

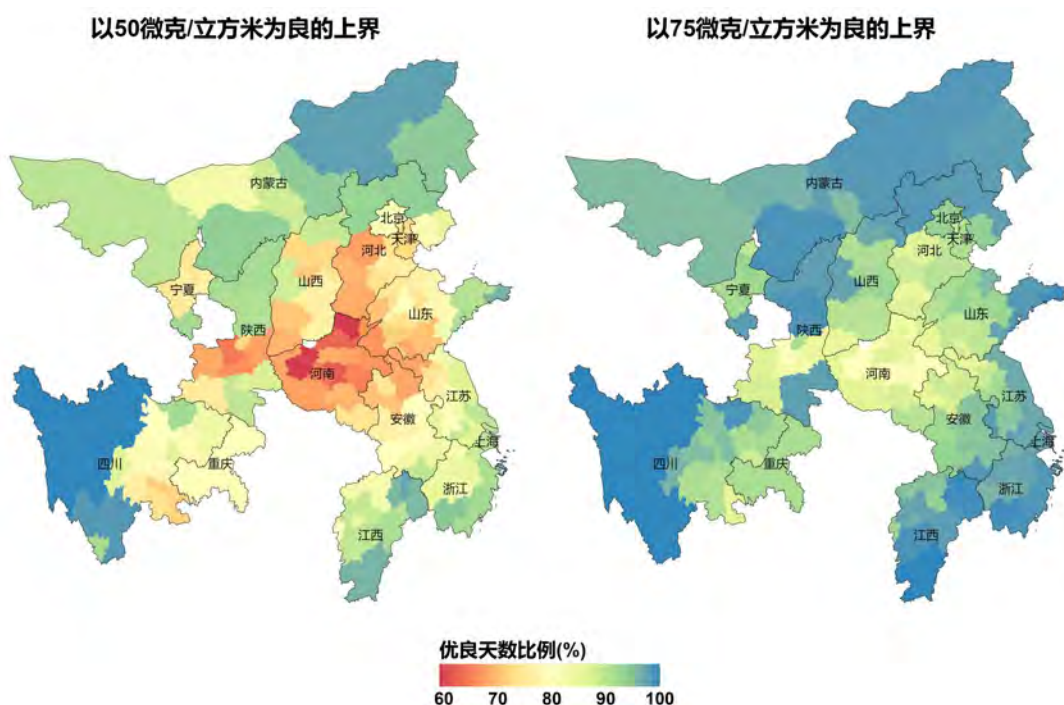
空气质量评估报告（十二）

“4+151”城市 2013-2024 年空气质量评估

为了蓝天

让我们用数据解读污染

2024年城市PM_{2.5}优良天数比例



清华大学统计与数据科学系

北京大学统计科学中心

西南财经大学统计交叉创新研究院

江西财经大学财经数据科学重点实验室

二零二五年三月

前言

这是本环境统计团队完成的第十二份空气质量评估报告，也标志着我们对中国重点区域的空气质量追踪评估进入第十一个年头。本报告基于 R 语言和 Python 自动化生成主体内容。其通过学习包括我们已发布的空气质量报告文本、历年空气污染物调整浓度数据、监测点数据，采用固定与动态阈值判断、显著性检验等统计方法，自动化输出图像和文本，最后通过固定的 LaTeX 模板整合生成报告。部分内容还通过大语言模型进行润色，在确保报告结果的准确性和唯一性的基础上增强语言表达的多样性。

已发布的系列报告中，报告一 [1] 分析了北京城区 2010 至 2014 年基于单站点（美国大使馆）的 $PM_{2.5}$ 污染状况；报告二 [2] 分析了中国五城市 2013 至 2015 年 $PM_{2.5}$ 浓度的变化趋势，对比了美国使领馆和相邻国控站点两个数据源的数据质量和一致性；报告三 [3] 集中研究了北京市全部（36 个）空气质量监测站点 2013 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；报告四 [4] 分析了京津冀地区 13 个城市 73 个国控站点 2013 年至 2017 年 5 月六种常规污染物的变化趋势；报告五 [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 至 2017 年的状态和变化趋势；报告六 [6] 综合评估了“2+43”城市（增加汾渭平原 11 市和延安市）247 个国控站点 2013 至 2018 年的状态和变化趋势；报告七 [7] 综合评估了“2+66”城市（补齐山东、河南、山西、陕西余下的城市）354 个国控站点 2013 至 2019 年的状态和变化趋势，并对新冠肺炎的影响进行了评估。报告八 [8] 综合评估了“3+95”城市（增加上海、安徽、江苏全部地级及以上共 30 个城市）520 个国控站点 2013 至 2020 年的状态和变化趋势。报告九 [9] 综合评估了“3+99”城市（增加内蒙古呼和浩特、包头、鄂尔多斯和乌兰察布共 4 个城市）548 个国控站点 2013 至 2021 年的状态和变化趋势。报告十 [10] 综合评估了“3+110”城市（增加江西省 11 个城市）620 个国控站点 2013 至 2022 年的状态和变化趋势。报告十一 [11] 综合评估了“3+130”城市（增加宁夏 5 市、浙江 11 市和内蒙古赤峰、锡林郭勒、巴彦淖尔和阿拉善 4 个城市）873 个国控站点 2013 至 2023 年的状态和变化趋势，比较了空气污染相对疫情前（2019 年）水平的变化。

本报告在上一份报告基础上增加重庆市和四川省 18 个地级市 3 个自治州，共新增了 22 个城市 128 个国控站点，这使得评估城市的总数为 155，统称“4+151”城市。报告将基于上述十二省四市“4+151”城市近 12 年的气象和污染数据，给出六种常规空气污染物的变化趋势和最近一年污染程度的评估。

感兴趣的读者可以参考目录，根据需求选择阅读的章节，亦可直接阅读第 6 章查看主要结论与建议。

为了方便各级环保部门和公众获取报告的评估结果，我们上线了空气质量评估平台 (<http://songxichen.com/AQAssess/#/home>)，将自 2013 年起各市经过气象调整和原始空气污染物浓度给出时间序列的可视化，并进行城市间的横向、纵向比较和分析。用户可以提出申请生成适合于自己省市的评估报告。

目录

1 背景介绍	1
2 采用数据说明	2
3 六种常规空气污染物评估	5
3.1 PM _{2.5}	5
3.1.1 PM _{2.5} 季度评估	5
3.1.2 PM _{2.5} 年度评估：年度变化趋势与城市相对排名	9
3.1.3 PM _{2.5} 极端污染（90% 分位数）	15
3.2 PM ₁₀	19
3.2.1 PM ₁₀ 季度评估	19
3.2.2 PM ₁₀ 年度评估：年度变化趋势与城市相对排名	23
3.2.3 PM _{10-2.5} 的浓度	26
3.3 二氧化硫	31
3.3.1 二氧化硫季度评估	32
3.3.2 二氧化硫年度评估：年度变化趋势与城市相对排名	41
3.4 一氧化碳	42
3.4.1 一氧化碳季度评估	45
3.4.2 一氧化碳年度评估：年度变化趋势与城市相对排名	47
3.5 二氧化氮	52
3.5.1 二氧化氮季度评估	53
3.5.2 二氧化氮年度评估：年度变化趋势与城市相对排名	59
3.6 8 小时臭氧	63
3.6.1 8 小时臭氧季度评估	63
3.6.2 8 小时臭氧年度评估：年度变化趋势与城市相对排名	68
3.6.3 8 小时臭氧极端污染（90% 分位数）	70
4 六种常规空气污染物综合评价	76
5 人努力-天帮忙指数	89
5.1 PM _{2.5} 的“人努力-天帮忙”情况	90

5.1.1	2024 年 PM _{2.5} 的“人努力”情况	90
5.1.2	2024 年 PM _{2.5} 的“天帮忙”情况	91
5.2	O ₃ 的“人努力-天帮忙”情况	94
5.2.1	2024 年 O ₃ 的“人努力”情况	94
5.2.2	2024 年 O ₃ 的“天帮忙”情况	95
6	主要结论与建议	98
6.1	后疫情时期 PM _{2.5} 及其前体物首迎大范围改善	98
6.2	臭氧污染加重，重点区域多城市浓度回升	99
6.3	京津空气质量差距明显，沪渝二氧化硫和一氧化碳浓度偏高	101
6.4	“十四五”空气质量目标：6 省市有望达标，10 省市存在挑战	103
6.5	臭氧极端污染风险上升，PM _{2.5} 极端污染改善	103
6.6	臭氧和 PM _{2.5} 仍是主要污染物，标准修订为二氧化氮治理加压	104
6.7	提高空气质量“良”的标准	105

1 背景介绍

2013年9月，国务院发布《大气污染防治行动计划》[12]（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》[13]。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》[14]，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》[15]，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。2021年11月，国务院印发《关于深入打好污染防治攻坚战的意见》[16]，明确了“十四五”期间细颗粒物与臭氧污染治理的任务：在2025年地级及以上城市细颗粒物（PM_{2.5}）浓度下降10%，空气质量优良天数比率达到87.5%；全国重度及以上污染天数控制在1%以内；挥发性有机物与氮氧化物的排放量下降至少10%，臭氧浓度增长趋势得到有效遏制。2023年11月，国务院印发《空气质量持续改善行动计划》[17]，将全国大气污染防治重点城市总数调整为82个（本次报告已全部覆盖），细化区域空气质量改善目标：“到2025年，京津冀及周边地区、汾渭平原PM_{2.5}浓度分别下降20%、15%，长三角地区PM_{2.5}浓度总体达标，北京市控制在32微克/立方米以内”。

在《空气质量持续改善行动计划》中，全国大气污染防治重点区域城市进行了调整。京津冀及周边地区由原来的“2+26”城市调整为“2+36”城市，新增河北秦皇岛、山东枣庄、东营、潍坊、泰安、日照和临沂6个城市，河南洛阳、平顶山、许昌、漯河、三门峡、商丘和周口7个城市。同时，原“2+26”城市中山西省的太原、阳泉、长治和晋城4个城市纳入汾渭平原，洛阳和三门峡划入“2+36”城市。当前汾渭平原共包括山西和陕西的13个重点城市。长三角地区包括上海市、江苏省、浙江和安徽的部分重点城市，共31市。此次调整后，京津冀及周边地区、长三角地区连为一体，同省的城市只在一个重点区域内，更有利于开展大范围的区域联防联控，降低相关行政成本。各重点区域城市划分参看第二章数据说明。“2+36”城市大多地处太行山与泰沂山脉之间，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。近年华北和江淮地区臭氧污染持续严重，特别是在夏季，已成为导致部分城市空气质量超标的首要因子。

在本次空气质量报告（十二）中，我们继续沿用《空气质量持续改善行动计划》的大气污染防治重点区域划分，并根据2024年国控空气质量监测站点的连续监测数据，对重点区域及周边城市的空气质量进行了剔除气象的空气质量评估。相较于2024年发布的报告（十一），本年度报告新增西南地区的重庆市，和四川省的成都、南充、泸州、巴中、绵阳、宜宾、自贡、广元、内江、遂宁、眉山、广安、达州、雅安、乐山、资阳、攀枝花、德阳等22个城市，以提供更全面、客观的空气质量现状与年际变化趋势信息，助力大气污染防治工作的深入开展。

2 采用数据说明

自 2013 年 1 月 1 日起,我国开始运行大气污染监测网络,实时监测六种常规污染物 (PM_{2.5}、PM₁₀、二氧化硫 (SO₂)、二氧化氮 (NO₂)、一氧化碳 (CO) 和臭氧 (O₃)) 的浓度。本报告所使用的小时频率空气污染物数据来自于生态环境部的国控空气质量监测站点,共包含 12 省 4 市 (即河北、河南、山东、山西、陕西、四川、安徽、江苏、江西、浙江、内蒙古、宁夏,以及北京、天津、上海、重庆市) 共“4+151”个地级及以上城市辖区内 977 个国控空气质量监测站点,不包含省控站点、对照点和地级市代管县级市国控点。以城市为单位统计,研究区域涵盖全国约 57.2% 的人口。自 2024 年开始,本团队发布系列报告按照 2023 年国务院发布的《空气质量持续改善行动计划》将研究区域城市重新进行划分,分为三大大气污染防治重点区域——京津冀及周边“2+36”城市 (用红色标记)、汾渭平原 (含 2 省 13 地级市,用橙色标记)、长三角地区 (含 4 省 31 地级及以上市,用紫色标记),以及区域内其他城市 (用灰色标记)。与报告 (十) 相比,京津冀及周边“2+26”城市调整为“2+36”城市;苏皖鲁豫交界地区不再单独分类,其中重点城市分别划归“2+36”城市和长三角地区 (山东枣庄、东营、潍坊、泰安、日照和临沂,河南平顶山、许昌、漯河、商丘和周口调整到“2+36”城市;安徽淮北、阜阳、宿州、亳州,江苏徐州、连云港、宿迁调整到长三角地区;河南南阳、信阳、驻马店,山东青岛调整到“其他城市”);汾渭平原仅包含山西和陕西两省;区域内所有非重点城市统一标记为“其他城市”。

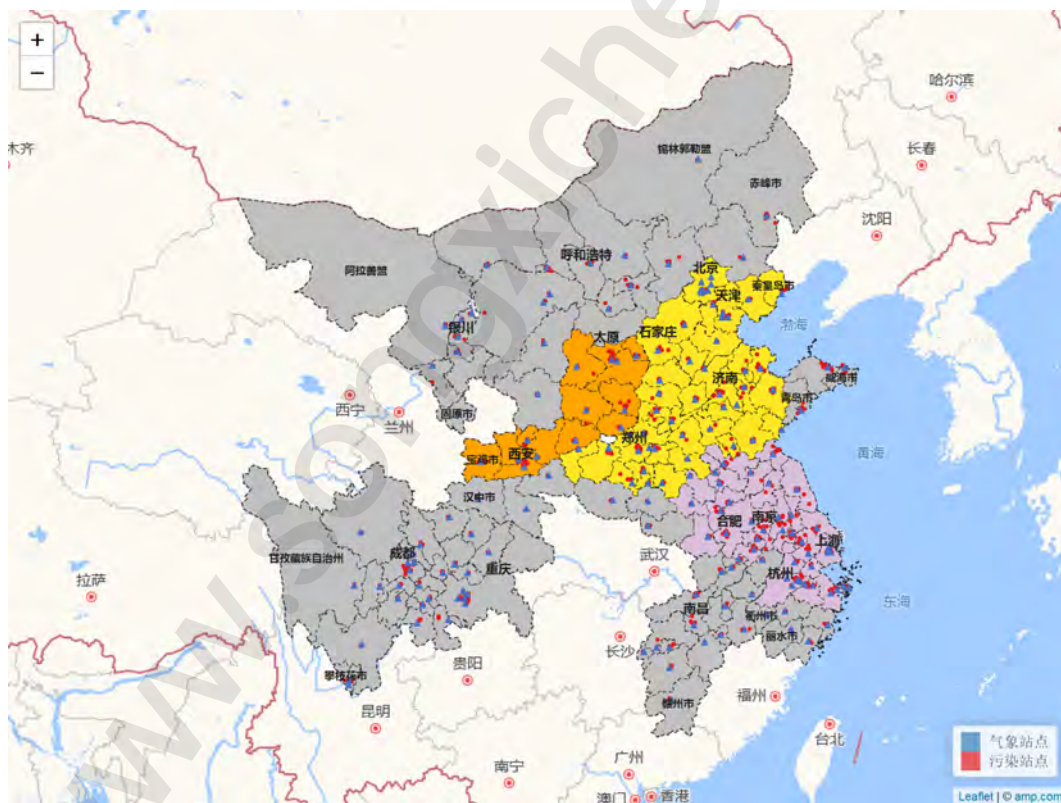


图 1: “4+151”城市区划及其站点分布 (●代表空气质量监测站点, △代表气象站点) (图中黄色区域为京津冀及周边地区, 橙色区域为汾渭平原, 紫色区域为长三角地区, 灰色区域为“其他城市”)

按照省市口径统计,纳入报告评估范围的地级及以上城市清单及监测站点数量如下:

