）最多的前 20 个城市中，吕梁、太原、渭南、咸阳、西安、临汾、运城、鹤壁、晋城这 9 个城市属于“2+26”及汾渭平原城市，值得关注；排名下降最多的前 20 个城市中，平顶山、东营、泰州、驻马店、连云港、常州、日照、青岛、信阳、南京、许昌这 11 个城市不属于“2+26”城市且不位于汾渭平原，非重点关注区域城市，仍改善显著。2015 年来，临沂、泰安、濮阳、大同近四年排名持续升高，污染治理改善速度落后；衡水排名持续降低，石家庄、平顶山、安庆近四年排名持续降低，侧面说明其持续改善趋势。和 $PM_{2.5}$ 情况类似，邢台 2013-2019 年排名均在前十，2020 年排名降至第 21 位；保定 2013-2018 年排名均在前十五，2019 和 2020 年排名降至第 31 和 48 位。

• $PM_{10-2.5}$ 的浓度

根据图 9，“3+95”城市 2015 年至 2020 年各季度 $PM_{10-2.5}$ 平均浓度具有如下特征。

从季节分布来看： $PM_{10-2.5}$ 平均浓度随季节变动明显，从 2015-2020 年六年整体来看，春季浓度最高，六年平均值为 56.8 微克/立方米；冬季、秋季较高，六年平均值分别为 44.9 微克/立方米和 43.5 微克/立方米；夏季浓度最低，六年平均值仅 31.3 微克/立方米。

从年际变化来看：从 2015 年至 2020 年， $PM_{10-2.5}$ 平均浓度整体下降趋势缓慢，2015 年平均值为 47.5 微克/立方米，2018 年平均值为 46.6 微克/立方米，到 2020 年下降至 39.6 微克/立方米。过去六年平均值只下降了 7.9 微克/立方米。

从地理分布来看：地区间差异较大，2020 年山西、河南、山东、京津冀和陕西全年平均值分别为 52.4、44.9、44.2、40.8 和 40.7 微克/立方米，而安徽、江苏、上海全年平均值仅 29.9、27.7、16.8 微克/立方米；“3+95”城市中，吕梁 PM_{10-2.5} 浓度最高，年平均值为 73.85 微克/立方米，黄山 PM_{10-2.5} 浓度最低，全年平均值为 14.8 微克/立方米；吕梁、安阳、朔州、菏泽、晋城、大同 6 市年均值超过 60 微克/立方米；黄山、宣城、南通、上海、安庆 5 市则不超过 20 微克/立方米。

从 2015 年到 2020 年，有 24 个城市 PM_{10-2.5} 年平均浓度不降反增，且 51 个城市降幅不超过 30%。与 PM_{2.5} 相比降幅改善较小，说明伴随 PM_{2.5} 治理和浓度水平降低，PM_{10-2.5} 的下降速度远低于 PM_{2.5} 的下降速度，PM_{10-2.5} 污染也应逐渐被重视。

（三）二氧化硫

二氧化硫 (SO₂) 是一种无色、有刺激性气味的气体，一般认为无毒或者毒性不大，但是二氧化硫在大气中易被氧化形成 SO₃，再与水分子结合生成硫酸分子，经过均相或非均相成核作用，形成硫酸气溶胶，并同时发生化学反应生成硫酸盐。硫酸和硫酸盐可形成硫酸烟雾和酸性降水，造成较大的危害。二氧化硫之所以被认为是重要的大气污染物，原因就在于它参与了硫酸烟雾和酸雨的形成[19]。大气中二氧化硫半数由人为源产生。人为源中，燃煤约占排放的 60%，尤其是高硫煤的燃烧，是大气中二氧化硫的主要来源。其次，燃油、工业排放也有一定贡献。

在“十一五计划”（2006-2010 年）期间，我国已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”。2014 年以来，我国在北方地区全面实施散煤综合治理，推进冬季清洁取暖。2015 年，我国启动对燃煤机组全面实施超低排放和节能改造，以降低发电煤耗和污染排放。这些均是降低大气中二氧化硫浓度的重要举措。

中国目前二氧化硫浓度的限值标准如表 5，美国环境保护署关于二氧化硫浓度的限值标准为：一级标准 1 小时平均浓度 75ppb（约为 197 微克/立方米），其标准实施形式为三年间小时浓度的 99% 分位数平均值不能超过该浓度限值，二级标准为 3 小时平均浓度 0.5ppm（约为 1310 微克/立方米），要求每年超过此浓度限值的次数不能多于一次。

表 5：我国目前二氧化硫平均浓度标准

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

图 11、图 12、图 13 和表 6 分别展示了“3+95”市二氧化硫经气象调整的季节平均浓度时间序列图，季节平均浓度地图，五年、三年和一年累计降幅，年度平均浓度及排名。根据上述三图一表，我们可以总结出二氧化硫浓度如下几个特征：

- **季度评估**

根据图 11，研究区域城市中江淮地区春冬两季浓度差异不大，其它区域具有相似的、明显的季节效应，冬季二氧化硫浓度最高，春秋两季次之，夏季最轻。与 $\text{PM}_{2.5}$ 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。

2015 年春季“3+95”城市二氧化硫浓度均值（标准误差）为 33.6（1.4）微克/立方米，2019 年下降至 14.2（0.6）微克/立方米，2020 年春季继续改善，为 12.0（0.4）微克/立方米。
2020 年春季大同平均浓度最高，为 24.4 微克/立方米；北京最低，为 4.8 微克/立方米。相比 2019 年，2020 年春季有 81 个城市改善，17 个城市恶化，其中分别有 5 个和 4 个城市位于陕西和河南。“3+95”城市平均降幅达到 13.4%。

2015 年夏季“3+95”城市二氧化硫浓度均值（标准误差）为 21.0（1.0）微克/立方米，2019 年浓度均值为 9.8（0.4）微克/立方米，2020 年夏季继续降至 9.0（0.4）微克/立方米。
2020 年夏季大同平均浓度最高，为 20.3 微克/立方米；延安最低，为 3.2 微克/立方米。相比 2019 年，2020 年夏季 57 个城市改善，41 个城市恶化，其中分别有 11、6 个城市位于山东和山西，“3+95”城市平均降幅仅 5.7%。相比 2015 年，汉中、宝鸡、榆林不降反增，亳州和驻马店降幅最大，均超过 80%。

2015 年秋季“3+95”城市二氧化硫浓度均值（标准误差）为 31.3（1.5）微克/立方米，2019 年下降至 12.8（0.5）微克/立方米，2020 年秋季改善较小，为 12.2（0.5）微克/立方米。2020 年秋季大同平均浓度最高，为 32.2 微克/立方米；北京最低，为 3.8 微克/立方米。相比 2019 年，2020 年秋季 58 个城市改善，40 个城市恶化，其中分别有 10、9 个城市位于山东和河南省，“3+95”城市平均降幅仅 2.2%。

2015 年冬季“3+95”城市二氧化硫浓度均值（标准误差）为 54.7（3.3）微克/立方米，由于 2019 年疫情防控措施的影响下导致浓度大幅度下降，2019 年浓度仅 15.3（0.9）微克/立方米，2020 年冬季略微反弹至 15.6（0.7）微克/立方米。2020 年冬季晋中平均浓度最高，为 44.6 微克/立方米；北京最低，为 5.2 微克/立方米。相比 2015 年，所有城市浓度下降，汉中降幅较小，仅 15.1%，运城和洛阳降幅最大，达到了 86.1% 和 86.0%。相比 2019 年，2020 年冬季仅 38 个城市改善，60 个城市恶化，“3+95”城市平均增幅达到 8.1%。在这些改善的城市中，有 28 个城市近五年浓度持续降低，呈现改善良好的态势，分别有山西 8 市（临汾、忻州、吕梁、运城、晋城、太原、大同、长治）、京津冀 5 市（唐山、秦皇岛、保定、沧州、

北京)、江苏3市(镇江、南通、常州)、陕西3市(延安、商洛、西安)、安徽3市(铜陵、淮北、蚌埠)、河南3市(安阳、洛阳、濮阳)、山东2市(枣庄、莱芜)以及上海。

• 年度变化趋势

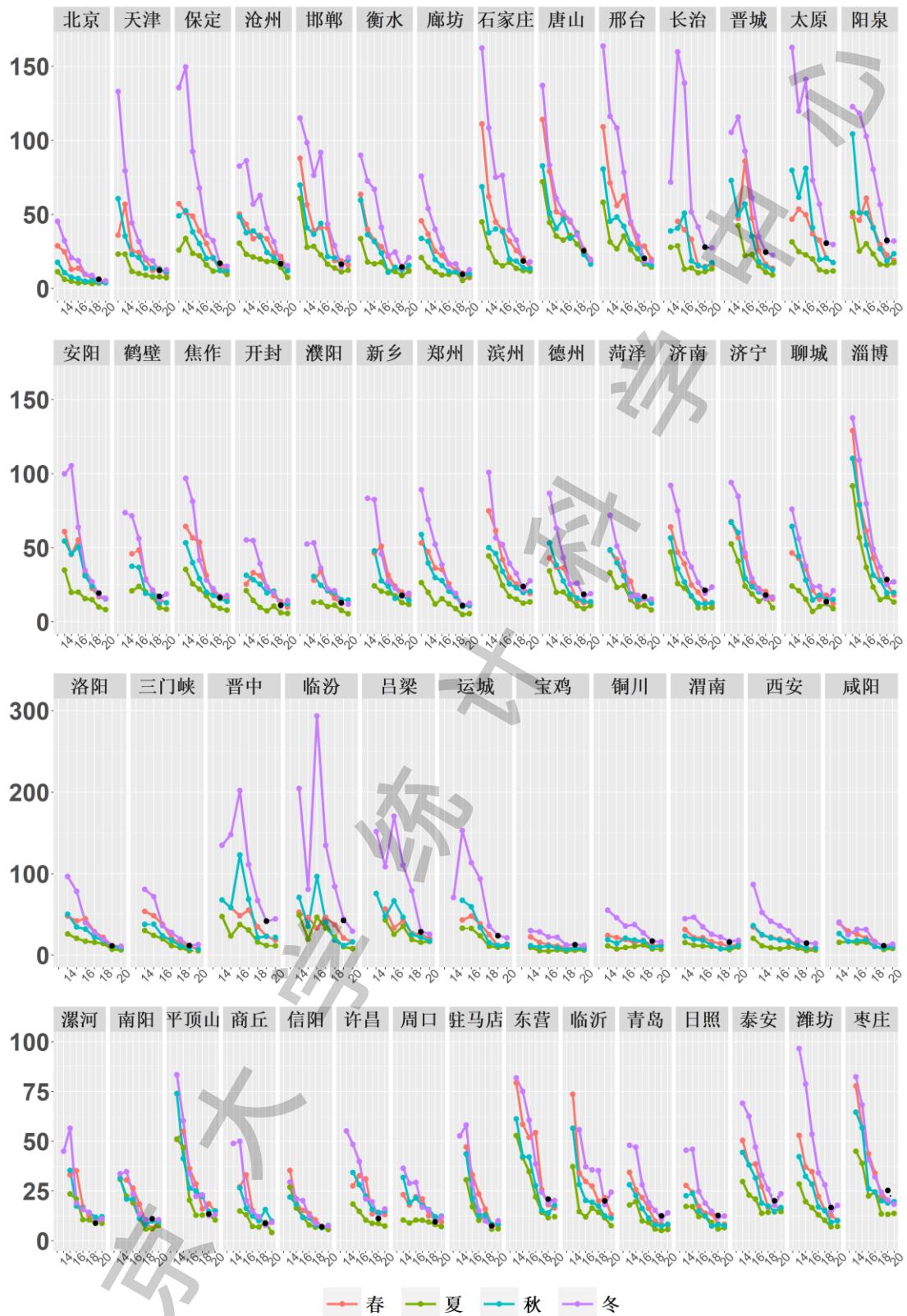
根据图13,相比2015年,2020年“3+95”城市二氧化硫平均累计降幅(标准误差)为62.9%(1.3%);相比2017年,2020年平均累计降幅(标准误差)为42.2%(1.4%);相比2019年,2020年平均累计降幅(标准误差)为4.7%(1.3%)。从五年累计降幅来看,“3+95”城市除汉中增加6.6%外,其他城市2020年的浓度均小于2015年的浓度,大同、承德、榆林、宝鸡、黄山降幅最小,低于40%;驻马店、三门峡、运城降幅最大,均超过80%。2015年至2020年有27个城市的累计降幅超过70%,其中8个城市位于河南,5个城市位于山东;67个城市的累计降幅超过60%,分别有16个城市位于河南,13个城市位于山东,12个城市位于江苏。2017年至2020年有延安、临汾两个城市的累计降幅超过70%,28个城市的累计降幅超过50%,其中有8个位于山西,5个位于安徽。山西各城市2017年以来二氧化硫浓度改善较多,但山西二氧化硫浓度仍处于较高水平。

过去五年整体来看,二氧化硫区域内浓度改善显著。相比于2015年,降幅最大的前二十个城市中分别有7、5个城市位于河南、山东,这两个省累计降幅相对较高,分别为69.5%、66.3%。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,达到了一些发达国家水平。相比于2015年,降幅最小的前二十个城市中分别有9、7个城市位于安徽、陕西,这两个省累计降幅相对较低,分别为55.1%、45.8%。

• 年度污染状态与相对排名

根据表6,2015年“3+95”城市二氧化硫年均浓度均值(标准误差)为35.2(1.7)微克/立方米,2019年下降至13.0(0.5)微克/立方米,2020年为12.2(0.5)微克/立方米。二氧化硫的排名与PM₁₀、PM_{2.5}的排名差异较大,如唐山市的颗粒物浓度较低,但是二氧化硫浓度在2020年位居第十位。大同、晋中和阳泉位居2020年二氧化硫浓度最高的前三位,前10位中有7个城市位于山西,山西二氧化硫治理应更加努力。“3+95”城市中有22个城市季节年平均浓度超过15微克/立方米;北京和威海季节年平均浓度最低,低于5微克/立方米,上海年平均浓度为6.9微克/立方米,38个城市季节年平均浓度低于10微克/立方米。

2015-2020年排名升高(相对恶化)最多的前20个城市中,无“2+26”城市,有5个城市(铜川、渭南、宝鸡、衡水、咸阳)属于汾渭平原。排名下降最多的前20个城市中,有12个城市(驻马店、亳州、商丘、延安、淮北、泰州、阜阳、镇江、无锡、青岛、日照、平顶山)不属于“2+26”和汾渭平原城市。



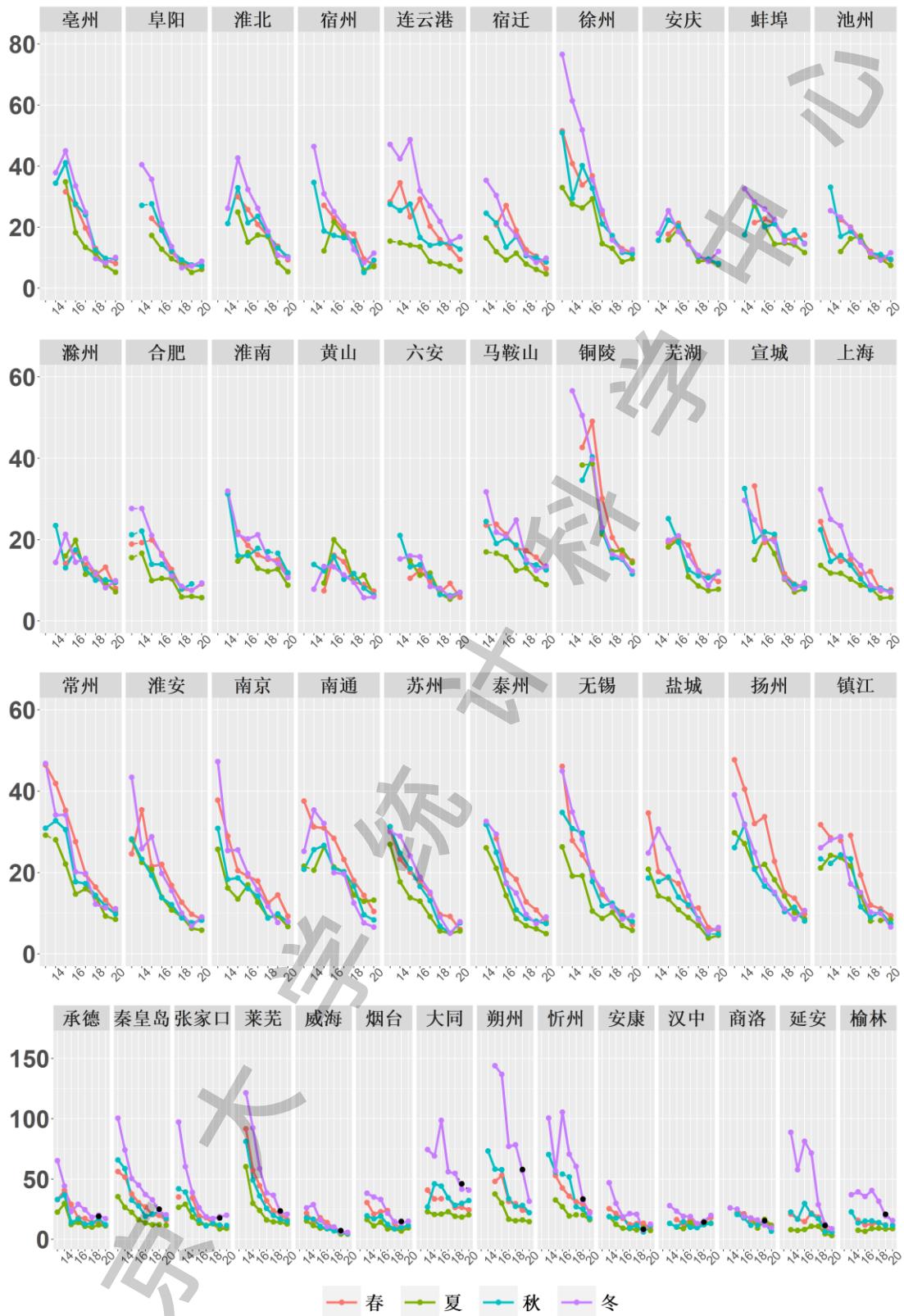


图 11 “3+95”城市气象调整后 2013 年至 2020 年二氧化硫季节平均浓度（微克/立方米）变化序列图

图中实线（虚线）代表在 5% 统计学显著水平比上一年有（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，经过疫情调整的值由黑点表示，城市排序依次为“2+26”城市、汾渭平原 11 市、苏皖鲁豫交界地区城市、长三角地区城市、区域内其他城市

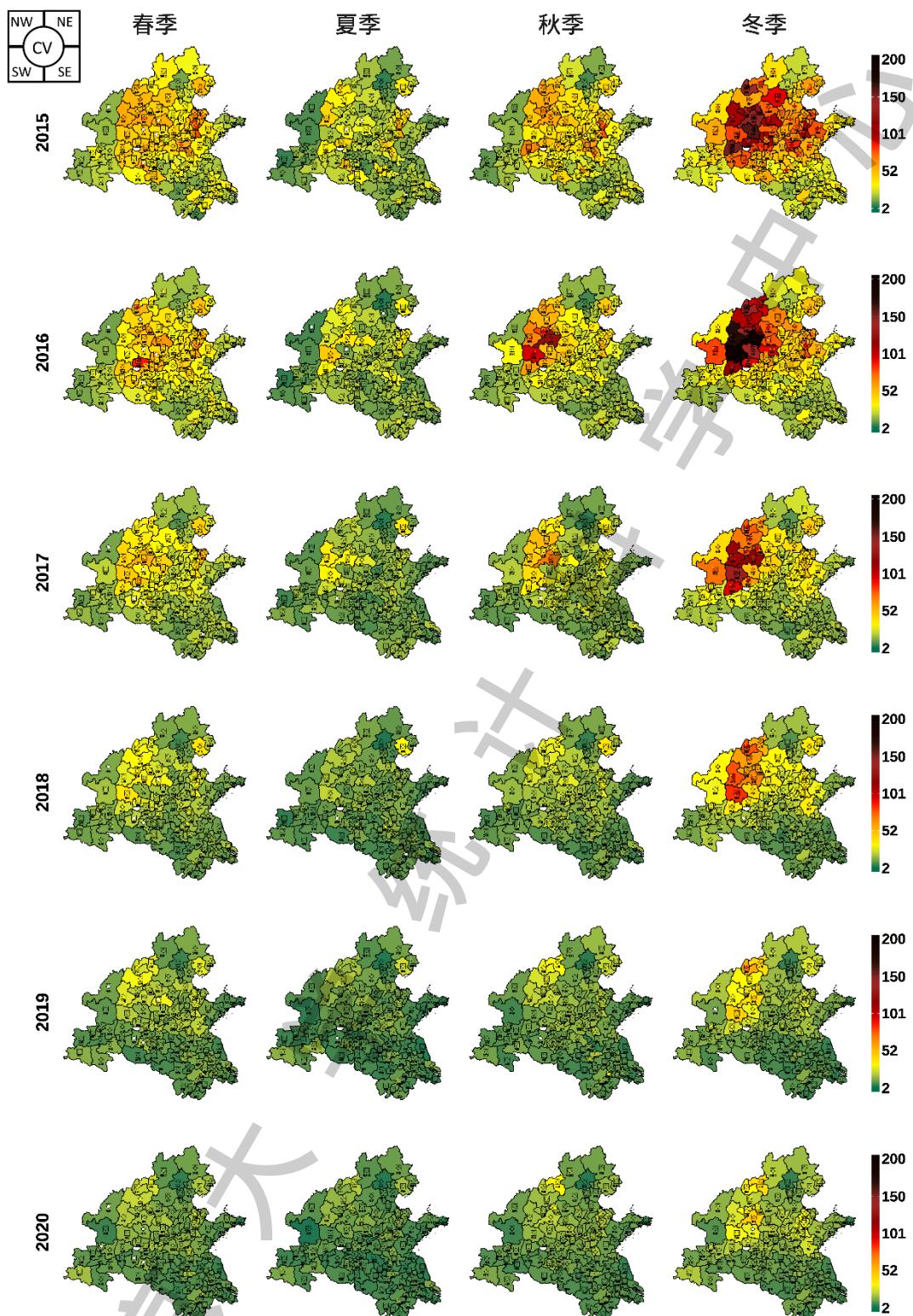


图 12 “3+95”城市气象调整后 2015 年至 2020 年二氧化硫季节平均浓度(微克/立方米)地图
(清晰图及五个风向下的浓度参见电子版)

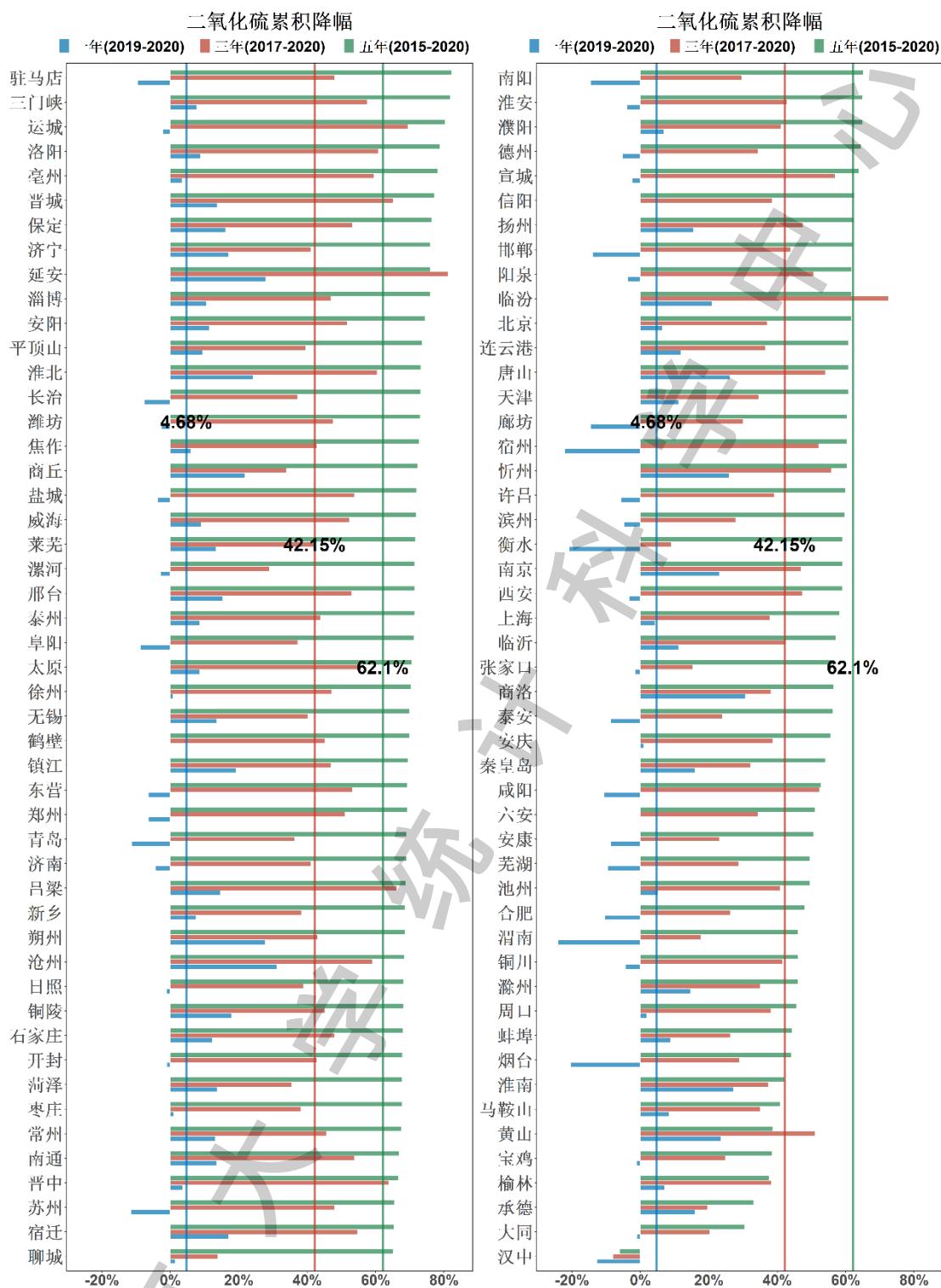


图 13 “3+95”城市气象调整后二氧化硫浓度过去一年（蓝色）、三年（红色）、五年（绿色）的累计降幅
蓝、红和绿色竖线分别代表“3+95”城市的一年、三年和五年平均降幅