- 北京市：11 个国控空气质量监测站
- 天津市：15 个国控空气质量监测站
- 上海市：9 个国控空气质量监测站
- 重庆市：20 个国控空气质量监测站
- 河北省：11 个地级市 (石家庄、唐山、秦皇岛、邯郸、邢台、保定、沧州、廊坊、衡水、张家口、承德) 共 61 个国控空气质量监测站
- 河南省：17 个地级市 (郑州、开封、洛阳、平顶山、安阳、鹤壁、新乡、焦作、濮阳、许昌、漯河、三门峡、商丘、周口、南阳、信阳、驻马店) 共 106 个国控空气质量监测站
- 山东省：16 个地级市 (济南 (含莱芜)、淄博、枣庄、东营、潍坊、济宁、泰安、日照、临沂、德州、聊城、滨州、菏泽、青岛、烟台、威海) 共 120 个国控空气质量监测站
- 山西省：11 个地级市 (太原、阳泉、长治、晋城、晋中、运城、临汾、吕梁、大同、朔州、忻州) 共 79 个国控空气质量监测站
- 陕西省：10 个地级市 (西安、铜川、宝鸡、咸阳、渭南、延安、汉中、榆林、安康、商洛) 共 45 个国控空气质量监测站
- 四川省：21 个地级市 (成都、自贡、攀枝花、泸州、德阳、绵阳、广元、遂宁、内江、乐山、南充、眉山、宜宾、广安、达州、雅安、巴中、资阳、阿坝、甘孜、凉山) 共 108 个国控空气质量监测站
- 安徽省：16 个地级市 (合肥、芜湖、蚌埠、淮南、马鞍山、淮北、滁州、阜阳、宿州、六安、亳州、铜陵、安庆、黄山、池州、宣城) 共 93 个国控空气质量监测站
- 江苏省：13 个地级市 (南京、无锡、徐州、常州、苏州、南通、连云港、淮安、盐城、扬州、镇江、泰州、宿迁) 共 114 个国控空气质量监测站
- 江西省：11 个地级市 (南昌、景德镇、萍乡、九江、新余、鹰潭、赣州、吉安、宜春、抚州、上饶) 共 72 个国控空气质量监测站
- 浙江省：11 个地级市 (嘉兴、宁波、杭州、湖州、绍兴、舟山、丽水、台州、温州、衢州、金华) 共 57 个国控空气质量监测站
- 内蒙古自治区：8 个地级行政单位 (呼和浩特、包头、赤峰、鄂尔多斯、巴彦淖尔、乌兰察布、锡林郭勒、阿拉善盟) 共 42 个国控空气质量监测站
- 宁夏回族自治区：5 个地级市 (银川、石嘴山、吴忠、固原、中卫) 共 25 个国控空气质量监测站

本报告给出调整气象的空气质量评估结果，用统计学方法剔除气象因素的影响，得到可比的污染（参看第三章介绍）。气象数据方面，河北、河南、山东、山西、陕西、四川、安徽、江苏、江西、浙江、内蒙古

和宁夏 12 省 150 个地级市的气象数据主要来源于对应城市的气象站点；北京市的气象数据来源于朝阳、海淀、丰台、昌平、顺义、怀柔和石景山共 7 个气象站点；天津市中心城区的气象数据来源于西青、北辰和东丽共 3 个气象站点；上海市的气象数据来源于上海、浦东和宝山共 3 个气象站点；重庆市的气象数据来自北碚、渝北、璧山、沙坪坝、巴南共 5 个气象站点。我们将空气质量站点与最近的气象站点进行匹配。图 1 给出上述区域内纳入评估的 977 个污染物监测站点和与之相匹配的 180 个气象站点的位置。

本报告选取的总时间区间为 2013 年 3 月到 2025 年 2 月。由于空气质量新标准按照“三步走”实施方案分阶段开展监测，研究能获取到城市空气质量监测数据的时间起点不完全一致，我们对各市的评估以各市实际开展监测的时间为准。本团队发布系列报告使用的“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。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 月到次年 2 月。

WWW.SONGXICHEN.COM

3 六种常规空气污染物评估

为了客观和公平地评价空气质量，我们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。本报告沿用前十份报告所使用的统计学气象调整方法，剔除气象因素的影响，得到可比的污染指标。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，并在此范围下以 2011 年 3 月-2021 年 2 月累计十年气象构造平均气象分布，计算各年污染物在此平均气象分布下的浓度。我们之所以采用这十年的气象数据，是为了构造稳定的基准气象条件，同时确保不同年间相似气象条件时间占比不会过少。我们在此基准气象条件下计算“4+151”个城市各季度污染物的平均值浓度，并对其进行比较和分析。关于气象调整的统计学原理，读者可以参看本团队发表的论文 [18-22]。

由于春季期间沙尘天气会造成 PM_{10} 浓度的急剧上升，导致这一指标的高估，空气质量评估中通常会将这一时段剔除。本报告沿用了报告（十）所用的本团队提出的沙尘过程检测和追踪程序 [23]。该方法基于“4+151”城市及周边甘肃、辽宁和内蒙其余城市地面站点的六种污染物浓度小时数据，基于 PM_{10} 浓度变化及与其他三种污染物 CO 、 NO_2 和 SO_2 的协方差矩阵，辅以 PM_{10} 同其他污染物的相关性变化，检测沙尘过程时间和空间变化点，并将对应时段六个污染物浓度予以去除。

3.1 $PM_{2.5}$

$PM_{2.5}$ 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，其中与心肺疾病的相关性更为明显。我国目前的 $PM_{2.5}$ 平均浓度标准如表 1 所示。

表 1: 我国目前 $PM_{2.5}$ 平均浓度标准

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

图 2-4、图 5 和图 11-13 分别展示了“4+151”城市 $PM_{2.5}$ 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、 $PM_{2.5}$ 经气象调整的季节 90% 分位数浓度时间序列图。根据上述图表，我们可以总结出 $PM_{2.5}$ 浓度如下几个特征：

3.1.1 $PM_{2.5}$ 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。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。

2018 年春季“4+151”城市 $PM_{2.5}$ 浓度均值（标准误差）为 49.7(1) 微克/立方米，2024 年下降至 36.7(0.7) 微克/立方米，累计降幅 26.2%；年均下降 2.2 微克/立方米。与 2019 年浓度均值 43.9(0.9)

微克/立方米相比，下降 7.2(0.5) 微克/立方米；与 2023 年浓度均值 39.7(0.7) 微克/立方米相比，下降 3(0.4) 微克/立方米，降幅 7.6%。

与 2023 年春季相比，“4+151”城市中，有 90 个城市 PM_{2.5} 浓度均值显著下降，占比 58.1%，降幅平均值为 14.6%；有 20 个城市 PM_{2.5} 浓度均值显著上升，占比 12.9%，升幅平均值为 13.5%。2024 年春季，焦作平均浓度最高，为 53.6 微克/立方米；甘孜平均浓度最低，为 11 微克/立方米。有 90 个城市平均浓度超过国家年平均浓度二级标准。承德为本季度 PM_{2.5} 同比改善幅度最大城市，平均浓度相比 2023 年同期的 41 微克/立方米下降 37.4%。重点区域中，有 3 个城市浓度降幅超过 20%，包括京津冀及周边地区的邢台，汾渭平原的渭南、太原。六安为浓度同比升幅最大城市，平均浓度相比去年同期的 33.9 微克/立方米上升 23.3%；此外还有 4 个城市升幅超过 20%，分别为吕梁、阜阳、周口、蚌埠。PM_{2.5} 浓度显著上升城市主要集中于河南、四川，分别有 8、6 个城市浓度上升。

2018 年夏季“4+151”城市 PM_{2.5} 浓度均值（标准误差）为 30.5(0.6) 微克/立方米，2024 年下降至 23.3(0.5) 微克/立方米，累计降幅 23.6%；年均下降 1.2 微克/立方米。与 2019 年浓度均值 28.5(0.6) 微克/立方米相比，下降 5.2(0.4) 微克/立方米；与 2023 年浓度均值 22.5(0.4) 微克/立方米相比，上升 0.8(0.3) 微克/立方米，升幅 3.6%。

与 2023 年夏季相比，“4+151”城市中，有 40 个城市 PM_{2.5} 浓度均值显著下降，占比 25.8%，降幅平均值为 16.1%；有 74 个城市 PM_{2.5} 浓度均值显著上升，占比 47.7%，升幅平均值为 15.5%。2024 年夏季，忻州平均浓度最高，为 36.2 微克/立方米；黄山平均浓度最低，为 10 微克/立方米。有 3 个城市平均浓度超过国家年平均浓度二级标准。景德镇为本季度 PM_{2.5} 同比改善幅度最大城市，平均浓度相比 2023 年同期的 21.4 微克/立方米下降 34.9%。重点区域中，有 2 个城市浓度降幅超过 20%，均位于长三角地区，包括南通、湖州。驻马店为浓度同比升幅最大城市，平均浓度相比去年同期的 19.5 微克/立方米上升 33.5%。重点区域中，有 11 个城市浓度升幅超过 20%，包括京津冀及周边地区的 8 个城市（鹤壁、平顶山、石家庄、沧州、天津、保定、衡水、秦皇岛），长三角地区的阜阳、宿州、滁州。PM_{2.5} 浓度显著上升城市主要集中于山东、四川、河北、河南，分别有 13、12、10、10 个城市浓度上升。

2018 年秋季“4+151”城市 PM_{2.5} 浓度均值（标准误差）为 43.8(1.2) 微克/立方米，2024 年下降至 34.9(1) 微克/立方米，累计降幅 20.3%；年均下降 1.5 微克/立方米。与 2019 年浓度均值 43.8(1) 微克/立方米相比，下降 8.9(0.6) 微克/立方米；与 2023 年浓度均值 37.3(0.9) 微克/立方米相比，下降 2.4(0.5) 微克/立方米，降幅 6.4%。

与 2023 年秋季相比，“4+151”城市中，有 86 个城市 PM_{2.5} 浓度均值显著下降，占比 55.5%，降幅平均值为 18.7%；有 30 个城市 PM_{2.5} 浓度均值显著上升，占比 19.4%，升幅平均值为 21.1%。2024 年秋季，濮阳平均浓度最高，为 65.2 微克/立方米；甘孜平均浓度最低，为 8.4 微克/立方米。有 65 个城市平均浓度超过国家年平均浓度二级标准。扬州为本季度 PM_{2.5} 同比改善幅度最大城市，平均浓度相比 2023 年同期的 36 微克/立方米下降 34.6%。重点区域中，有 20 个城市浓度降幅超过 20%，包括京津冀及周边地区的东营、枣庄、莱芜、潍坊，长三角地区的 16 个城市（扬州、镇江、马鞍山、泰州、芜湖、南通、无锡、常州、南京、连云港、杭州、盐城、苏州、宿迁、淮北、宿州）。张家口为浓度同比升幅最大城市，平均浓度相比去年同期的 16.5 微克/立方米上升 36.3%。重点区域中，有 8 个城市浓度升幅超过 20%，包括京津冀及周边地区的漯河、洛阳，汾渭平原的 6 个城市（渭南、阳泉、西安、铜川、咸阳、宝

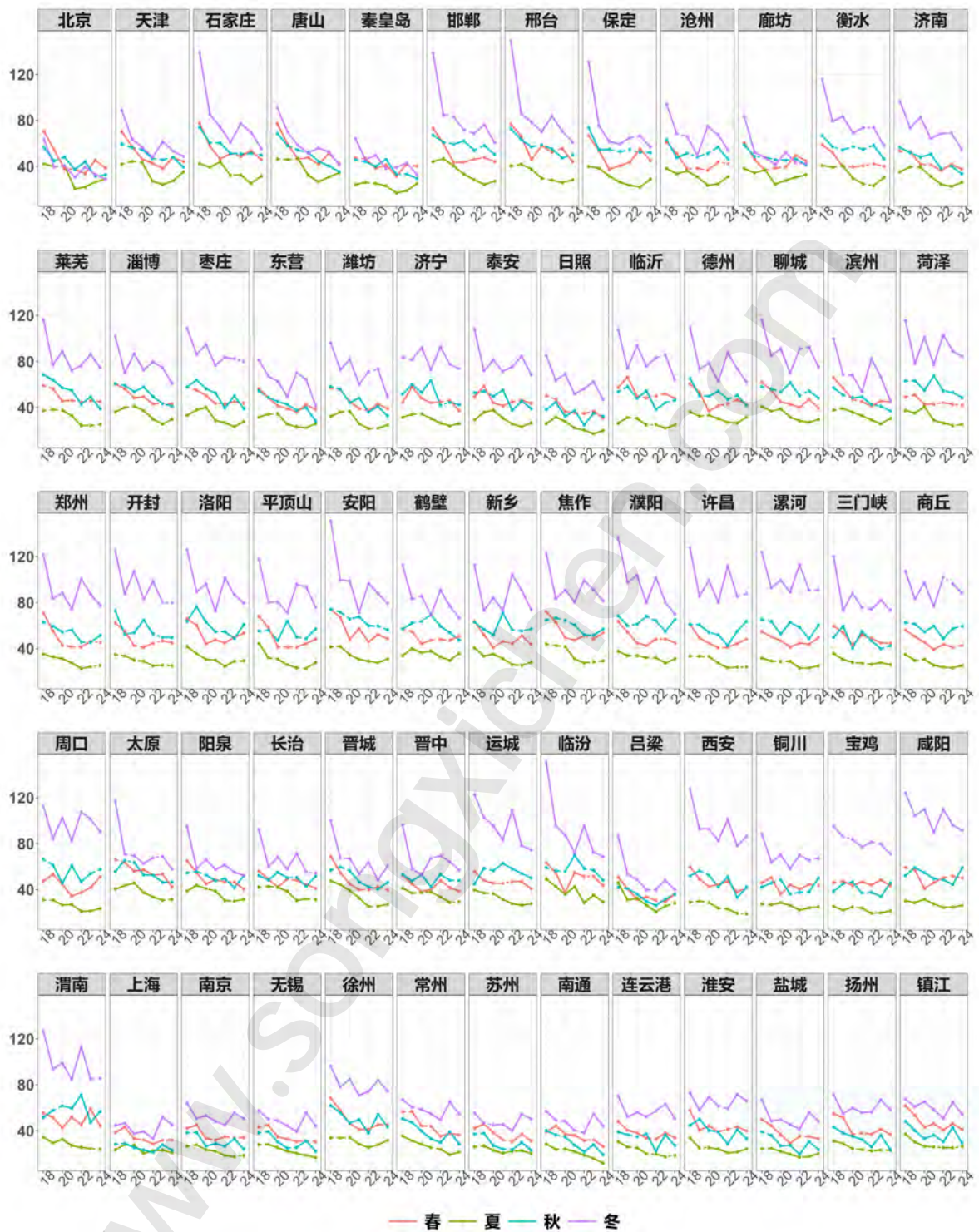


图 2: “4+151” 城市气象调整后 2018 年至 2024 年 PM_{2.5} 季节平均浓度 (微克/立方米) 变化序列图, 图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

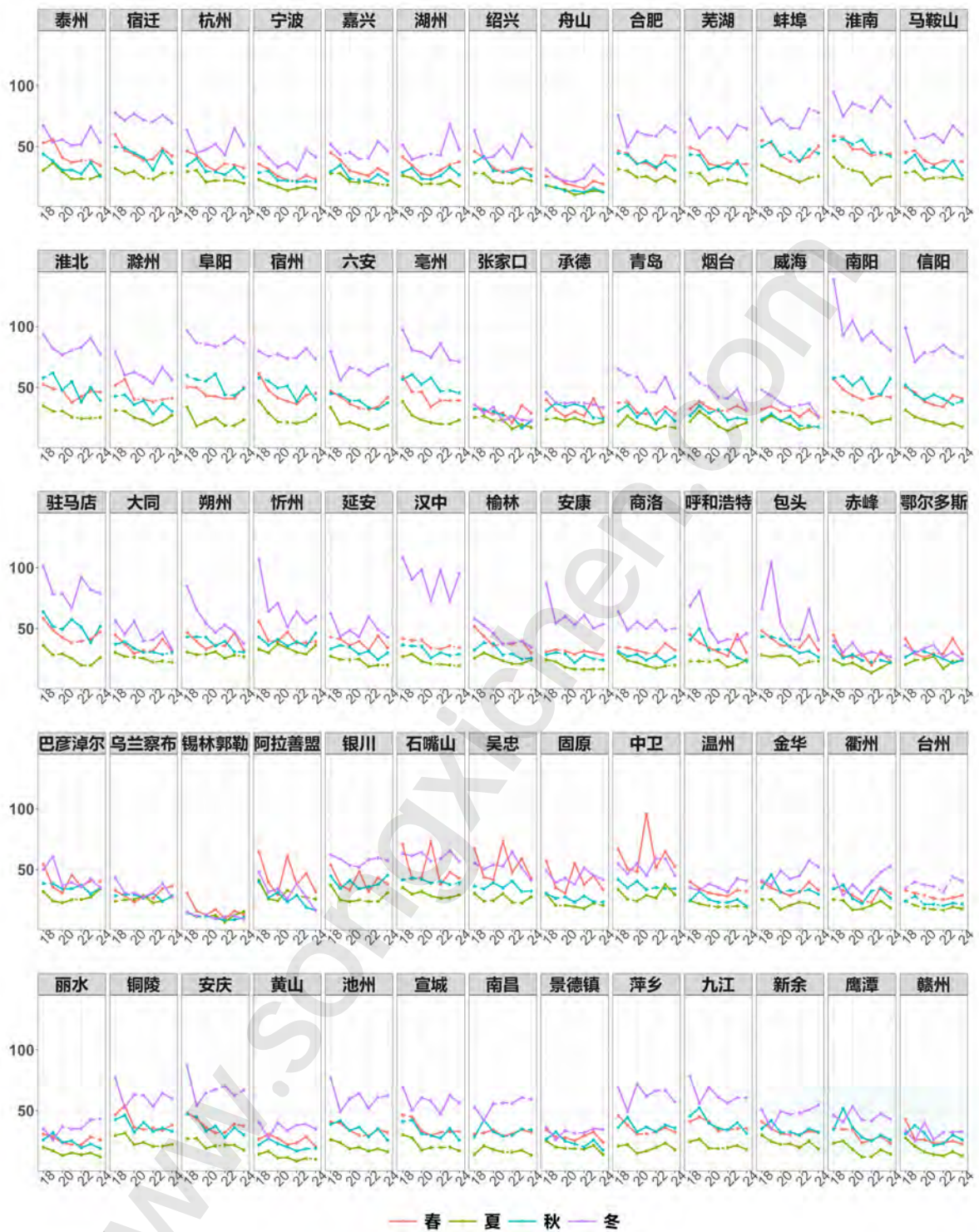


图 3: “4+151” 城市气象调整后 2018 年至 2024 年 PM_{2.5} 季节平均浓度 (微克/立方米) 变化序列图, 图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