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	2020年	排名
大同	NA		41.3	(34)	42.3	(31)	49.4	(14)	36.9	(11)	32.1	(8)	29.1	(2)	29.4	(1)
晋中	NA		NA		72.0	(3)	102.7	(2)	66.4	(1)	34.8	(5)	24.6	(5)	24.0	(2)
阳泉	NA		75.9	(5)	60.2	(10)	61.2	(8)	46.6	(5)	32.3	(7)	21.8	(9)	23.0	(3)
朔州	NA		NA		72.0	(4)	69.4	(5)	39.7	(10)	37.7	(2)	31.3	(1)	22.6	(4)
滨州	NA		67.5	(9)	50.2	(20)	38.2	(24)	28.0	(22)	24.1	(12)	19.3	(13)	20.2	(5)
吕梁	NA		NA		64.0	(7)	74.0	(3)	58.8	(3)	37.5	(3)	23.3	(6)	19.9	(6)
忻州	NA		NA		49.5	(21)	57.3	(11)	44.4	(6)	34.7	(6)	26.2	(3)	19.6	(7)
淄博	NA		117.2	(1)	81.2	(1)	57.4	(10)	36.8	(12)	27.0	(11)	21.8	(8)	19.5	(8)
太原	80.3	(6)	80.2	(4)	64.9	(6)	73.6	(4)	42.7	(7)	30.4	(9)	20.9	(10)	19.1	(9)
唐山	101.5	(2)	64.5	(13)	47.1	(22)	45.0	(17)	40.2	(9)	35.2	(4)	24.9	(4)	18.4	(10)
长治	NA		46.3	(30)	68.6	(5)	60.5	(9)	29.3	(17)	20.7	(22)	17.1	(18)	18.4	(11)
枣庄	NA		67.4	(10)	55.2	(13)	33.4	(32)	28.8	(19)	20.1	(24)	18.0	(15)	17.8	(12)
泰安	NA		48.4	(28)	40.5	(35)	34.5	(28)	23.3	(34)	18.7	(31)	16.3	(21)	17.7	(13)
临汾	NA		94.2	(2)	45.5	(25)	117.5	(1)	63.6	(2)	40.6	(1)	22.0	(7)	17.4	(14)
邢台	102.9	(1)	66.1	(11)	59.9	(11)	54.5	(12)	36.4	(13)	27.9	(10)	20.2	(11)	17.1	(15)
邯郸	83.4	(5)	55.9	(19)	45.1	(26)	49.9	(13)	30.5	(16)	20.6	(23)	15.0	(29)	17.1	(16)
东营	NA		68.8	(8)	54.4	(14)	47.4	(15)	35.7	(14)	19.9	(26)	15.7	(26)	16.7	(17)
秦皇岛	64.4	(8)	52.7	(24)	35.8	(43)	29.8	(37)	24.2	(29)	21.6	(20)	19.5	(12)	16.4	(18)
莱芜	NA		88.6	(3)	57.1	(12)	40.7	(21)	28.0	(21)	23.6	(14)	18.7	(14)	16.2	(19)
汉中	NA		NA		15.1	(94)	13.8	(94)	14.8	(75)	11.1	(76)	14.2	(37)	16.0	(20)
新乡	NA		NA		50.2	(19)	36.3	(26)	25.5	(25)	20.0	(25)	17.0	(19)	15.7	(21)
衡水	61.7	(10)	41.7	(33)	37.0	(42)	27.7	(43)	16.6	(61)	15.7	(45)	12.5	(45)	15.1	(22)
蚌埠	NA		NA		26.2	(58)	22.3	(58)	19.8	(46)	15.9	(44)	16.0	(24)	14.6	(23)
运城	NA		NA		74.1	(2)	63.3	(7)	47.5	(4)	21.7	(19)	14.2	(36)	14.5	(24)
晋城	NA		NA		63.7	(8)	64.5	(6)	41.7	(8)	23.3	(15)	16.8	(20)	14.5	(25)
济宁	NA		70.3	(7)	60.7	(9)	36.1	(27)	24.6	(27)	19.6	(27)	17.5	(16)	14.5	(26)
聊城	NA		52.8	(23)	41.1	(34)	29.2	(41)	16.6	(60)	16.8	(43)	14.5	(34)	14.3	(27)
济南	85.3	(4)	64.9	(12)	45.9	(23)	33.8	(29)	24.1	(30)	17.1	(39)	13.6	(39)	14.2	(28)
石家庄	96.5	(3)	58.9	(18)	44.5	(28)	42.4	(18)	27.3	(23)	22.6	(16)	16.2	(22)	14.2	(29)
临沂	NA		59.5	(17)	33.2	(44)	24.8	(48)	24.7	(26)	21.7	(18)	15.9	(25)	14.2	(30)
德州	NA		54.3	(22)	39.6	(36)	31.8	(36)	21.3	(40)	16.9	(42)	13.3	(40)	14.0	(31)
焦作	NA		62.4	(15)	50.9	(16)	36.6	(25)	24.3	(28)	17.5	(35)	14.8	(31)	13.9	(32)
安阳	NA		62.6	(14)	54.1	(15)	47.3	(16)	28.6	(20)	22.1	(17)	15.6	(28)	13.8	(33)
平顶山	NA		61.2	(16)	50.9	(17)	29.3	(40)	22.2	(35)	18.6	(32)	14.9	(30)	13.4	(34)
渭南	NA		NA		28.8	(47)	24.9	(64)	21.4	(61)	16.3	(65)	10.8	(57)	13.4	(35)
鹤壁	NA		NA		44.0	(29)	41.3	(20)	24.1	(32)	19.1	(28)	13.2	(41)	13.2	(36)
铜陵	NA		NA		41.5	(33)	41.9	(19)	24.1	(31)	17.4	(36)	16.1	(23)	13.2	(37)
承德	38.4	(18)	37.8	(36)	19.6	(82)	19.5	(71)	16.3	(64)	13.9	(56)	15.6	(27)	13.1	(38)
许昌	NA		NA		32.2	(48)	28.9	(42)	21.2	(41)	14.4	(53)	12.2	(47)	12.9	(39)
菏泽	NA		50.4	(26)	39.1	(37)	32.3	(35)	19.5	(49)	13.8	(57)	14.6	(33)	12.6	(40)
张家口	50.2	(14)	45.7	(31)	29.1	(52)	18.6	(75)	14.9	(73)	14.2	(55)	12.4	(46)	12.6	(41)
铜川	NA		27.4	(54)	22.3	(72)	21.3	(62)	20.5	(44)	18.8	(29)	11.5	(51)	12.0	(42)
保定	66.9	(7)	71.8	(6)	50.8	(18)	39.8	(22)	25.7	(24)	21.2	(21)	14.3	(35)	12.0	(43)
马鞍山	NA		24.2	(59)	20.3	(79)	19.6	(70)	18.5	(52)	14.9	(52)	13.1	(42)	12.0	(44)
沧州	53.0	(13)	47.6	(29)	37.6	(40)	38.4	(23)	29.2	(18)	23.7	(13)	17.3	(17)	11.9	(45)
榆林	NA		NA		19.1	(85)	17.3	(84)	19.3	(50)	17.1	(40)	12.8	(43)	11.9	(46)
烟台	NA		26.2	(56)	21.1	(76)	22.3	(57)	16.6	(62)	11.3	(74)	9.8	(67)	11.8	(47)
潍坊	NA		55.1	(21)	42.0	(32)	33.3	(33)	21.6	(38)	17.3	(37)	11.0	(55)	11.3	(48)
徐州	53.0	(12)	39.8	(35)	38.0	(39)	33.5	(30)	21.4	(39)	15.6	(46)	11.4	(53)	11.3	(49)
连云港	29.6	(25)	29.3	(46)	28.4	(55)	22.8	(51)	17.5	(58)	15.1	(50)	12.6	(44)	11.1	(50)
濮阳	NA		NA		31.3	(49)	27.1	(44)	18.7	(51)	16.9	(41)	11.8	(48)	11.0	(51)
淮南	NA		NA		18.5	(89)	17.9	(79)	17.1	(59)	15.0	(51)	14.7	(32)	10.7	(52)
漯河	NA		NA		37.2	(41)	23.1	(50)	14.9	(74)	12.9	(66)	10.3	(62)	10.6	(53)
开封	NA		33.3	(41)	32.7	(45)	26.4	(46)	18.4	(53)	17.1	(38)	10.4	(59)	10.5	(54)
芜湖	NA		24.0	(60)	20.6	(77)	20.1	(67)	14.6	(77)	11.1	(77)	9.5	(68)	10.4	(55)
咸阳	NA		30.5	(45)	22.1	(74)	22.5	(55)	21.8	(37)	13.6	(59)	9.4	(69)	10.4	(56)
周口	NA		25.5	(58)	18.8	(86)	20.9	(63)	16.5	(63)	13.3	(60)	10.4	(60)	10.2	(57)
天津	63.2	(9)	48.7	(27)	26.0	(60)	21.8	(59)	15.6	(69)	13.1	(63)	11.5	(50)	10.2	(58)
郑州	56.9	(11)	44.0	(32)	32.5	(47)	29.3	(39)	20.4	(45)	15.6	(47)	9.4	(70)	10.0	(59)
安康	NA		27.5	(53)	20.3	(78)	15.9	(89)	13.0	(87)	13.3	(61)	9.2	(72)	10.0	(60)
常州	38.3	(19)	34.2	(40)	30.5	(50)	20.1	(68)	18.2	(56)	14.3	(54)	11.4	(52)	9.9	(61)
商洛	NA		NA		22.3	(71)	19.4	(72)	15.7	(68)	12.5	(69)	14.0	(38)	9.7	(62)
南通	26.3	(26)	28.2	(51)	29.0	(53)	22.7	(53)	20.8	(42)	15.4	(48)	11.1	(54)	9.6	(63)
西安	44.5	(16)	28.3	(50)	23.4	(68)	20.4	(66)	18.2	(55)	13.1	(62)	9.3	(71)	9.6	(64)
廊坊	44.0	(17)	34.2	(39)	24.0	(67)	18.4	(76)	13.6	(81)	12.8	(67)	8.3	(81)	9.5	(65)
南阳	NA		31.8	(44)	27.2	(57)	22.5	(56)	13.5	(82)	8.4	(93)	8.3	(82)	9.5	(66)
池州	NA		NA		18.6	(88)	18.7	(74)	15.9	(67)	11.3	(73)	9.9	(66)	9.4	(67)
扬州	35.7	(21)	32.8	(42)	24.7	(66)	22.6	(54)	17.7	(57)	15.3	(49)	11.0	(56)	9.3	(68)
洛阳	NA		55.2	(20)	43.9	(30)	33.2	(34)	23.7	(33)	18.3	(33)	10.2	(64)	9.3	(69)
宝鸡	NA		18.3	(67)	14.8	(95)	12.7	(97)	12.1	(90)	8.4	(92)	9.0	(74)	9.1	(70)
安庆	NA		NA		20.3	(80)	19.9	(69)	14.7	(76)	10.0	(84)	9.1	(73)	9.0	(71)
青岛	45.4	(15)	32.1	(43)	28.8	(54)	19.0	(73)	14.0	(79)	9.8	(85)	8.0	(86)	8.9	(72)
宿州	NA		NA		22.2	(73)	21.8	(60)	18.4	(54)	15.3	(49)	7.2	(90)	8.8	(73)
日照	NA		28.3	(49)	27.8	(56)	17.3	(83)	14.4	(78)	11.3	(72)	8.7	(78)	8.8	(74)
淮北	NA		NA		32.6	(46)	23.6	(49)	22.0	(36)	17.5	(34)	11.5	(49)	8.7	(75)
滁州	NA		NA		16.1	(93)	17.2	(85)	13.4	(83)	11.3	(75)	10.2	(63)	8.7	(76)
宣城	NA		NA		23.2	(69)	20.5	(65)	19.5	(48)	10.7	(78)	8.2	(84)	8.4	(77)
合肥	20.8	(31)	21.4	(63)	16.2	(92)	14.3	(92)	11.4	(93)	7.5	(96)	7.6	(88)	8.4	(78)
三门峡	NA		50.8	(25)	45.5	(24)	29.4	(38)	19.6	(47)	13.8	(58)	9.0	(75)	8.3	(79)
亳州	NA		NA		38.1	(38)	26.6	(45)	20.5	(43)	11.6	(70)	8.6	(79)	8.3	(80)

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	2020年	排名
商丘	NA		NA		29.6	(51)	20.7	(64)	12.4	(89)	10.1	(83)	10.5	(58)	8.2	(81)
驻马店	NA		NA		44.9	(27)	25.0	(47)	15.4	(70)	13.0	(65)	7.3	(89)	8.1	(82)
镇江	25.6	(28)	25.8	(57)	26.2	(59)	22.8	(52)	15.1	(71)	9.8	(86)	9.9	(65)	8.0	(83)
南京	35.4	(22)	22.2	(62)	19.6	(83)	18.0	(78)	15.1	(72)	10.5	(80)	10.4	(61)	8.0	(84)
淮安	31.1	(23)	26.8	(55)	22.6	(70)	17.4	(82)	13.8	(80)	10.2	(82)	7.6	(87)	7.9	(85)
无锡	38.0	(20)	28.2	(52)	25.3	(63)	16.9	(86)	12.7	(88)	11.6	(71)	8.8	(76)	7.6	(86)
阜阳	NA		NA		25.8	(62)	18.0	(77)	11.8	(91)	8.0	(94)	6.8	(93)	7.4	(87)
泰州	NA		35.0		25.9	(61)	17.5	(81)	13.2	(85)	9.5	(87)	8.1	(85)	7.4	(88)
宿迁	NA		NA		21.1	(75)	17.7	(80)	16.1	(66)	10.6	(79)	8.8	(77)	7.3	(89)
信阳	NA		28.5	(48)	18.7	(87)	14.8	(91)	11.4	(94)	8.5	(90)	7.0	(92)	7.0	(90)
上海	23.2	(30)	17.2	(68)	16.5	(91)	13.8	(93)	11.1	(95)	9.2	(88)	7.2	(90)	6.9	(91)
苏州	29.7	(24)	23.7	(61)	19.7	(81)	16.5	(87)	13.1	(86)	7.8	(95)	6.2	(95)	6.8	(92)
六安	NA		NA		13.7	(96)	13.3	(96)	10.2	(97)	7.1	(97)	6.7	(94)	6.7	(93)
黄山	NA		NA		10.6	(98)	16.3	(88)	13.3	(84)	10.2	(81)	8.5	(80)	6.5	(94)
延安	NA		35.1	(37)	24.7	(65)	33.5	(31)	31.3	(15)	18.8	(30)	8.3	(83)	5.9	(95)
盐城	24.7	(29)	20.7	(64)	19.3	(84)	15.6	(90)	11.7	(92)	8.8	(89)	5.2	(97)	5.4	(96)
威海	NA		20.1	(65)	17.8	(90)	13.4	(95)	10.5	(96)	8.5	(91)	5.5	(96)	5.0	(97)
北京	25.8	(27)	18.5	(66)	11.5	(97)	10.7	(98)	7.0	(98)	6.2	(98)	4.7	(98)	4.4	(98)

表 6 “3+95”城市气象调整后 2013 年至 2020 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)

2015 年来，大同、汉中、蚌埠排名持续升高，泰安、衡水、聊城、渭南、张家口、漯河、芜湖、周口近四年排名持续升高，改善幅度滞后于其他城市。而 2015 年来三门峡、亳州排名持续降低，晋城、南通、洛阳、淮北、延安近四年排名持续降低，改善幅度领先其他城市。

相比其他省份，山西已成为二氧化硫浓度较高的区域，年平均值达到 20.2 微克/立方米，比第二高的省市（河北）高 5.9 微克/立方米，二氧化硫控制应成为山西大气污染治理的主要议题；沪苏皖地区虽浓度较低，各季度也出现不同程度的恶化，值得关注。

（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[19]，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，即由内燃机炉壁的冷却作用造成的。此外，森林砍伐、草原和废弃物的焚烧也是来源之一。一氧化碳对人体的危害主要是阻碍体内氧气输送，使人体缺氧窒息。作为大气污染物的一氧化碳，其主要危害在于能参与光化学烟雾的形成，造成全球性的环境问题。一氧化碳在大气中的“存活”时间为一到两个月，所以它可以在区域内长距离的传输。我国目前一氧化碳平均浓度标准如表 7。美国环境保护署的标准以 8 小时平均浓度为 9ppm(约 10 毫克/立方米)、1 小时平均浓度 35ppm(约 40 毫克/立方米) 为限值，并规定每年超过以上标准限值的次数不能多于一次。

表 7：我国目前一氧化碳平均浓度标准

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

图 14、图 15、图 16 和表 8 分别展示了“3+95”市一氧化碳经气象调整的季节平均浓度时间序列图，季节平均浓度地图，五年、三年和一年累计降幅，年度平均浓度及排名。根据上述三图一表，我们可以总结出一氧化碳浓度如下几个特征：

- **季度评估**

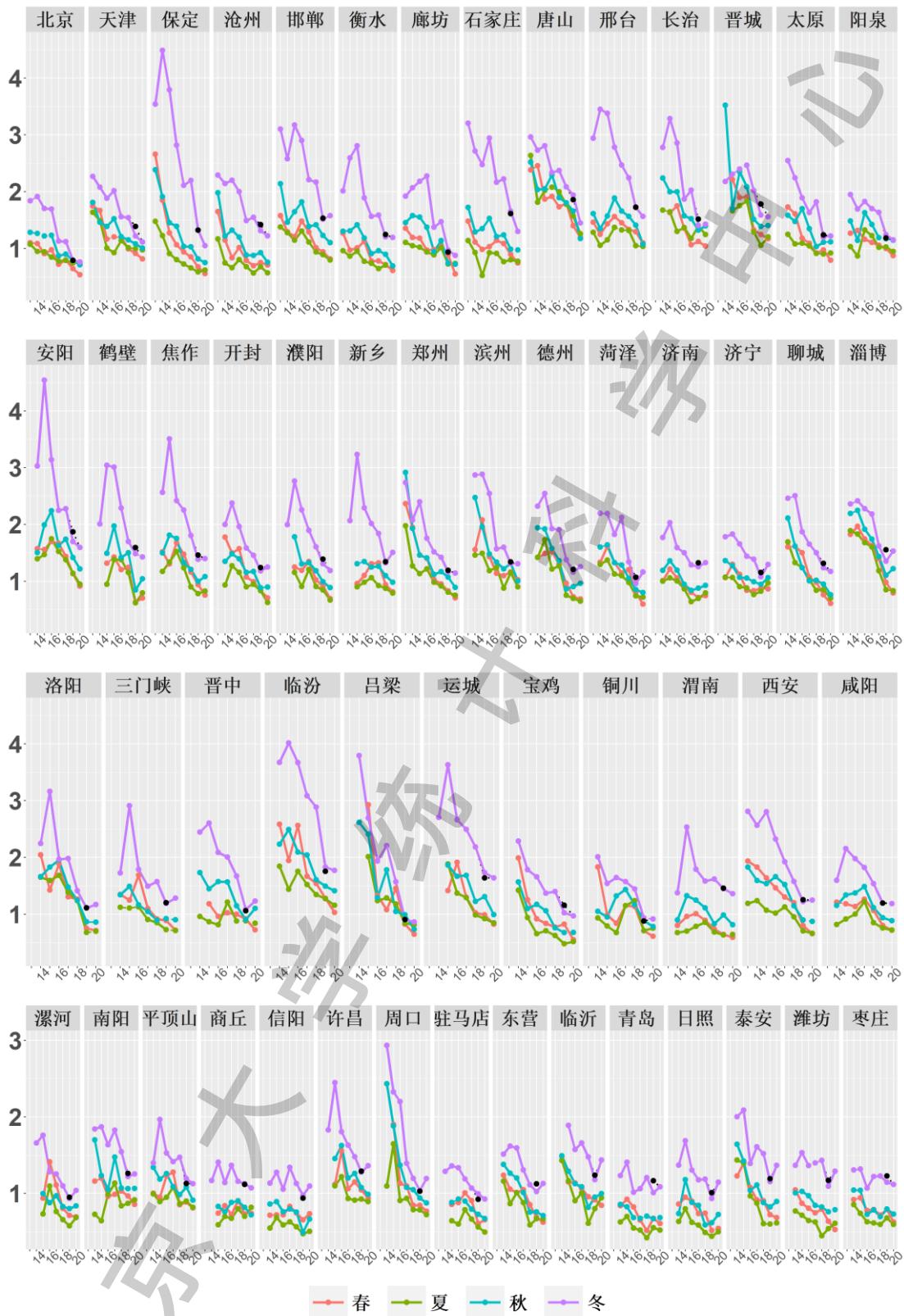
根据图 14，安徽江苏上海两省一市一氧化碳四季浓度较低，无显著季节差异。其他地区一般以冬季浓度最高，春秋季节次之，夏季浓度最低。

2015 年春季“3+95”城市一氧化碳浓度均值（标准误差）为 1.21（0.04）毫克/立方米，2019 年下降至 0.83（0.02）毫克/立方米，2020 年春季继续改善，为 0.73（0.01）毫克/立方米。2020 年春季唐山平均浓度最高，为 1.19 毫克/立方米；宿州最低，为 0.49 毫克/立方米。相比 2019 年 2020 年春季有 82 个城市改善，16 个城市恶化，后者主要包含江苏 5 市、河南和山东各 4 市以及安徽 3 市，“3+95”城市一年降幅的平均值为 10.6%。

2015 年夏季“3+95”城市一氧化碳浓度均值（标准误差）为 0.98（0.04）毫克/立方米，2019 年下降至 0.76（0.02）毫克/立方米，2020 年夏季几乎无改善，为 0.73（0.02）毫克/立方米。相比 2015 年，黄山、石家庄、南阳、商丘、滁州、池州、南京、阳泉和安庆恶化，其中黄山增幅达到了 173.1%。德州、吕梁、延安、周口、洛阳、泰安和运城降幅最大，均超过 55%。相比 2019 年，2020 年夏季 64 个城市改善，34 个城市恶化，包括河南和江苏各 7 市、山东 6 城市、安徽和河北各 4 市、陕西 3 市、山西 2 市及上海，“3+95”城市一年降幅的平均值仅 3.2%。

2015 年秋季“3+95”城市一氧化碳浓度均值（标准误差）为 1.29（0.04）毫克/立方米，2019 年下降至 0.91（0.02）毫克/立方米，2020 年秋季为 0.85（0.02）毫克/立方米。相比 2019 年 2020 年秋季 69 个城市改善，29 个城市恶化，主要包括山东 9 市，河南 6 市，江苏 5 市和山西 4 市，河北 2 市，安徽和陕西各 1 市和上海，“3+95”城市平均降幅为 5.5%。

2015 年冬季“3+95”城市一氧化碳浓度均值（标准误差）为 1.97（0.08）毫克/立方米，2019 年下降至 1.13（0.03）毫克/立方米，2020 年冬季无改善，保持在 1.13（0.02）毫克/立方米。相比 2015 年，黄山、宣城、安庆、承德、张家口和池州恶化，其中黄山增幅达到了 110.4%；保定、商洛、吕梁、安阳、洛阳、焦作降幅最大，均超过 60%。相比 2019 年，2020 年冬季“3+95”城市一年降幅的平均值仅 2%，共有 46 个城市改善，52 个城市恶化，主要包括安徽 14 市、山东 12 市、河南 10 市、江苏 9 市、山西 3 市以及河北和陕西各 2 市。



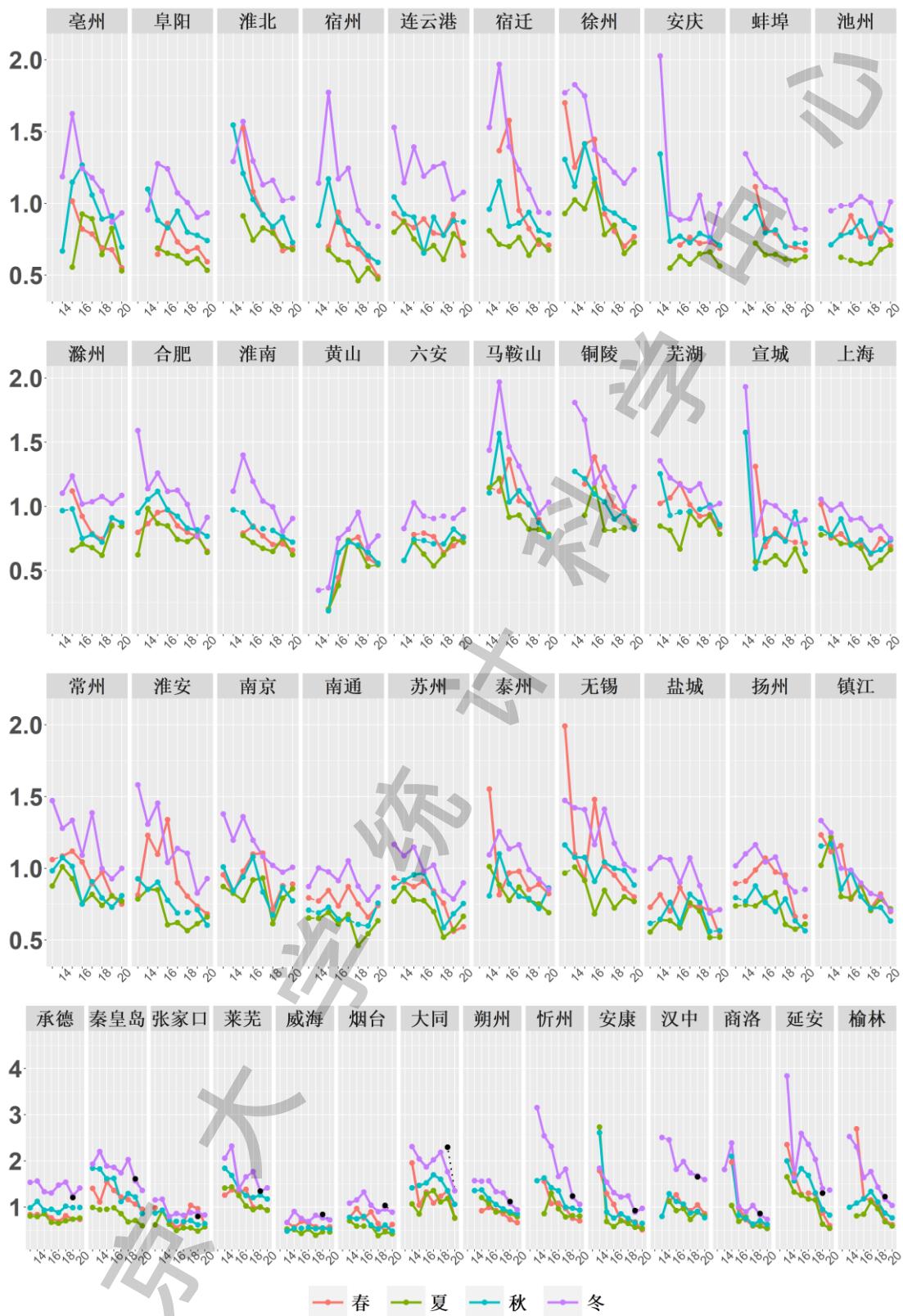


图 14 “3+95”城市气象调整后 2013 年至 2020 年一氧化碳季节平均浓度（毫克/立方米）变化序列图

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

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，城市排序依次为“2+26”

城市、汾渭平原 11 市、苏皖鲁豫交界地区城市、长三角地区城市、区域内其他城市

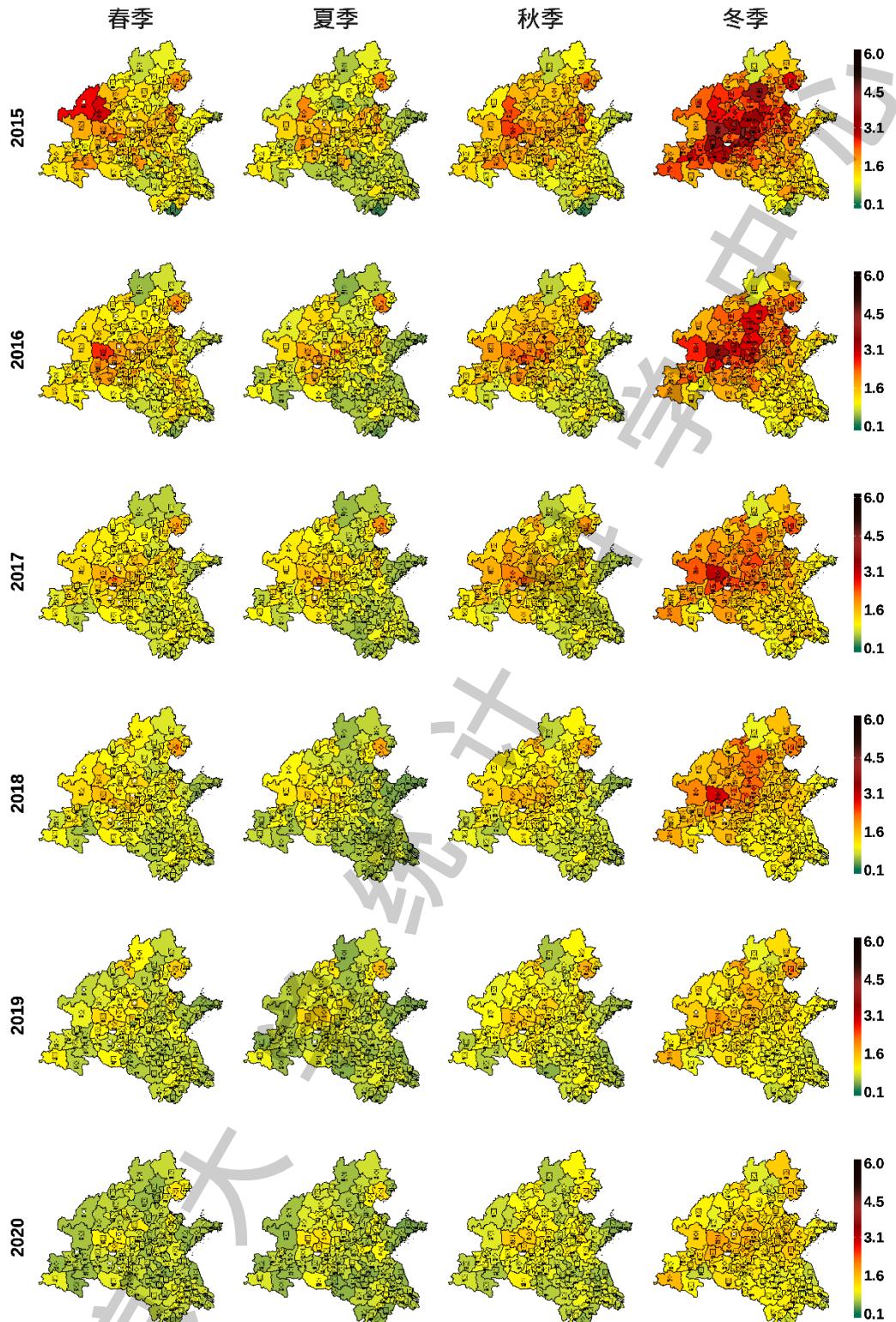


图 15 “3+95”城市气象调整后 2015 年至 2020 年一氧化碳季节平均浓度(毫克/立方米)地图
(清晰图及五个风向下的浓度参见电子版)

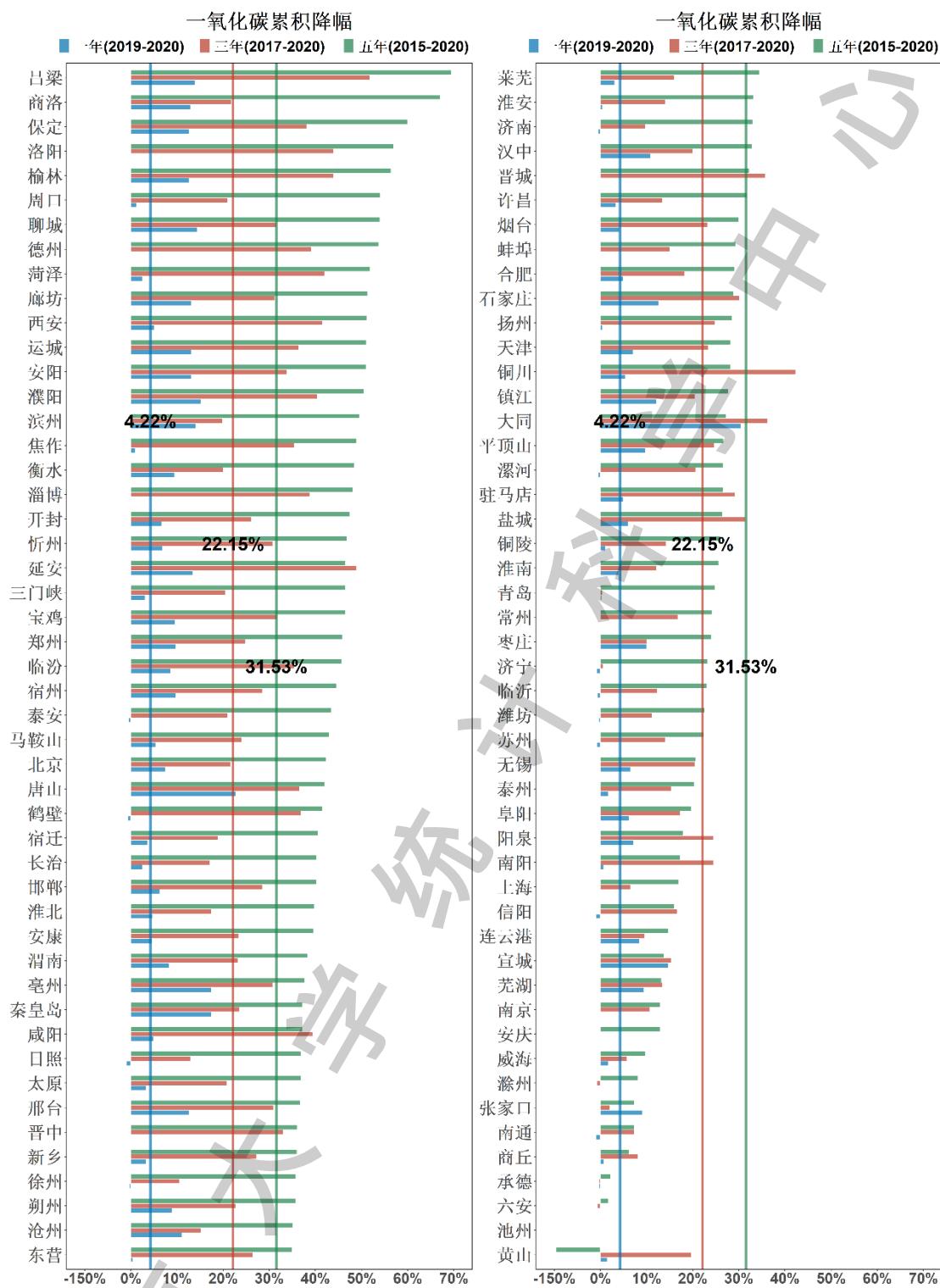


图 16 “3+95”城市气象调整后一氧化碳浓度过去一年（蓝色）、三年（红色）、五年（绿色）的累计降幅

蓝、红和绿色竖线分别代表“3+95”城市的一年、三年和五年平均降幅

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	2020年	排名
蚌埠	NA		NA		1.01	(75)	0.84	(85)	0.84	(84)	0.76	(85)	0.71	(85)	0.71	(81)
上海	0.92	(27)	0.82	(63)	0.85	(89)	0.75	(92)	0.76	(92)	0.65	(96)	0.71	(86)	0.71	(82)
阜阳	NA		NA		0.87	(87)	0.90	(77)	0.85	(79)	0.76	(84)	0.75	(78)	0.70	(83)
镇江	1.19	(18)	1.19	(43)	0.95	(81)	0.89	(79)	0.87	(76)	0.74	(88)	0.78	(72)	0.69	(84)
驻马店	NA		NA		0.94	(84)	0.94	(69)	0.97	(62)	0.86	(66)	0.72	(82)	0.69	(85)
北京	1.32	(17)	1.30	(39)	1.19	(59)	1.19	(52)	0.88	(74)	0.90	(59)	0.74	(79)	0.69	(86)
宣城	NA		NA		0.79	(93)	0.76	(91)	0.81	(89)	0.74	(89)	0.80	(67)	0.68	(87)
宝鸡	NA		1.82	(12)	1.27	(51)	1.10	(59)	1.00	(58)	0.89	(61)	0.75	(77)	0.68	(88)
亳州	NA		NA		1.09	(64)	1.06	(61)	0.98	(61)	0.83	(71)	0.82	(63)	0.68	(89)
扬州	0.86	(29)	0.88	(61)	0.94	(82)	0.92	(73)	0.90	(73)	0.81	(73)	0.68	(89)	0.67	(90)
张家口	0.91	(28)	1.01	(54)	0.72	(96)	0.65	(96)	0.68	(97)	0.80	(77)	0.73	(80)	0.67	(91)
安康	NA		2.24	(5)	1.10	(62)	0.93	(70)	0.87	(75)	0.84	(70)	0.70	(88)	0.67	(92)
商洛	NA		NA		1.87	(15)	0.88	(80)	0.79	(90)	0.72	(91)	0.71	(87)	0.62	(93)
黄山	NA		NA		0.24	(98)	0.55	(98)	0.75	(93)	0.77	(81)	0.61	(97)	0.60	(94)
烟台	NA		0.84	(62)	0.86	(88)	0.87	(81)	0.79	(91)	0.61	(97)	0.63	(94)	0.60	(95)
宿州	NA		NA		1.08	(65)	0.90	(77)	0.84	(81)	0.70	(93)	0.66	(90)	0.60	(96)
盐城	0.73	(31)	0.79	(65)	0.79	(94)	0.74	(94)	0.85	(78)	0.77	(82)	0.62	(96)	0.58	(97)
威海	NA		0.58	(67)	0.63	(97)	0.60	(97)	0.60	(98)	0.58	(98)	0.58	(98)	0.57	(98)

表 8 “3+95”城市气象调整后 2013 年至 2020 年一氧化碳季节年平均浓度(毫克/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)

• 年度变化趋势

从图 16 一氧化碳累计降幅来看, 相比 2015 年, “3+95”城市一氧化碳平均累计降幅(标准误差)达 31.5% (2.4%); 相比 2017 年, 2020 年平均累计降幅(标准误差)为 22.2% (1.3%); 相比 2019 年, 2020 年平均累计降幅(标准误差)为 4.2% (0.8%)。相比 2015 年, 除黄山和池州分别上升 150% 和 3.8% 外, “3+95”城市较其初始年份均有改善; 吕梁累计降幅最高, 达 69.5%; 吕梁、商洛、保定三市降幅超过 60%, 洛阳、榆林、聊城、周口、德州、菏泽、廊坊、西安、安阳、运城、濮阳十一市居于 50%-60%; 34 市累计降幅大于 40%。整体来看, 一氧化碳改善显著, 但低于二氧化硫的改善程度。

此外, 相比于 2015 年, 五年累计降幅最小的前二十个城市中无汾渭平原城市, 仅阳泉 1 个城市属于“2+26”城市, 即使开始污染治理较早, 其改善依旧滞后。而降幅最大的前二十个城市中包含 12 个“2+26”城市和 4 个汾渭平原城市, 另 4 个城市(忻州、周口、榆林、商洛)不属于“2+26”城市和汾渭平原。

• 年度污染状态与相对排名

如表 8 所示, 2015 年“3+95”城市一氧化碳浓度均值(标准误差)为 1.36 (0.05) 毫克/立方米, 2019 年下降至 0.91 (0.02) 毫克/立方米, 2020 年为 0.86 (0.02) 毫克/立方米。

在 2020 年各城市一氧化碳平均浓度排名中, 临汾、晋城、长治、唐山、邢台、安阳、莱芜位列前七, 除莱芜外其它 6 个城市去年也在前七位。从 2015-2020 年六年来看, 承德、池州排名持续升高, 长治、莱芜、邯郸、济宁、许昌、太原、滁州、三门峡、六安、青岛近四年排名持续升高, 改善速度滞后于其他城市; 吕梁、榆林、咸阳、西安、延安、驻马店、宝鸡、扬州近四年排名持续降低, 持续改善较为显著。2014-2020 年, 临汾的排名始终位于前两位, 一氧化碳治理需要更加努力。

2015-2020 年黄山和池州不降反增，增幅分别为 150% 和 3.8%，六安和承德降幅最小，低于 5%；吕梁、商洛、保定、洛阳、榆林降幅最大，均超过 55%。2015 至 2020 年，排名下降（相对改善）最多的前 20 个城市中保定、廊坊、聊城、菏泽、衡水、北京、濮阳、德州和开封 9 市属于“2+26”城市，吕梁、宝鸡、洛阳和西安 4 市属于汾渭平原，另 7 个城市（商洛、榆林、宿州、安康、亳州、周口、延安）不属于上述重点关注区域，但改善同样显著；排名升高（相对恶化）最多的前 20 个城市有承德、滁州、阳泉、池州、南阳、商丘、南京、芜湖、济宁、六安、临沂、平顶山、连云港、大同、铜陵、天津、石家庄、南通、许昌、无锡，其中阳泉、济宁、天津和石家庄 4 市属于“2+26”城市，上述城市虽较早开始治理，但一氧化碳改善速度不及其他城市而排名靠前。

（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 ，以及逆温气象条件下使上空已形成的 NO_2 下沉到地面等。二氧化氮是一种重要的空气污染物，主要来自于车辆尾气排放和工业生产过程，是硝酸盐的前体物。硝酸盐是 $\text{PM}_{2.5}$ 的重要组分之一。二氧化氮在光照下可与氧气发生化学反应生成臭氧，所以它也是臭氧污染的主要“帮凶”。二氧化氮还可伤害呼吸道，直接影响人的身体健康。

我国从“十二五”（2011-2015 年）开始对氮氧化物实施总量控制，这比对二氧化硫的总量控制晚了五年。二氧化氮在大气中的“存活”时间是本报告所考虑的四种气体 (SO_2 , NO_2 , CO 和 O_3) 中最短的，一般在几个小时到二天之间，所以它的空间传输距离很短，基本反映了本地排放。中国目前关于二氧化氮的浓度限值如表 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 53 ppb (约为 100 微克/立方米)。

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	

图 17、图 18、图 19 和表 10 分别展示了“3+95”市二氧化氮经气象调整的季节平均浓度时间序列图，季节平均浓度地图，五年、三年和一年累计降幅，年度平均浓度及排名。根据上述三图一表，我们可以总结出二氧化氮浓度如下几个特征：

• 季度评估

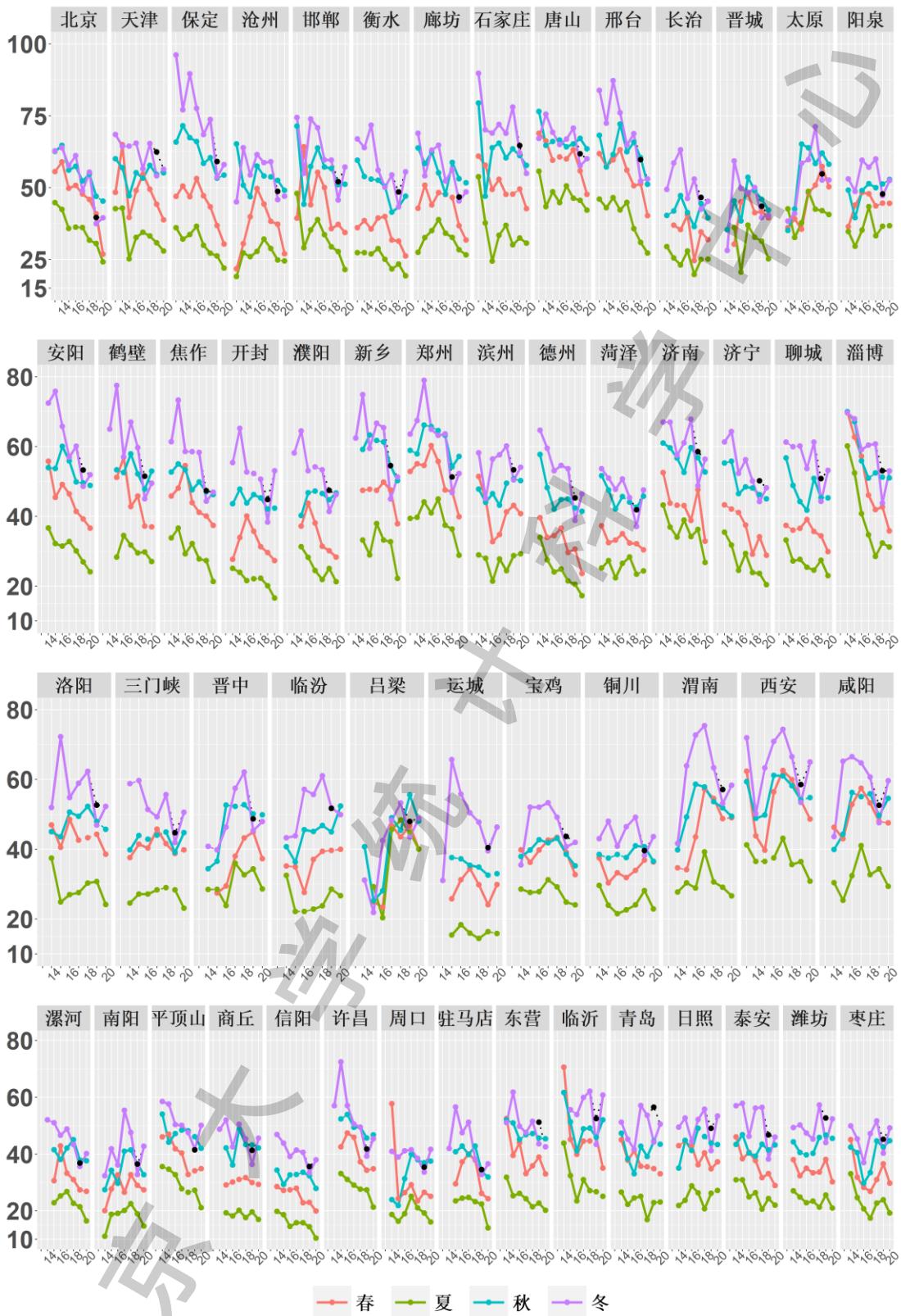
根据图 17 可见，研究区域城市的二氧化氮也具有明显的季节特征，主要以冬季最高，夏季最低。山西季节效应较其余区域不明显，主要体现在中部和北部城市全年差异较小。

2015 年春季“3+95”城市二氧化氮浓度均值（标准误差）为 36.2（1.0）微克/立方米，2019 年浓度增长达到 37.6（0.8）微克/立方米，2020 年春季改善至 33.3（0.7）微克/立方米，这一改善主要是新冠疫情所致。2020 年春季太原平均浓度最高，为 50.3 微克/立方米；张家口最低，为 16.4 微克/立方米。相比 2019 年，2020 年春季有 86 个城市改善，12 个城市（运城、宿州、汉中、日照、铜陵、烟台、三门峡、平顶山、安庆、许昌、临汾、渭南）恶化，“3+95”城市一年降幅平均值为 10.9%。

2015 年夏季“3+95”城市二氧化氮浓度均值（标准误差）为 27.7（0.8）微克/立方米，2019 年下降至 25.9（0.7）微克/立方米，2020 年夏季继续改善，仅 23.2（0.6）微克/立方米。2020 年夏季唐山平均浓度最高，为 42.1 微克/立方米；黄山最低，为 10.4 微克/立方米。相比 2015 年，22 个城市不降反增，其中大同、吕梁和石家庄增幅最大，均超过 25%。浓度下降的城市中，阜阳、信阳、焦作、邢台、宿迁、亳州、淄博和驻马店降幅最大，均超过 40%。相比 2019 年，2020 年夏季“3+95”城市一年降幅平均值为 9.8%，共有 76 个城市改善，22 个城市恶化，恶化的城市主要集中在安徽（6 个）、山东（6 个）和江苏（5 个），较为严重的城市包括安徽宣城（增加 3.8 微克/立方米）、江苏镇江（增加 3.2 微克/立方米）。

2015 年秋季 98 个城市二氧化氮浓度均值（标准误差）为 42.7（1.2）微克/立方米，2019 年升至 43.6（0.9）微克/立方米，2020 年秋季为 42.7（0.9）微克/立方米。2020 年秋季唐山平均浓度最高，为 63.5 微克/立方米；威海最低，为 17.9 微克/立方米。相比 2019 年，2020 年秋季“3+95”城市一年降幅平均值为 1.6%，63 个城市改善，35 个城市恶化，恶化的城市主要集中在安徽（7 个）、河南（7 个）、江苏（6 个），较为严重的城市包括安徽宿州（增加 15.2 微克/立方米）、山西临汾（增加 7.4 微克/立方米）。

2015 年冬季“3+95”城市二氧化氮浓度均值（标准误差）为 52.9（1.4）微克/立方米，2019 年下降至 40.9（0.8）微克/立方米，2020 年冬季反弹至 46.8（0.8）微克/立方米。2020 年冬季西安平均浓度最高，为 65 微克/立方米；黄山最低，为 21.9 微克/立方米。相比 2015 年，34 个城市不降反增，其中吕梁、扬州、蚌埠、马鞍山、池州和大同增幅最大，超过 30%。浓度下降的城市中，邢台、许昌、鹤壁、焦作、驻马店和保定降幅最大，均超过 30%。相比 2019 年，2020 年冬季仅 9 个城市（忻州、石家庄、朔州、榆林、临汾、南通、大同、东营、太原）改善，89 个城市恶化。“3+95”城市一年增幅平均值达到了 15.5%。



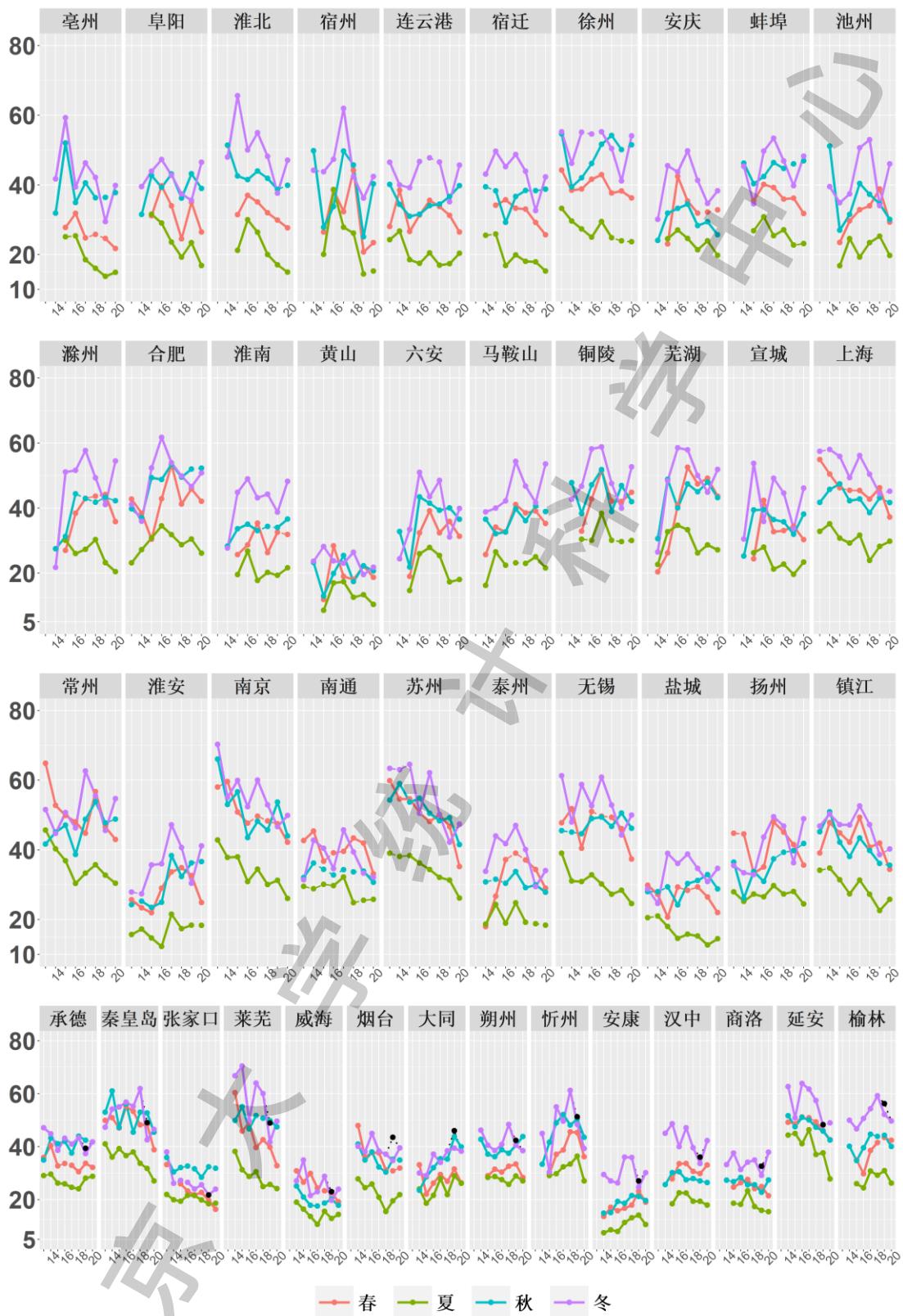


图 17 “3+95”城市气象调整后 2013 年至 2020 年二氧化氮季节平均浓度（微克/立方米）变化序列图

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，经过疫情调整的值由黑点表示，城市排序依次为“2+26”城市、汾渭平原 11 市、苏皖鲁豫交界地区城市、长三角地区城市、区域内其他城市

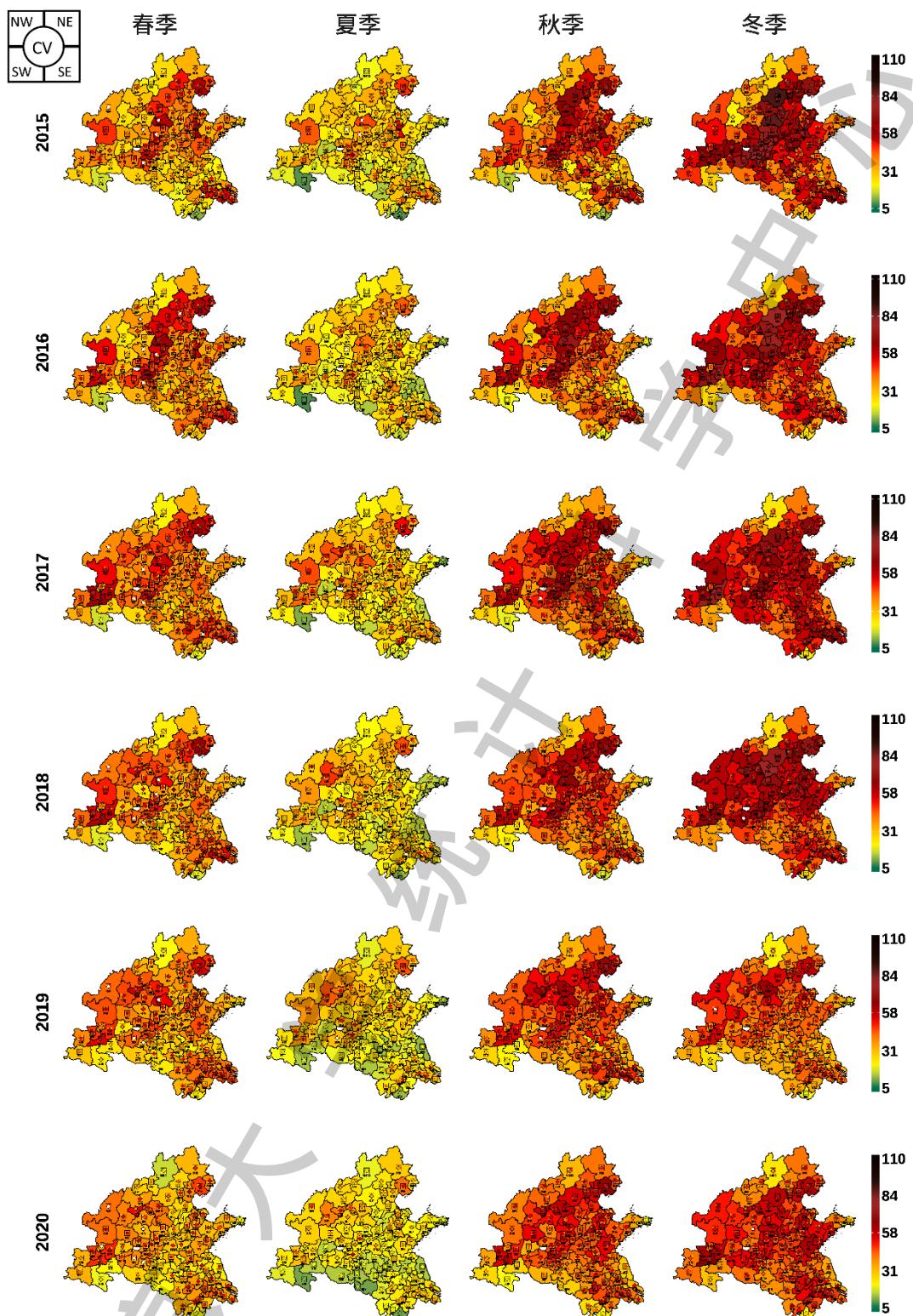


图 18 “3+95”城市气象调整后 2015 年至 2020 年二氧化氮季节平均浓度(微克/立方米)地图
(清晰图及五个风向下的浓度参见电子版)

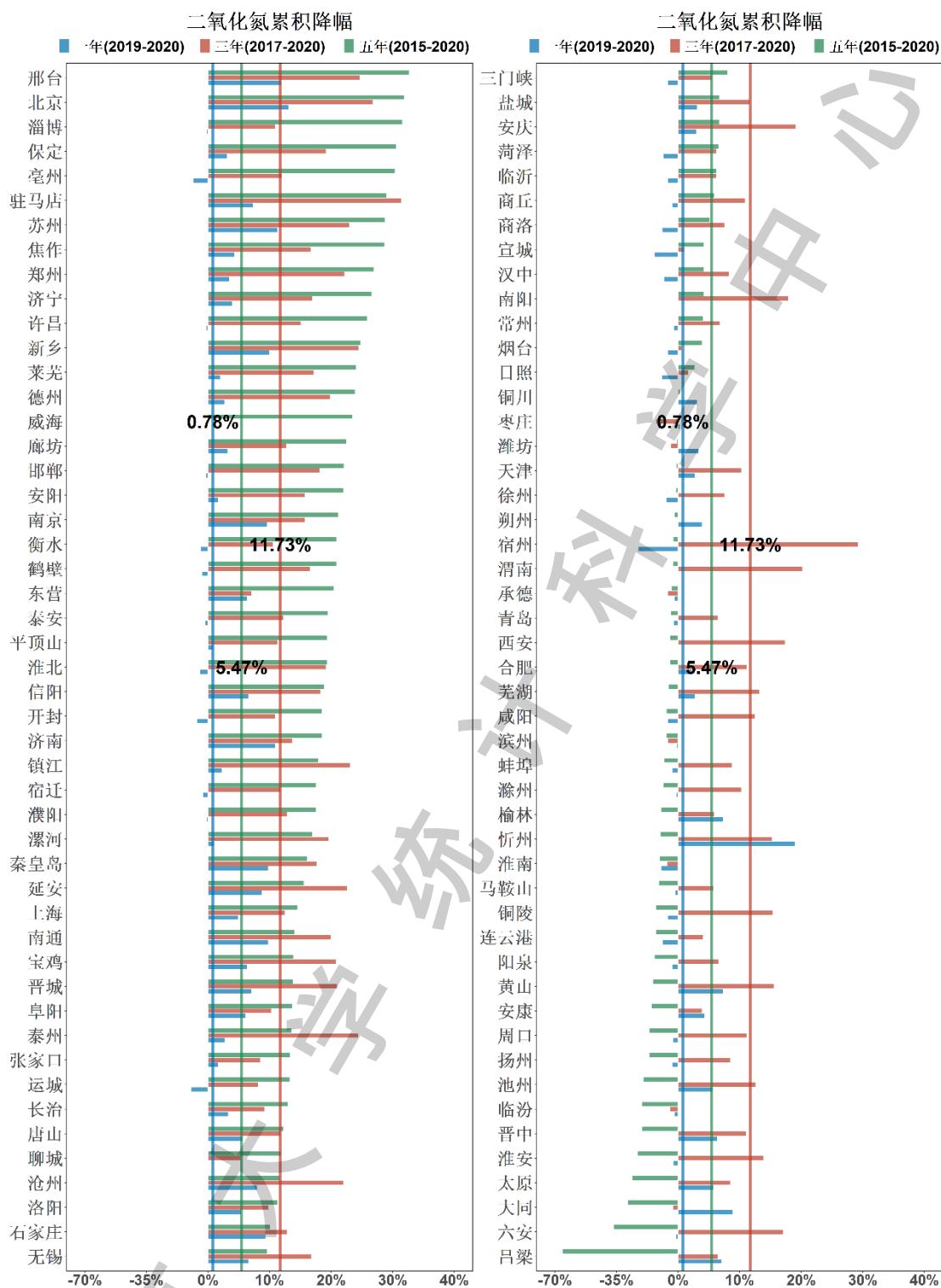


图 19 “3+95”城市气象调整后二氧化氮浓度过去一年（蓝色）、三年（红色）、五年（绿色）的累计降幅

蓝、红和绿色竖线分别代表“3+95”城市的一年、三年和五年平均降幅

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	2020年	排名
南通	33.9	(28)	38.3	(46)	35.4	(67)	34.1	(75)	38.0	(67)	35.3	(75)	33.7	(69)	30.4	(81)
宿州	NA		NA		29.5	(85)	39.6	(50)	43.0	(42)	39.6	(49)	24.1	(93)	30.4	(82)
漯河	NA		NA		36.5	(60)	38.2	(58)	37.7	(69)	35.5	(72)	30.6	(77)	30.3	(83)
淮安	23.4	(31)	23.3	(66)	24.0	(95)	25.6	(95)	35.2	(77)	31.3	(83)	29.4	(83)	30.3	(84)
周口	NA		35.3	(54)	25.4	(91)	29.5	(86)	33.9	(85)	30.3	(87)	29.1	(85)	30.1	(85)
汉中	NA		NA		31.3	(80)	31.7	(84)	32.7	(86)	29.4	(89)	27.5	(89)	30.0	(86)
南阳	NA		22.7	(67)	30.7	(83)	29.4	(87)	35.8	(75)	36.1	(69)	29.3	(84)	29.4	(87)
安庆	NA		NA		31.3	(81)	36.6	(65)	36.1	(72)	30.7	(85)	30.1	(80)	29.2	(88)
亳州	NA		NA		41.1	(44)	32.9	(78)	32.5	(87)	30.1	(88)	26.1	(90)	28.6	(89)
泰州	NA		25.3	(63)	31.6	(79)	32.1	(80)	36.1	(71)	31.4	(82)	28.2	(88)	27.3	(90)
驻马店	NA		NA		37.6	(55)	38.0	(62)	38.9	(65)	35.5	(71)	28.8	(86)	26.7	(91)
商洛	NA		NA		27.0	(87)	26.1	(92)	27.7	(94)	25.6	(94)	23.2	(94)	25.6	(92)
盐城	26.8	(30)	25.2	(64)	26.8	(88)	26.1	(93)	28.3	(93)	27.6	(93)	25.8	(92)	25.0	(93)
信阳	NA		32.4	(57)	29.7	(84)	28.4	(91)	29.5	(92)	28.2	(92)	25.8	(91)	24.1	(94)
张家口	32.3	(29)	26.9	(61)	26.2	(89)	26.1	(94)	24.8	(95)	24.2	(95)	23.1	(95)	22.7	(95)
安康	NA		16.4	(68)	17.0	(97)	17.4	(98)	20.7	(97)	22.2	(96)	20.8	(96)	19.9	(96)
威海	NA		25.6	(62)	24.7	(93)	20.7	(97)	18.9	(98)	21.6	(97)	18.9	(98)	18.9	(97)
黄山	NA		NA		15.4	(98)	22.3	(96)	21.2	(96)	18.6	(98)	19.3	(97)	17.9	(98)

表 10 “3+95”城市气象调整后 2013 年至 2020 年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)

• 年度变化趋势

从图 19 来看, 相比 2015 年, 2020 年“3+95”城市二氧化氮平均累计降幅(标准误差)为 5.5% (1.9%); 相比 2017 年, 2020 年平均累计降幅(标准误差)为 11.7% (0.8%); 相比 2019 年, 2020 年平均累计降幅(标准误差)为 0.8% (0.7%)。相比于 2015 年, 邢台累计降幅最高, 达 32.7%, 北京、淄博、保定、亳州 4 市均超过 30%, 降幅前四名中三个为京津冀城市。共有 22 个城市降幅超过 20%, 48 个超过 10%; 有超过半数城市(63 个)2020 年二氧化氮浓度低于 2015 年的二氧化氮浓度, 其中河南 16 个、山东 13 个、河北 10 个、江苏 9 个、安徽和陕西各 5 个、山西 3 个以及天津、上海; 不降反增最多的四位为山西吕梁、安徽六安、山西大同和太原, 其中吕梁 2020 年平均二氧化氮浓度较 2015 年上升 75%, 应予以充分关注。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, 尤其山西省应尽快采取有效措施。

相比于 2015 年, 降幅最小的前二十个城市中分别有 7、7、3、2 和 1 个城市位于山西、安徽、江苏、陕西和河南。其中山西和安徽二氧化氮年均浓度不降反增, 增幅分别为 13% 和 0.9%; 陕西 2020 年浓度与 2015 年基本持平。在这二十个城市中, 有 5 个城市属于“2+26”及汾渭平原城市, 它们虽然较早开始治理, 但是改善情况仍不乐观。降幅最大的前二十个城市中分别有 6、6、5、2、1 个城市位于河北(北京)、河南、山东、江苏、安徽。其中, 河北、河南和山东的五年累计降幅分别为 18.5%、18.2% 和 13.2%。在这二十个城市中, 有 6 个城市(亳州、驻马店、苏州、许昌、威海、南京)不属于“2+26”及汾渭平原城市, 虽然不是早期重点治理城市, 但改善效果显著。整体而言, 研究区域内“3+95”城市的二氧化氮浓度下降微弱, 多数城市未形成持续下降趋势。

- 年度污染状态与相对排名

2015 年 98 个城市二氧化氮年均浓度均值（标准误差）为 39.9（1.0）微克/立方米，2019 年仅下降至 37.0（0.8）微克/立方米，2020 年为 36.5（0.7）微克/立方米，下降甚微。

根据表 10，忻州和北京 2020 年平均二氧化氮浓度的排名相较上年下降最多，分别下降 43 和 27 名；日照、铜陵、徐州、临沂的排名上升最多，分别上升 24、21、21 和 20 名，表明它们相较其他城市相对恶化。从 2015-2020 年六年来看，临汾排名持续升高，滨州、承德、淮南近四年排名持续升高，说明持续相对恶化；六安、驻马店排名持续降低，延安、苏州、沧州、晋城、镇江、德州、淮安、泰州近四年排名持续降低。2015-2020 年，唐山的排名始终位于前四位，郑州排名尽管在持续降低但仍位于前十名，这两个城市值得关注。

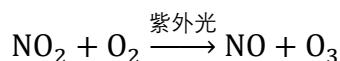
相比 2015 年，35 个城市不降反增，其中吕梁、六安和大同增幅最大，均超过 30%；邢台、北京、淄博、保定、亳州降幅最大，均超过 30%。2015-2020 年排名升高（相对恶化）最多的前 20 个城市是吕梁、临汾、太原、晋中、阳泉、铜陵、扬州、滨州、榆林、芜湖、合肥、滁州、马鞍山、蚌埠、咸阳、天津、忻州、徐州、渭南、大同，值得关注；这 20 个城市中，有 9 个城市属于“2+26”及汾渭平原城市。排名下降（相对改善）最多的前 20 个城市是北京、亳州、济宁、驻马店、苏州、德州、焦作、许昌、东营、衡水、泰安、开封、镇江、平顶山、淮北、漯河、新乡、濮阳、莱芜、宿迁，改善较大，其中有 11 个城市不属于“2+26”及汾渭平原城市。

值得注意的是，自 2016 年以来山西二氧化氮浓度呈上升态势，太原、阳泉、晋中等正在加入高浓度区域。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、天津、郑州均位列 2020 年全年平均二氧化氮浓度排名前十，合肥和济南位列排名前十九，这些城市 2020 年全年平均二氧化氮浓度均高于 42 微克/立方米。

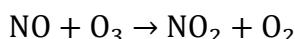
（六）臭氧

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保护人类与环境。但是，对流层大气中臭氧浓度增加则不利于人体健康。由于臭氧具有强氧化性，被吸入呼吸道时会与呼吸道中的细胞、流体和组织反应，导致肺功能减弱和组织损伤[19]。同时，臭氧可促使空气中的大量气体污染物转化为颗粒物，进而转化为 $PM_{2.5}$ 。因此，近地面臭氧浓度超标，其危害程度不亚于 $PM_{2.5}$ 。