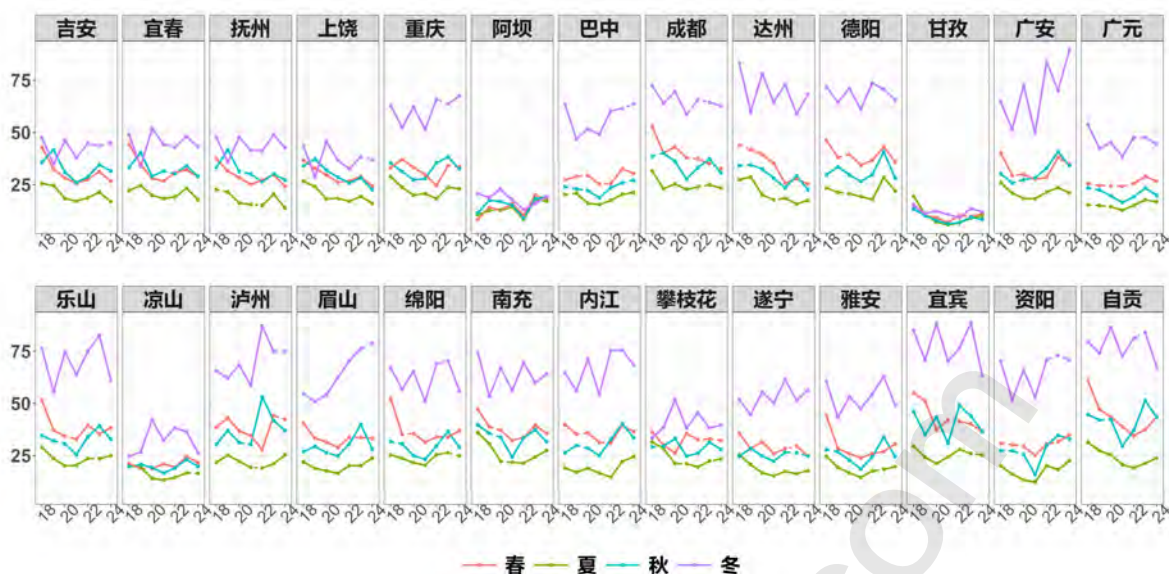


图 4: “4+151”城市气象调整后 2018 年至 2024 年 $PM_{2.5}$ 季节平均浓度 (微克/立方米) 变化序列图, 图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

鸡)。 $PM_{2.5}$ 浓度显著上升城市主要集中于河南、陕西、山西, 分别有 9、7、5 个城市浓度上升。

2018 年冬季 “4+151” 城市 $PM_{2.5}$ 浓度均值 (标准误差) 为 78.5(2.5) 微克/立方米, 2024 年下降至 56.5(1.5) 微克/立方米, 累计降幅 28%; 年均下降 3.7 微克/立方米。与 2019 年浓度均值 59.5(1.6) 微克/立方米相比, 下降 3(1.1) 微克/立方米; 与 2023 年浓度均值 62.8(1.5) 微克/立方米相比, 下降 6.3(0.6) 微克/立方米, 降幅 10%。

与 2023 年冬季相比, “4+151” 城市中, 有 110 个城市 $PM_{2.5}$ 浓度均值显著下降, 占比 71%, 降幅平均值为 15.8%; 有 15 个城市 $PM_{2.5}$ 浓度均值显著上升, 占比 9.7%, 升幅平均值为 13.8%。2024 年冬季, 汉中平均浓度最高, 为 95.1 微克/立方米; 锡林郭勒平均浓度最低, 为 9.1 微克/立方米。有 135 个城市平均浓度超过国家年平均浓度二级标准。阿拉善盟为本季度 $PM_{2.5}$ 同比改善幅度最大城市, 平均浓度相比 2023 年同期的 27.3 微克/立方米下降 40.6%。重点区域中, 有 16 个城市浓度降幅超过 20%, 包括京津冀及周边地区的 12 个城市 (东营、潍坊、滨州、临沂、日照、秦皇岛、唐山、衡水、石家庄、济南、邯郸、沧州), 长三角地区的湖州、舟山、杭州、无锡。汉中为浓度同比升幅最大城市, 平均浓度相比去年同期的 72.7 微克/立方米上升 30.8%; 此外还有 3 个城市升幅超过 20%, 分别为广安、晋城、阿坝。 $PM_{2.5}$ 浓度显著上升城市主要集中于四川, 有 6 个城市浓度上升。

3.1.2 $PM_{2.5}$ 年度评估: 年度变化趋势与城市相对排名

2018 年 “4+151” 城市 $PM_{2.5}$ 浓度均值 (标准误差) 为 50.6(1.2) 微克/立方米, 2024 年下降至 37.9(0.8) 微克/立方米, 累计降幅 25.1%; 年均下降 2.1 微克/立方米。与 2019 年浓度均值 43.9(1) 微克/立方米相比, 下降 6(0.5) 微克/立方米; 与 2023 年浓度均值 40.6(0.7) 微克/立方米相比, 下降 2.7(0.3) 微克/立方米, 降幅 6.7%。

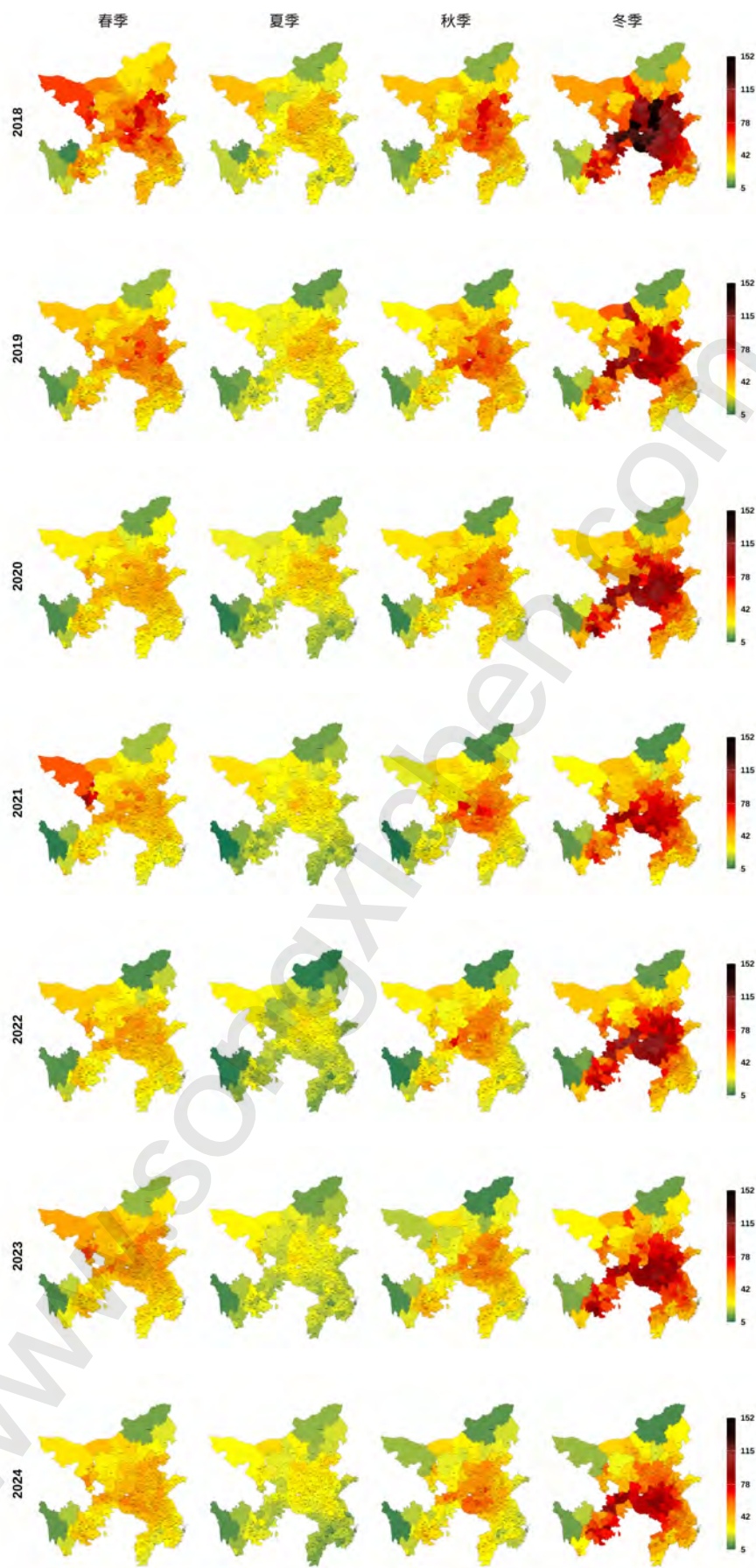


图 5: “4+151”城市气象调整后 2018 年至 2024 年 PM_{2.5} 季节平均浓度 (微克/立方米)

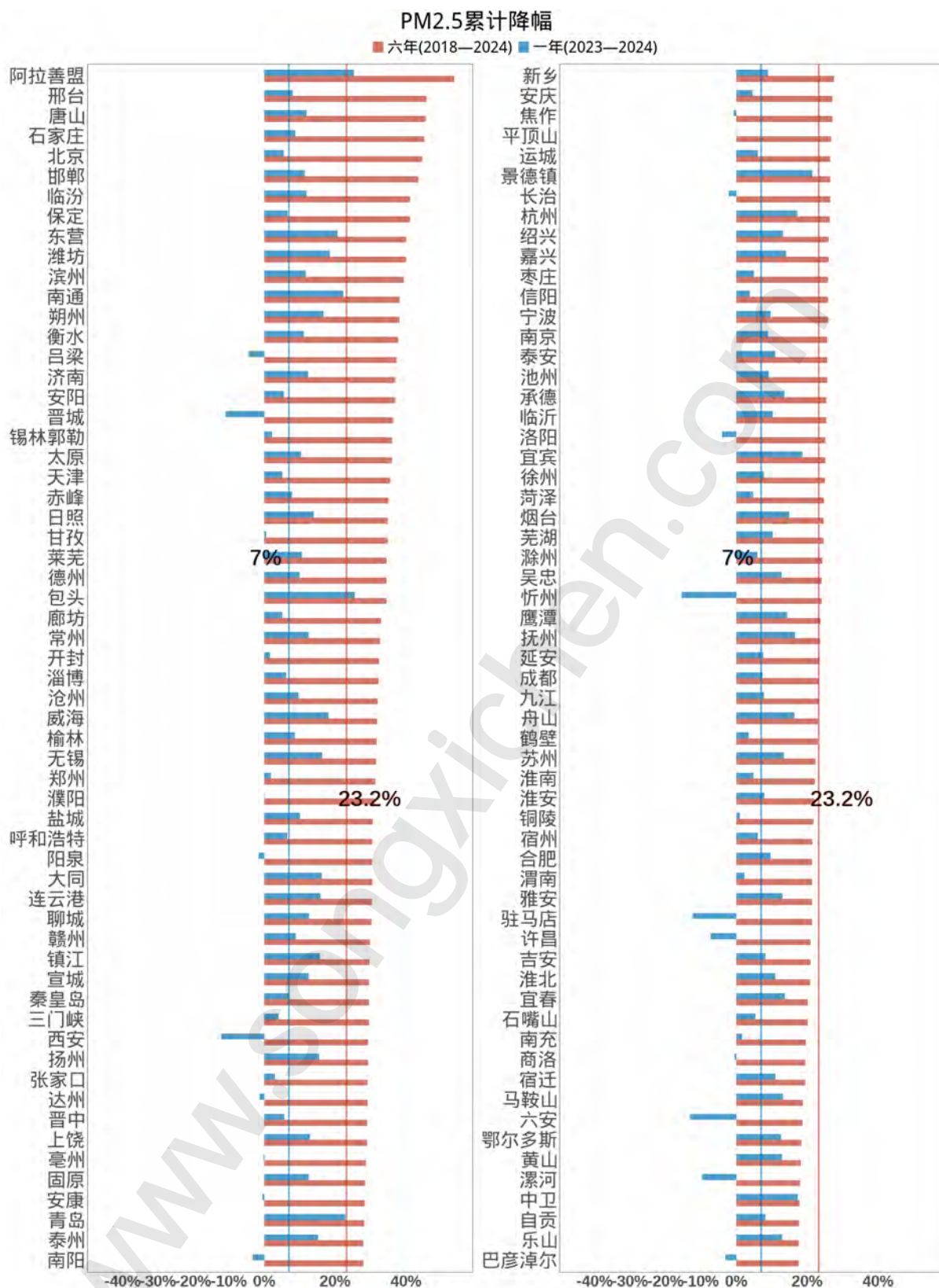


图 6: “4+151”城市气象调整后 PM_{2.5} 浓度过去一年 (蓝色)、六年 (红色) 的累计降幅, 蓝色和红色竖线分别代表 “4+151” 城市的一年和六年平均降幅 (注: 负数代表平均浓度相对升高)

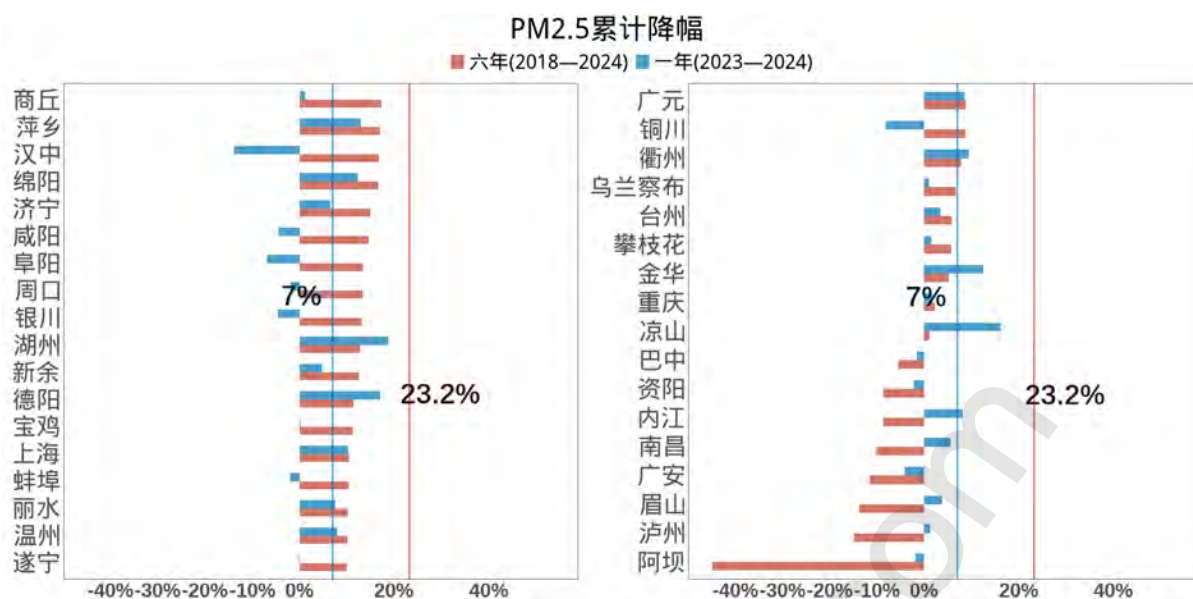


图 7: “4+151”城市气象调整后 $PM_{2.5}$ 浓度过去一年(蓝色)、六年(红色)的累计降幅,蓝色和红色竖线分别代表“4+151”城市的一年和六年平均降幅(注:负数代表平均浓度相对升高)

2024年,汾渭平原是 $PM_{2.5}$ 平均浓度最高的重点地区,浓度均值为 46.1(1.4) 微克/立方米,比 2023 年的 46.2(1.7) 微克/立方米下降 0.1(1) 微克/立方米,比 2019 年的 54.4(1.9) 微克/立方米下降 8.3(1.4) 微克/立方米,比 2018 年的 63.7(2.2) 微克/立方米下降 17.6(2.2) 微克/立方米。京津冀及周边“2+36”城市 $PM_{2.5}$ 浓度均值为 45.9(1.1) 微克/立方米,比 2023 年的 48.9(0.9) 微克/立方米下降 3(0.5) 微克/立方米,比 2019 年的 56.4(0.9) 微克/立方米下降 10.5(0.8) 微克/立方米,比 2018 年的 67.4(1.4) 微克/立方米下降 21.5(1.2) 微克/立方米。长三角地区 $PM_{2.5}$ 浓度均值为 36.6(1.5) 微克/立方米,比 2023 年的 40.5(1.3) 微克/立方米下降 3.9(0.5) 微克/立方米,比 2019 年的 43.2(1.5) 微克/立方米下降 6.6(0.6) 微克/立方米,比 2018 年的 48.1(1.7) 微克/立方米下降 11.5(0.7) 微克/立方米。“其他城市” $PM_{2.5}$ 浓度均值为 32.6(1) 微克/立方米,比 2023 年的 35.1(0.9) 微克/立方米下降 2.5(0.4) 微克/立方米,比 2019 年的 35.6(1) 微克/立方米下降 3(0.7) 微克/立方米,比 2018 年的 40.3(1.2) 微克/立方米下降 7.7(0.7) 微克/立方米。

2024年“4+151”城市中, $PM_{2.5}$ 年均浓度超过 35 微克/立方米的城市有 93 个,比 2023 年减少 17 个。其中,京津冀及周边“2+36”城市有 35 个,比 2023 年减少 2 个;汾渭平原 13 市全部超标,比 2023 年增加 1 个;长三角地区有 17 个,比 2023 年减少 6 个,半数以上城市实现达标;“其他城市”有 28 个,比 2023 年减少 10 个。2024 年,有 12 个城市年均浓度低于 25 微克/立方米(WHO 第二阶段指导值),比 2023 年实现倍增。其中,长三角地区有 1 个(舟山),与 2023 年持平;“其他城市”有 11 个,比 2023 年增加 6 个。

根据图 6、图 7,相比 2018 年,2024 年“4+151”城市中,有 147 个城市年均 $PM_{2.5}$ 浓度呈现不同程度下降,有 8 个城市年均 $PM_{2.5}$ 浓度上升,分别为巴中、资阳、内江、南昌、广安、眉山、泸州、阿坝。 $PM_{2.5}$ 六年累计降幅的城市均值为 23.2% (1.1%)。有 15 个城市累计降幅超过 37%,包括京津冀及

	62.3	59.3	53.3	58.4	54.3	56.8	1 咸阳
	59.0	56.9	55.6	59.8	51.6	56.5	2 漯河
	57.2	57.8	50.1	54.7	52.2	56.0	3 许昌
	65.5	58.5	51.3	56.4	53.6	55.8	4 洛阳
	57.6	54.8	51.3	53.3	54.6	55.7	5 周口
	63.9	61.7	54.8	57.5	54.9	55.4	6 焦作
	56.1	57.0	50.2	54.6	54.6	53.9	7 商丘
	70.1	61.8	56.7	57.8	56.9	53.7	8 安阳
	61.4	60.9	55.8	61.6	52.8	52.8	9 濮阳
	58.1	58.8	55.9	63.7	53.9	52.6	10 渭南
	56.7	49.9	50.7	52.7	52.3	52.3	11 平顶山
	52.8	51.5	53.0	47.4	48.7	52.1	12 阜阳
	57.6	57.0	53.4	50.7	49.3	50.9	13 南阳
	51.8	49.9	46.9	50.7	45.3	50.9	14 驻马店
	54.0	53.0	55.4	57.8	55.7	50.7	15 新乡
	60.0	57.6	55.9	57.8	52.0	50.2	16 鹤壁
	56.9	59.8	54.1	57.1	52.4	49.9	17 菏泽
	57.8	54.3	50.0	52.6	50.9	49.9	18 郑州
	57.3	58.4	54.5	55.2	50.6	49.8	19 开封
	51.4	46.2	43.0	40.3	48.5	49.4	20 蚌埠
	56.4	53.0	47.5	44.8	52.9	48.8	21 徐州
	61.7	58.6	55.8	60.5	51.5	48.4	22 运城
	55.2	53.8	53.4	46.1	50.8	48.4	23 淮南
	58.2	57.1	51.5	52.5	55.2	48.2	24 聊城
	60.8	60.4	50.4	48.3	50.2	47.7	25 枣庄
	62.4	54.3	59.9	58.5	54.0	47.5	26 临汾
	57.1	54.3	48.4	55.7	42.2	47.3	27 西安
	55.8	50.7	49.7	46.9	53.0	47.2	28 淮北
	54.4	50.0	52.4	49.2	48.6	46.7	29 三门峡
	51.8	47.5	46.2	42.4	49.6	46.7	30 宿州
	46.7	45.8	41.3	42.6	43.0	46.5	31 铜川
	58.9	57.3	51.5	47.1	51.5	46.0	32 莱芜
	64.3	54.8	54.1	54.9	49.9	45.9	33 邢台
	55.5	46.3	44.8	46.6	49.0	45.7	34 保定
	57.5	55.4	50.9	49.2	51.0	45.7	35 临沂
	60.7	56.3	49.0	52.3	50.1	45.7	36 石家庄
	63.2	56.6	52.6	49.4	51.5	45.6	37 邯郸
	50.2	49.7	46.2	45.7	45.5	45.5	38 宝鸡
	42.6	47.1	42.0	42.8	39.2	45.3	39 忻州
	58.4	56.9	52.7	51.6	48.0	44.9	40 济宁
	41.8	39.7	35.7	46.7	45.4	44.9	41 泸州
	53.7	50.3	46.9	48.1	44.7	44.8	42 亳州
	31.9	37.1	30.9	41.7	43.1	44.8	43 广安
	60.9	58.8	52.5	51.7	49.8	44.6	44 太原
	50.1	51.9	49.1	50.0	43.7	44.6	45 长治
	47.7	49.5	40.5	43.0	48.5	44.6	46 自贡
	55.1	53.1	49.7	45.9	50.0	44.5	47 泰安
	52.4	49.6	47.2	51.2	49.4	44.4	48 德州
	48.8	49.3	38.4	45.5	39.0	44.4	49 汉中
	53.1	51.2	48.2	47.0	43.4	44.1	50 阳泉
	48.6	48.5	43.6	40.8	49.4	43.9	51 宿迁
	56.9	54.6	48.9	48.5	49.4	43.8	52 衡水
	56.5	57.4	54.2	50.5	46.7	43.8	53 淄博
	50.3	47.9	41.8	46.6	48.2	43.5	54 沧州
	56.7	51.9	43.3	42.9	39.2	43.4	55 晋城
	47.0	45.3	47.0	51.0	45.7	43.1	56 晋中
	46.7	45.1	45.0	44.5	44.7	43.0	57 信阳
	38.9	37.8	39.9	37.4	41.1	43.0	58 银川
	44.1	45.5	49.3	40.9	44.4	42.0	59 石嘴山
	55.4	50.1	41.2	42.4	44.1	41.9	60 天津
	40.5	40.8	38.9	35.1	36.8	41.6	61 六安
	33.2	32.4	33.2	38.8	42.6	40.9	62 眉山
	43.4	44.8	40.9	37.5	44.4	40.8	63 淮安
	34.6	38.6	31.8	38.5	44.3	40.7	64 内江
	45.3	47.6	41.9	48.7	49.6	40.4	65 宜宾
2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年		

图 8: “4+151”城市气象调整后 2018 年至 2024 年 PM_{2.5} 年平均浓度 (微克/立方米) 年际变化表 (浓度底纹从红到绿表示年平均浓度由大到小; 左侧红、橙、紫、灰方格分别标记京津冀“2+36”城市、汾渭平原、长三角地区、其他城市)

	39.5	42.0	50.9	43.2	48.9	40.4	66 中卫
	45.4	42.4	37.6	41.3	42.5	40.3	67 廊坊
	31.4	33.6	26.6	37.9	39.4	40.3	68 资阳
	39.7	40.0	33.7	39.5	40.3	39.7	69 南充
	53.8	49.9	45.2	48.8	44.7	39.5	70 滨州
	37.1	39.9	35.7	43.0	45.2	39.3	71 乐山
	36.1	35.7	32.4	36.1	39.9	39.2	72 重庆
	47.8	40.9	40.3	34.6	41.2	38.8	73 滁州
	41.6	39.5	39.8	36.0	42.9	38.8	74 合肥
	58.2	51.5	45.9	42.2	43.8	38.5	75 唐山
	46.2	38.4	40.3	35.7	38.7	38.4	76 铜陵
	54.4	53.0	46.9	41.9	43.4	38.1	77 济南
	42.5	38.3	39.4	38.0	39.8	38.0	78 安庆
	39.4	40.3	35.3	39.5	45.7	37.9	79 德阳
	46.1	42.0	41.8	36.8	44.8	37.7	80 镇江
	41.8	43.5	36.7	40.0	40.4	37.4	81 成都
	36.6	36.9	31.5	39.5	41.9	36.7	82 绵阳
	55.1	51.9	43.4	41.5	44.8	36.5	83 潍坊
	43.8	37.2	38.0	36.2	42.0	36.5	84 马鞍山
	43.4	37.7	38.7	36.6	40.5	36.3	85 芜湖
	45.0	42.3	37.2	36.0	39.4	36.3	86 九江
	39.7	31.1	36.0	33.6	35.1	36.2	87 巴彦淖尔
	38.1	39.8	47.8	43.9	41.2	36.0	88 吴忠
	38.5	37.6	36.6	37.8	41.1	35.7	89 萍乡
	29.9	29.9	27.1	31.7	35.1	35.6	90 巴中
	43.3	39.0	37.5	35.5	41.9	35.4	91 扬州
	41.5	37.3	32.5	29.4	33.8	35.2	92 吕梁
	48.9	42.7	39.3	34.6	40.3	35.2	93 常州
	45.8	39.0	35.3	35.2	41.1	34.8	94 泰州
	34.3	35.2	32.7	33.2	36.9	34.8	95 南昌
	34.1	33.8	33.1	31.9	36.0	34.3	96 新余
	38.6	36.4	37.6	31.7	37.4	34.0	97 池州
	49.7	45.9	39.2	41.8	42.2	33.5	98 东营
	41.2	42.6	36.4	35.2	32.9	33.4	99 达州
	35.9	32.3	31.1	32.8	38.1	33.4	100 金华
	41.3	35.6	34.2	31.6	37.7	33.0	101 宣城
	38.8	38.5	35.7	33.0	38.8	32.6	102 连云港
	46.7	41.4	36.7	34.1	37.8	32.5	103 日照
	44.7	41.8	31.6	34.8	34.1	32.2	104 北京
	33.3	34.5	30.7	32.8	32.0	32.2	105 商洛
	32.4	27.8	28.0	29.4	39.4	32.1	106 湖州
	37.4	31.1	31.9	29.8	36.9	32.1	107 绍兴
	30.9	27.4	23.5	29.0	35.4	32.1	108 衢州
	40.7	38.4	37.1	30.3	34.3	31.9	109 秦皇岛
	39.3	32.9	33.1	31.9	38.5	31.8	110 杭州
	40.5	34.2	32.7	31.2	34.9	31.8	111 南京
	44.1	39.7	37.4	38.4	38.0	31.7	112 朔州
	36.3	35.9	34.1	35.4	34.3	31.7	113 延安
	39.4	33.4	30.5	29.1	36.0	31.2	114 苏州
	38.4	33.8	30.3	28.3	34.8	31.2	115 盐城
	29.4	29.7	26.1	30.6	35.6	31.0	116 雅安
	30.6	32.1	28.5	33.4	30.9	30.9	117 遂宁
	47.9	34.7	31.5	29.8	32.9	30.8	118 呼和浩特
	31.6	33.1	29.9	31.0	31.3	30.8	119 攀枝花
	34.9	34.6	30.0	34.2	30.4	30.6	120 安康
	54.0	39.9	34.5	31.3	40.9	30.5	121 包头
	36.7	30.9	28.8	26.3	33.6	30.2	122 上海
	33.4	30.9	26.7	29.9	32.7	30.0	123 吉安
	28.5	27.3	27.6	27.7	30.2	29.9	124 乌兰察布
	30.4	30.3	33.8	33.8	34.0	29.7	125 固原
	33.4	32.2	30.2	30.7	34.4	29.7	126 宜春
	37.2	36.3	31.8	31.3	35.0	29.3	127 大同
	41.0	36.4	31.5	31.3	31.3	28.6	128 榆林
	40.6	34.8	31.0	29.0	34.1	28.5	129 无锡
	36.1	29.9	27.5	26.9	32.9	28.3	130 嘉兴
	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年	

图 9: “4+151”城市气象调整后 2019 年至 2024 年 PM_{2.5} 年平均浓度 (微克/立方米) 年际变化表 (浓度底纹从红到绿表示年平均浓度由大到小; 左侧红、橙、紫、灰方格分别标记京津冀“2+36”城市、汾渭平原、长三角地区、其他城市)

	30.2	28.7	26.7	25.5	30.3	27.9	131 温州
	29.8	26.3	25.3	23.4	28.1	27.2	132 台州
	40.1	33.7	31.4	27.5	35.2	27.1	133 青岛
	32.6	30.9	28.0	27.4	32.3	27.0	134 抚州
	26.1	25.9	23.0	26.8	29.4	26.9	135 广元
	39.3	34.2	30.6	27.3	31.5	26.8	136 烟台
	38.1	35.5	26.5	26.1	31.0	26.6	137 鹰潭
	32.7	29.9	32.3	29.9	30.3	26.2	138 承德
	38.5	36.0	31.5	27.5	32.7	25.4	139 南通
	28.4	28.9	30.3	24.5	29.0	25.4	140 鄂尔多斯
	30.2	24.2	23.5	22.1	27.8	25.1	141 宁波
	25.8	24.4	24.4	22.6	27.1	25.1	142 丽水
	30.7	31.3	27.5	25.6	28.7	25.0	143 上饶
	27.4	28.6	21.2	22.9	25.9	23.6	144 赣州
	25.9	28.6	24.6	21.7	25.3	23.3	145 赤峰
	29.5	28.6	25.4	22.3	23.5	22.8	146 张家口
	31.0	29.8	35.9	33.5	30.1	22.5	147 阿拉善盟
	26.7	26.3	24.6	24.8	28.7	22.5	148 景德镇
	33.2	28.1	27.7	23.8	26.2	21.4	149 威海
	25.5	25.3	21.9	21.7	24.2	21.1	150 黄山
	21.5	23.6	20.8	22.8	25.2	21.1	151 凉山
	15.7	16.3	15.7	10.2	18.0	18.4	152 阿坝
	20.4	17.2	15.5	15.7	21.2	17.7	153 舟山
	12.6	12.1	12.3	9.0	12.3	12.0	154 锡林郭勒
	10.6	9.1	7.4	8.2	10.4	10.4	155 甘孜
	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年	

图 10: “4+151”城市气象调整后 2019 年至 2024 年 PM_{2.5} 年平均浓度 (微克/立方米) 年际变化表 (浓度底纹从红到绿表示年平均浓度由大到小; 左侧红、橙、紫、灰方格分别标记京津冀“2+36”城市、汾渭平原、长三角地区、其他城市)

周边“2+36”城市的 10 个城市 (邢台、唐山、石家庄、北京、邯郸、保定、东营、潍坊、滨州、衡水), 汾渭平原的临汾、吕梁, 长三角地区的南通。从城市降幅排名来看, 北京、天津、河北 PM_{2.5} 治理效果相对较好。

相比 2023 年, “4+151”城市中, 有 125 个城市年均 PM_{2.5} 浓度下降, 有 30 个城市年均 PM_{2.5} 浓度上升。PM_{2.5} 浓度降幅的城市均值为 7% (0.7%)。从城市 PM_{2.5} 浓度降幅排名来看, 江苏、山东、浙江 PM_{2.5} 治理效果相对较好。吕梁、晋城六年累计降幅排名靠前, 但本年度升幅排名靠前, 需防范浓度反弹风险。