中国这几年臭氧污染问题日益突出，臭氧和 PM_{2.5}已成为中国大气污染的两个首要污染物。低空臭氧的生成主要来自大气的光化学反应。现在已知的可以生成低空臭氧的一个重要途径是二氧化氮经过光照生成臭氧和一氧化氮的反应：



这一反应说明二氧化氮在白天光照下会促进臭氧生成，同时也意味着在光照强度最高的中午和下午时段臭氧的浓度会最高。在通常状态下，上述反应还伴有逆反应：



这个反应不需要光照作为条件，在白天和夜晚都会发生。机动车行驶，尤其是低速行驶时燃料的不完全燃烧，会产生氮氧化物。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），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。

一天中各个小时的臭氧浓度差异很大，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 6 时是最低的。由于人们的活动主要集中在光照较强的白天，分析包含夜间时段的臭氧浓度会低估其对人体健康的影响。考虑到国家标准是基于臭氧最高 8 小时的浓度，因此，我们这里分析中午 12 时到傍晚 20 时共 8 小时的臭氧浓度数据，并计算其气象调整后的平均浓度。

图 20、图 22、图 23 和表 11 分别展示了“3+95”市 8 小时臭氧经气象调整的季节平均浓度时间序列图，季节平均浓度地图，五年、三年和一年累计降幅，年度平均浓度及排名。图 21 还展示了 8 小时臭氧经气象调整的季节 90% 分位数浓度时间序列图。根据上述四图一表，我们可以总结出 8 小时臭氧浓度如下几个特征：

- **季度评估**

根据图 20，臭氧具有与前五种污染物不同的季节效应，在夏季浓度最高，冬季最低。这是由于夏天光照强，臭氧的产生与光照强度高度相关而造成的。其中江淮地区春夏两季浓度更接近，冬季浓度更高，这与其较高的平均气温有关。

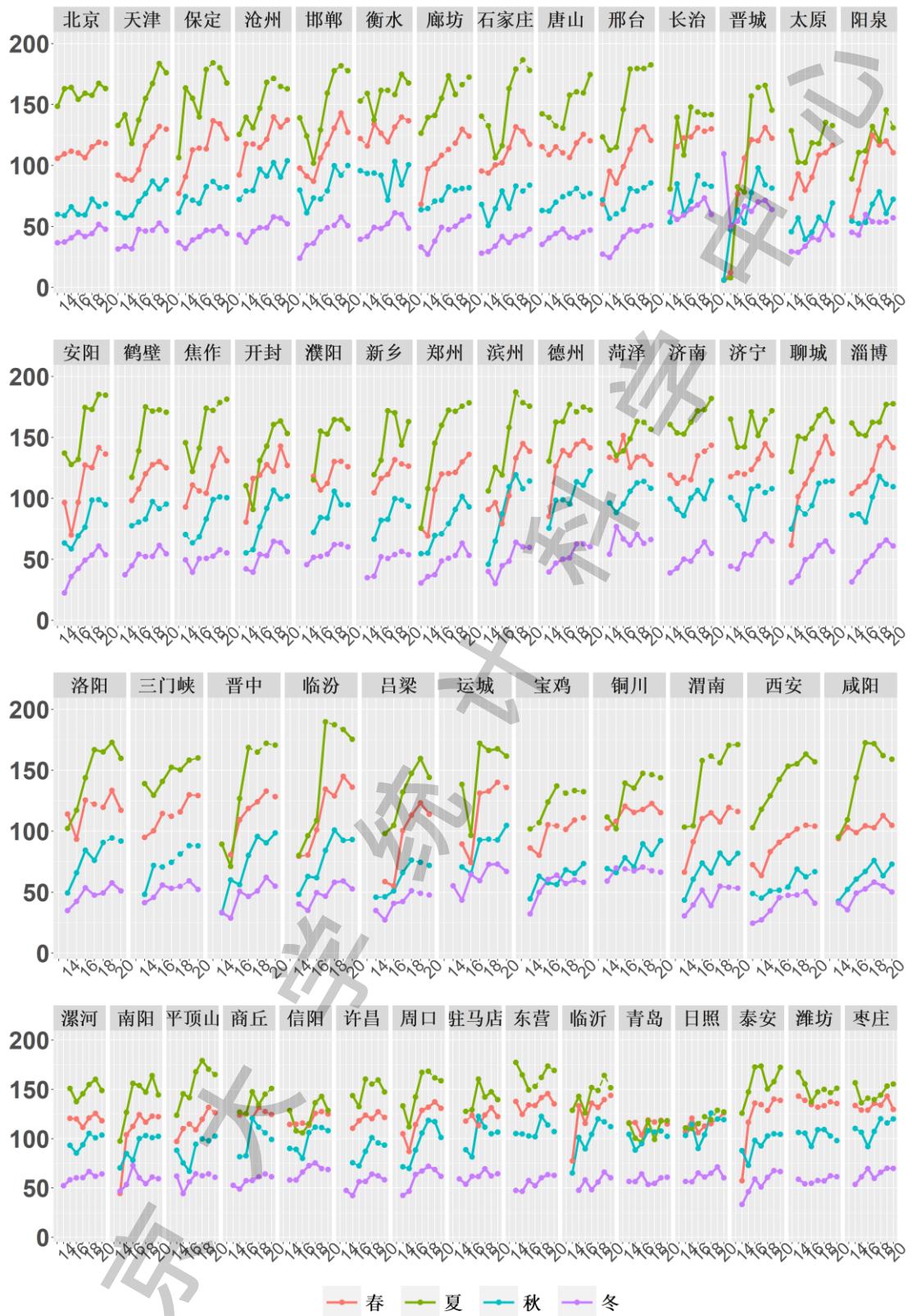
2015 年春季“3+95”城市 8 小时臭氧浓度均值（标准误差）为 100.1 (2.3) 微克/立方米，2019 年春季均值（标准误差）增长至 127.2 (1.3) 微克/立方米，2020 年春季均值（标准误差）为 124.0 (1.0) 微克/立方米。2020 年春季山东临沂、济南、淄博、德州四市浓度最高，

均超过 140 微克/立方米；安康、铜陵浓度最低，约为 94 微克/立方米。相比 2015 年，2020 年仅 8 个城市浓度降低（安康、菏泽、潍坊、朔州、漯河、青岛、盐城和汉中），其余 90 个城市均有浓度增加。相比 2019 年，2020 年共有 71 个城市改善，27 个城市恶化，包含安徽 7 市、陕西 6 市、山东和江苏各 4 市、河北和山西各 2 市、河南 1 市和上海。“3+95”城市一年降幅的平均值为 3.2%。

2015 年夏季“3+95”城市 8 小时臭氧浓度均值（标准误差）为 116.9（2.9）微克/立方米，2019 年夏季均值（标准误差）增长至 151.7（2.1）微克/立方米，2020 年夏季均值（标准误差）为 147.0（2.2）微克/立方米。2020 年夏季安阳、邢台、济南和焦作浓度最高，均超过 180 微克/立方米；共 31 个城市夏季浓度超过 160 微克/立方米；共 86 个城市夏季浓度超过 120 微克/立方米；铜陵、安康、黄山浓度最低，均不超过 100 微克/立方米。相比 2015 年，2020 年有 85 个城市浓度增加，宿州、滁州、安庆、芜湖、晋中、黄山和六安增幅最大超过 100%，仅 13 个城市浓度下降，分别是镇江、朔州、盐城、上海、安康、南通、淮安、泰州、承德、潍坊、漯河、北京和汉中，但降幅均低于 15%。相比 2019 年夏季，“3+95”城市一年降幅的平均值为 4.8%。2020 年夏季有 69 个城市改善，29 个城市恶化，包括山东 7 个城市、河北和河南 5 个城市、江苏 4 个城市、安徽 3 个城市、山西和陕西 2 个城市和上海。2020 年夏季，研究区域各城市夏季臭氧平均浓度基本都超过了中国和世卫组织 100 微克/立方米的标准，98 个城市中有 45 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。

2015 年秋季“3+95”城市 8 小时臭氧浓度均值（标准误差）为 77.8（1.9）微克/立方米，2019 年秋季均值（标准误差）增长至 95.7（1.6）微克/立方米，2020 年秋季均值（标准误差）为 97.2（1.4）微克/立方米。2020 年秋季德州和枣庄浓度最高，均超过 120 微克/立方米；共 52 个城市浓度超过 100 微克/立方米。相比 2015 年，2020 年有 87 个城市恶化，11 个城市改善。相比 2019 年，2020 年秋季有 45 个城市改善，53 个城市恶化，“3+95”城市一年降幅的平均值为 4.5%。

2015 年冬季“3+95”城市 8 小时臭氧浓度均值（标准误差）为 48.3（1.2）微克/立方米，2019 年冬季均值（标准误差）为 63.6（0.8）微克/立方米，2020 年冬季均值（标准误差）为 58.5（0.8）微克/立方米。2020 年冬季盐城和宣城浓度最高，约为 75 微克/立方米。相比 2015 年，85 个城市浓度增加，仅 13 个城市浓度下降。相比 2019 年，2020 年冬季有 86 个城市改善，12 个城市恶化。“3+95”城市一年降幅的平均值为 9.3%。



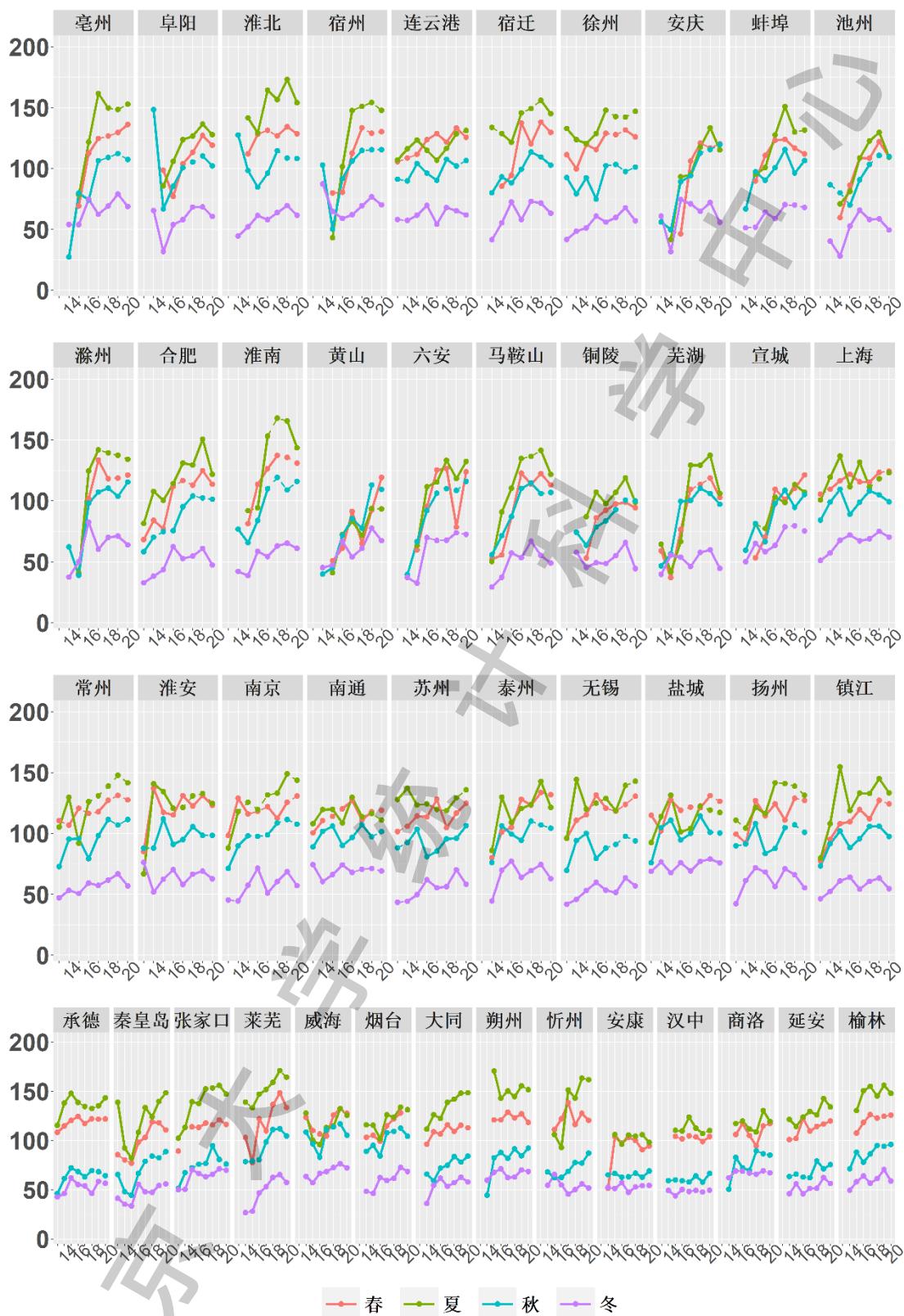
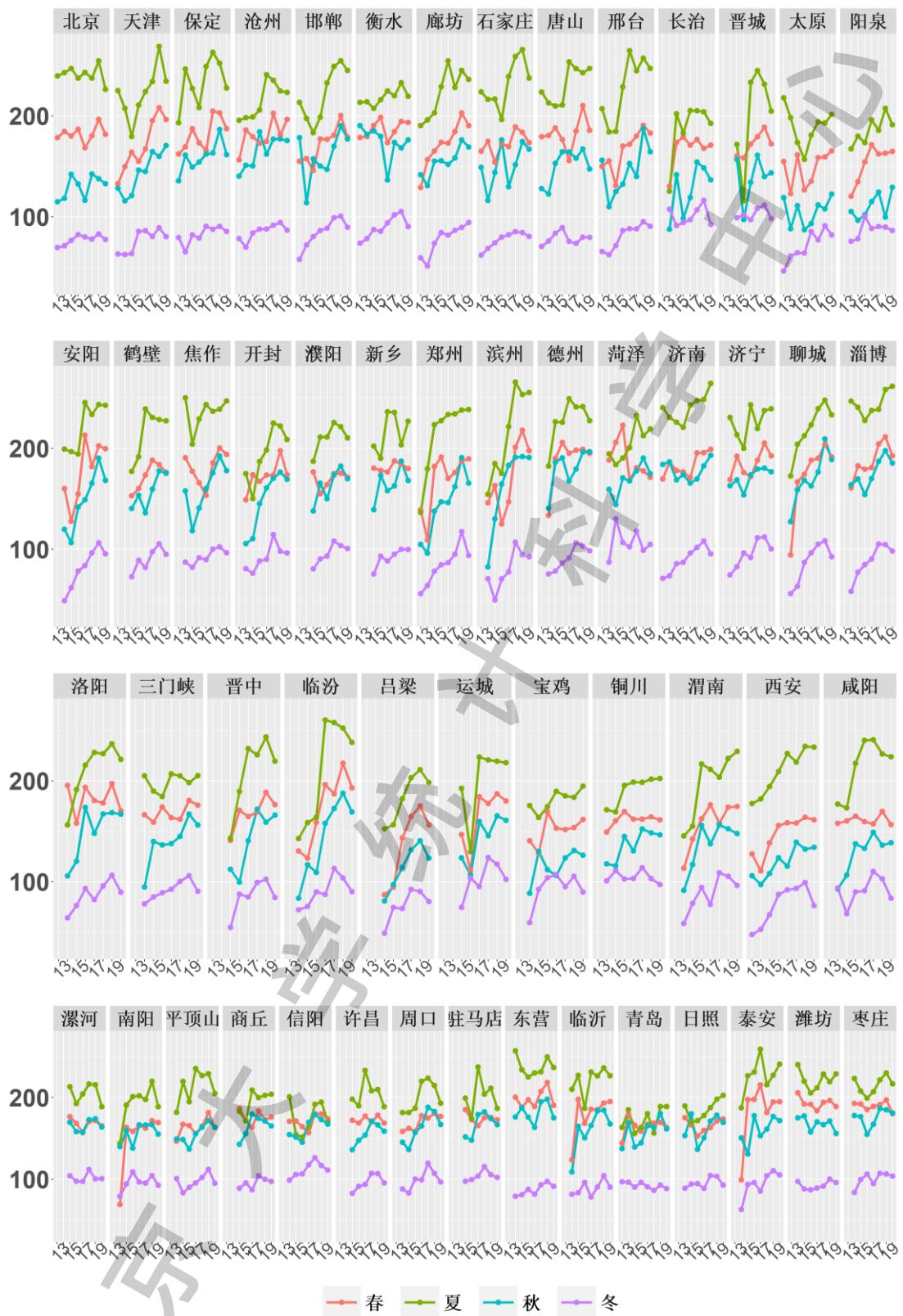


图 20 “3+95”城市气象调整后 2013 年至 2020 年臭氧季节平均浓度（微克/立方米）变化序列图
 图中实线（虚线）代表在 5% 统计学显著水平比上年有（无）显著增加或减少，城市排序依次为“2+26”城市、汾渭平原 11 市、苏皖鲁豫交界地区城市、长三角地区城市、区域内其他城市



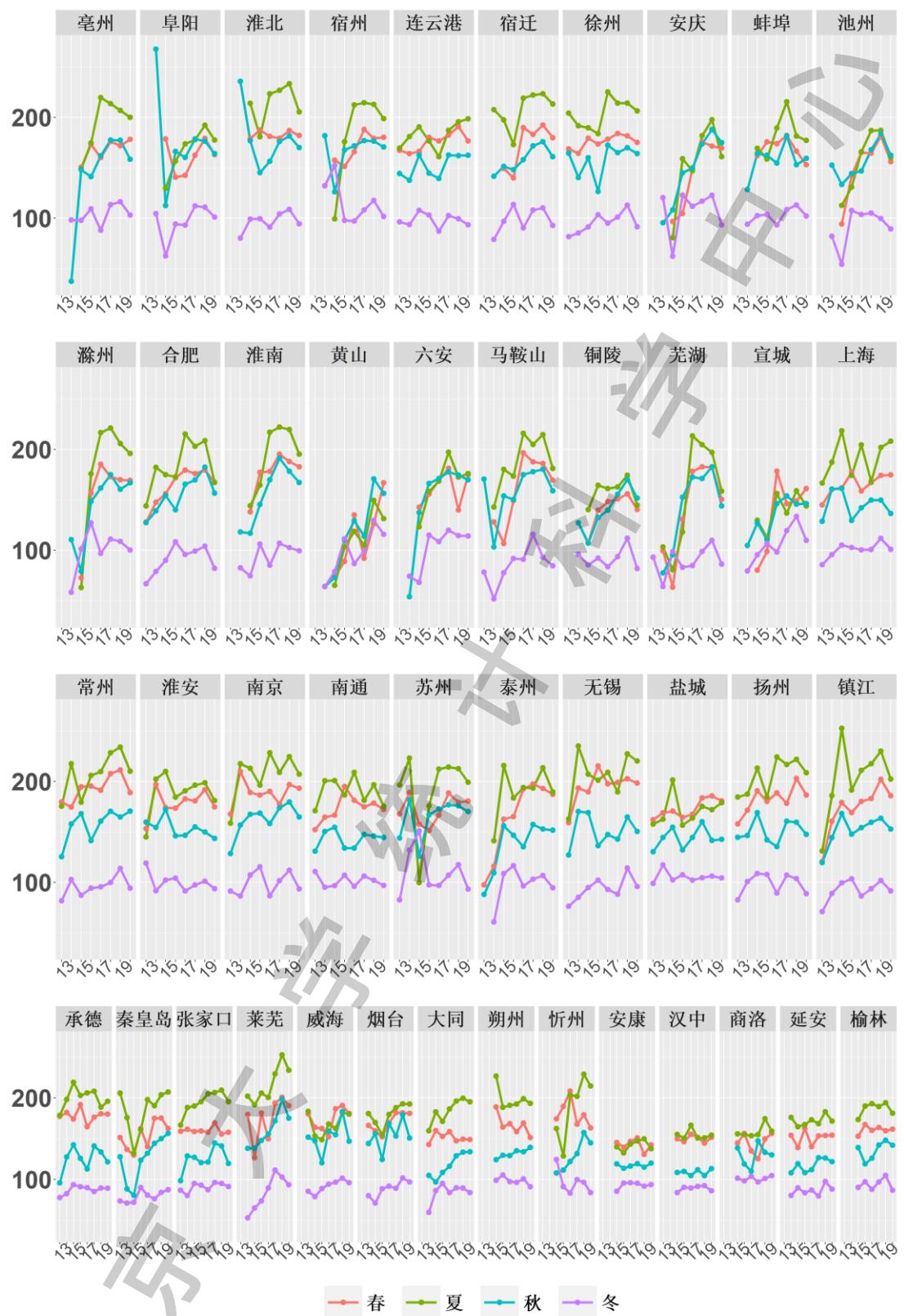


图 21 “3+95”城市气象调整后 2013 年至 2020 年臭氧季节 90% 分位数浓度（微克/立方米）变化序列图
城市排序同图 20

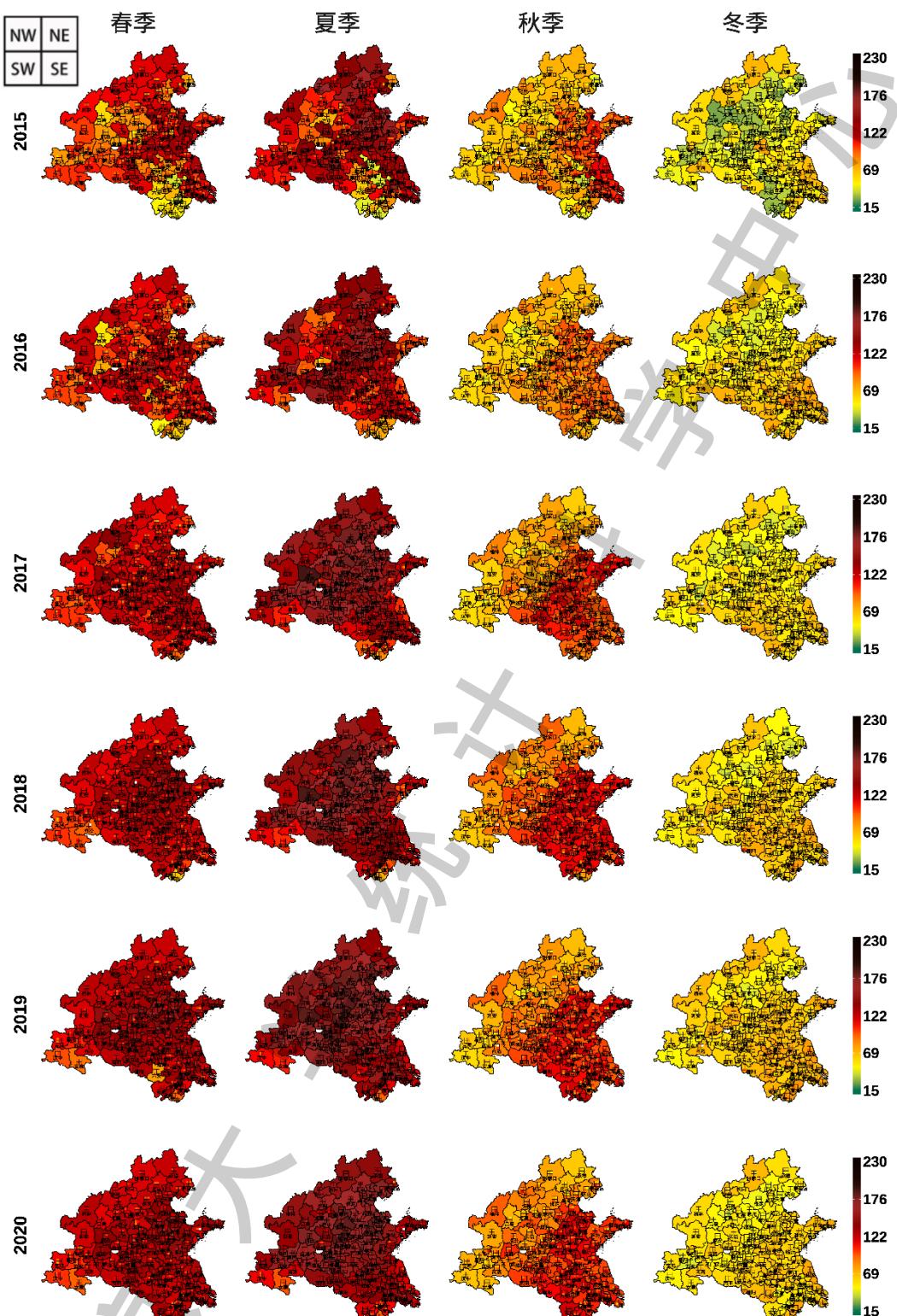


图 22 “3+95”城市气象调整后 2015 年至 2020 年臭氧季节平均浓度(微克/立方米)地图
(清晰图及五个风向下的浓度参见电子版)

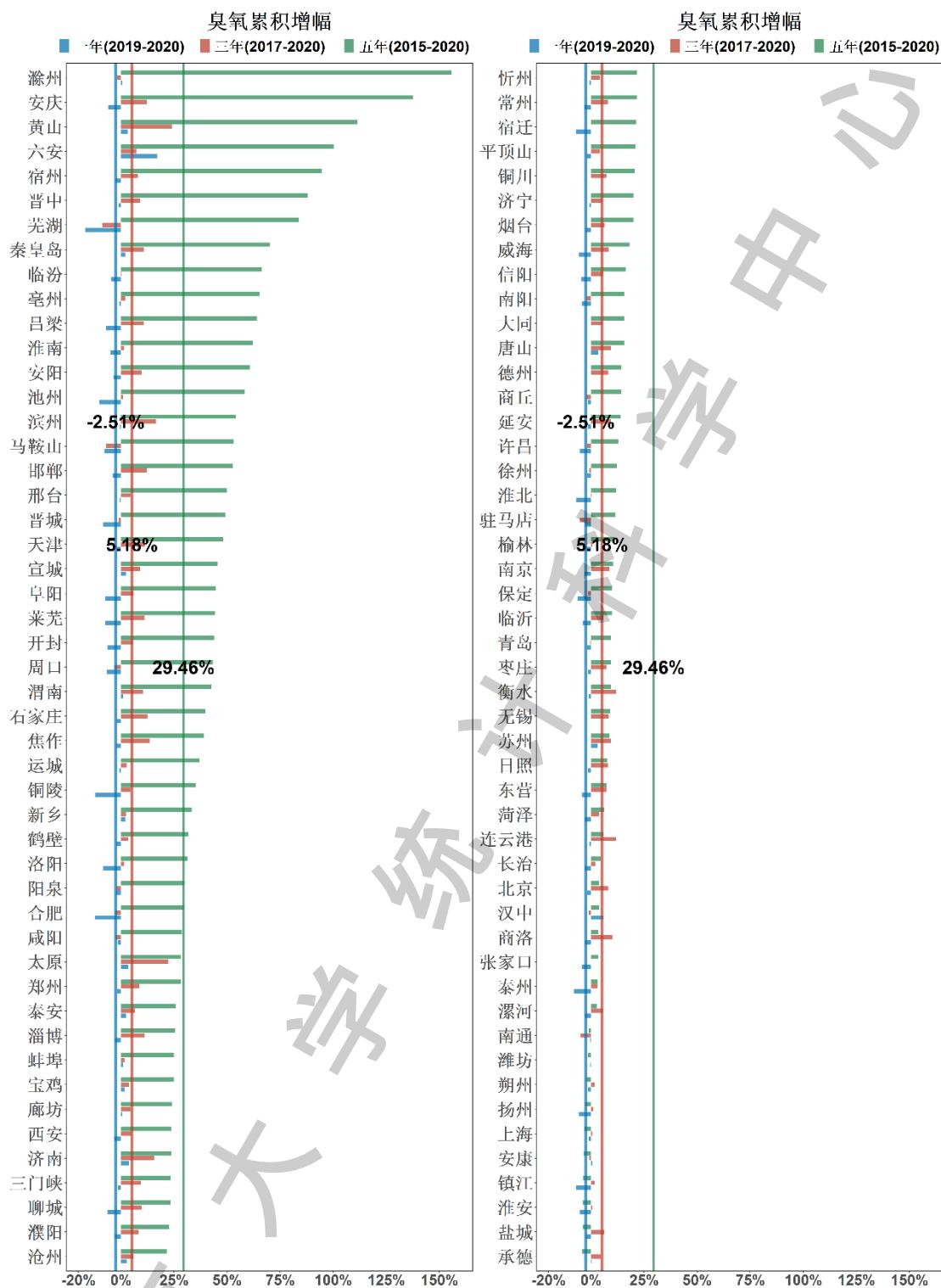


图 23 “3+95”城市气象调整后臭氧浓度过去一年（蓝色）、三年（红色）、五年（绿色）的累计降幅
蓝、红和绿色竖线分别代表“3+95”城市的一年、三年和五年平均降幅

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	2020年	排名
德州	NA		82.7	(37)	108.5	(5)	112.8	(3)	114.7	(2)	122.8	(2)	123.8	(5)	124.2	(1)
济南	100.9	(2)	104.5	(7)	99.9	(21)	101.5	(17)	106.6	(29)	117.5	(11)	118.8	(17)	123.7	(2)
淄博	NA		95.9	(17)	97.3	(27)	98.3	(32)	109.9	(19)	121.2	(6)	126.1	(1)	122.4	(3)
滨州	NA		70.6	(54)	79.2	(66)	82.6	(82)	104.6	(38)	125.9	(1)	122.9	(6)	122.1	(4)
泰安	NA		76.0	(47)	95.8	(32)	116.5	(1)	112.9	(8)	110.6	(37)	117.6	(23)	120.6	(5)
济宁	NA		107.0	(5)	99.8	(22)	99.7	(22)	113.9	(4)	114.7	(21)	121.1	(11)	120.0	(6)
枣庄	NA		113.5	(3)	108.3	(6)	107.9	(5)	110.6	(14)	116.1	(15)	120.6	(12)	118.7	(7)
东营	NA		116.9	(2)	110.2	(3)	110.9	(4)	110.2	(16)	121.7	(5)	124.2	(3)	118.6	(8)
聊城	NA		72.3	(50)	95.2	(35)	99.4	(24)	106.9	(27)	119.7	(8)	125.6	(2)	117.6	(9)
安阳	NA		79.8	(42)	73.0	(78)	85.1	(77)	106.8	(28)	112.6	(30)	121.6	(8)	117.4	(10)
运城	NA		NA		85.5	(56)	75.1	(92)	113.9	(5)	116.4	(14)	118.4	(21)	117.3	(11)
临沂	NA		78.1	(43)	106.3	(12)	97.4	(37)	110.2	(17)	114.2	(22)	121.7	(7)	117.0	(12)
焦作	NA		89.5	(27)	84.0	(59)	91.6	(58)	103.0	(47)	112.5	(31)	119.6	(14)	117.0	(13)
亳州	NA		NA		70.3	(82)	95.8	(40)	113.7	(7)	113.7	(25)	117.3	(25)	116.3	(14)
宿州	NA		NA		59.5	(91)	83.2	(79)	107.1	(25)	117.2	(13)	118.9	(16)	115.9	(15)
郑州	59.0	(31)	67.0	(58)	89.8	(48)	99.9	(21)	105.7	(33)	109.2	(43)	117.6	(22)	115.2	(16)
莱芜	NA		86.9	(33)	79.5	(65)	99.1	(27)	103.3	(45)	117.3	(12)	124.2	(4)	114.9	(17)
菏泽	NA		107.3	(4)	107.9	(7)	113.1	(2)	110.4	(15)	120.0	(7)	118.4	(20)	114.7	(18)
临汾	NA		62.0	(64)	68.7	(86)	80.3	(86)	113.8	(6)	118.9	(9)	120.1	(13)	114.4	(19)
沧州	83.2	(14)	93.3	(21)	93.5	(39)	101.8	(13)	107.5	(24)	117.8	(10)	110.9	(47)	114.0	(20)
邯郸	85.1	(12)	77.8	(44)	74.5	(72)	88.3	(66)	101.2	(57)	114.8	(20)	118.6	(19)	113.8	(21)
平顶山	NA		92.7	(23)	93.9	(37)	94.9	(50)	108.9	(21)	115.2	(18)	116.1	(26)	113.7	(22)
衡水	102.5	(1)	102.6	(9)	103.5	(14)	107.1	(6)	101.2	(58)	113.5	(28)	114.6	(28)	113.3	(23)
周口	NA		88.0	(29)	78.9	(67)	102.2	(11)	117.2	(1)	122.7	(3)	121.3	(10)	113.2	(24)
晋中	NA		NA		60.1	(89)	85.8	(75)	103.6	(43)	108.9	(45)	114.4	(31)	113.1	(25)
淮北	NA		NA		101.0	(17)	100.9	(19)	112.4	(9)	115.5	(17)	121.5	(9)	113.0	(26)
淮南	NA		NA		69.5	(84)	87.7	(71)	111.0	(12)	122.0	(4)	119.0	(15)	112.9	(27)
潍坊	NA		118.9	(1)	113.5	(1)	104.7	(9)	111.5	(11)	112.4	(32)	112.2	(38)	111.6	(28)
鹤壁	NA		NA		84.4	(58)	95.3	(44)	107.6	(23)	112.2	(33)	113.9	(32)	111.4	(29)
六安	NA		NA		55.5	(94)	92.3	(55)	103.7	(42)	109.5	(42)	94.9	(93)	111.3	(30)
宿迁	NA		NA		90.7	(44)	94.2	(53)	110.1	(18)	114.0	(23)	118.8	(18)	110.2	(31)
邢台	72.7	(26)	72.3	(51)	73.3	(77)	87.6	(72)	105.1	(37)	108.4	(48)	110.7	(48)	109.9	(32)
天津	79.3	(18)	80.3	(41)	74.0	(74)	87.9	(69)	98.5	(70)	106.1	(59)	112.1	(40)	109.8	(33)
南京	75.7	(23)	95.3	(18)	99.3	(23)	101.7	(16)	109.9	(61)	103.7	(65)	113.7	(33)	109.8	(34)
开封	NA		72.0	(52)	76.1	(69)	95.2	(48)	103.8	(41)	113.5	(26)	117.4	(24)	109.6	(35)
濮阳	NA		NA		89.2	(50)	99.7	(23)	100.8	(62)	115.6	(16)	113.0	(36)	109.5	(36)
常州	83.9	(13)	96.3	(16)	89.8	(49)	95.3	(44)	101.1	(59)	109.8	(40)	113.2	(34)	109.4	(37)
廊坊	72.8	(25)	82.1	(38)	87.8	(51)	96.0	(39)	104.1	(40)	101.6	(71)	108.1	(60)	109.1	(38)
新乡	NA		NA		81.7	(62)	95.4	(43)	106.2	(30)	113.9	(24)	106.7	(67)	109.1	(39)
商丘	NA		NA		95.3	(34)	97.5	(36)	111.7	(10)	109.9	(39)	110.7	(49)	109.0	(40)
烟台	NA		89.1	(28)	90.6	(45)	86.9	(73)	102.2	(52)	104.2	(63)	111.8	(42)	108.9	(41)
滁州	NA		NA		42.5	(68)	101.9	(12)	110.8	(13)	109.6	(41)	107.9	(62)	108.8	(42)
漯河	NA		NA		105.7	(13)	100.9	(20)	102.8	(48)	111.9	(35)	112.1	(41)	108.7	(43)
驻马店	NA		NA		97.0	(29)	99.1	(26)	114.5	(3)	111.8	(36)	111.5	(43)	108.3	(44)
日照	NA		94.4	(20)	100.4	(19)	94.1	(54)	100.0	(64)	106.3	(57)	109.9	(53)	108.2	(45)
徐州	94.6	(3)	87.8	(31)	96.0	(31)	95.0	(49)	108.9	(22)	108.4	(49)	109.8	(54)	107.8	(46)
朔州	NA		NA		110.4	(2)	105.7	(7)	105.8	(32)	105.5	(61)	109.3	(57)	107.7	(47)
威海	NA		105.8	(6)	91.0	(43)	88.1	(68)	99.3	(66)	106.7	(54)	114.5	(29)	107.7	(48)
信阳	NA		97.8	(14)	92.4	(41)	92.0	(57)	101.8	(53)	112.2	(34)	112.8	(37)	107.6	(49)
三门峡	NA		81.2	(39)	86.9	(53)	95.5	(42)	98.1	(71)	100.6	(74)	108.9	(59)	107.4	(50)
榆林	NA		NA		96.1	(30)	102.7	(10)	106.1	(31)	106.1	(60)	111.4	(45)	107.1	(51)
南阳	NA		NA		64.8	(60)	92.3	(42)	104.9	(8)	109.6	(20)	105.3	(62)	112.2	(39)
石家庄	83.0	(15)	77.5	(45)	76.3	(68)	84.7	(78)	94.8	(81)	109.0	(44)	109.0	(58)	106.7	(53)
苏州	90.3	(6)	94.9	(19)	97.8	(26)	95.2	(47)	97.2	(74)	93.8	(86)	103.0	(77)	106.4	(54)
连云港	90.4	(5)	93.0	(22)	100.2	(20)	101.1	(18)	95.0	(80)	103.4	(67)	107.3	(64)	106.3	(55)
无锡	76.0	(22)	98.8	(11)	97.2	(28)	99.0	(28)	97.7	(72)	94.9	(84)	106.1	(69)	106.1	(56)
渭南	NA		60.9	(65)	73.9	(76)	98.5	(30)	95.4	(79)	100.2	(77)	104.4	(74)	105.6	(57)
忻州	NA		NA		86.3	(55)	83.1	(80)	101.0	(60)	96.7	(83)	106.0	(70)	105.2	(58)
泰州	NA		71.6	(53)	101.8	(15)	97.7	(35)	101.7	(54)	106.7	(53)	114.5	(30)	105.2	(59)
许昌	NA		NA		93.0	(40)	94.9	(51)	107.0	(26)	110.2	(38)	111.2	(46)	105.1	(60)
洛阳	NA		75.1	(48)	79.7	(63)	101.8	(15)	103.2	(46)	106.2	(58)	114.7	(27)	105.0	(61)
盐城	88.1	(8)	99.4	(10)	109.4	(4)	97.8	(34)	98.7	(69)	108.7	(46)	107.6	(63)	104.9	(62)
唐山	89.0	(7)	87.8	(30)	90.5	(46)	90.8	(62)	95.5	(78)	100.2	(76)	101.2	(79)	104.7	(63)
蚌埠	NA		NA		83.5	(60)	91.5	(59)	102.7	(49)	115.2	(19)	103.3	(76)	104.5	(64)
铜川	NA		85.6	(35)	86.5	(54)	101.8	(14)	97.2	(73)	106.4	(55)	104.4	(75)	104.4	(65)
上海	85.5	(11)	96.5	(15)	107.7	(8)	98.7	(29)	103.5	(44)	101.1	(72)	105.5	(72)	104.3	(66)
保定	70.3	(27)	90.2	(25)	94.5	(36)	91.1	(61)	105.5	(34)	113.5	(27)	111.4	(44)	104.0	(67)
扬州	85.6	(10)	87.3	(32)	107.1	(9)	95.7	(41)	102.5	(50)	107.0	(52)	110.3	(52)	103.8	(68)
长治	NA		70.4	(55)	98.9	(25)	87.8	(70)	101.5	(55)	108.6	(47)	106.9	(66)	103.6	(69)
晋城	31.8	(32)	29.2	(68)	69.2	(85)	75.8	(90)	104.5	(39)	113.1	(29)	113.0	(35)	103.3	(70)
安庆	NA		NA		43.2	(97)	75.8	(91)	91.5	(87)	104.1	(64)	109.5	(56)	102.7	(71)
镇江	69.2	(28)	86.8	(34)	106.5	(11)	95.2	(46)	100.7	(63)	102.9	(68)	110.4	(51)	102.5	(72)
阜阳	NA		NA		70.7	(80)	80.6	(85)	96.5	(75)	103.4	(66)	110.6	(50)	102.4	(73)
张家口	73.3	(24)	80.9	(40)	98.9	(24)	98.3	(32)	102.5	(51)	107.4	(51)	107.2	(65)	102.4	(74)
宣城	NA		NA		70.2	(83)	68.1	(95)	93.6	(83)	96.8	(82)	99.6	(85)	102.3	(75)
淮安	79.0	(19)	104.5	(8)	106.5	(10)	99.3	(25)	101.4	(56)	106.4	(56)	107.9	(61)	102.2	(76)
秦皇岛	82.9	(16)	63.9	(61)	59.3	(92)	82.2	(83)	90.8	(88)	93.6	(87)	98.6	(86)	100.9	(77)
大同	NA		77.5	(46)	87.2	(52)	90.7	(63)	95.7	(77)	98.1	(79)	101.1	(81)	100.9	(78)
南通	92.9	(4)	98.1	(13)	101.5	(16)	98.3	(31)	105.							

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	2020年	排名
青岛	80.1	(17)	98.2	(12)	90.4	(47)	89.8	(64)	99.7	(65)	94.3	(85)	101.1	(80)	99.1	(81)
马鞍山	NA		46.8	(67)	63.9	(87)	85.5	(76)	105.4	(36)	108.1	(50)	106.3	(68)	97.8	(82)
黄山	NA		NA		46.1	(96)	68.1	(96)	78.5	(97)	68.9	(98)	94.3	(94)	97.5	(83)
商洛	NA		NA		93.8	(38)	94.6	(52)	88.3	(90)	89.7	(92)	100.2	(84)	97.3	(84)
咸阳	NA		68.2	(57)	75.0	(70)	88.1	(67)	99.2	(67)	102.3	(70)	98.4	(87)	96.7	(85)
承德	78.1	(20)	90.1	(26)	100.7	(18)	96.7	(38)	92.2	(85)	92.6	(90)	95.9	(90)	96.5	(86)
延安	NA		83.0	(36)	84.6	(57)	88.8	(65)	88.1	(91)	92.8	(89)	98.2	(88)	96.5	(87)
合肥	60.2	(30)	75.1	(49)	74.0	(75)	91.1	(60)	99.0	(68)	100.4	(75)	109.8	(55)	96.1	(88)
池州	NA		NA		59.6	(90)	72.5	(94)	93.4	(84)	98.2	(78)	105.3	(73)	94.5	(89)
吕梁	NA		NA		57.5	(93)	62.9	(98)	85.2	(93)	97.0	(81)	101.6	(78)	94.4	(90)
宝鸡	NA		66.2	(59)	75.0	(71)	86.9	(74)	90.4	(89)	89.5	(93)	92.0	(95)	93.8	(91)
阳泉	NA		62.2	(63)	71.3	(79)	81.9	(84)	94.8	(82)	92.2	(91)	95.0	(92)	92.7	(92)
西安	62.2	(29)	63.5	(62)	74.5	(73)	82.6	(81)	87.8	(92)	93.5	(88)	95.3	(91)	92.2	(93)
太原	77.1	(21)	69.1	(56)	70.3	(81)	63.7	(97)	73.7	(98)	80.8	(97)	87.1	(96)	90.3	(94)
芜湖	NA		52.4	(66)	47.7	(95)	74.2	(93)	96.5	(76)	102.8	(69)	105.6	(71)	87.8	(95)
铜陵	NA		NA		62.3	(88)	80.3	(87)	80.6	(95)	88.2	(94)	96.1	(89)	84.4	(96)
汉中	NA		NA		79.6	(64)	80.2	(88)	83.6	(94)	82.4	(95)	77.9	(98)	82.6	(97)
安康	NA		NA		81.9	(61)	78.4	(89)	79.8	(96)	81.0	(96)	78.3	(97)	79.0	(98)

表 11 “3+95”城市气象调整后 2013 年至 2020 年臭氧季节年平均浓度(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)

• 年度变化趋势

根据图 23，不同于其他污染物，8 小时臭氧今年变化趋势以增长为主。相比 2015 年，2020 年“3+95”城市平均累计增幅（标准误差）为 29.5% (3%)；相比 2017 年，2020 年平均累计增幅（标准误差）为 5.2% (0.6%)；相比 2019 年，2020 年累计均值下降 2.5% (0.4%)，这是自 2015 年以来臭氧年均浓度的首次下降。

从五年累计增幅来看，“3+95”城市中 88 市的臭氧浓度上升，增幅最大前五个城市（滁州、安庆、黄山、六安和宿州）均位于安徽，分别增加 155.9%、138.0%、111.5%、100.5% 和 95.0%。共有 13 个城市累计增幅超过 60%，除前五个城市外分别是山西晋中、临汾、吕梁，安徽芜湖、亳州、淮南，河北秦皇岛和河南安阳；共 18 个城市累计增幅超过 50%；超半数（56 个）城市累计增幅超过 20%；仅 10 个城市浓度较 2015 年有下降且降幅均未超过 5%，包括江苏 5 市（南通、扬州、镇江、淮安、盐城）、山东潍坊、山西朔州、河北承德、陕西安康和上海。

相较于 2015 年，2020 年增幅最高的前 20 个城市中包含“2+26”城市中的安阳、滨州、邯郸、邢台、晋城、天津和汾渭平原的晋中、临汾和吕梁，增幅最低的 20 个城市仅有“2+26”城市中的菏泽、长治、北京，无汾渭平原城市。

• 年度污染状态与相对排名

根据表 11，2015 年“3+95”城市 8 小时臭氧浓度均值（标准误差）为 85.8 (1.7) 微克/立方米，2019 年上升至 109.6 (1.0) 微克/立方米，2020 年年均浓度略下降到 106.7 (0.9) 微克/立方米。2015-2020 年排名升高（相对恶化）最多的前 20 个城市是宿州、亳州、安阳、临汾、六安、晋中、滨州、淮南、滁州、邯郸、莱芜、焦作、邢台、运城、周口、天津、开

封、郑州、鹤壁、泰安，其中有 10 个“2+26”城市和 3 个汾渭平原城市，这些城市属于重点治理区域，需要加快 $PM_{2.5}$ 与臭氧协同治理的进程；排名下降（相对改善）最多的前 20 个城市是承德、淮安、南通、镇江、扬州、盐城、上海、张家口、北京、商洛、朔州、泰州、长治、安康、连云港、青岛、汉中、保定、漯河、延安，改善较大，其中有 3 个属于“2+26”城市，3 个属于苏皖鲁豫交界地区，无汾渭平原城市。

自 2015 年以来，焦作排名持续升高，衡水、天津、日照、连云港、渭南近四年排名持续升高，臭氧污染恶化速度超过其他城市；张家口、淮安排名持续降低，临汾、周口、驻马店、许昌、马鞍山近四年排名持续降低，臭氧污染情况趋于平稳。德州在 2015 至 2020 年排名始终位于前五位，臭氧污染恶化趋势需要进一步控制。

2020 年臭氧浓度前 9 名为德州、济南、淄博、滨州、泰安、济宁、枣庄、东营、聊城，均为山东城市；前 20 名还包含另 3 个山东城市（临沂、莱芜、菏泽），共占 12 名，这说明臭氧污染应成为山东省大气治理的重要命题。

• 极端污染

图 21 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，这从另一个侧面又刻画了臭氧污染的严峻形势。**2015 年“3+95”城市 90% 分位数浓度均值（标准误差）为 141.4（2.2）微克/立方米，2019 年上升至 166.8（1.5）微克/立方米，2020 年略有下降，为 157.9（1.3）微克/立方米。**除秦岭以南的安康、汉中及山东沿海青岛、日照、威海、烟台外，其他城市 8 小时极端污染同样呈现增长态势。北京近七年夏天 90% 分位数始终保持在 250 微克/立方米左右。河北、河南沿太行山城市，山东西部城市，山西中部城市以及天津恶化趋势明显，尤其体现在夏季臭氧浓度上。

2020 年“3+95”城市中夏季 90% 分位数超过 250 微克/立方米的有 3 个（济南、淄博和滨州）；超过 230 微克/立方米的有 19 个；超过 200 微克/立方米的有 31 个。浓度最高的 20 个城市中有 15 个属于“2+26”城市，区域内 $PM_{2.5}$ 与臭氧协同治理已迫在眉睫，尤其体现在降低极端污染发生的频次上。

五、“3+95”城市污染物综合累计降幅与监视坐标

本节将给出 $PM_{2.5}$ 和臭氧的整体情况，并汇总 6 个污染物 2015-2020 年及 2018-2020 年的总体变化及 2020 年总体情况。

图 24 给出“3+95”城市 2020 年 $PM_{2.5}$ 秋冬和 8 小时臭氧春夏平均浓度的联合分布，这个图反映了目前七省三市大气污染的状况和挑战。这一联合分布呈现出两个峰值，他们将“3+95”城市明显的分成两个群体。一个是主要由“2+26”城市、苏皖鲁豫城市，和近一半（5 个）汾渭平原城市组成的高 $PM_{2.5}$ 和高臭氧群（双高群），另一个是主要由长三角和北方五省边缘地区城市构成的相对低 $PM_{2.5}$ 和低臭氧群（双低群）。北京虽然属于“2+26”城市但却游离到双低群，格外亮显。

图 25 给出“3+95”城市 2020 年 $PM_{2.5}$ 秋冬和 8 小时臭氧春夏年平均 90% 分位数浓度的联合分布。这一 $PM_{2.5}$ 和臭氧的极端污染的联合分布也呈现出相同于图 24 的两个峰值及围绕它们的两个群体。但两个群体的界限不如图 24 所展示的平均值分布分明，双高群主要由“2+26”城市，和部分苏皖鲁豫城市和汾渭平原城市组成，有一半的苏皖鲁豫城市向双低群靠拢。极端污染的双低群仍主要由长三角和北方五省边缘地区城市构成。

图 24 和图 25 说明我国面临着 $PM_{2.5}$ 和臭氧的复合型污染问题。“3+95”城市 $PM_{2.5}$ 浓度高的城市臭氧浓度也高，如“2+26”城市、汾渭平原 11 市和苏皖鲁豫交界地区；而 $PM_{2.5}$ 浓度低的城市臭氧浓度往往也低，如长三角和冀晋鲁豫陕的边缘城市。这说明有必要通过协同控制措施，加强对 $PM_{2.5}$ 与臭氧两种污染物的管控。

表 12 给出每个城市过去六年或三年气象调整后的综合改善情况。由于 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 有重合部分，尽管我们使用六种污染物等权重平均， $PM_{2.5}$ 所占比例仍高于其他污染物。由于我们的方法去除了气象因素干扰，故表 12 给出的是各城市污染物受人为影响的下降比例。根据表 12，98 个城市的六年平均改善率是 20.8%，而三年平均改善率是 13.5%。部分城市的六年累积平均降幅低于三年累积平均降幅，这说明这些城市 2018 年的空气质量有所降低。改善排名前三分之一的 33 个城市中包含 14 个非“2+26”城市和汾渭平原 11 市（东营、驻马店、平顶山、苏州、盐城、泰州、漯河、镇江、日照、许昌、延安、上海、无锡、商洛），同时改善排名后三分之一的城市中包含 9 个“2+26”城市和汾渭平原 11 市（天津、铜川、咸阳、阳泉、渭南、太原、临汾、晋中、吕梁）。前三分之一的（33 个）城市中有 14 个城市不在重点治理区域，但空气质量改善显著，说明污染治理颇有成效；而后三分之一的（32）个城市包含 9 个重点治理区域的城市，表明这些城市应当加强治理。

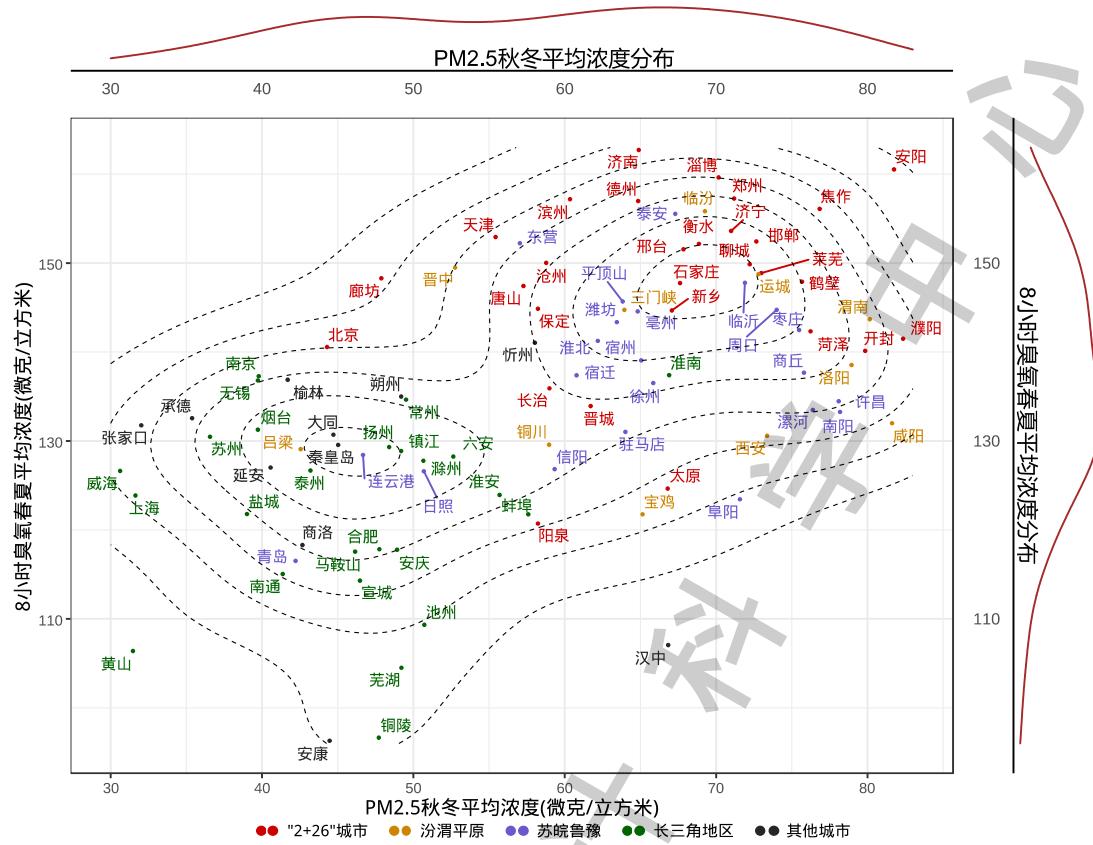


图 24 “3+95”城市 2020 年 PM_{2.5} 秋冬和 8 小时臭氧春夏平均浓度（微克/立方米）散点分布图

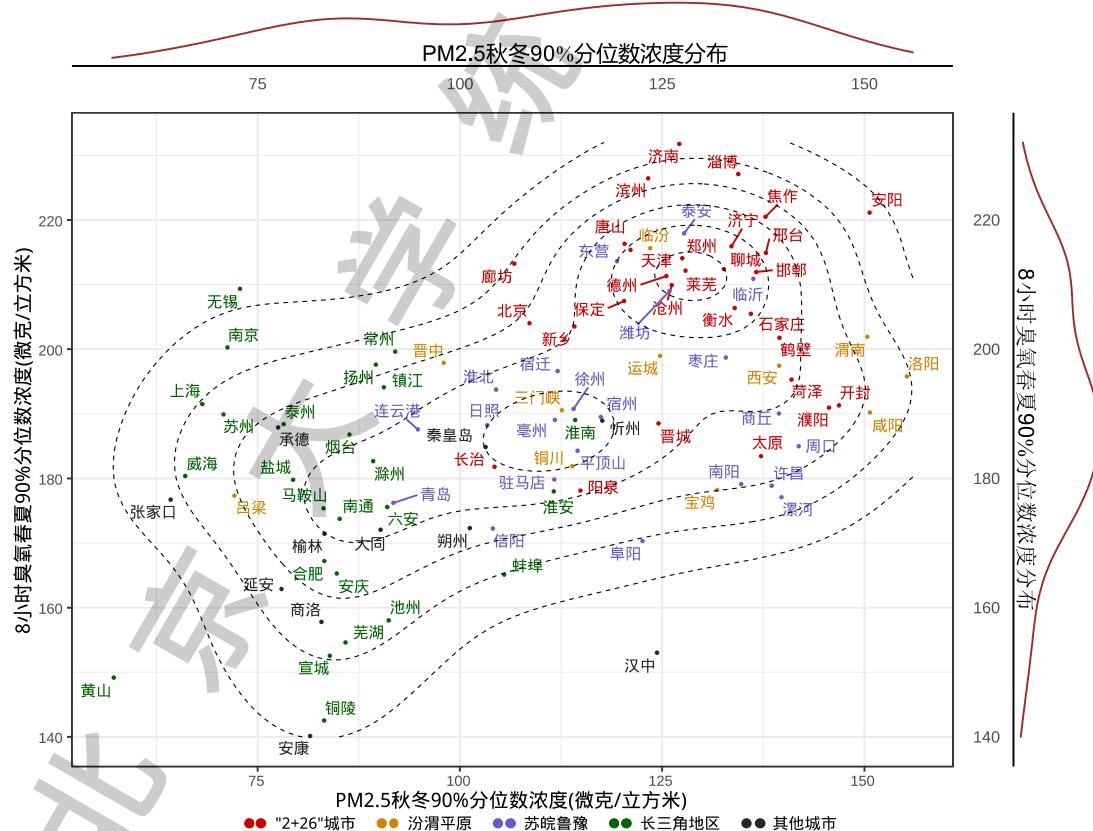


图 25 “3+95”城市 2020 年 PM_{2.5} 秋冬和 8 小时臭氧春夏年平均 90% 分位数浓度（微克/立方米）散点分布图

表 12 “3+95”城市 2015 年（括号内为 2018 年）-2020 年六种污染物气象调整后浓度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	43.2(30.3)	34	南通	27.2(12.6)	67	亳州	18.2(14.1)
2	德州	37.1(13.9)	35	潍坊	26.8(13.6)	68	天津	17.9(15.3)
3	衡水	35.8(11.5)	36	南京	26.4(7.6)	69	张家口	17.9(11.4)
4	北京	35(22.1)	37	宿迁	26.4(12.1)	70	朔州	17(17.5)
5	淄博	34.7(14)	38	沧州	25.5(21.6)	71	铜陵	16.9(8.5)
6	东营	34.2(11.3)	39	青岛	25.5(4.2)	72	烟台	16.4(-0.6)
7	廊坊	34(22.1)	40	莱芜	25.1(15.2)	73	宣城	16.2(11.6)
8	驻马店	33.8(22.8)	41	信阳	25.1(14.6)	74	铜川	15.5(18.2)
9	郑州	33.4(18.8)	42	枣庄	24.7(6.4)	75	忻州	15(21.5)
10	平顶山	32.6(17.3)	43	开封	24.1(18.8)	76	咸阳	14.9(16.4)
11	济宁	31.5(5.5)	44	运城	24.1(13.5)	77	蚌埠	14.6(8.5)
12	聊城	31.5(14.6)	45	邯郸	23.6(17.5)	78	承德	14.6(7.1)
13	新乡	31(18.8)	46	淮北	23.5(15.5)	79	马鞍山	14.6(13)
14	三门峡	30.8(17.4)	47	威海	23.5(12.2)	80	秦皇岛	13.3(16.1)
15	苏州	30.7(7.1)	48	泰安	23.4(5)	81	榆林	13(16.5)
16	菏泽	30.5(9.3)	49	鹤壁	23.3(16.6)	82	阳泉	10.3(14.8)
17	盐城	30.3(20.5)	50	扬州	22.9(15.3)	83	渭南	10(7)
18	济南	30.1(8.2)	51	安阳	22.7(18.7)	84	阜阳	8.1(5.3)
19	泰州	30.1(13.5)	52	常州	22.6(12.4)	85	太原	7.6(14.8)
20	漯河	30(12.2)	53	徐州	22.5(10.7)	86	汉中	7(-4.3)
21	长治	29.7(8.7)	54	临沂	21.8(8.3)	87	芜湖	7(11.7)
22	镇江	29.6(12.4)	55	商丘	21.8(10.2)	88	临汾	6.9(25.9)
23	日照	29.3(10.2)	56	安康	21.7(15.4)	89	宿州	6.9(17.6)
24	邢台	29.3(25.7)	57	淮安	21.6(11.8)	90	晋中	5.3(18.5)
25	许昌	29.1(12.5)	58	石家庄	21.4(23.8)	91	淮南	0.1(9.6)
26	濮阳	28.6(18.4)	59	连云港	20.6(9.4)	92	安庆	-0.5(12.6)
27	延安	28.5(25.8)	60	南阳	20.6(7.9)	93	大同	-1.3(8.6)
28	焦作	28.4(14.7)	61	宝鸡	20.4(10)	94	吕梁	-2.9(21.2)
29	唐山	28.3(23.6)	62	滨州	19.8(11.7)	95	六安	-6.6(7.2)
30	上海	28.1(5)	63	合肥	19.3(5.5)	96	池州	-8.1(8.7)
31	洛阳	27.9(23.3)	64	西安	19.3(15.6)	97	滁州	-8.3(7.8)
32	无锡	27.7(12.6)	65	晋城	19.1(18.8)	98	黄山	-30.9(4.8)
33	商洛	27.5(9.2)	66	周口	18.8(12.7)			平均降幅
								20.8(13.5)

注：括号外为六种污染物 2015 年到 2020 年经气象调整后的六年累计降幅的平均值，括号内为 2018 年到 2020 年经气象调整后的三年累计降幅的平均值。红色表示排名前三分之一的非“2+26”城市及汾渭平原 11 市以及排名后三分之一的“2+26”城市和汾渭平原 11 市。星号 (*) 表示该城市六年综合累计降幅为负，即空气质量无改善。

图 26 给出六种污染物各季节逐年变化率的情况。PM_{2.5} 各季节污染情况总体上逐年降低，且下降幅度略有增加。20 年春夏秋三季相比 19 年均下降，且春季下降幅度较大，降幅排名 25% 至 75% 的城市的降幅集中在 20% 附近，但 20 年冬季浓度高于 19 年冬季，可能受

到疫情因素影响。 PM_{10} 在春、秋两季的逐年降幅有一定提升，而夏季的逐年降幅趋缓，19-20年冬季 PM_{10} 浓度有较大幅度（集中在25%附近）的增加。二氧化硫各季度浓度总体逐年降低，夏、秋季降低的幅度逐渐减小（秋季尤为明显），20年的夏秋冬三季相比19年都有部分城市浓度上升，其中冬季有超过50%的城市浓度上升。一氧化碳浓度总体呈现下降趋势，但下降幅度较为平缓，20年冬季有50%左右的城市浓度相比19年冬季上升。二氧化氮浓度在春、秋两季改善明显，下降幅度逐渐增大，相比19年冬季，20年冬季浓度上升幅度较大（涨幅排名25%至75%的城市涨幅集中于20%附近）。臭氧各季节浓度总体上呈上升趋势，应当引起注意，20年各季节浓度相比19年存在一定的降低，冬季降幅相对明显。

图27汇总了六种污染物在四个季节中，2020年浓度及过去一年降幅最高或最低的20个城市出现的频次，“3+95”城市中过去一年各季节改善幅度较小的11个城市为汉中、商丘、菏泽、渭南、安康、廊坊、泰安、宝鸡、六安、阳泉、郑州，这些城市中除商丘、郑州外基础浓度均较低，六安、宿州在2019年数据质量不佳导致污染浓度有一定低估；过去一年改善幅度较大的10个城市为芜湖、邢台、铜陵、池州、镇江、南京、泰州、沧州、保定、苏州，其中江苏有4个，河北和安徽分别3个，虽然河北省2020年冬季仍受新冠疫情的影响，较大的降幅侧面印证其污染排放的显著降低。污染浓度数值较高的城市有唐山、临沂、邢台、安阳、淄博、太原、邯郸、莱芜、滨州、焦作、枣庄，其中山东有5个，河北、河南和山西分别有3、2、1个，上述城市存在多种污染物的污染情况在七省三市中最为严重，具体可参考表13超标污染物汇总，空气污染治理仍需加速。