根据图 8、图 9、图 10, 2024 年“4+151”城市中, PM_{2.5} 年均浓度最高的城市为咸阳 (56.8 微克/立方米)、漯河 (56.5 微克/立方米)、许昌 (56 微克/立方米)。浓度最高的 10 个城市包括河南的 8 个城市 (漯河、许昌、洛阳、周口、焦作、商丘、安阳、濮阳), 陕西的 2 个城市 (咸阳、渭南); 其中安阳、焦作、渭南已连续 5 年在列, 咸阳已连续 3 年在列。

3.1.3 PM_{2.5} 极端污染 (90% 分位数)

图 11-13 展示了研究区域城市 2018 年以来经气象调整的 PM_{2.5} 浓度 90% 分位数给定季节的时间序列。我们以按季度计算的 PM_{2.5} 90% 分位数浓度的全年最大值作为极端污染的衡量指标。按照国家标准, PM_{2.5} 年 95% 分位数应当低于 75 微克/立方米, 以达到日尺度人群健康保护的需求。我们以 PM_{2.5} 浓度最高的季节 90% 分位数统计, 较国家标准略微严格, 但对大多数城市而言, 仍较 WHO 提出的年 99% 分位数达标的要求更宽松。2024 年, 有 138 个城市的 PM_{2.5} 90% 分位数浓度最大值产生在冬季; 有 5 个

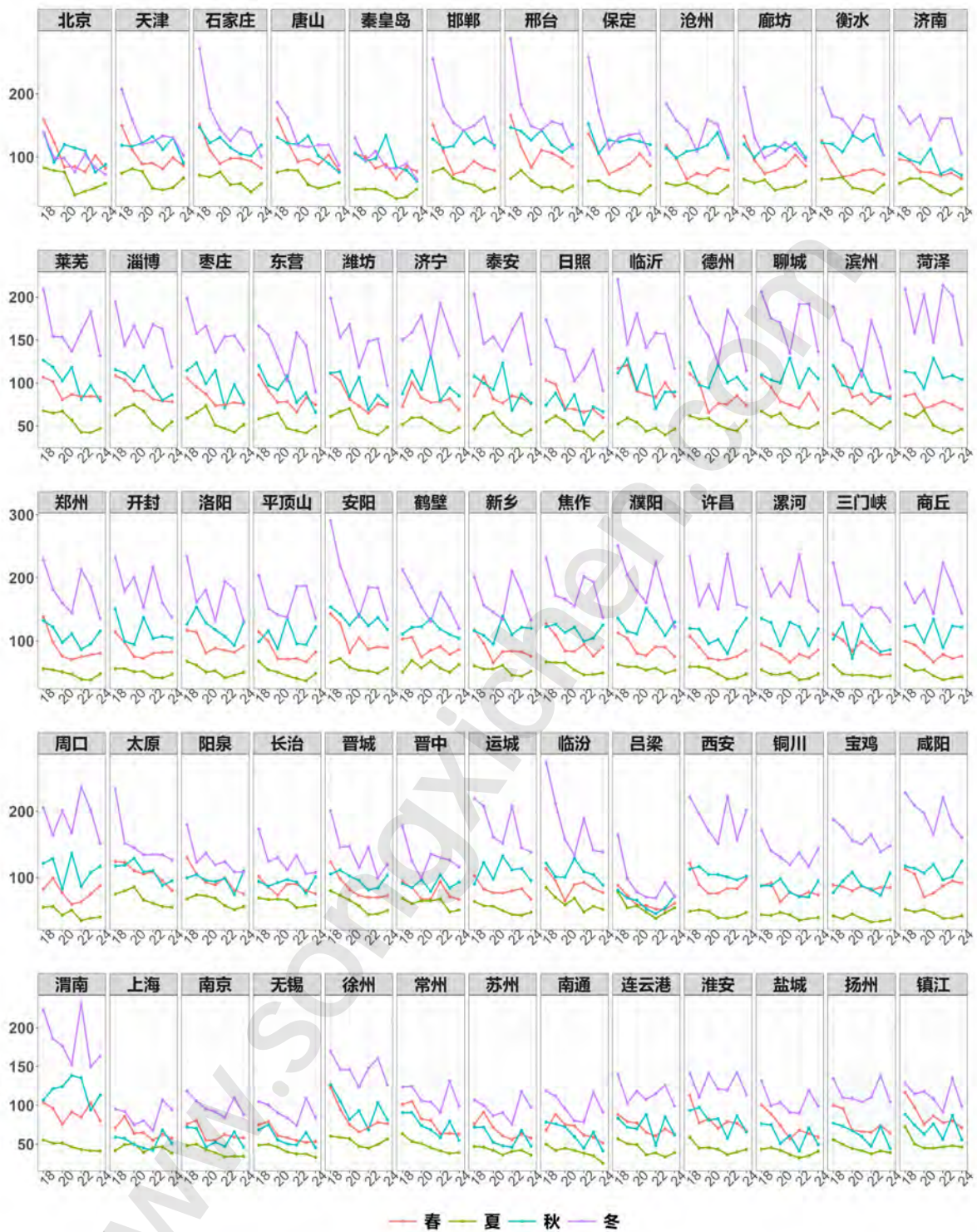


图 11: “4+151”城市气象调整后 2018 年至 2024 年 PM_{2.5} 季节 90% 分位数浓度 (微克/立方米) 变化序列图

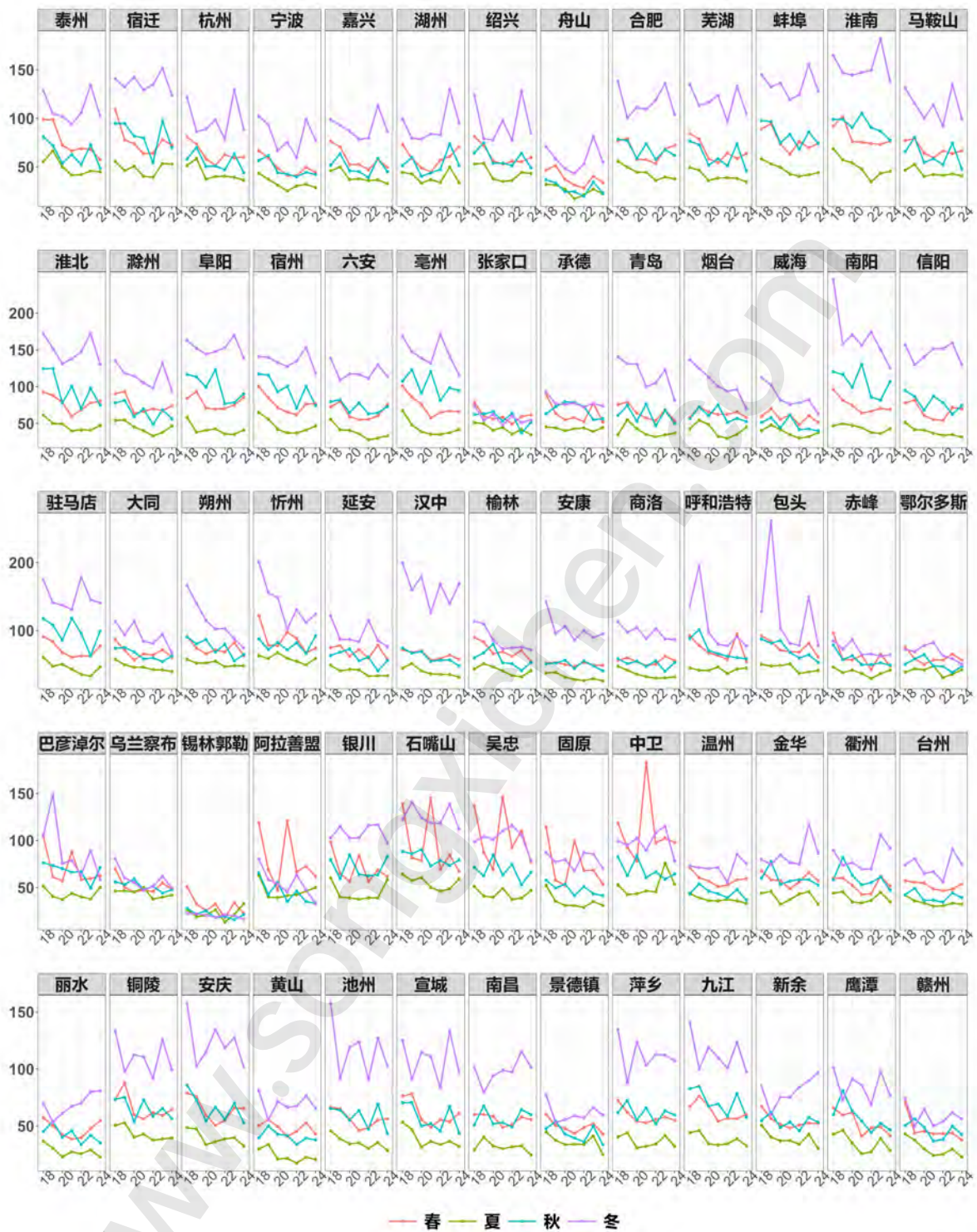


图 12: “4+151”城市气象调整后 2018 年至 2024 年 PM_{2.5} 季节 90% 分位数浓度 (微克/立方米) 变化序列图

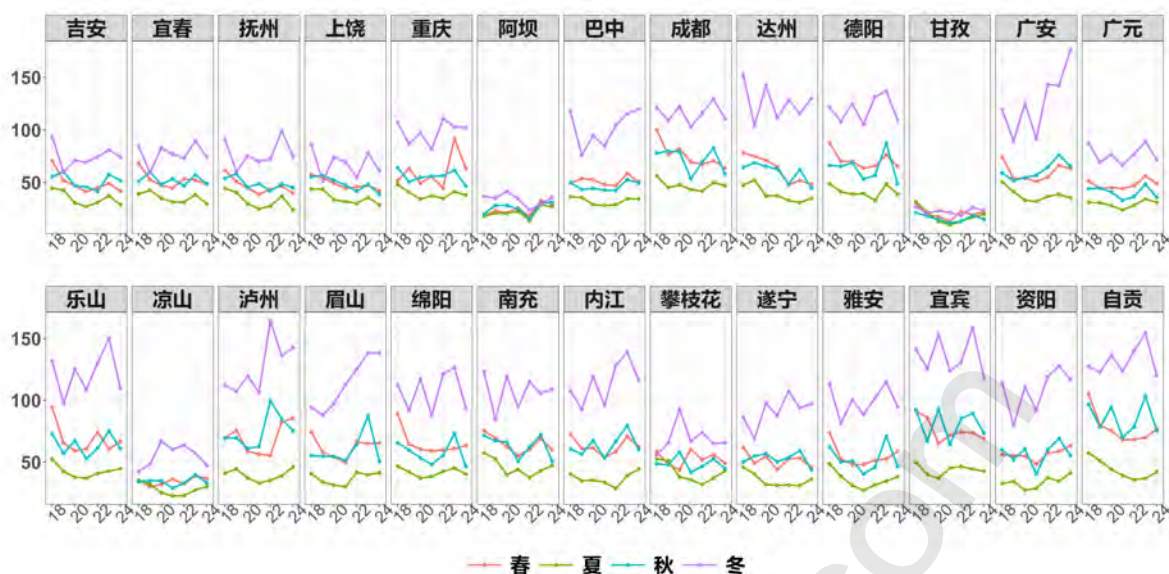


图 13: “4+151”城市气象调整后 2018 年至 2024 年 $PM_{2.5}$ 季节 90% 分位数浓度 (微克/立方米) 变化序列图

城市的 $PM_{2.5}$ 90% 分位数浓度最大值产生在春季, 包括京津冀及周边“2+36”城市的秦皇岛和非重点城市鄂尔多斯、阿拉善盟、中卫、张家口; 锡林郭勒的 $PM_{2.5}$ 90% 分位数浓度最大值产生在夏季; 有 11 个城市的 $PM_{2.5}$ 90% 分位数浓度最大值产生在秋季, 包括 8 个京津冀及周边“2+36”城市 (北京、保定、廊坊、石家庄、衡水、邢台、邯郸、濮阳), 汾渭平原的吕梁、阳泉和非重点城市巴彦淖尔。

2018 年“4+151”城市 $PM_{2.5}$ 90% 分位数浓度值 (标准误差) 为 148.3(4.4) 微克/立方米, 2024 年下降至 103.9(2.4) 微克/立方米, 年均下降 7.4 微克/立方米。与 2019 年 90% 分位数浓度值 120(3.5) 微克/立方米相比, 下降 16.1(2.6) 微克/立方米; 与 2023 年 90% 分位数浓度值 125.5(2.9) 微克/立方米相比下降 21.6(1.6) 微克/立方米。

在区域和城市尺度, $PM_{2.5}$ 90% 分位数浓度最高的城市为西安 (201.3 微克/立方米)、广安 (176.2 微克/立方米)、汉中 (168.9 微克/立方米)。浓度最高的 30 个城市中, 周口、咸阳、商丘、漯河、菏泽已连续 3 年在列。河南、陕西为本年度 $PM_{2.5}$ 极端污染较严重省份, 分别有 13、6 个城市进入浓度最高的 30 个城市榜单。 $PM_{2.5}$ 90% 分位数浓度最低的城市为甘孜 (23.7 微克/立方米)、锡林郭勒 (32.8 微克/立方米)、阿坝 (36 微克/立方米)。浓度最低的 30 个城市中, 舟山、吕梁为重点城市, 极端污染状况控制得相对较好。内蒙古、四川、江西为本年度 $PM_{2.5}$ 极端污染相对较轻省份, 分别有 6、5、6 个城市进入浓度最低的 30 个城市榜单。

2024 年“4+151”城市中 $PM_{2.5}$ 年 90% 分位数低于 75 微克/立方米的的城市有 28 个, 占比 18%。包括抚州、宜春、朔州、吉安、承德、吕梁、榆林、广元、巴彦淖尔、固原、烟台、大同、攀枝花、黄山、赤峰、威海、阿拉善盟、张家口、上饶、景德镇、鄂尔多斯、赣州、舟山、乌兰察布、凉山、阿坝、锡林郭勒、甘孜, 其中吕梁、舟山为重点城市。以上达标城市中, 内蒙古乌兰察布、赤峰、鄂尔多斯、锡林郭勒、阿拉善盟, 四川凉山、攀枝花、甘孜、阿坝, 江西景德镇、赣州, 河北张家口已连续 3 年达标。

3.2 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。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。本报告将使用前一种方法。

我国目前的 PM₁₀ 平均浓度标准如表 2 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 2: 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 14-16和图 17分别展示了“4+151”城市 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。根据上述图表，我们可以总结出 PM₁₀ 浓度如下几个特征：

3.2.1 PM₁₀ 季度评估

2018 年春季“4+151”城市 PM₁₀ 浓度均值（标准误差）为 110.3(3.1) 微克/立方米，2024 年下降至 79.3(1.9) 微克/立方米，累计降幅 28.1%；年均下降 5.2 微克/立方米。与 2019 年浓度均值 88.3(2.2) 微克/立方米相比，下降 9(1) 微克/立方米；与 2023 年浓度均值 90(2.1) 微克/立方米相比，下降 10.7(0.7) 微克/立方米，降幅 11.9%。

与 2023 年春季相比，“4+151”城市中，有 121 个城市 PM₁₀ 浓度均值显著下降，占比 78.1%，降幅平均值为 14.8%；有 5 个城市 PM₁₀ 浓度均值显著上升，占比 3.2%，升幅平均值为 12%。2024 年春季，中卫平均浓度最高，为 154.8 微克/立方米；阿坝平均浓度最低，为 25.8 微克/立方米。有 92 个城市平均浓度超过国家年平均浓度二级标准。景德镇为本季度 PM₁₀ 同比改善幅度最大城市，平均浓度相比 2023 年同期的 61.8 微克/立方米下降 34.1%。重点区域中，有 6 个城市浓度降幅超过 20%，包括京津冀及周边地区的邢台，汾渭平原的太原、晋中、吕梁，长三角地区的嘉兴、苏州。甘孜为浓度同比升幅最大城市，平均浓度相比去年同期的 23 微克/立方米上升 20.5%。

2018 年夏季“4+151”城市 PM₁₀ 浓度均值（标准误差）为 58.5(1.3) 微克/立方米，2024 年下降至 46.1(1.1) 微克/立方米，累计降幅 21.2%；年均下降 2.1 微克/立方米。与 2019 年浓度均值

54(1.2) 微克/立方米相比，下降 7.9(0.9) 微克/立方米；与 2023 年浓度均值 44.6(1) 微克/立方米相比，上升 1.5(0.5) 微克/立方米，升幅 3.4%。

与 2023 年夏季相比，“4+151”城市中，有 40 个城市 PM₁₀ 浓度均值显著下降，占比 25.8%，降幅平均值为 14.3%；有 62 个城市 PM₁₀ 浓度均值显著上升，占比 40%，升幅平均值为 15.8%。2024 年夏季，巴彦淖尔平均浓度最高，为 92.1 微克/立方米；赣州平均浓度最低，为 23.9 微克/立方米。有 7 个城市平均浓度超过国家年平均浓度二级标准。景德镇为本季度 PM₁₀ 同比改善幅度最大城市，平均浓度相比 2023 年同期的 35.7 微克/立方米下降 32%；此外还有 6 个城市降幅超过 20%，均为非重点城市。驻马店为浓度同比升幅最大城市，平均浓度相比去年同期的 38.2 微克/立方米上升 40%。重点区域中，有 9 个城市浓度升幅超过 20%，包括京津冀及周边地区的 6 个城市（廊坊、滨州、邯郸、秦皇岛、临沂、日照），汾渭平原的西安，长三角地区的淮北、阜阳。PM₁₀ 浓度显著上升城市主要集中于山东、河北、四川、河南，分别有 12、10、7、7 个城市浓度上升。

2018 年秋季“4+151”城市 PM₁₀ 浓度均值（标准误差）为 80.3(2.2) 微克/立方米，2024 年下降至 59.4(1.5) 微克/立方米，累计降幅 26%；年均下降 3.5 微克/立方米。与 2019 年浓度均值 83.5(2.1) 微克/立方米相比，下降 24.1(1.3) 微克/立方米；与 2023 年浓度均值 68.2(1.5) 微克/立方米相比，下降 8.8(0.7) 微克/立方米，降幅 12.9%。

与 2023 年秋季相比，“4+151”城市中，有 119 个城市 PM₁₀ 浓度均值显著下降，占比 76.8%，降幅平均值为 18.6%；有 13 个城市 PM₁₀ 浓度均值显著上升，占比 8.4%，升幅平均值为 15.7%。2024 年秋季，咸阳平均浓度最高，为 106.2 微克/立方米；甘孜平均浓度最低，为 22 微克/立方米。有 50 个城市平均浓度超过国家年平均浓度二级标准。宿迁为本季度 PM₁₀ 同比改善幅度最大城市，平均浓度相比 2023 年同期的 74.9 微克/立方米下降 36%。重点区域中，有 33 个城市浓度降幅超过 20%，包括京津冀及周边地区的 9 个城市（枣庄、莱芜、东营、济宁、德州、衡水、天津、潍坊、济南），长三角地区的 24 个城市（宿迁、泰州、镇江、扬州、芜湖、南京、连云港、淮北、南通、上海、盐城、常州、马鞍山、无锡、徐州、嘉兴、淮安、合肥、宿州、苏州、绍兴、滁州、湖州、蚌埠）。咸阳为浓度同比升幅最大城市，平均浓度相比去年同期的 82.9 微克/立方米上升 28.1%；此外还有 3 个城市升幅超过 20%，分别为驻马店、宝鸡、黄山。PM₁₀ 浓度显著上升城市主要集中于陕西、河南，分别有 7、3 个城市浓度上升。

2018 年冬季“4+151”城市 PM₁₀ 浓度均值（标准误差）为 121.8(3.6) 微克/立方米，2024 年下降至 86.8(1.9) 微克/立方米，累计降幅 28.7%；年均下降 5.8 微克/立方米。与 2019 年浓度均值 84.8(2.2) 微克/立方米相比，上升 2(1.3) 微克/立方米；与 2023 年浓度均值 93.8(1.9) 微克/立方米相比，下降 7(0.7) 微克/立方米，降幅 7.5%。

与 2023 年冬季相比，“4+151”城市中，有 102 个城市 PM₁₀ 浓度均值显著下降，占比 65.8%，降幅平均值为 12.4%；有 14 个城市 PM₁₀ 浓度均值显著上升，占比 9%，升幅平均值为 10.1%。2024 年冬季，咸阳平均浓度最高，为 142 微克/立方米；锡林郭勒平均浓度最低，为 23 微克/立方米。有 123 个城市平均浓度超过国家年平均浓度二级标准。乌兰察布为本季度 PM₁₀ 同比改善幅度最大城市，平均浓度相比 2023 年同期的 64 微克/立方米下降 32.4%。重点区域中，有 6 个城市浓度降幅超过 20%，包括京津冀及周边地区的 5 个城市（东营、滨州、临沂、日照、秦皇岛），长三角地区的湖州。汉中为浓度同比升幅最大城市，平均浓度相比去年同期的 88.3 微克/立方米上升 27.9%；其次是广安，升幅 27.1%。PM₁₀

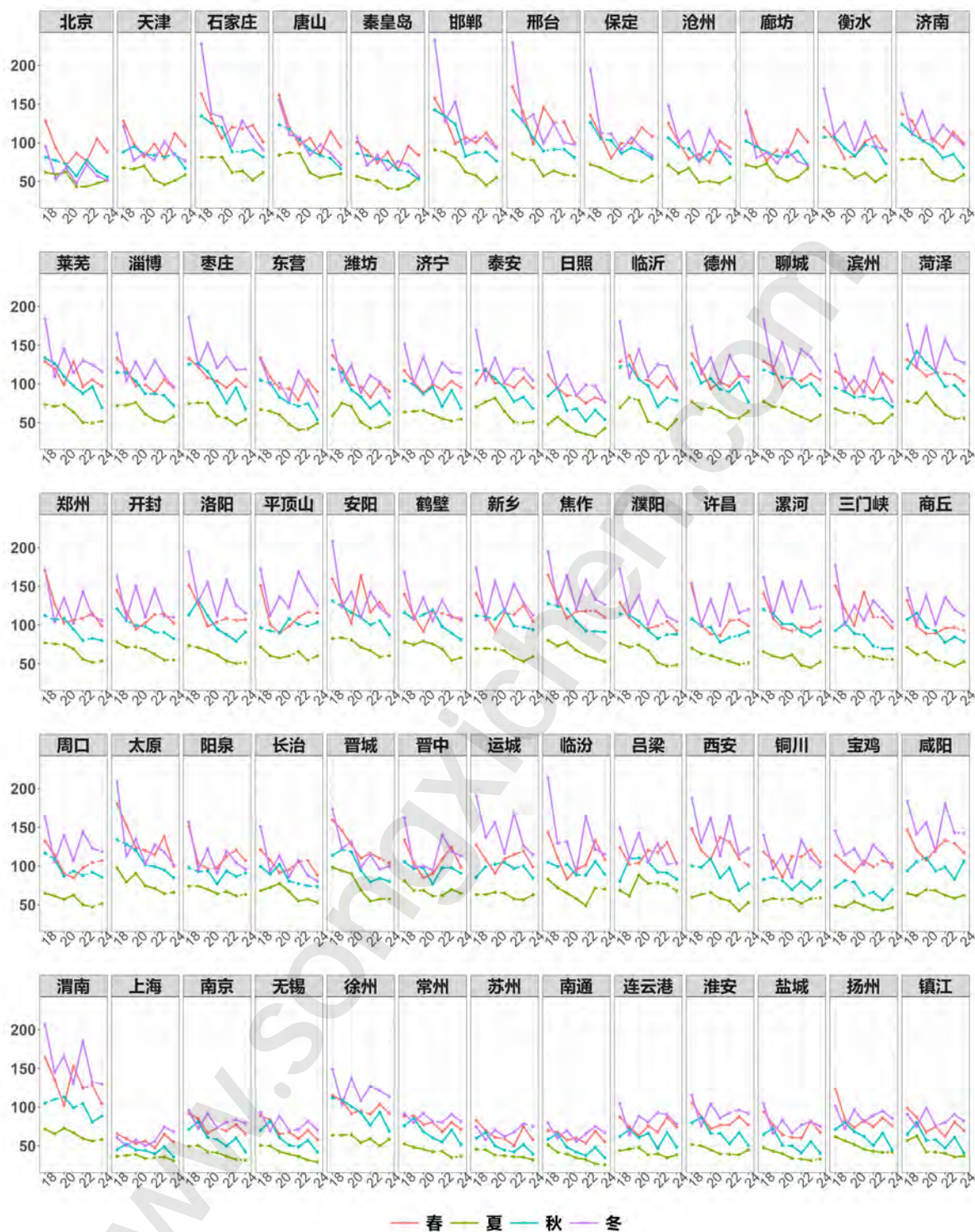


图 14: “4+151”城市气象调整后 2018 年至 2024 年 PM₁₀ 季节平均浓度 (微克/立方米) 变化序列图, 图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

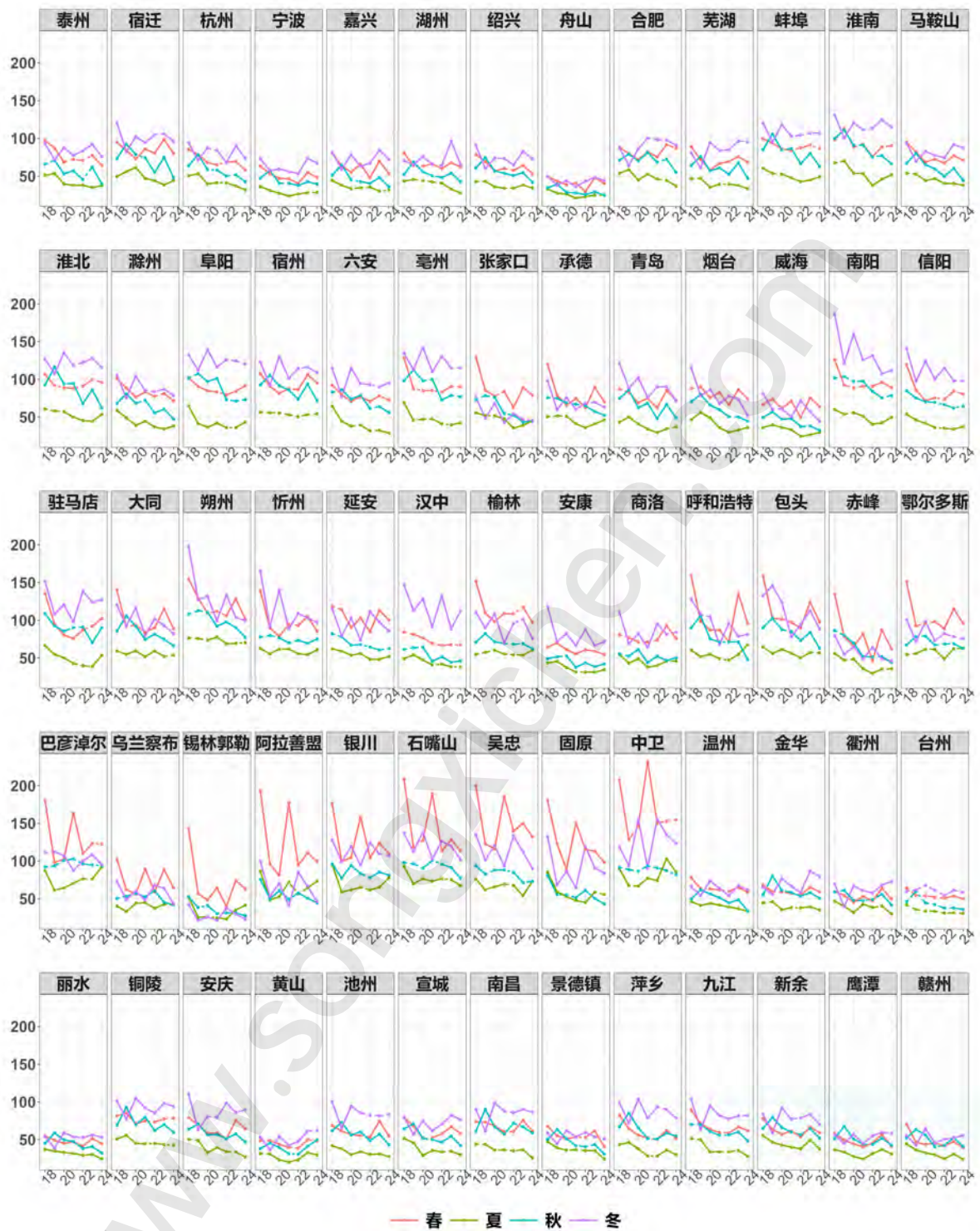


图 15: “4+151”城市气象调整后 2018 年至 2024 年 PM₁₀ 季节平均浓度 (微克/立方米) 变化序列图, 图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

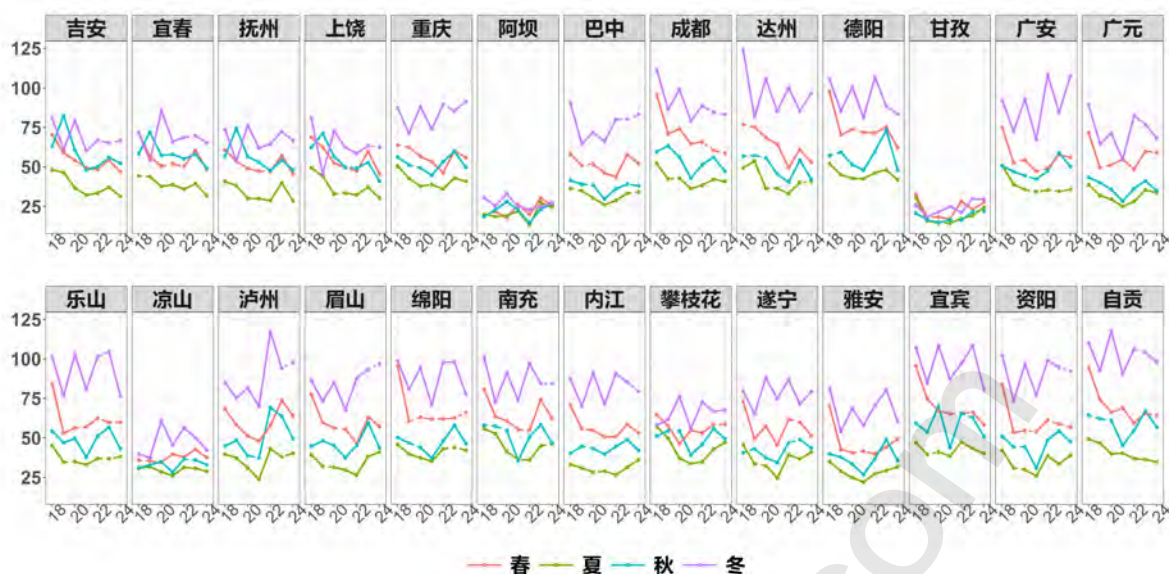


图 16: “4+151”城市气象调整后 2018 年至 2024 年 PM_{10} 季节平均浓度 (微克/立方米) 变化序列图, 图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

浓度显著上升城市主要集中于四川、陕西, 分别有 4、3 个城市浓度上升。

3.2.2 PM_{10} 年度评估: 年度变化趋势与城市相对排名

2018 年“4+151”城市 PM_{10} 浓度均值 (标准误差) 为 92.8(2.4) 微克/立方米, 2024 年下降至 67.9(1.4) 微克/立方米, 累计降幅 26.8%; 年均下降 4.1 微克/立方米。与 2019 年浓度均值 77.6(1.8) 微克/立方米相比, 下降 9.7(0.8) 微克/立方米; 与 2023 年浓度均值 74.1(1.5) 微克/立方米相比, 下降 6.2(0.4) 微克/立方米, 降幅 8.3%。

2024 年, 汾渭平原是 PM_{10} 平均浓度最高的重点地区, 浓度均值为 89.1(2.2) 微克/立方米, 比 2023 年的 94.9(2.6) 微克/立方米下降 5.8(1.7) 微克/立方米, 比 2019 年的 100.9(3.2) 微克/立方米下降 11.8(3.1) 微克/立方米, 比 2018 年的 121.3(4.7) 微克/立方米下降 32.2(4.4) 微克/立方米。京津冀及周边“2+36”城市 PM_{10} 浓度均值为 82.3(1.5) 微克/立方米, 比 2023 年的 88.9(1.3) 微克/立方米下降 6.6(0.6) 微克/立方米, 比 2019 年的 100.4(1.9) 微克/立方米下降 18.1(1.7) 微克/立方米, 比 2018 年的 122.8(2.5) 微克/立方米下降 40.5(2) 微克/立方米。长三角地区 PM_{10} 浓度均值为 60.9(2.4) 微克/立方米, 比 2023 年的 68.6(2.2) 微克/立方米下降 7.7(0.7) 微克/立方米, 比 2019 年的 71.5(2.5) 微克/立方米下降 10.6(1) 微克/立方米, 比 2018 年的 78.7(2.9) 微克/立方米下降 17.8(1.1) 微克/立方米。“其他城市” PM_{10} 浓度均值为 59.3(2) 微克/立方米, 比 2023 年的 64.7(2) 微克/立方米下降 5.4(0.6) 微克/立方米, 比 2019 年的 63.8(2.1) 微克/立方米下降 4.5(1) 微克/立方米, 比 2018 年的 77.4(3) 微克/立方米下降 18.1(1.5) 微克/立方米。