为了方便各级部门了解2020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的浓度的监视坐标图（图28至图30）和“3+95”城市2020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} 替换了 $PM_{10-2.5}$ 。 $PM_{10-2.5}$ 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：50微克/立方米（ $PM_{2.5}$ ）、40微克/立方米（ $PM_{10-2.5}$ ）、20微克/立方米（二氧化硫）、1毫克/立方米（一氧化碳）、120微克/立方米（春夏两季8小时臭氧）、40微克/立方米（二氧化氮）。考虑到大气污染的总体改善以及减少与国际标准的差别，并参考国家标准、目前的城市均值浓度分布和数据的区分度，相比上一份报告，我们将 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10-2.5}$ 的标准分别减少10微克/立方米，二氧化硫的标准减少5微克/立方米，一氧化碳的标准减少0.25毫克/立方米，二氧化氮的标准减少5微克/立方米。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。

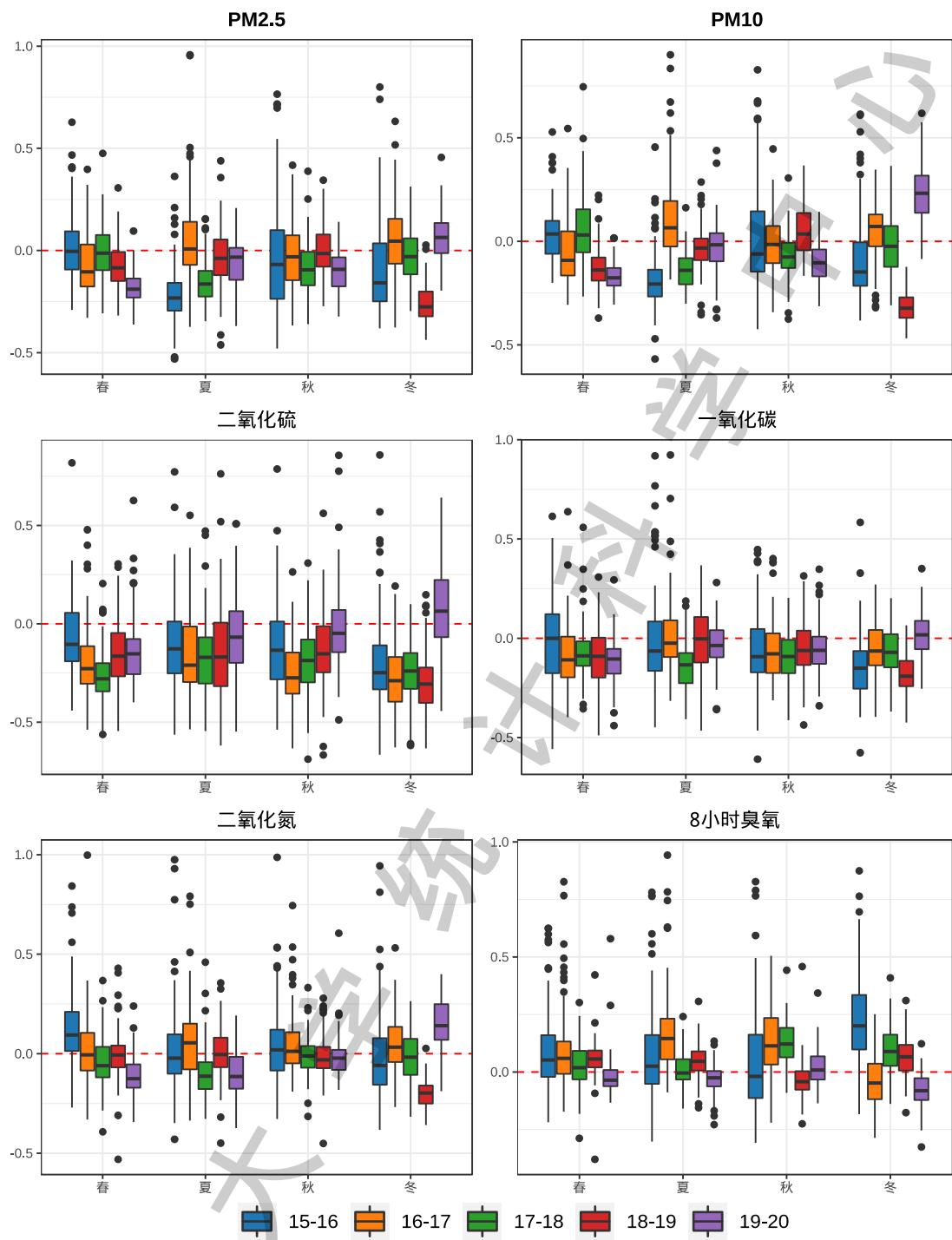


图 26 “3+95”城市六种污染物各季节平均浓度逐年变化幅度箱线图

由表 13 可知，阳泉有六种污染物过高，安阳、滨州、邯郸、临汾、临沂、太原、唐山、邢台、新乡、淄博 10 市五种污染物过高；长治、鹤壁、焦作、济南、晋城、晋中、莱芜、洛阳、南阳、石家庄、渭南、西安、咸阳、徐州、运城、郑州 16 市四种污染物过高；三个污染物超标的有 18 个城市；两个和一个污染物超标的各有 14 和 30 个；安康、安庆、池州、黄山、马鞍山、南通、青岛、商洛、宣城 9 个城市无超标污染物。超标城市数最多的污染物是 8 小时臭氧（春夏），有 85 个城市超标，占 86%；其次是 PM_{10-2.5}（47 个）和 PM_{2.5}（44

个), 二氧化氮(31个)和一氧化碳(20个); 二氧化硫仅5个城市超标, 说明对其治理效果显著。这也说明“3+95”城市臭氧污染已经超过PM_{2.5}成为首要大气污染问题。我们希望图28至图30和表13对各市在下一步的大气污染治理中选定重点治理方向有帮助。

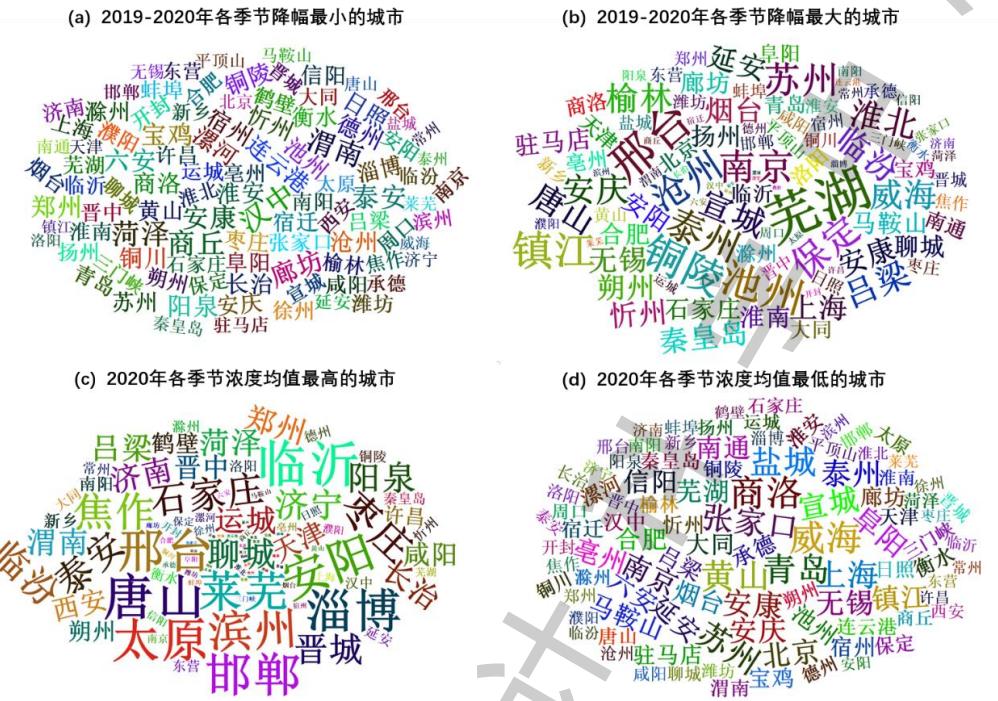


图27 “3+95”城市2020年各季度六种污染物各季度降幅最小(a)和最大(b); 平均浓度最高(c)和最低(d)的20城市词云图, 城市字体大小表示其出现频次

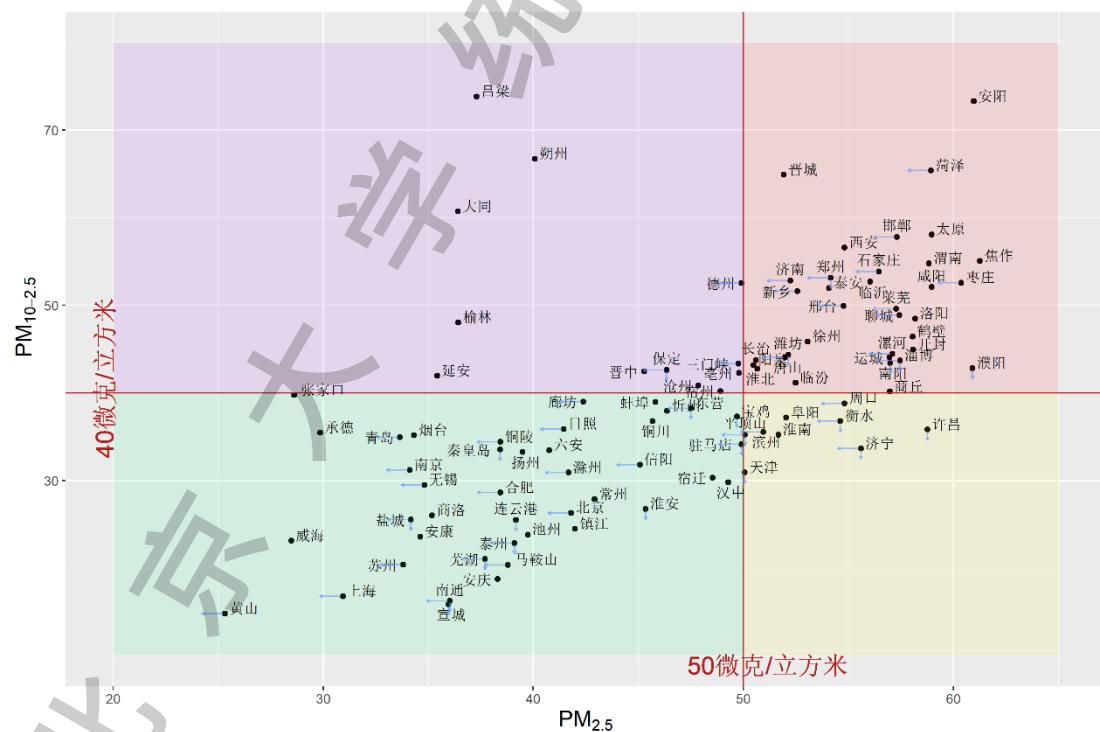


图28 “3+95”城市2020年PM_{10-2.5}和PM_{2.5}的监视坐标图 (纵向箭头表示该城市六年内PM_{10-2.5}降幅至少30%, 横向箭头表示该城市六年内PM_{2.5}降幅至少35%)

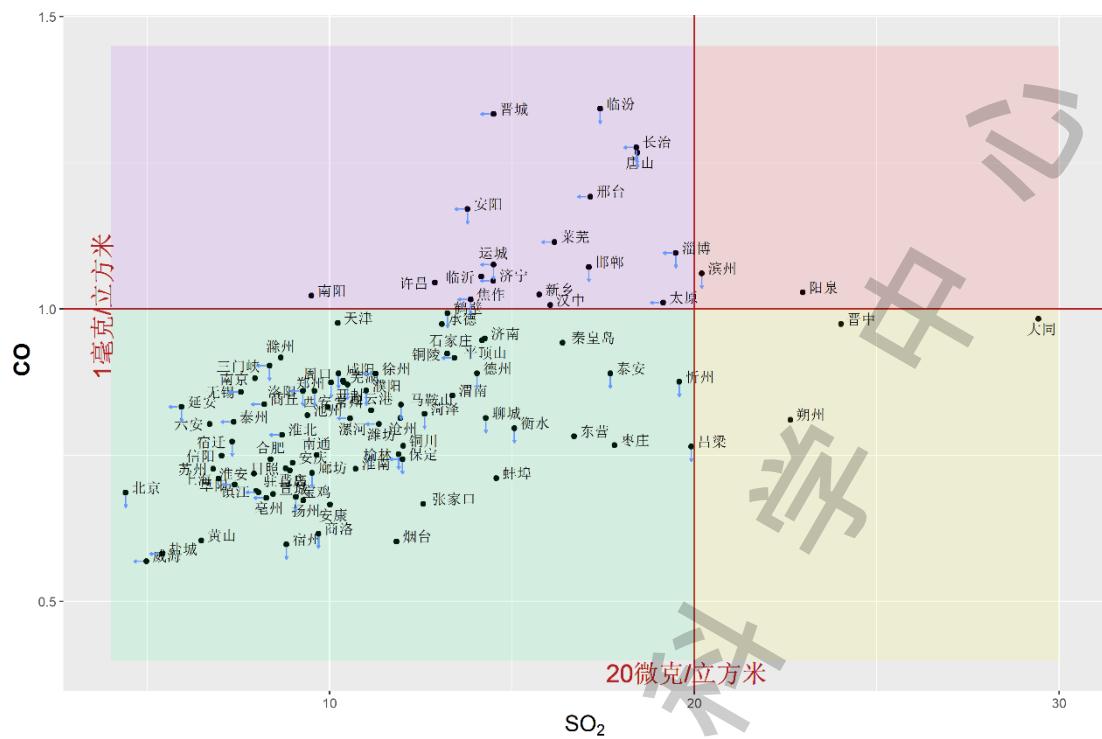


图 29 “3+95”城市 2020 年一氧化碳和二氧化硫的监视坐标图（纵向箭头表示该城市六年内一氧化碳降幅至少 40%，横向箭头表示该城市六年内二氧化硫降幅至少 70%）

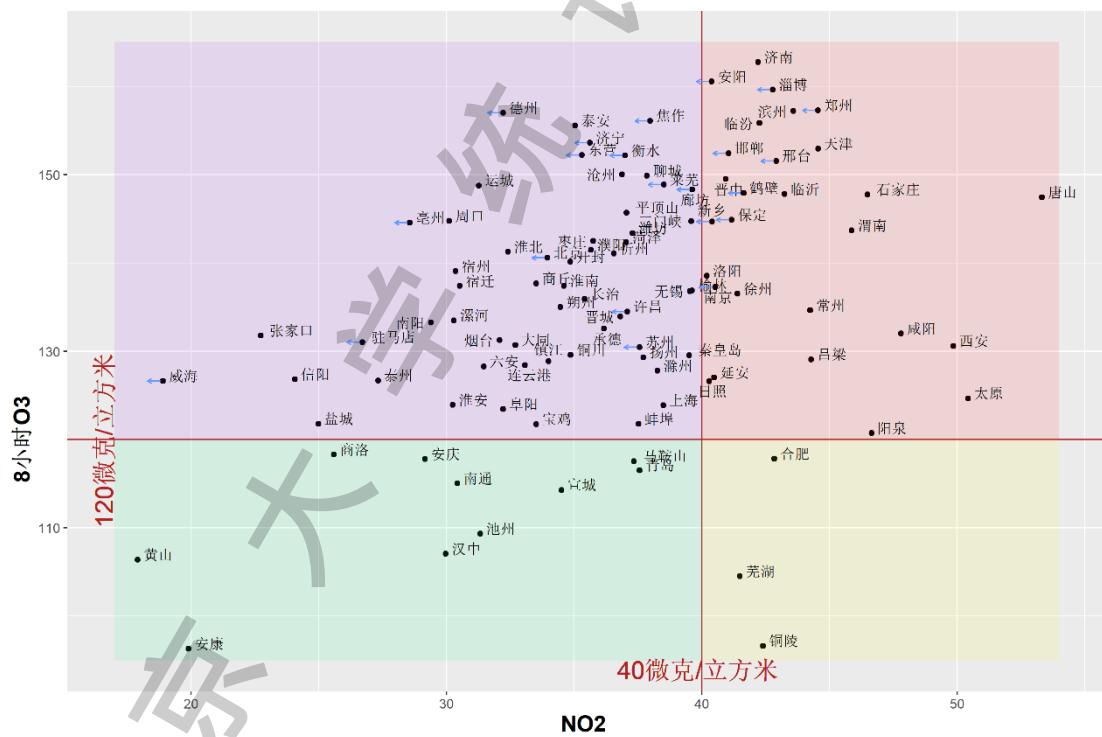


图 30 “3+95”城市 2020 年二氧化氮和春夏 8 小时臭氧的监视坐标图（横向箭头表示该城市六年内二氧化氮降幅至少 20%，春夏两季 8 小时臭氧未用箭头标记降幅）

表 13 “3+95”城市 2020 年超标污染物情况汇总，“×”代表污染物过高

序号	城市	PM _{2.5}	PM _{10-2.5}	二氧化硫	一氧化碳	二氧化氮	8 小时臭氧（春夏）
1	阳泉	X	X	X	X	X	X
2	安阳	X	X		X	X	X
3	滨州	X		X	X	X	X
4	邯郸	X	X		X	X	X
5	临汾	X	X		X	X	X
6	临沂	X	X		X	X	X
7	太原	X	X		X	X	X
8	唐山	X	X		X	X	X
9	邢台	X	X		X	X	X
10	新乡	X	X		X	X	X
11	淄博	X	X		X	X	X
12	长治	X	X		X		X
13	鹤壁	X	X			X	X
14	焦作	X	X		X		X
15	济南	X	X			X	X
16	晋城	X	X		X		X
17	晋中		X	X		X	X
18	莱芜	X	X		X		X
19	洛阳	X	X			X	X
20	南阳	X	X		X		X
21	石家庄	X	X			X	X
22	渭南	X	X			X	X
23	西安	X	X			X	X
24	咸阳	X	X			X	X
25	徐州	X	X			X	X
26	运城	X	X		X		X
27	郑州	X	X			X	X
28	保定		X			X	X
29	大同	X		X			X
30	菏泽	X	X				X
31	淮北	X	X				X
32	济宁	X			X		X
33	开封	X	X				X
34	聊城	X	X				X
35	漯河	X	X				X
36	吕梁		X			X	X
37	濮阳	X	X				X
38	商丘	X	X				X
39	朔州		X	X			X

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）
40	泰安	X	X				X
41	天津	X			X		X
42	潍坊	X	X				X
43	许昌	X			X		X
44	延安		X			X	X
45	枣庄	X	X				X
46	亳州		X				X
47	沧州		X				X
48	常州				X		X
49	德州		X				X
50	阜阳	X					X
51	衡水	X					X
52	淮南	X					X
53	南京				X		X
54	平顶山	X					X
55	日照				X		X
56	三门峡		X				X
57	宿州		X				X
58	榆林		X				X
59	周口	X					X
60	汉中			X			
61	合肥				X		
62	铜陵				X		
63	芜湖				X		
宝鸡、北京、蚌埠、承德、滁州、东营、淮安、廊坊、连云港、六安、秦 皇岛、上海、宿迁、苏州、泰州、铜川、威海、无锡、信阳、忻州、盐 城、扬州、烟台、张家口、镇江、驻马店							
8 小时臭氧（春夏）超标 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：红色代表 6 个污染物超标，紫色代表 5 个污染物超标，棕色代表 4 个污染物超标，蓝色代表 3 个污染物超标，绿色代表 2 个污染物超标，灰色代表 1 个污染物超标，黑色代表无污染物超标。

六、“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“人努力一天帮忙”指数。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。

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 31 和图 32 给出了“3+95”城市 2020 年相较于 2018 年或 2019 年四个季节 PM_{2.5} “人努力”指数与“天帮忙”指数地图。由于已经剔除气象条件影响，“人努力”指数能够真实地反应本地排放年际变化情况。受到自 2019 年冬季以来的新冠肺炎疫情影响，“人努力”部分既来自动主动的节能减排，也来自因为疫情被动的停工停产等。并且，由于 2019 年冬季受到疫情影响最大，为了更有效的反映 2020 年情况，我们加入了以 2018 年为参照的人努力天帮忙地图。从“人努力”地图我们可以看到，2020 年全年排放水平较 2019 年有所下降，“人努力”城市增多，其中 2020 年春季减排程度最大，2020 年夏季和秋季“人努力”城市较 2019 年有一定增加，而 2020 年冬季较 2019 年的反弹主要因 2019 年受疫情影响更多，绝大部分城市 2020 年冬季相对 2018 年冬季也属于人努力城市。“天帮忙”指数反映该季节气象条件是否对空气质量有利。2020 年整体气象条件优于 2019 年，从天帮忙地图看，2020 年中春、夏、秋三季优于冬季气象条件。

• 2020 年“人努力”情况

图 32 左侧四图反映 2020 年相对 2019 年 96 个城市各季节“人努力”情况。**2020 年春季**由于受到疫情停工停产、人群流动限制限制等影响，几乎所有城市本地排放出现大幅下降（96/98），一定程度上反映了春季污染排放的下限。夏季“人努力”城市（65/98）相对 2019 年（56/98）有所增加，安徽整体改善最为明显，宣城、黄山、芜湖三市，PM_{2.5} 夏季浓度一年降幅超 30%，而相反，山东菏泽、安徽阜阳，山西忻州三市 PM_{2.5} 夏季浓度一年增幅超 15%。秋季大部分城市也属于“人努力”情形（85/98），本地减排效果明显，尤其安徽、山东、江苏各市本地排放相对 2019 年秋季均有一定下降。但长治、忻州、晋中增幅超 10%，北京也存在 6.9% 的反弹。冬季由于 2019 年受疫情影响更大，对应排放水平较低，大部分城市呈现出“人不努力”情况，“人努力”城市占比降低（28/98），只有部分地区排放水平降低，包括河北石家庄、保定、廊坊、邢台等市有**2020 年冬季有疫情反弹相应抗疫措施加强的因素**，本地排放水平较 2019 年进一步下降。由于 2019 年冬季受疫情影响明显，以 2018 年为参考更能反映各城市冬季本地减排人努力情况。从图 31 可以看到，2020 年冬季绝大部分城市（96/98）相对 2018 年冬季本地排放降低，“人不努力”的两个城市中，宿州排放增加 0.8%，两年几乎持平，济宁增加 7.0%，有明显反弹。

• 2020 年“天帮忙”情况

图 32 右侧四图反映 2020 年 98 个城市各季节“天帮忙”情况。我们可以看到，2020 年春季绝大多数城市（73/98）气象条件也较为有利。在“天不帮忙”的城市中，气象条件最不利于 PM_{2.5} 扩散的鹤壁受气象影响仅 3%，整体天气对污染物观测浓度的影响较小。夏季情况与春季类似，62 个城市属于“天帮忙”状态，河北、山东东部、江苏各市气象条件较不利于扩散，河南与山西气象相对有利。具体“天不帮忙”城市中平顶山最为不利，影响接近 10%，上海与山东东营影响达 4%。秋季气象情况变化较大，69/98 城市为“天帮忙”城市，北京、天津与河北大部分城市气象条件均非常有利。**其中北京市天帮忙指数达 13.3%**，因此虽本地排放增幅 6.8%，但整体观测空气质量变优。2020 年冬季约半数的城市（50/98）为“天帮忙”城市，其他城市“天不帮忙”程度较其他季节增加，8 个城市（上海、德州、南通、安庆、烟台、平顶山、天津、东营）“天不帮忙”指数超 5%，气象条件较为不利。**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。**

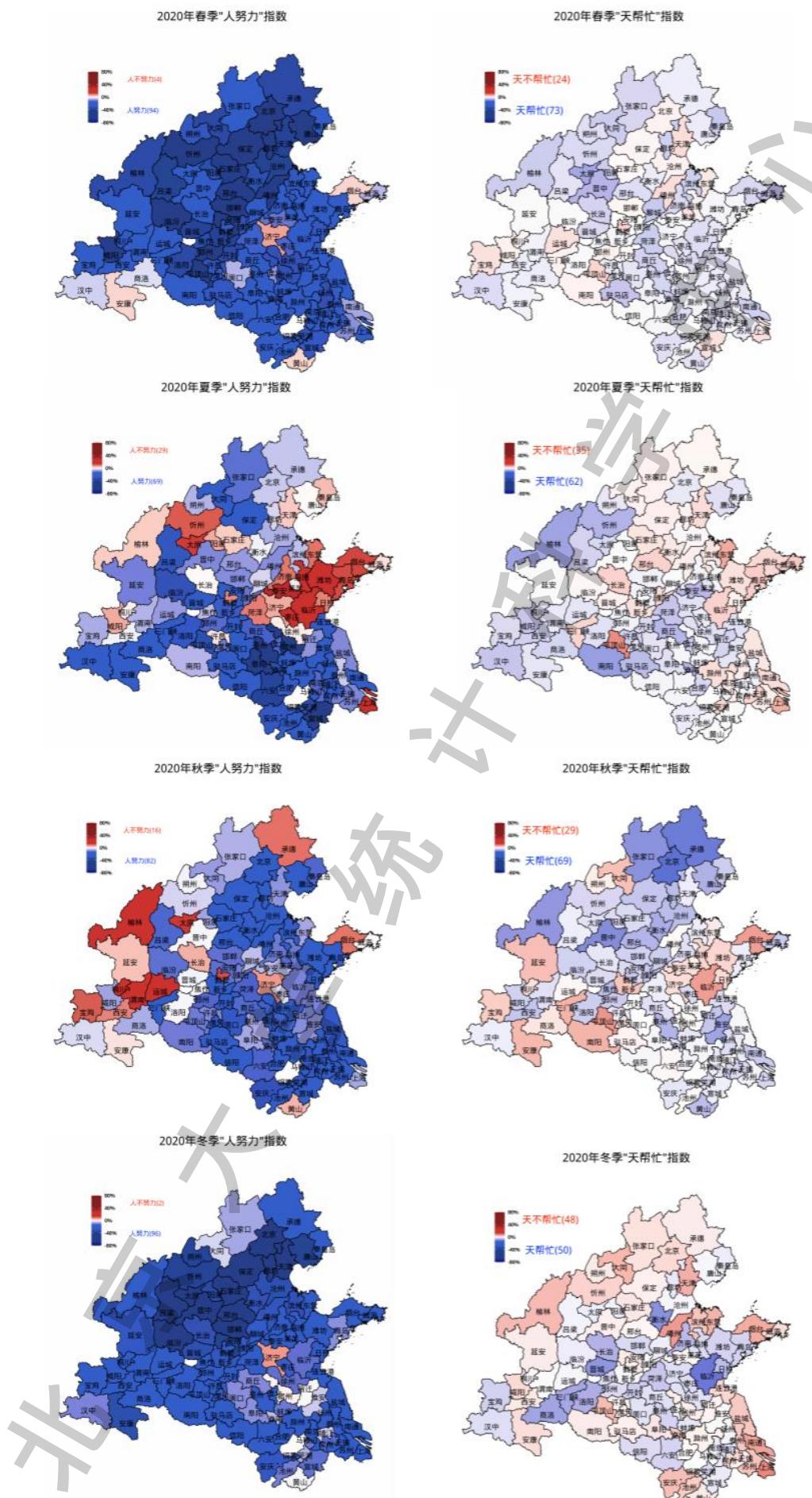


图 31 “3+95”城市 2018-2020 年各季节 PM_{2.5}“人努力”和“天帮忙”指数地图

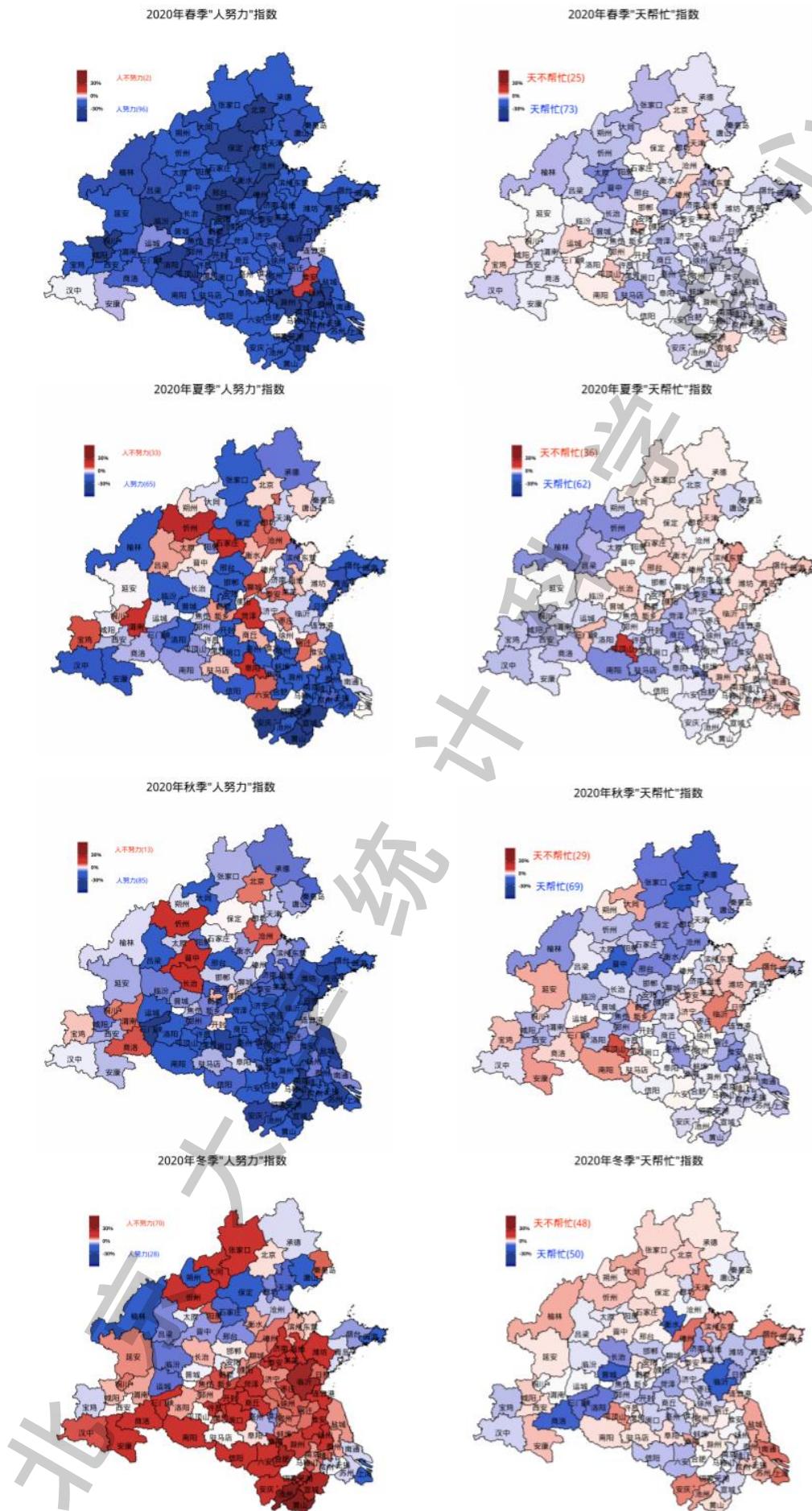


图 32 “3+95”城市 2019-2020 年各季节 PM_{2.5}“人努力”和“天帮忙”指数地图

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 年以来华北地区京津冀晋鲁豫陕五省二市和南方苏皖沪地区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。

2020 年由于疫情影响，2 月至 5 月全社会活动水平降低，污染物的排放也有所降低。但由于受厄尔尼诺现象的影响，2019-2020 年秋冬季气象条件整体偏差，不利于大气污染物扩散。因此各地区仍出现了重污染天气。随着疫情防控形势持续向好，夏季起企业加快复工复产，许多受疫情影响抑制的产能和产量短时间内集中快速增长，为各地区的大气污染治理工作带来了不小的压力。各地区都发布了 2020-2021 秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案，方案的主要任务包括实施钢铁行业超低排放改造，针对钢铁、建材、焦化、化工等行业落实产业结构调整，严格控制煤炭消费总量，强化扬尘管控，加快推进柴油货车治理，强化秸秆禁烧管控和严防散煤复烧等方面。