2024 年“4+151”城市中, PM_{10} 年均浓度超过 70 微克/立方米的城市有 71 个, 比 2023 年减少 9 个。其中, 京津冀及周边“2+36”城市有 35 个, 比 2023 年减少 1 个; 汾渭平原 13 个, 与 2023 年持

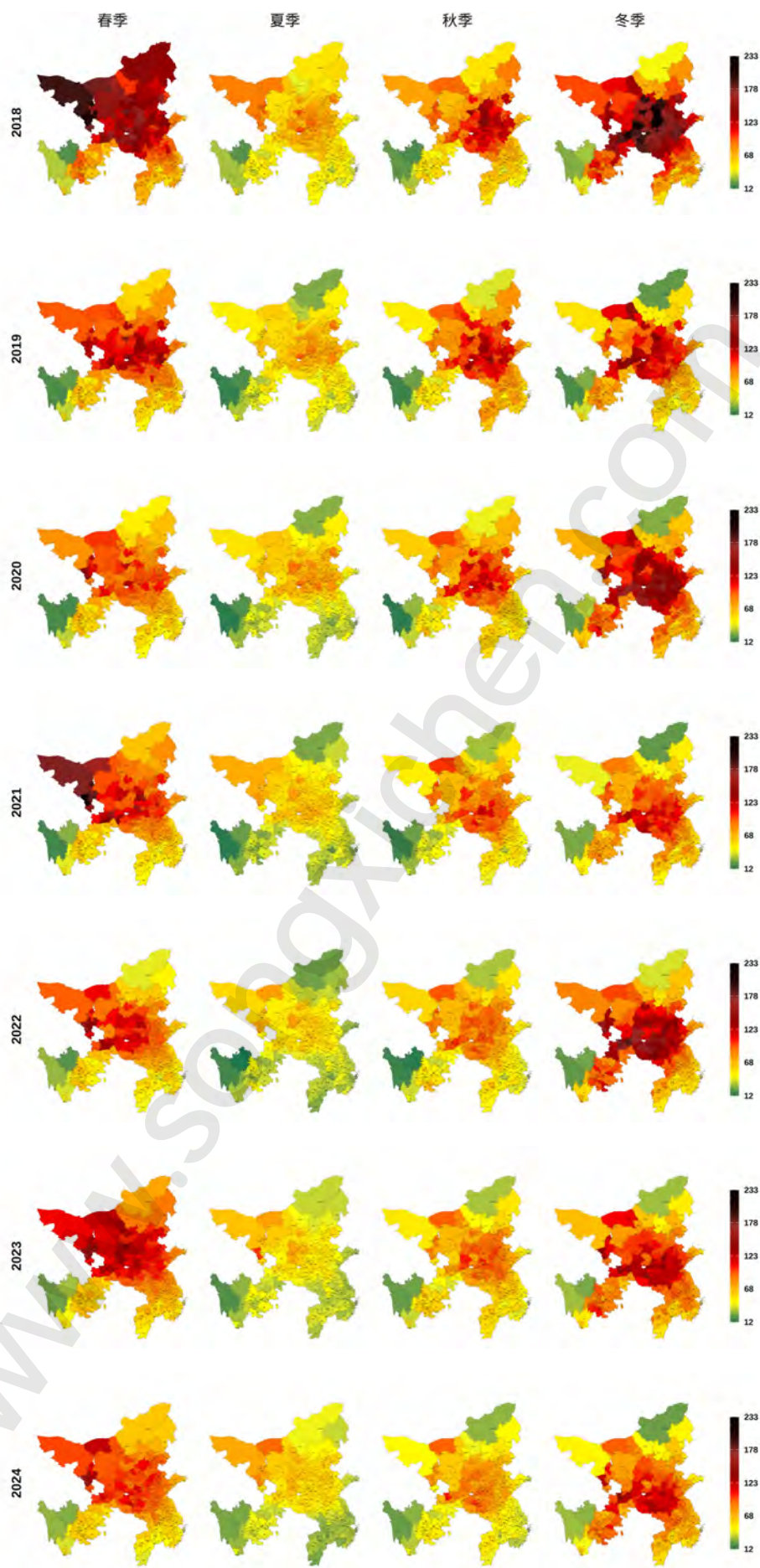


图 17: “4+151” 城市气象调整后 2018 年至 2024 年 PM_{10} 季节平均浓度 (微克/立方米)

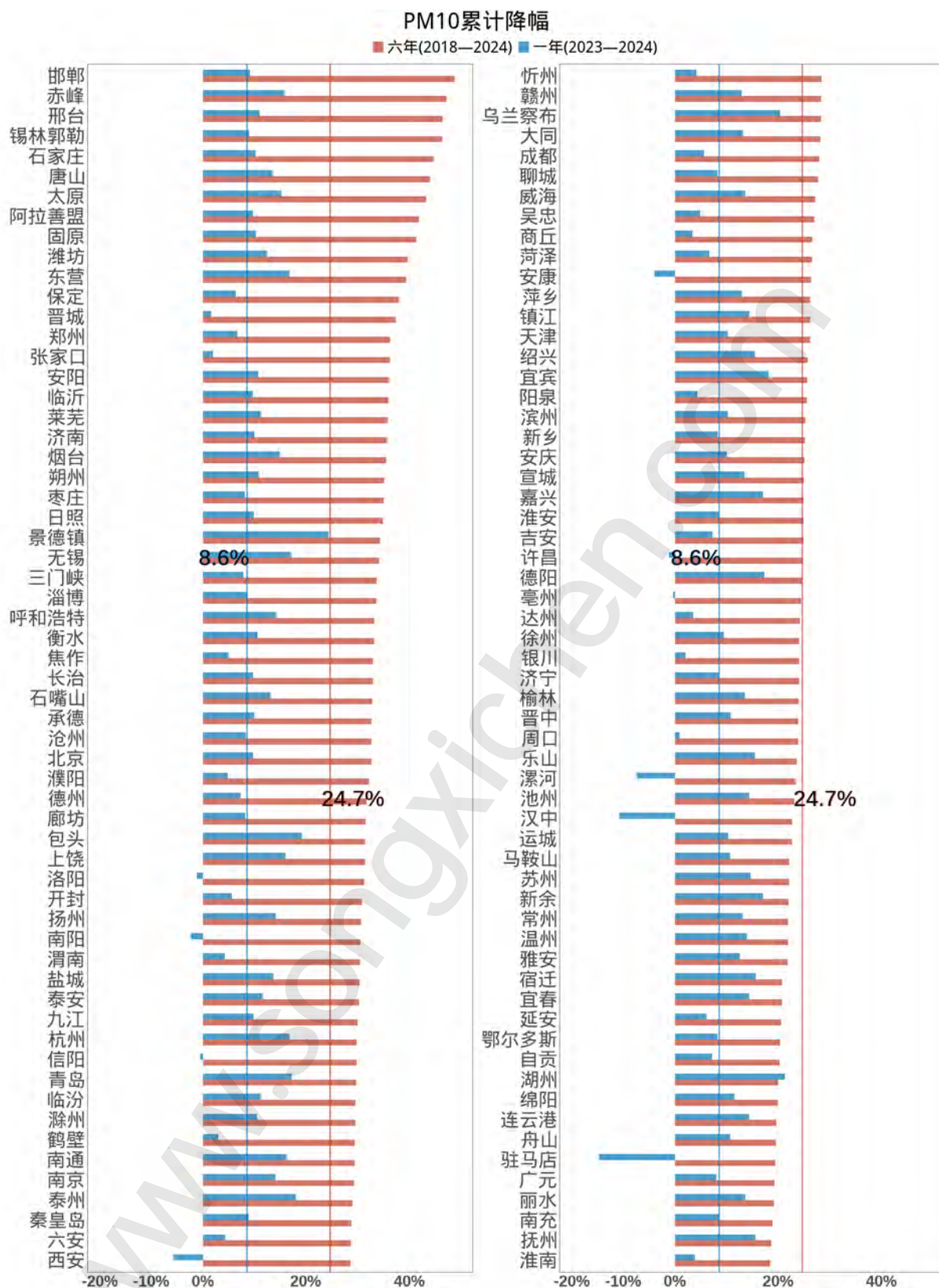


图 18: “4+151”城市气象调整后 PM₁₀ 浓度过去一年（蓝色）、六年（红色）的累计降幅，蓝色和红色竖线分别代表“4+151”城市的一年和六年平均降幅（注：负数代表平均浓度相对升高）

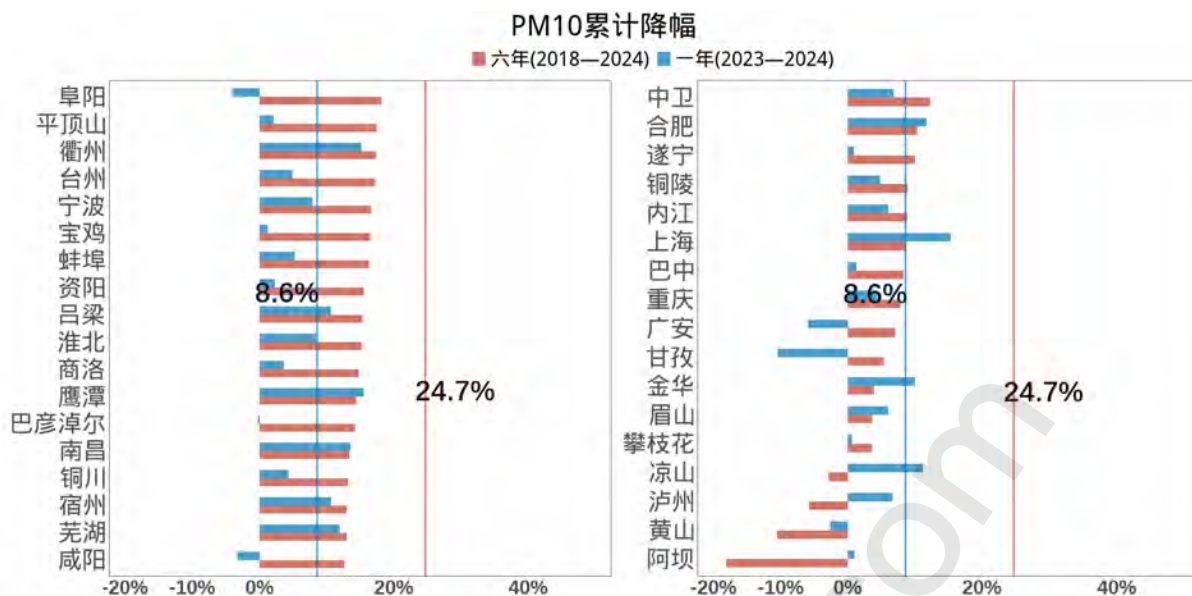


图 19: “4+151”城市气象调整后 PM₁₀ 浓度过去一年（蓝色）、六年（红色）的累计降幅，蓝色和红色竖线分别代表“4+151”城市的一年和六年平均降幅（注：负数代表平均浓度相对升高）

平；长三角地区有 7 个，比 2023 年减少 4 个；“其他城市”有 16 个，比 2023 年减少 4 个。年均浓度低于 50 微克/立方米的城市有 28 个，比 2023 年增加 15 个。其中，长三角地区有 7 个，比 2023 年增加 5 个；“其他城市”有 21 个，比 2023 年增加 10 个。

根据图 18、图 19，相比 2018 年，2024 年“4+151”城市中，有 151 个城市年均 PM₁₀ 浓度呈现不同程度下降，有 4 个城市年均 PM₁₀ 浓度上升，分别为凉山、泸州、黄山、阿坝。PM₁₀ 六年累计降幅的城市均值为 24.7% (0.9%)。有 17 个城市累计降幅超过 36%，包括京津冀及周边“2+36”城市的 10 个城市（邯郸、邢台、石家庄、唐山、潍坊、东营、保定、郑州、安阳、临沂），汾渭平原的太原、晋城。从城市降幅排名来看，河北、北京、山东 PM₁₀ 治理效果相对较好。

相比 2023 年，“4+151”城市中，有 139 个城市年均 PM₁₀ 浓度下降，有 16 个城市年均 PM₁₀ 浓度上升。PM₁₀ 浓度降幅的城市均值为 8.6% (0.5%)。从城市 PM₁₀ 浓度降幅排名来看，上海、江苏、江西 PM₁₀ 治理效果相对较好。

根据图 20、图 21、图 22，2024 年“4+151”城市中，PM₁₀ 年均浓度最高的城市为中卫 (111.5 微克/立方米)、咸阳 (106.9 微克/立方米)、平顶山 (101.2 微克/立方米)。浓度最高的 10 个城市包括河南的 4 个城市（平顶山、焦作、漯河、驻马店），宁夏的 2 个城市（中卫、银川），陕西的 2 个城市（咸阳、渭南），内蒙古巴彦淖尔，山西临汾；其中中卫已连续 5 年在列，平顶山、咸阳已连续 3 年在列。

3.2.3 PM_{10-2.5} 的浓度

2018 年“4+151”城市 PM_{10-2.5} 浓度均值（标准误差）为 42.1(1.4) 微克/立方米，2024 年下降至 30(0.9) 微克/立方米，累计降幅 28.7%；年均下降 2 微克/立方米。与 2019 年浓度均值 33.7(1) 微克/立方米相比，下降 3.7(0.6) 微克/立方米；与 2023 年浓度均值 33.5(1) 微克/立方米相比，下降

	94.7	113.6	123.4	117.9	119.7	111.5	1 中卫
	107.2	111.0	100.7	118.5	103.4	106.9	2 咸阳
	91.3	93.5	97.1	111.3	103.4	101.2	3 平顶山
	91.4	93.6	106.3	95.9	100.6	100.9	4 巴彦淖尔
	103.2	95.5	83.5	100.9	107.9	95.9	5 临汾
	114.0	113.6	112.6	118.6	99.5	95.2	6 渭南
	114.5	117.7	102.4	107.2	100.0	95.0	7 焦作
	83.7	95.0	100.6	92.1	96.1	94.1	8 银川
	98.6	102.5	92.9	98.2	87.0	93.5	9 漯河
	87.5	84.0	76.7	89.0	81.1	93.1	10 驻马店
	115.2	124.9	105.1	107.0	99.4	92.8	11 菏泽
	115.4	110.5	113.5	106.7	104.0	92.7	12 安阳
	100.0	106.4	105.2	105.8	101.0	92.6	13 新乡
	92.4	97.7	109.3	106.5	96.9	92.2	14 吴忠
	105.5	106.6	97.4	100.4	99.9	91.7	15 聊城
	91.9	87.7	80.7	102.3	102.7	91.6	16 晋中
	115.3	107.9	92.9	101.9	90.1	91.2	17 洛阳
	97.5	93.6	86.8	94.9	91.6	90.8	18 周口
	90.3	94.8	79.9	98.8	89.4	90.5	19 许昌
	102.0	103.8	98.9	109.4	100.6	90.2	20 运城
	99.3	108.4	116.6	103.1	103.7	90.1	21 石嘴山
	95.7	111.1	101.9	104.5	100.2	89.5	22 吕梁
	91.4	95.4	82.5	98.1	93.2	89.2	23 阳泉
	100.0	104.7	104.3	103.4	91.1	88.4	24 鹤壁
	103.1	111.5	98.1	112.1	83.6	88.4	25 西安
	100.3	101.2	90.1	94.7	95.1	88.2	26 德州
	118.1	117.3	99.8	103.0	103.8	88.0	27 太原
	100.4	104.0	94.8	103.0	92.7	87.5	28 开封
	111.1	106.5	95.1	101.5	97.8	87.1	29 朔州
	86.6	84.3	81.2	94.4	89.7	85.8	30 铜川
	121.0	116.8	92.9	91.3	86.7	85.3	31 晋城
	103.3	105.2	93.0	96.9	90.4	84.4	32 郑州
	111.9	112.9	94.9	90.3	91.6	84.1	33 枣庄
	94.5	97.1	84.1	90.2	86.8	83.9	34 商丘
	118.7	104.7	97.9	101.5	94.4	83.9	35 邢台
	118.7	110.0	91.8	99.6	93.3	83.8	36 石家庄
	106.5	106.9	101.1	91.1	94.1	83.4	37 莱芜
	102.3	103.7	88.9	90.8	87.5	83.3	38 濮阳
	96.2	98.7	87.6	88.4	92.0	83.3	39 徐州
	91.6	94.0	89.2	86.5	90.5	82.8	40 济宁
	86.0	89.6	82.0	81.2	92.3	82.5	41 宿州
	92.7	100.4	91.3	86.6	80.4	82.3	42 南阳
	98.6	89.0	82.8	87.6	87.7	82.1	43 保定
	87.9	89.4	85.6	78.6	78.9	82.0	44 阜阳
	93.4	93.6	87.7	81.6	89.4	81.9	45 淮北
	98.2	95.8	98.7	93.4	88.4	81.4	46 三门峡
	89.7	93.1	85.7	81.8	80.9	81.2	47 亳州
	98.8	88.5	87.1	75.6	84.1	80.9	48 淮南
	107.7	106.2	91.1	87.3	89.7	80.7	49 济南
	102.4	101.2	88.4	89.7	87.8	80.3	50 淄博
	112.8	108.8	90.7	85.0	88.7	80.1	51 临沂
	120.7	114.1	87.7	88.3	87.8	79.7	52 邯郸
	104.5	105.7	90.6	85.7	89.9	79.5	53 泰安
	79.0	89.2	78.6	82.7	82.9	79.5	54 忻州
	86.3	87.0	79.7	84.2	80.3	79.3	55 宝鸡
	88.2	85.3	83.7	88.0	86.8	77.9	56 滨州
	97.5	91.4	77.8	96.7	87.1	77.8	57 衡水
	85.8	81.4	75.9	77.4	84.4	77.5	58 廊坊
	87.2	85.3	80.3	75.2	80.7	76.5	59 蚌埠
	101.7	93.6	79.1	76.8	94.6	76.4	60 包头
	89.2	88.7	71.4	82.3	82.8	75.9	61 沧州
	82.6	78.4	75.0	77.2	79.8	75.0	62 延安
	84.5	81.0	78.0	77.3	83.2	74.7	63 天津
	74.6	83.6	74.9	72.0	81.0	74.3	64 鄂尔多斯
	84.8	84.5	75.7	81.6	85.3	73.8	65 榆林
	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年	