为了反映京津冀及周边地区、汾渭平原和长三角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 33 展示了 2011 年以来京津冀晋鲁豫陕苏皖沪七省三市的主要工业产品产量情况。从图中可以发现，2019 年冬季各省市的生铁和粗钢产量基本与 2018 年保持不变或略有上升，这说明即使在疫情防控期间，钢铁行业仍然维持了正常的生产水平。随着疫情防控形势变好和企业复工复产，江苏省、山西省、河南省和山东省从 2020 年春季开始生铁产量较 2019 年同期有明显提高。粗钢产量提升最多的为山西省、河南省和安徽省，均从 2020 年春季开始同比上升，钢铁大省河北省、山东省和江苏省则均从 2020 年夏季开始上升。作为钢铁产量最多的省份，河北省 2020 年四个季度同比增幅均不超过 15%。受疫情影响，政府为加快经济复苏增加了对基础建设和房地产建筑等相关行业的支持和投入，水泥生产大省山东和河南自 2020 年春季起水泥产量有显著上升的趋势，江苏和安徽省则从 2020 年秋季起显著同比上升。随着工业的快速复苏和全社会活动的恢复，各省市从 2020 年夏季开始的发电量比 2019 年也有显著提高。根据国家统计局提供的数据，各省市的 GDP 在 2020 年第一季度²均比上年同期下降 3% 至 7.4%，从 2020 年第二季度开始同比上升，升幅最大的（4%以上）为河北省、山东省、河南省、江苏省和安徽省。到 2020 年第三、四季度，所有省市的 GDP 均同比上升，增速达到 2.4% 至 7.8%（除河南省第四季度略有下降以外）。这说明各地区的经济从 2020 年 4 月开始回暖。前文分析的主要工业产品产量变化趋势与此基本一致。

² 国家统计局公布的季度数据中的第一季度指当年 1-3 月，第二季度指当年 4-6 月，以此类推。

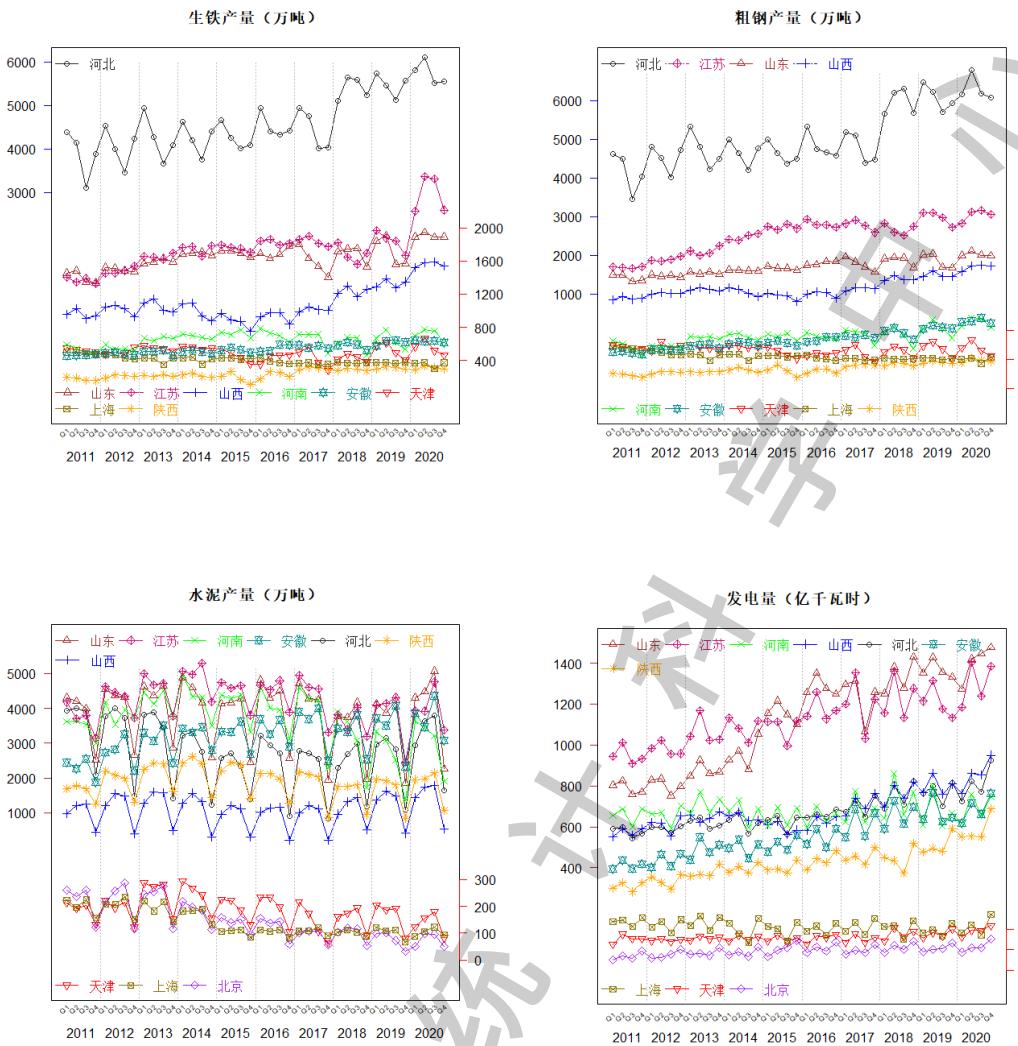
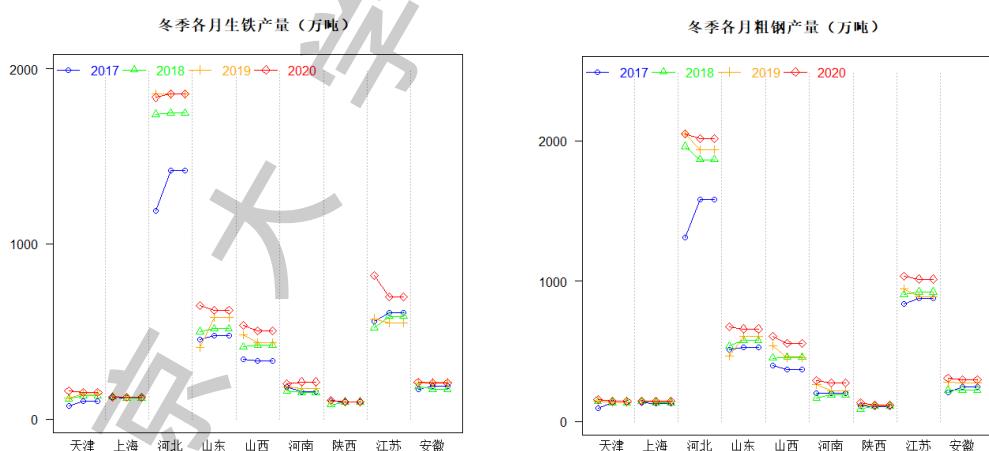


图 33 京津冀晋鲁豫陕苏皖沪七省三市耗煤工业产品季度总产量及季度总发电量



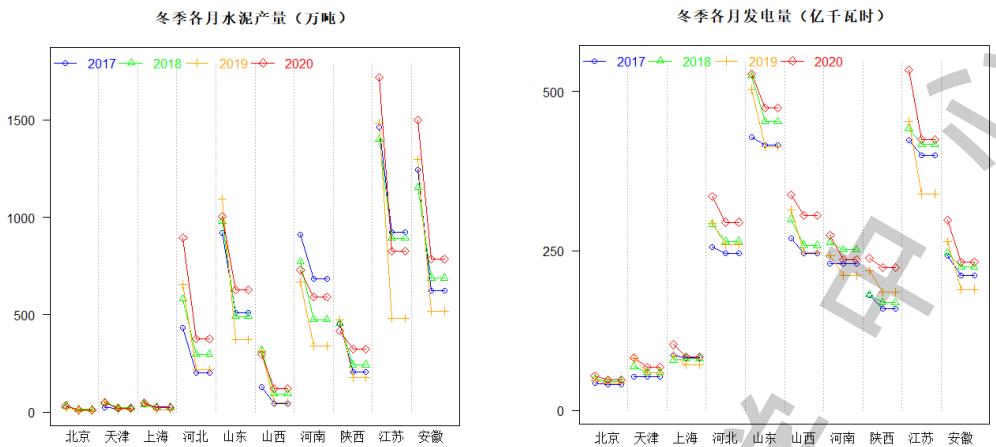


图 34 京津冀晋鲁豫陕苏皖沪七省三市 2017-2020 年冬季各月（当年 12 月-次年 2 月）耗煤工业产品季度总产量及季度总发电量³

尽管 2018 年以来，全国各地秋冬季大气污染攻坚战取得积极成效，但京津冀及周边地区、汾渭平原和长三角地区秋冬季 PM_{2.5} 平均浓度显著高于其它季节，重污染天气占全年 95% 以上。为了进一步分析冬季各行业生产活动的变化趋势，将 2017-2020 年冬季各月（当年 12 月至次年 2 月）的主要工业产品产量绘制在图 34 中。由于国家统计局仅公布每年 1-2 月的工业产品产量与发电量的累计值，本文以两月的平均产量代替 1-2 月的当月产量。从图 34 中可以看出，2019 年冬季生铁和粗钢的产量基本与 2018 年水平相同，并未受到疫情的太大影响。到 2020 年冬季，随着生产恢复和基建房地产行业的加速发展，各个钢铁大省的生铁和粗钢产量有明显的增加，其中江苏省增加最多（2020 年冬季生铁产量同比上升 32.8%，粗钢产量同比上升 12.3%），山东省其次（2020 年冬季生铁产量同比上升 20.8%，粗钢产量同比上升 18.7%），山西和河南省紧随其后。河北省 2019 年冬季钢铁产量有明显增加，但 2020 年冬季则保持与 2019 年基本相同。与钢铁行业不同，由于在外务工人员返乡过年，建材行业有明显的春节效应。图 34 显示每年的 1-2 月水泥产量都是最低的。江苏和安徽省的建材行业较发达，月度水泥产量在这七省三市中名列一二。受新冠肺炎疫情影响，2019 年冬季全国的基础建设和房地产建筑工地停工，各省市 2020 年 1-2 月的水泥产量为 4 年中的最低值。随着疫情形势逐步好转，2020 年全国基础建设和房地产建筑等相关行业的全面复苏，各省市的水泥产量都有显著上升的趋势，其中江苏、安徽、河南和山东省 2020 年冬季的水泥产量分别同比上升 37.8%、31.9%、41.7% 和 22.8%。随着工业的快速复苏和全社会活动的恢复，以及社会各界响应 2021 年春节就地过节的号召，各省市在 2020 年冬季的发电量达到了历年来最高峰，除天津市以外，均同比上升超过 10%。

如前文所述，从 2018 年开始，各地在秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案中都提到要严格控制煤炭消费总量。我们接下来分析各省市的煤炭消耗情况。图 35 给出了京津冀晋

³ 国家统计局仅公布每年 1-2 月的工业产品产量与发电量的累计值。此处 1 和 2 月的当月产量以两月的平均产量代替。

鲁豫陕苏皖沪七省三市 1995-2020 年（按自然年计算）煤炭消费总量的折线图。北京市的煤炭消费量自北京奥运会之前的 2007 年就开始稳步下降，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，到 2016 年煤炭消费总量已下降至一千万吨以下，2020 年的煤炭消费总量仅为 2016 年的三分之一左右。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，2019 和 2020 年的煤耗总量已下降至近十年来的最低水平，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。经过 2017 年停工限产令后，山东省的煤炭消费量随产能的恢复有所上升，但在全省各界的努力下，年度煤炭消费总量均控制在 4 亿吨左右，且 2019 和 2020 年都有逐年下降的趋势。长三角地区苏皖沪的煤炭消费量则一直比较稳定，2020 年略有降低。如前文所述，2020 年全国各地的基建和房地产行业快速发展，因此各地 2020 年建材行业的煤炭消费量均有所上升，此处不再赘述。图 36 也展示了其它类煤炭消费量的情况，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，2020 年冬季有所回升。尽管如此，除北京外各省市的其它类煤炭消费量占煤炭消费总量的比例已下降到 10% 左右或以下，这表明各省市有效推进清洁取暖，严防散煤复烧等任务取得了不错的成果，值得继续关注。

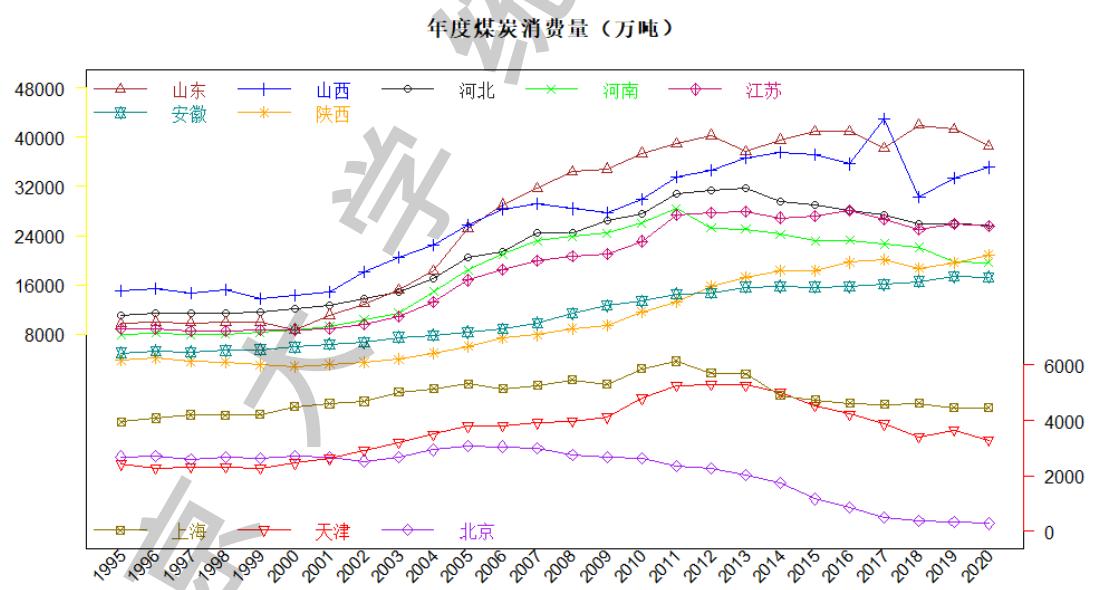


图 35 京津冀晋鲁豫陕苏皖沪七省三市自然年年度煤炭消费总量(万吨)

(1995-2017 年数据来自国家统计局网站，2018-2020 年数据来自中国煤炭资源网)

为了进一步分析新冠肺炎疫情对煤炭消费量的影响，我们将 2017-2020 年冬季各月（当年 12 月至次年 2 月）的分行业煤炭消费量绘制如图 37。从图中可以看出，尽管受到疫情影

响，各省市各行业 2019 年冬季各月的煤炭消费量均有所下降，随着疫情好转和全面复工复产，2020 年冬季的煤炭消费量有所回升。这与上文分析与经济形势都相符，此处不再赘述。

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[23]。为了进一步了解京津冀晋鲁豫陕苏皖沪七省三市的煤炭消费结构，图 36 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 36 中可以看出，除北京和天津市 2020 年的四个季度煤炭消费总量全面同比下降外，其他各省市 2020 年的煤炭消费总量从春季或夏季开始均同比上升，其中冬季上升幅度最高（均接近或超过 10%）。除天津市外各地 2020 年冬季的电力行业煤炭消费量同比增加也都超过了 10%，这与各地的发电量上升显著密切相关，北京市已全面取消燃煤发电。而在冶金行业，山东和河南省在严格控制煤炭消费量上取得了巨大的成效。尽管生铁和粗钢产量与 2019 年同期持平或显著上升，河北省的冶金行业煤炭消费量在 2020 年的四个季度基本保持不变或少量下降，山东省同比下降 25.9%、35.9%、33.4% 和 18.8%，河南省下降 12.2%、9.7%、3.3% 和 1.5%。这反映了河北、山东和河南省在钢铁行业的超低排放改造和产业结构调整工作中取得了很好的成绩。而山西省和江苏省的冶金行业煤炭消费量在 2020 年四个季度均有所上升，这应与这两个省钢铁产量显著上升密切相关（见图 33）。

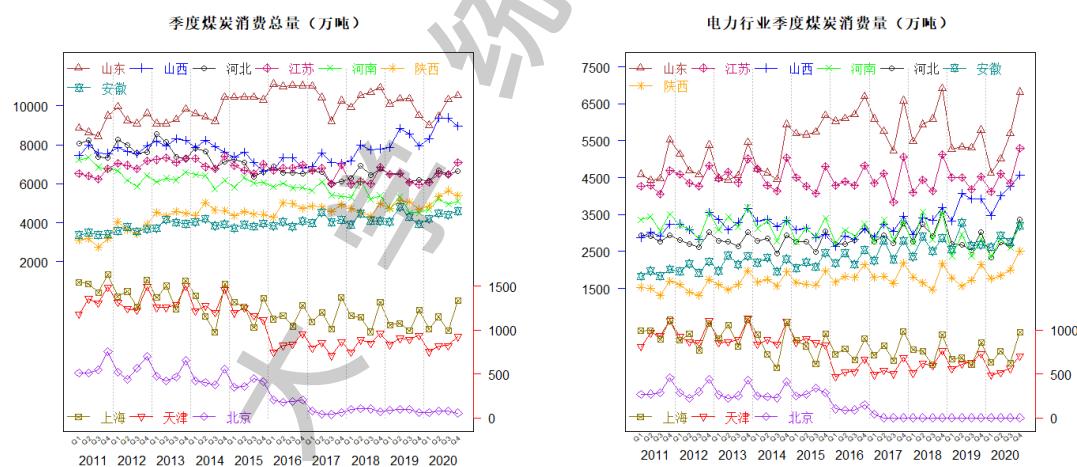
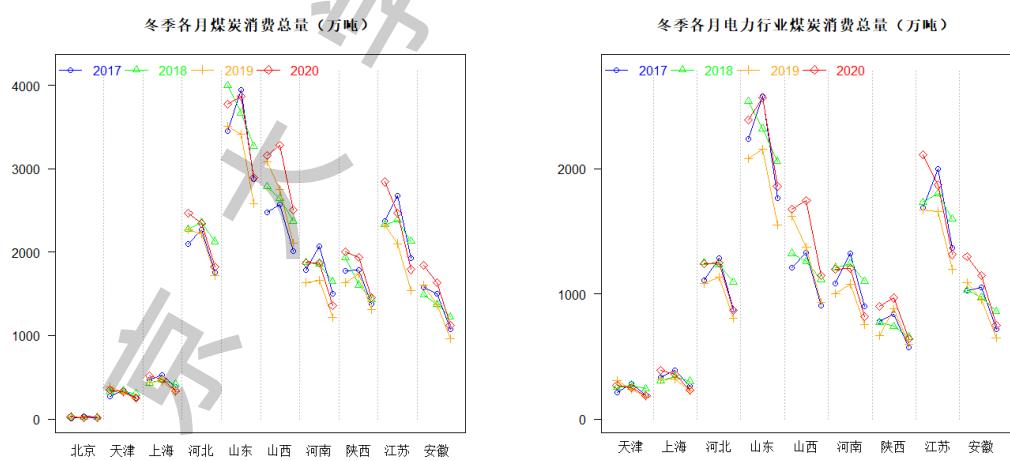




图 36 京津冀晋鲁豫陕苏皖沪七省三市季度分行业煤炭消费量



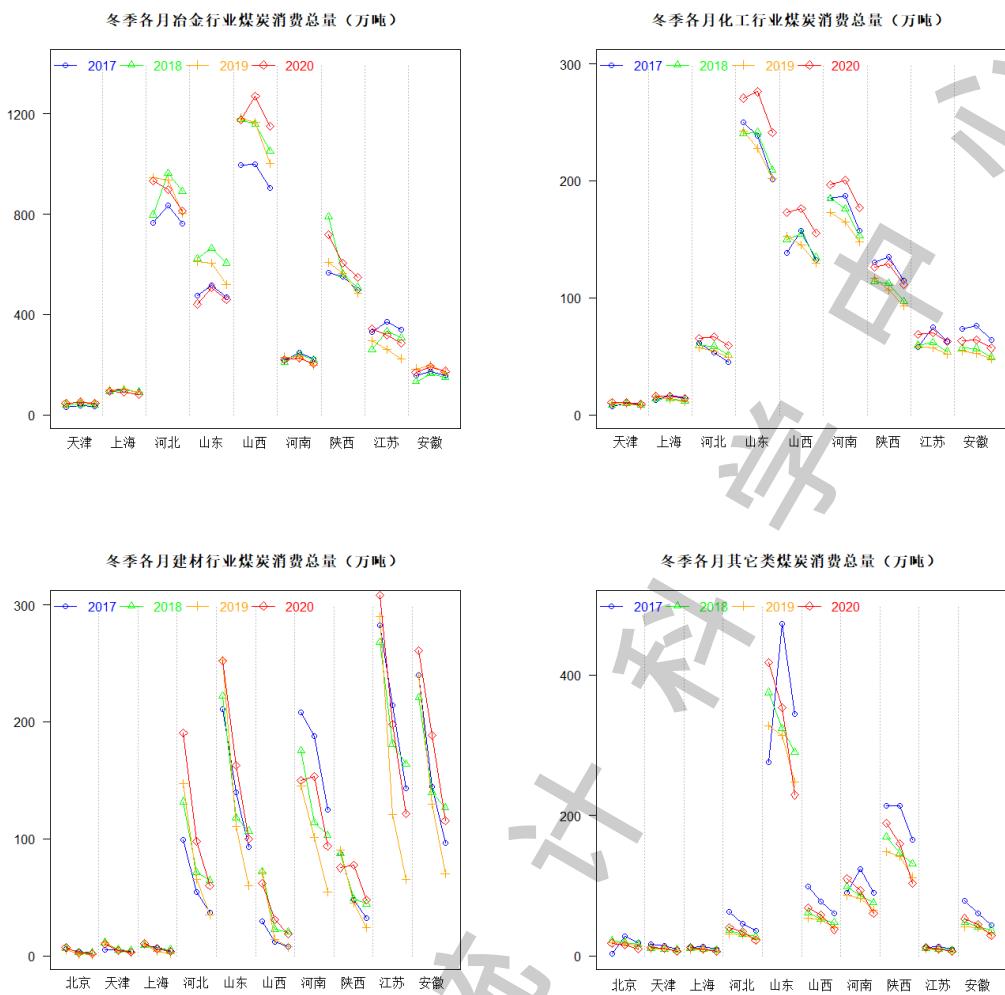


图 37 京津冀晋鲁豫陕苏皖沪七省三市 2017-2020 年冬季各月（当年 12 月-次年 2 月）分行业煤炭消费量

八、总结与建议

由于 2013-2014 年的大气污染较为严重，作为比较的起点年会降低标准，我们的结果汇总将集中于 2015 年到 2020 年的六年。我们将从七省三市、区域等维度，对“3+95”城市过去几年的空气质量状况及变化趋势进行分析总结，并提出建议供有关部门参考。

（1）春夏臭氧首次普遍下降

在经历了五年的普遍升高后，臭氧在浓度最高的春夏两季首次出现普遍下降。相较于 2019 年春夏，除上海升高 2.5% 外，其它七省二市的臭氧春夏平均浓度有 1.8 - 4.1% 的减少，这是多年来的首次。**2020 年春夏臭氧普遍降低的一个主要原因是新冠疫情所造成的交通出行受限，使得来自燃油汽车排放的氮氧化物减少。臭氧在春夏季节的降低可能并非完全来自于生产减排因素。但无论如何，我们看到中国的臭氧污染可以通过减少排放而实现。**参考文献[24]给出新冠疫情对中国北方五省二市大气污染的影响。

随着疫情的冲击逐渐减缓，社会生活恢复，氮氧化物和臭氧污染有可能回升到疫情前的水平。作为参照，我们看到 2020 年秋冬季节各地区包括二氧化硫、二氧化氮、一氧化碳在内的污染物浓度水平出现反弹迹象，表明污染物排放也随社会生产逐渐恢复，若不及时采取有效的减排措施，2021 年春夏季节的臭氧污染将较上年反弹，这值得警惕和关注。

（2）PM_{2.5} 与臭氧高度关联

我们对 PM_{2.5} 与臭氧的综合分析表明（图 38），我国面临着 PM_{2.5} 和臭氧复合型污染的严峻问题。“3+95”城市 PM_{2.5} 浓度高的城市臭氧浓度也高，如“2+26”城市、汾渭平原 11 市和苏皖鲁豫交界地区；而 PM_{2.5} 浓度低的城市臭氧浓度往往也低，如长三角和冀晋鲁豫陕的边缘城市。这说明有必要通过协同控制措施，加强对 PM_{2.5} 与臭氧两种污染物的管控。

我们的研究表明同时减少 PM_{2.5} 和臭氧在中国是可以实现的，因为这两个污染物的生成路径有重叠。比如对氮氧化物和一氧化碳的减少会同时减少 PM_{2.5} 与臭氧，氮氧化物在过去六年是除去臭氧之外的五个污染物中下降最少的，“3+95”城市过去六年只下降了 5.5%，有 35 个城市不降反增。氮氧化物的下降空间很大。

我们建议各省市采取措施有效减少氮氧化物和一氧化碳的浓度，这在遏制臭氧的上升同时也为颗粒物浓度进一步下降提供新的驱动力。这尤其在二氧化硫已经下降很多、进一步下降的空间有限的情况下显得尤为重要。

（3）七省三市 2015 至 2020 年污染物变化情况

基于气象调整后“3+95”城市的平均浓度，我们首先按照省市的尺度汇总七省三市近六年的变化情况。图 39、图 40 和图 41 给出了该十个省市六种污染物平均浓度的逐年变化。

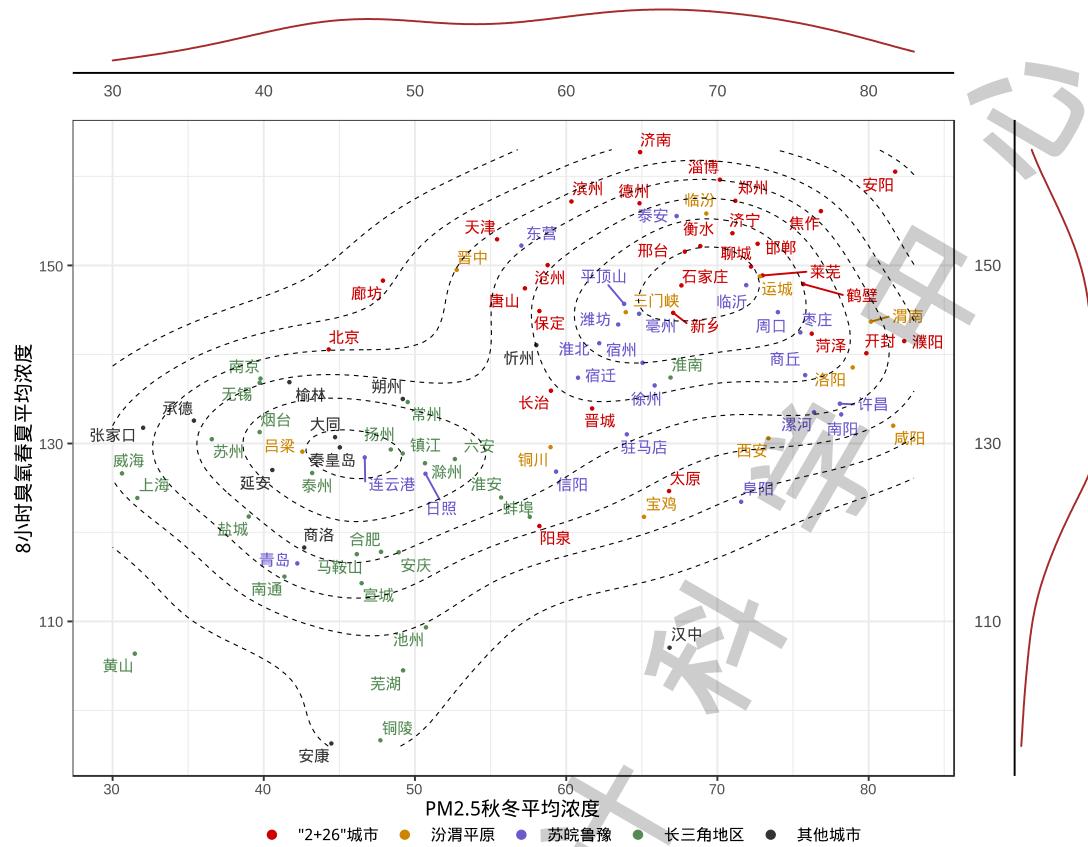


图 38 “3+95”城市 2020 年 PM_{2.5} 秋冬和 8 小时臭氧春夏平均浓度（微克/立方米）散点分布图

(3.1) PM_{2.5} 和 PM₁₀

经过多年治理，七省三市 PM_{2.5} 污染已有明显改善。与 2015 年相比，河北、北京和上海改善最为显著，PM_{2.5} 累计降幅分别为 40.6%、44.9% 和 42.2%；山东、河南、江苏和天津改善次之，分别下降 38.8%、36.1%、33.4% 和 32.7%；安徽再次之，累计下降 28.2%；山西和陕西改善最低，累计降幅分别为 18.7% 和 18.1%。

以 2020 年均浓度为标准，河南和天津 PM_{2.5} 污染最严重，年平均浓度分别为 55.5 和 50.1 微克/立方米。其他省市年平均浓度降至 50 微克/立方米以下，年均浓度从高到低依次为山东（49.9）、山西（47.9）、河北（46.2）、陕西（45.9）、安徽（42.1）、北京（41.8）、江苏（40.2）和上海（30.9）微克/立方米。北京市 PM_{2.5} 在北方地区独树一帜，与长三角地区相当。

2020 年七省三市 PM_{2.5} 浓度仍保持了下降趋势，河北较 2019 年均下降了 4.5 微克/立方米（8.8%），在七个省份中最为显著，这与其春、夏、冬三季节均受新冠疫情影响有关；河南、山东、山西和陕西较 2019 年分别下降 4.6%、4.6%、5.7% 和 3.6%；安徽和江苏较 2019 年下降 7.3% 和 8.2%，改善程度优于北方省份且污染程度在七省中最低。北京、天津和上海三市则分别下降了 6.6%、9.6% 和 15.1%。2020 年 PM_{2.5} 的下降依然受到疫情因素影响，特别是在全面复工复产前污染排放的显著降低，具体体现在二氧化硫、一氧化碳和二氧化氮等

气体污染物在春夏两季排放水平的下降。2020 年 PM_{2.5} 污染大幅度改善的另一原因是过去几年煤改气、散煤治理、燃煤超低排放和节能改造等举措的延续。

相比 2015 年，河北、山东、江苏和河南 PM₁₀ 分别下降 34.3%、32.9%、31.8% 和 31.5%；北京、天津和上海分别下降 32.7%、35% 和 33.3%。以上四省三市 PM₁₀ 改善程度显著。陕西、安徽、山西分别下降 16.4%、15.3% 和 3.7%，这三省改善较少。2020 年 PM₁₀ 浓度改善程度并不一致，相比 2019 年，京津冀及长三角地区 PM₁₀ 保持下降趋势，山东、陕西改善微弱，仅下降 2.6、1.8 微克/立方米，河南、山西较前年则有反弹，分别增加 1.1、0.8 微克/立方米。

尽管过去六年 PM₁₀ 显著下降，但 PM₁₀ 中空气动力学直径大于 2.5 微米的颗粒物，即 PM_{10-2.5} 的下降速度远低于 PM_{2.5} 的下降速度。相较于 2015 年，“3+95”城市中有 24 个城市 PM_{10-2.5} 年均浓度上升，PM_{10-2.5} 的六年平均下降幅度只有 11.1%。因此我们建议加强对扬尘的管理，有效减少 PM_{10-2.5} 的浓度。

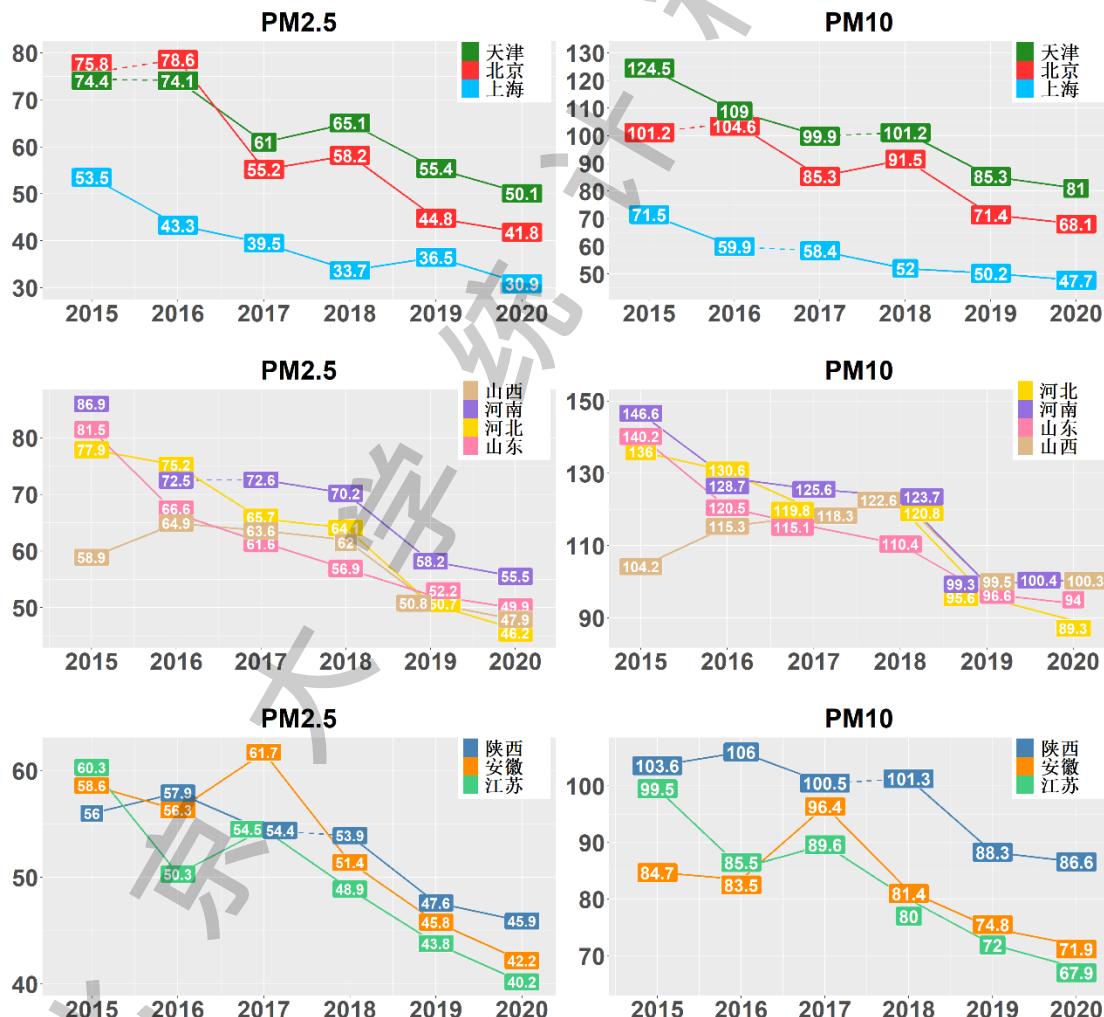


图 39 七省三市去除气象因素影响后 PM_{2.5}、PM₁₀ 年平均浓度时间序列（微克/立方米），实线（虚线）代表在 5% 统计学显著水平比上年有（无）显著增加或减少

(3.2) 二氧化硫和一氧化碳

各省市近些年逐渐推行散煤综合治理和排放改造举措，得益于此七省三市二氧化硫浓度近六年稳步显著下降，河北、河南、山东、山西、陕西、安徽和江苏较 2015 年分别降低 63.4%、71.2%、67.7%、67.1%、48.3%、58.6% 和 66.8%；北京、天津和上海较 2015 年分别下降 61.7%、60.7% 和 57.9%。北京在七省三市中二氧化硫浓度最低，年均仅 4.4 微克/立方米，好于第二低的上海 2.5 微克。区域性二氧化硫的显著下降是七省三市过去几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推手。

一氧化碳的下降幅度小于二氧化硫。相比 2015 年，河北、河南、山东、山西、陕西、安徽和江苏分别降低 38.8%、40.6%、38.5%、42.4%、46%、22.1% 和 25.2%；北京、天津和上海较 2015 年分别下降 42.4%、28.3% 和 16.8%。2020 年河北年均浓度首次降至 1 毫克/立方米以下，北京年均浓度已降至 0.69 毫克/立方米，也低于上海。

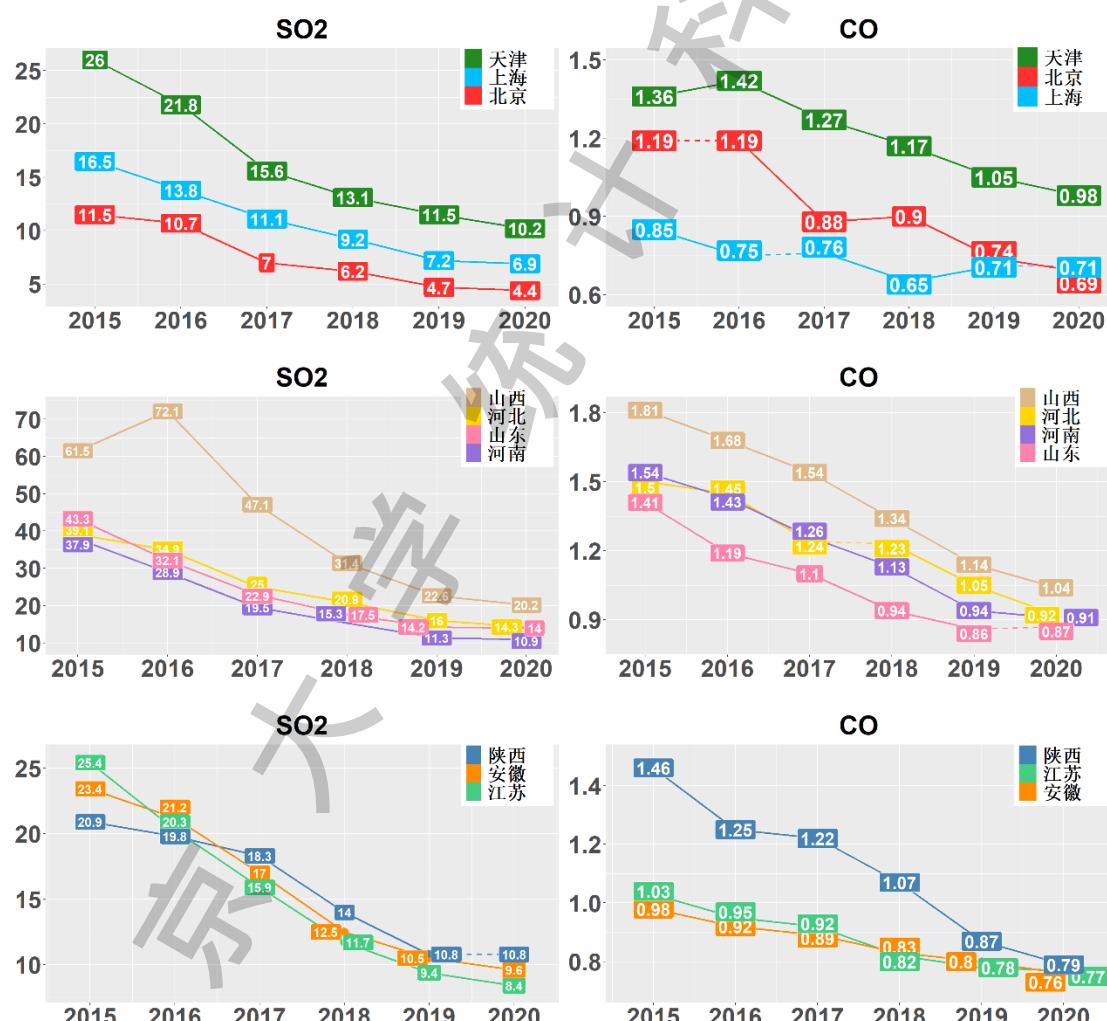


图 40 七省三市去除气象因素影响后二氧化硫（微克/立方米）和一氧化碳（毫克/立方米）年平均浓度时间序列，实线（虚线）代表在 5% 统计学显著水平比上年有（无）显著增加或减少

山西近六年二氧化硫和一氧化碳虽然下降明显，但仍是七省三市中浓度最高的地区，其二氧化硫比第二高的河北高 5.9 微克/立方米，一氧化碳是唯一超过 1 毫克/立方米的省。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一般工业排放、机动车排放和生物质燃烧来使一氧化碳也有更显著的下降，从而促成臭氧减少。

(3.3) 二氧化氮

七省三市二氧化氮改善程度远不及二氧化硫和一氧化碳。相比 2015 年，北京二氧化氮年均浓度下降最为显著，累计减少 31.9%；河北、河南和山东改善程度次之，分别下降 18.5%、18.3% 和 13.3%；江苏和上海也有一定改善，累计下降 8.2% 和 14.6%；陕西和天津几乎维持不变；安徽和山西则上升 2.5% 和 12.8%。

2020 年，北京二氧化氮持续改善，较 2019 年降低 5 微克/立方米。河北、山西、天津和上海较前一年下降 1.9、2、1.4 和 2 微克/立方米；其他省份则无显著改善，变化幅度均在 1 微克/立方米以内，尽管有新冠疫情的影响。

2015 年，在“3+95”城市气象调整后的二氧化氮年平均浓度最高的排名前十名中，河北、河南分别有 4 个城市，其余 2 个城市在山东和江苏。2020 年年平均浓度最高的排名前十位中无山东城市，河北、河南分别占 2、1 个城市，山西、陕西省分别有 3 个城市出现在前十位，天津市排名第八。综合 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、二氧化硫、一氧化碳的结果，山西、陕西和天津此“二省一市”亟需提高大气污染治理的力度。

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。

(3.4) 8 小时臭氧

尽管 2020 年春夏臭氧浓度略有下降，但臭氧污染的问题仍然突出，七省三市过去六年 8 小时臭氧浓度仍呈上升趋势。在浓度最高的春夏两季，相比 2015 年，安徽、天津、山西、河北和河南分别增加 72.2%、48.5%、33.4%、24.4% 和 23%，恶化最为显著；山东和江苏初始污染水平较高，累计增幅分别为 15.1% 和 8.7%；陕西六年累计上升 17.3%，污染程度在评估区域中相对较轻；北京和上海分别保持在 140 和 120 微克/立方米上下波动，北京春夏臭氧浓度高于上海。安徽、山西的春夏平均臭氧浓度分别接近河南和江苏，情况也令人担忧。

2015 年在“3+95”城市气象调整后的臭氧年平均浓度最高的前十个城市中，山东占其中 5 个城市，其余有 3 个在江苏、1 个在山西、1 个为上海。而 2020 年浓度最高的前 9 个城市均在山东省，山东省仍应采取有效措施加快治理臭氧的步伐。我们建议像管控 $\text{PM}_{2.5}$ 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。

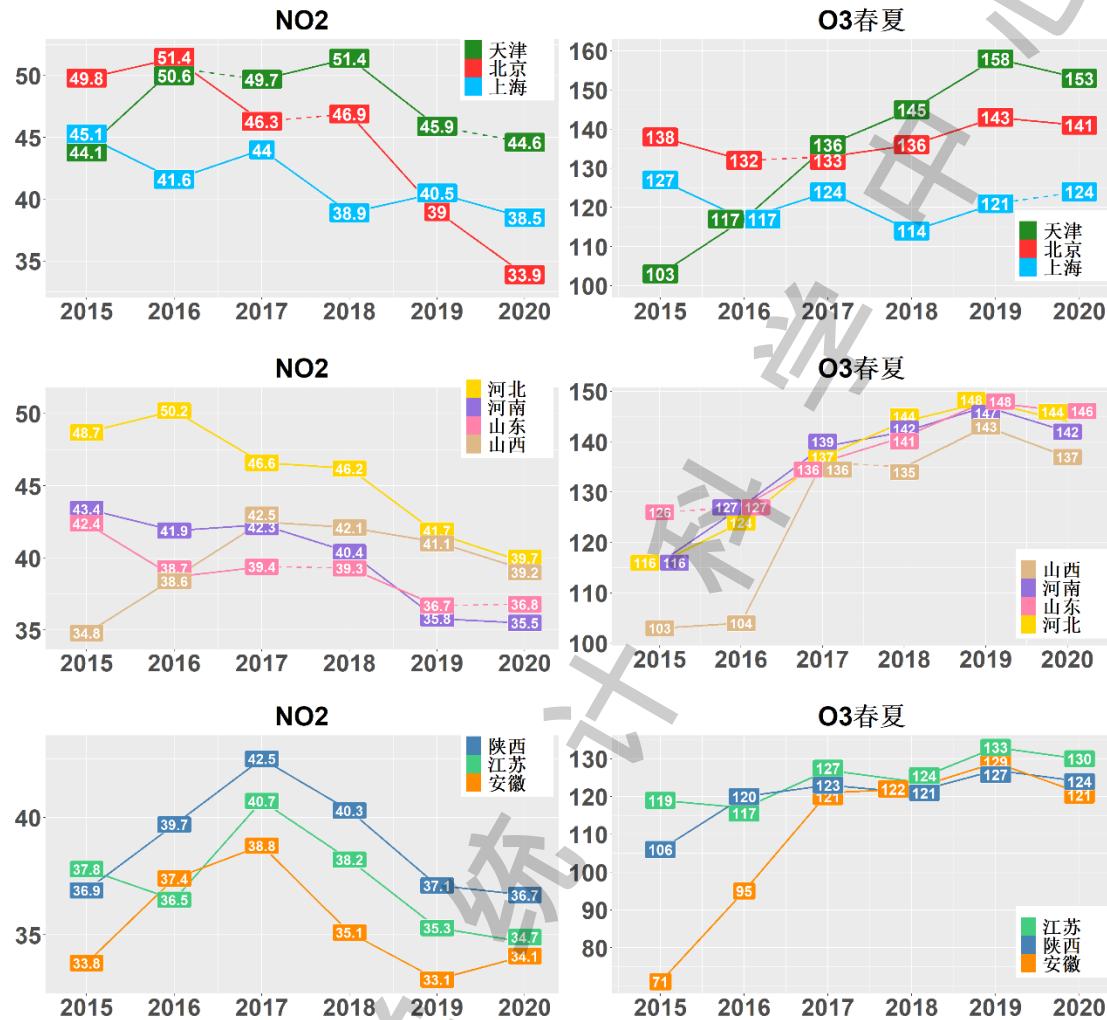


图 41 七省三市去除气象因素影响后二氧化氮和 8 小时臭氧春夏平均浓度时间序列（微克/立方米），实线（虚线）代表在 5% 统计学显著水平比上年有（无）显著增加或减少

(4) 重点监测区域 2015-2020 年污染物变化情况

2020 年生态环境部在京津冀及周边地区“2+26”城市、汾渭平原 11 市的基础上将苏皖鲁豫交界地区也作为大气污染治理的重点区域。本节比较这三个重点监测区域六大主要污染物剔除气象影响后的变化情况。

根据图 42, 2020 年均浓度上，除二氧化氮外的五种污染物均以“2+26”城市污染程度最高，二氧化氮以汾渭平原地区污染程度最高；除臭氧外的五个污染物均以苏皖鲁豫交界地区污染程度最低，臭氧以汾渭平原污染程度最低。相较 2015 年，PM_{2.5}、PM₁₀、二氧化硫、二氧化氮四污染物均以“2+26”城市改善最大，降幅分别为 38.3%、32%、67.3%、17.6%；汾渭平原改善最小，降幅分别为 22.9%、15%、67.3%、-5.4%（即浓度增加）。一氧化碳以汾

渭平原改善最大，累计下降 48.4%；苏皖鲁豫交界地区改善最小，累计下降 31.2%。8 小时臭氧以汾渭平原恶化最多，六年增加 39%；苏皖鲁豫交界地区恶化程度较小，六年增加 18.3%。

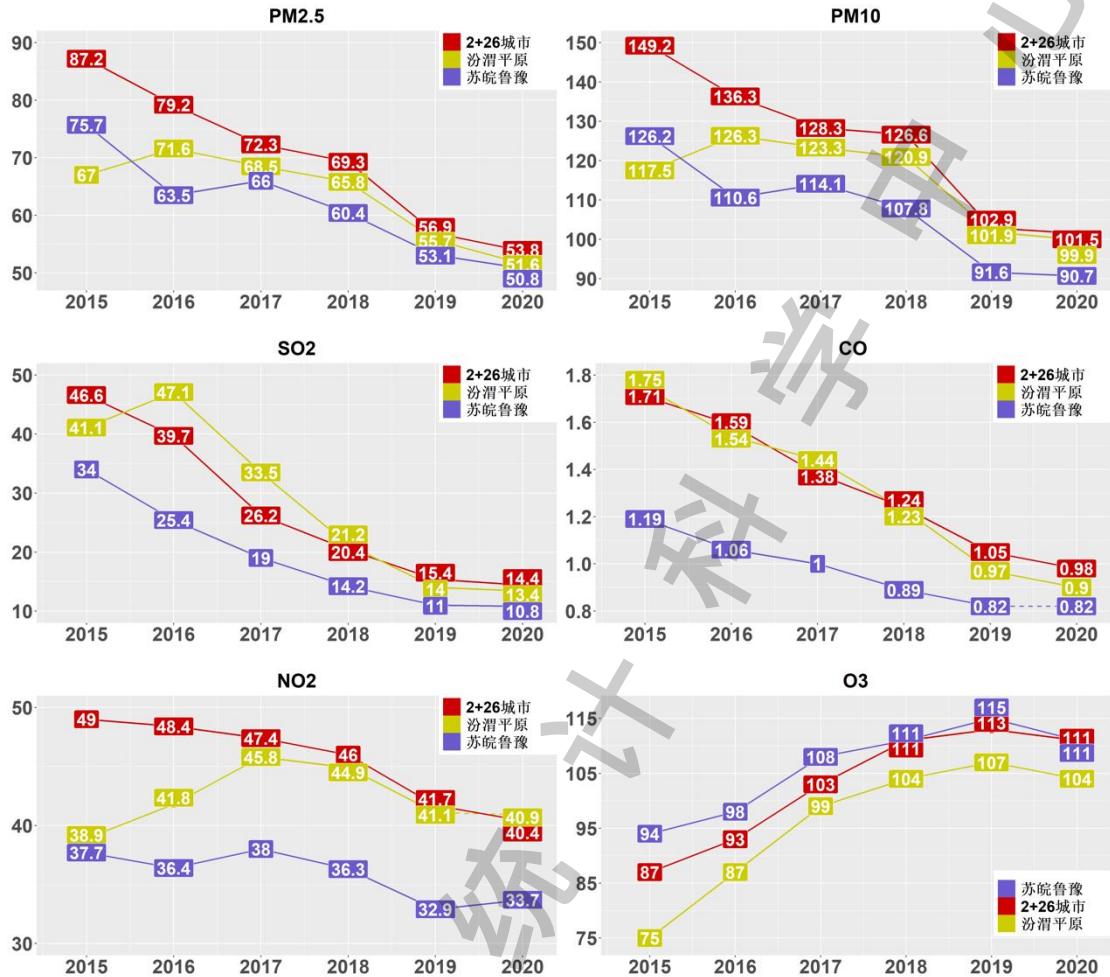


图 42 “2+26”城市、汾渭平原和苏皖鲁豫交界地区六种污染物年平均浓度时间序列图

(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)

从 2015 到 2020 年，三个重点监测区域间的污染差异正逐步缩小。从浓度极差的角度（即三个区域平均浓度最大值与最小值之差），PM_{2.5}、PM₁₀、二氧化硫、二氧化氮和臭氧五个污染物的极差分别从 20.3、31.7、12.6、11.3、18.9 微克/立方米下降至 3.1、10.8、3.6、7.3、7.1 微克/立方米；一氧化碳则从 0.57 毫克/立方米下降至 0.17 毫克/立方米。对于 PM_{2.5} 和 8 小时臭氧，2020 年三个区域污染水平已十分接近，两种污染物协同治理将是三个区域的共同挑战。苏皖鲁豫交界地区虽然在臭氧外的五个污染物有着三个区域最低的污染浓度，且臭氧浓度在三个区域也排在第二，但伴随着区域间污染差异缩小，其污染程度较其他两个区域不再呈现出显著优势。该地区仍应保持污染治理力度，避免被其他两个地区所超越。

（5）极端污染

极端污染是衡量空气质量的另一重要标准，如美国的考核指标是 PM_{2.5} 日均浓度 98% 分位数浓度不超过 35 微克/立方米，8 小时臭氧每年第四高日均浓度不超过 137 微克/立方米

[26]。报告第四章给出了各市 PM_{2.5} 和 8 小时臭氧的 90% 分位数浓度，用以衡量各城市污染最严重的 10% 天数的污染情况，这相比 98% 分位数和年第四高浓度是较为宽松的标准，但比均值浓度要严格。

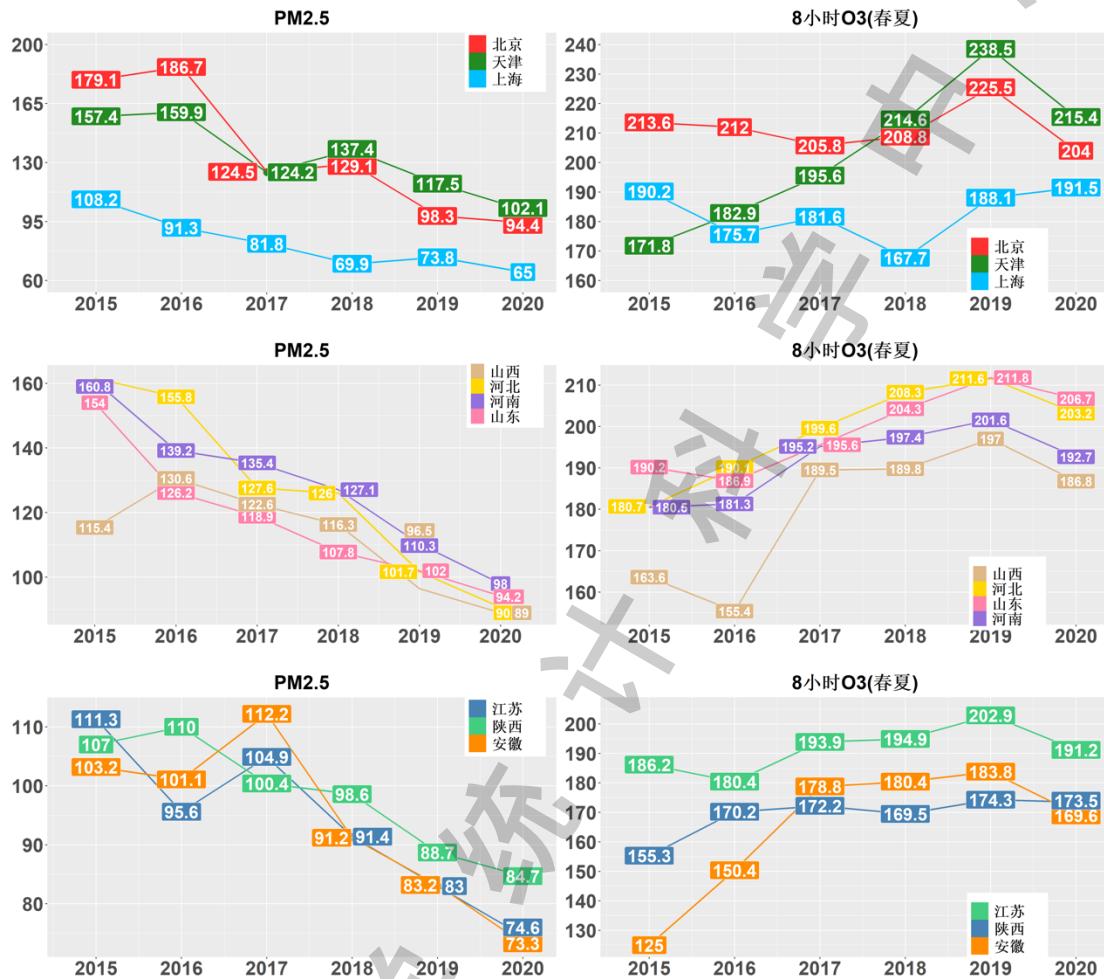


图 43 七省三市去除气象因素影响后 PM_{2.5} 和 8 小时臭氧（春夏）90% 分位数时间序列图，实线（虚线）代表在 5% 统计学显著水平比上年有（无）显著增加或减少

图 43 给出七省三市 2015 至 2020 年 PM_{2.5} 和 8 小时臭氧年平均 90% 分位数浓度的变化趋势。综合各区域来看，伴随 PM_{2.5} 均值浓度下降，其 90% 分位数也呈现出明显下降趋势，“3+95”城市 90% 分位数均值从 2015 年的 132.8 微克/立方米下降至 2020 年的 86.6 微克/立方米，降幅达 34.7%。其中北京和河北下降最为明显，降幅分别为 47.3% 和 43.9%；河南、山东、上海和天津次之，降幅分别 39%、38.9%、39.9% 和 35.2%；安徽、江苏和陕西改善程度略低，下降 29.1%、32.9% 和 20.9%，但这三省 90% 分位数浓度远低于其他四个省份。2020 年 PM_{2.5} 极端污染仍以京津冀及周边地区较重，其中天津和河南 90% 分位数浓度最高，分别为 102.1 和 99.1 微克/立方米；北京和山东极端污染情况次之，分别为 94.4 和 94.2 微克/立方米；山西、陕西略低，分别为 89、84.7 微克/立方米；安徽、江苏和上海则不超过 75 微克/立方米。

虽然 PM_{2.5} 的 90% 分位数六年来有显著改善，“3+95”城市中仍有 29 个城市 90% 分位数浓度超过 100 微克/立方米。而在污染最高的冬季，“3+95”城市 90% 分位数浓度平均值可达 135.8 微克/立方米，共 34 个城市超过 150 微克/立方米，这意味着冬季至少有 9 天达到重度污染。因此在污染物平均浓度普遍改善的情形下，分位数浓度也应纳入考核考量标准，减少极端污染对人群健康的伤害。

2020 年春夏 8 小时臭氧的 90% 分位数浓度在除上海外的省市也有普遍的下降。相比 2015 年春夏，除北京外的七省二市均无改善迹象，其中，安徽和天津春夏 8 小时臭氧 90% 分位数浓度分别上升 35.4% 和 25.4%，极端污染恶化最为严重；其他省市则有不同程度的恶化趋势，其中河北、山西、陕西恶化较明显，分别上升 12.4%、14.2%、11.7%；山东、河南增长较为平缓，增幅分别为 8.7%、6.8%；江苏和上海则无显著改变，近年基本在 190 微克/立方米上下波动；北京虽然五年累计有下降，但 90% 分位数浓度仍处于 204 微克/立方米的高位，仅低于天津（215 微克/立方米）和山东（206 微克/立方米）。

（6）提高空气质量“良”的标准

通过分析“3+95”城市过去五年的空气优良率，中国空气质量已有非常显著的改善。“3+95”城市 PM_{2.5} 年平均浓度已从 2015 年 69.9 微克/立方米，降至 2020 年的 47 微克/立方米，2020 年气象调整后年均浓度最高省市为 61.3 微克/立方米，超半数城市（54 个）年均浓度低于 50 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，提高预警范围，以减少中国公民的长期污染暴露水平。

如本报告第三章所示，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 16%，但所有城市“优良空气”占比都超过 54%，其中 47 个城市优良空气占比仍在 70% 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，将提高我国污染等级提示的标准，将使我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。

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2010-2014年PM2.5污染状况研究, 2015年3月. (http://songxichen.gsm.pku.edu.cn/images/Air_Quality_Assessment_Report_I_201503.pdf)
- [2] 北京大学统计科学中心环境统计组(2016). 空气质量评估报告(二): 中国五城市空气污染状况之统计学分析, 2016年3月. (http://songxichen.gsm.pku.edu.cn/images/Air_Quality_Assessment_Report_II_20160903.pdf)
- [3] 北京大学统计科学中心环境统计组(2017). 空气质量评估报告(三): 北京2013-2016年区域污染状况评估, 2017年3月. (http://songxichen.gsm.pku.edu.cn/images/Air_Quality_Assessment_Report_III_20170317.pdf)
- [4] 北京大学统计科学中心环境统计组(2017). 空气质量评估报告(四): 京津冀2013-2016年区域污染状况评估, 2017年8月. (http://songxichen.gsm.pku.edu.cn/images/JJJ_report_1101_Final_WaterMarked.pdf)
- [5] 北京大学统计科学中心环境统计组(2018). 空气质量评估报告(五): “2+31”城市2013-2017年区域污染状况评估, 2018年4月. (http://songxichen.gsm.pku.edu.cn/images/231_cities_0410c.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_20190412.pdf)
- [7] 北京大学统计科学中心环境统计组(2020). 空气质量评估报告(七): “2+66”城市2013-2019年区域污染状况评估, 2020年7月. (https://songxichen.com/Uploads/Files/Report/Air_Quality_Assessment_Report_VII.pdf)
- [8] 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.
- [9] 中国国务院(2013), 大气污染防治行动计划, 国发〔2013〕37号.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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)
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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>)

- [17] Liang, X., Li, S., Zhang, S., Huang, H., and Chen, S. X. (2016). PM2.5 data reliability, consistency and air quality assessment in five Chinese cities. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121, doi: 10.1002/2016JD024877.
(<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2016JD024877/epdf>)
- [18] 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>)
- [19] 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.
- [20] 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>)
- [21] 唐孝炎,张远航,邵敏(2016), 大气环境化学: 第二版, 365-446.
- [22] Cochran, W.G. (1968). The effectiveness of adjustment by subclassification in removing bias in observational studies, *Biometrics*, 295-313, 24(2).
- [23] 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.
- [24] 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>)
- [25] Zheng X., Guo B., He J., and Chen S.X. (2021). Effects of COVID-19 Control Measures on Air Quality in North China, *Environmetrics*, e2673.
- [26] EPA, OAR, US. (2021). NAAQS Table | US EPA. (<https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>)

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



罗山杉，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



王艺纯，北京大学数学科学学院本科生



詹皓翔，北京大学数学科学学院本科生



王心怡，北京大学元培学院本科生



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



郭 斌，西南财经大学统计研究中心、统计学院副教授



陈松蹊，北京大学光华管理学院、统计科学中心、数学科学学院讲席教授，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光华思想力项目、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，北京大学陶澍院士、张远航院士、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、王横放在数据库方面一如既往地协助与努力。感谢牟修瑞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，及统计科学中心王彦懿，穆慧娜的协助。

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://songxichen.com/Uploads/Files/Report/Air%20Quality%20Assessment%20Report_I_201503.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://songxichen.com/Uploads/Files/Report/Air%20Quality%20Assessment%20Report_II_20160903.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://songxichen.com/Uploads/Files/Report/Air%20Quality%20Assessment%20Report_III_20170317.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://songxichen.com/Uploads/Files/Report/JJJ_report_1101_Final_WaterMarked.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://songxichen.com/Uploads/Files/Report/231cities_0410c.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://songxichen.com/Uploads/Files/Report/Air%20Quality%20Assessment%20Report_VI_20190412.pdf

空气质量评估报告(七): “2+66”城市 2013-2019 年区域污染状况评估, 2020 年 7 月.

https://songxichen.com/Uploads/Files/Report/Air_Quality_Assessment_Report_VII.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

大数据分析与应用技术国家工程实验室
bda.pku.edu.cn