图 20: “4+151”城市气象调整后 2019 年至 2024 年 PM₁₀ 年平均浓度 (微克/立方米) 年际变化表 (浓度底纹从红到绿表示年平均浓度由大到小; 左侧红、橙、紫、灰方格分别标记京津冀“2+36”城市、汾渭平原、长三角地区、其他城市)

	90.7	96.1	82.3	86.3	81.6	73.7	66 长治
	108.5	98.5	85.6	80.4	84.7	73.2	67 唐山
	91.0	80.4	68.6	71.4	85.1	72.9	68 呼和浩特
	86.0	90.2	72.5	83.1	83.7	72.6	69 大同
	103.4	96.4	79.7	76.2	80.9	70.9	70 潍坊
	76.6	70.8	78.7	85.4	78.4	70.3	71 固原
	76.0	76.9	70.3	72.5	69.6	70.0	72 信阳
	77.9	72.8	72.7	66.6	72.3	68.8	73 铜陵
	70.4	68.2	79.2	72.0	76.5	67.5	74 合肥
	78.7	78.8	75.4	71.1	79.5	67.0	75 宿迁
	75.2	71.8	67.1	65.3	72.3	66.2	76 淮安
	93.3	84.6	74.1	76.8	79.5	66.1	77 东营
	61.8	66.3	85.0	73.5	73.1	66.0	78 阿拉善盟
	77.8	79.1	61.6	73.1	59.5	66.0	79 汉中
	60.4	65.7	54.2	65.1	66.5	64.1	80 商洛
	68.8	71.2	61.3	64.3	68.3	63.4	81 自贡
	71.8	74.2	72.3	64.2	66.0	63.1	82 六安
	54.9	50.7	44.8	71.9	67.4	62.9	83 泸州
	85.2	77.3	69.2	65.1	69.4	62.5	84 日照
	74.2	71.9	67.8	61.5	68.5	62.4	85 秦皇岛
	52.8	56.8	47.7	60.1	58.9	62.4	86 广安
	73.2	72.6	67.9	64.3	72.3	62.0	87 扬州
	70.8	68.1	58.7	67.3	68.2	61.6	88 北京
	64.0	61.2	62.7	61.5	69.4	61.1	89 芜湖
	71.2	65.2	64.0	57.9	67.4	60.2	90 马鞍山
	75.6	70.8	66.0	61.6	69.1	60.0	91 常州
	61.5	62.0	50.3	59.6	65.5	59.9	92 南充
	63.8	65.0	65.2	61.6	69.7	59.7	93 连云港
	53.3	54.5	47.6	51.5	63.6	59.7	94 眉山
	56.9	58.0	52.6	56.3	62.1	59.4	95 重庆
	65.0	67.2	60.9	71.1	71.2	58.9	96 德阳
	50.5	56.4	46.9	61.8	60.3	58.9	97 资阳
	73.3	72.0	71.2	63.4	65.7	58.8	98 滁州
	66.9	66.6	57.9	55.7	60.2	58.2	99 达州
	67.2	67.5	60.6	63.4	67.3	58.2	100 南昌
	57.0	59.6	51.3	62.7	65.7	58.1	101 绵阳
	66.3	65.3	60.6	57.8	64.3	57.9	102 承德
	65.7	68.0	55.8	61.1	60.8	57.4	103 成都
	63.2	71.6	58.7	68.8	70.2	57.4	104 宜宾
	76.2	66.5	62.6	57.5	66.9	57.3	105 镇江
	76.7	68.6	63.1	57.3	69.2	57.3	106 青岛
	63.0	57.0	58.8	58.8	63.4	57.0	107 安庆
	60.5	58.1	55.1	51.1	62.4	56.2	108 金华
	55.9	53.5	45.9	51.7	56.1	55.7	109 攀枝花
	63.5	63.4	57.8	56.7	61.1	55.1	110 九江
	62.3	64.6	59.8	56.8	66.2	54.9	111 新余
	72.2	65.3	61.4	59.1	63.4	54.5	112 南京
	70.8	62.3	61.1	59.4	66.5	54.5	113 泰州
	52.7	60.9	52.2	63.0	64.5	54.5	114 乐山
	64.8	59.5	52.8	52.6	62.5	54.0	115 盐城
	67.1	65.9	52.8	55.6	61.8	53.8	116 萍乡
	47.8	53.8	44.9	58.6	54.3	53.8	117 遂宁
	66.1	68.3	57.1	51.2	54.5	53.4	118 张家口
	50.4	54.3	47.7	53.2	56.1	52.7	119 内江
	59.4	59.4	58.9	53.8	61.2	52.3	120 池州
	47.3	48.1	42.0	47.1	52.6	51.9	121 巴中
	60.5	51.9	50.0	52.2	59.7	51.7	122 宣城
	70.4	63.4	62.1	56.9	62.0	51.5	123 杭州
	76.1	69.2	61.4	56.1	60.6	51.5	124 烟台
	60.0	54.8	50.6	49.1	60.0	51.2	125 苏州
	61.7	55.8	55.3	51.9	59.9	50.6	126 绍兴
	59.7	58.2	47.7	55.7	48.7	50.6	127 安康
	71.1	64.2	57.0	53.7	60.2	49.9	128 无锡
	60.9	59.7	56.0	53.3	62.7	49.3	129 湖州
	62.3	57.7	47.5	49.7	53.2	49.3	130 吉安
	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年	

图 21：“4+151”城市气象调整后 2019 年至 2024 年 PM₁₀ 年平均浓度（微克/立方米）年际变化表（浓度底纹从红到绿表示年平均浓度由大到小；左侧红、橙、紫、灰方格分别标记京津冀“2+36”城市、汾渭平原、长三角地区、其他城市）

	46.5	46.9	40.6	48.8	53.3	49.1	131 广元
	56.6	57.8	53.7	52.5	56.9	48.8	132 宜春
	48.8	48.1	51.1	48.1	57.2	48.5	133 衢州
	56.4	53.0	51.5	47.7	58.1	48.2	134 嘉兴
	49.4	54.3	58.9	56.3	60.1	47.9	135 乌兰察布
	40.4	40.1	33.5	35.0	46.4	47.6	136 黄山
	49.9	48.4	45.9	44.4	55.8	47.3	137 上海
	55.0	53.0	48.0	47.0	55.9	47.2	138 抚州
	64.9	62.1	54.5	47.7	55.7	46.9	139 赤峰
	55.3	59.3	54.7	49.4	54.5	46.9	140 温州
	49.7	43.6	41.6	39.4	49.8	45.8	141 宁波
	58.6	53.7	48.0	47.1	54.6	45.7	142 南通
	55.9	53.7	48.8	46.9	53.3	44.8	143 上饶
	40.9	41.8	37.1	43.6	50.7	44.3	144 雅安
	53.0	50.0	47.3	43.5	46.1	43.8	145 台州
	49.0	45.1	38.4	43.9	51.5	43.5	146 鹰潭
	57.5	51.4	50.7	45.7	49.2	42.5	147 威海
	47.2	49.2	40.5	39.8	45.8	39.9	148 赣州
	35.6	35.5	35.2	33.0	42.6	38.8	149 锡林郭勒
	45.4	46.8	45.1	40.3	44.9	38.7	150 丽水
	50.7	50.1	46.6	47.1	48.7	36.8	151 景德镇
	34.4	39.7	34.9	40.5	39.9	35.4	152 凉山
	37.0	34.3	31.4	30.2	37.5	33.5	153 舟山
	22.2	24.5	24.0	17.8	26.4	26.1	154 阿坝
	17.3	17.3	18.2	20.8	23.4	25.9	155 甘孜
	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年	

图 22: “4+151”城市气象调整后 2019 年至 2024 年 PM₁₀ 年平均浓度 (微克/立方米) 年际变化表 (浓度底纹从红到绿表示年平均浓度由大到小; 左侧红、橙、紫、灰方格分别标记京津冀“2+36”城市、汾渭平原、长三角地区、其他城市)

3.5(0.2) 微克/立方米, 降幅 10.4%。

2024 年, 汾渭平原是 PM_{10-2.5} 平均浓度最高的重点地区, 浓度均值为 43(1.9) 微克/立方米, 比 2023 年的 48.7(2.3) 微克/立方米下降 5.7(1.1) 微克/立方米, 比 2019 年的 46.4(2.4) 微克/立方米下降 3.4(2.6) 微克/立方米, 比 2018 年的 57.6(3.1) 微克/立方米下降 14.6(3.3) 微克/立方米。京津冀及周边“2+36”城市 PM_{10-2.5} 浓度均值为 36.4(0.7) 微克/立方米, 比 2023 年的 40.1(0.7) 微克/立方米下降 3.7(0.3) 微克/立方米, 比 2019 年的 44(1.3) 微克/立方米下降 7.6(1.2) 微克/立方米, 比 2018 年的 55.3(1.4) 微克/立方米下降 18.9(1.3) 微克/立方米。“其他城市” PM_{10-2.5} 浓度均值为 26.7(1.6) 微克/立方米, 比 2023 年的 29.6(1.6) 微克/立方米下降 2.9(0.4) 微克/立方米, 比 2019 年的 28.2(1.5) 微克/立方米下降 1.5(0.7) 微克/立方米, 比 2018 年的 37.1(2.3) 微克/立方米下降 10.4(1) 微克/立方米。长三角地区 PM_{10-2.5} 浓度均值为 24.3(1) 微克/立方米, 比 2023 年的 28.1(1) 微克/立方米下降 3.8(0.4) 微克/立方米, 比 2019 年的 28.3(1.2) 微克/立方米下降 4(0.8) 微克/立方米, 比 2018 年的 30.6(1.3) 微克/立方米下降 6.3(0.9) 微克/立方米。

2024 年“4+151”城市中, PM_{10-2.5} 年均浓度超过 35 微克/立方米的的城市有 51 个, 比 2023 年减少 14 个。其中, 京津冀及周边“2+36”城市有 23 个, 比 2023 年减少 10 个; 汾渭平原有 11 个, 比 2023 年减少 1 个; 长三角地区有 2 个(亳州、宿州), 比 2023 年减少 2 个; “其他城市”有 15 个, 比 2023 年减少 1 个。年均浓度低于 25 微克/立方米的的城市有 67 个, 比 2023 年增加 16 个。其中, 长三角地区有 20 个, 比 2023 年增加 10 个; “其他城市”有 47 个, 比 2023 年增加 6 个。

根据图 23、图 24, 相比 2018 年, 2024 年“4+151”城市中, 有 145 个城市年均 PM_{10-2.5} 浓度呈

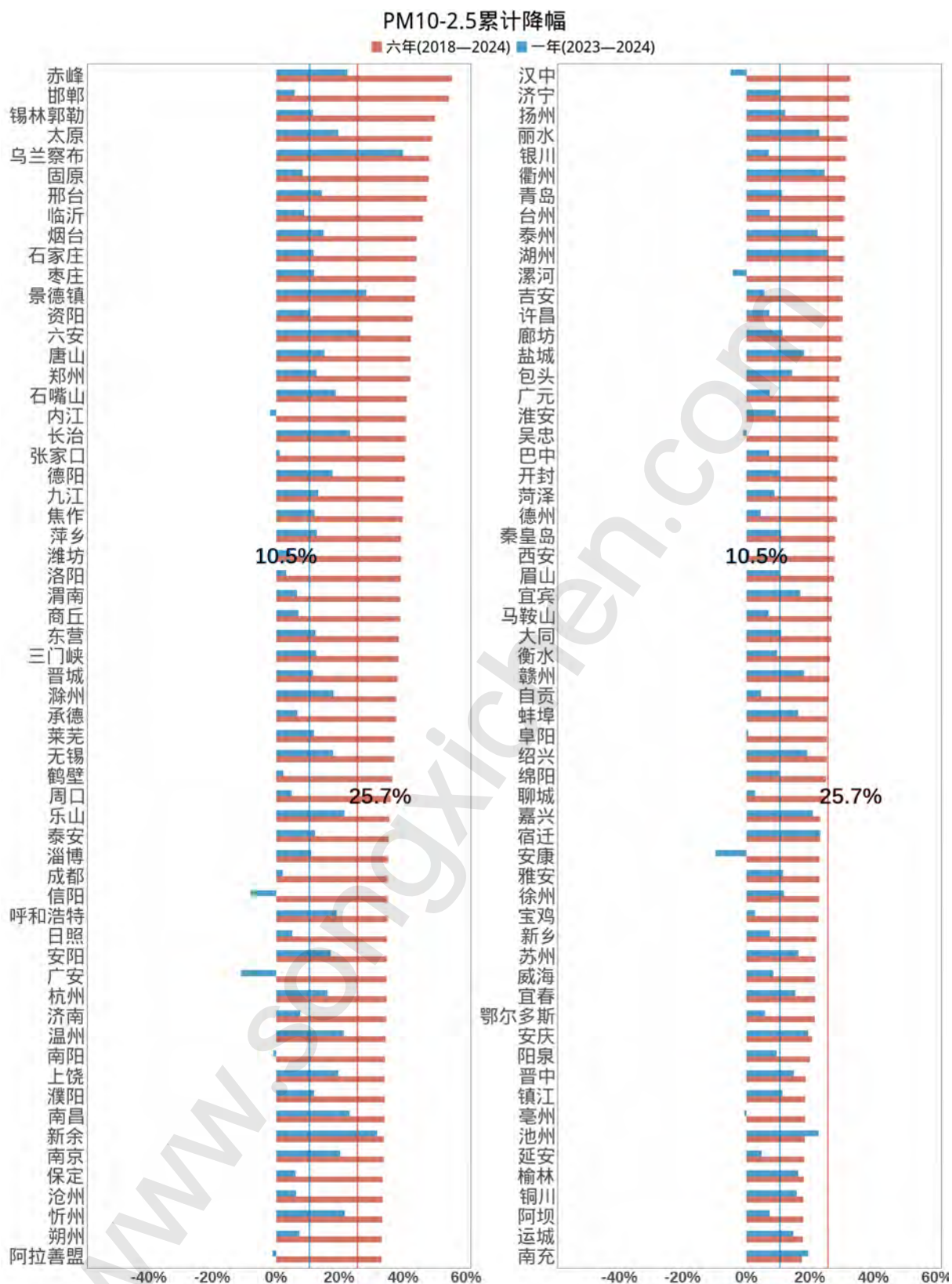


图 23: “4+151”城市气象调整后 PM_{10-2.5} 浓度过去一年(蓝色)、六年(红色)的累计降幅,蓝色和红色竖线分别代表“4+151”城市的一年和六年平均降幅(注:负数代表平均浓度相对升高)

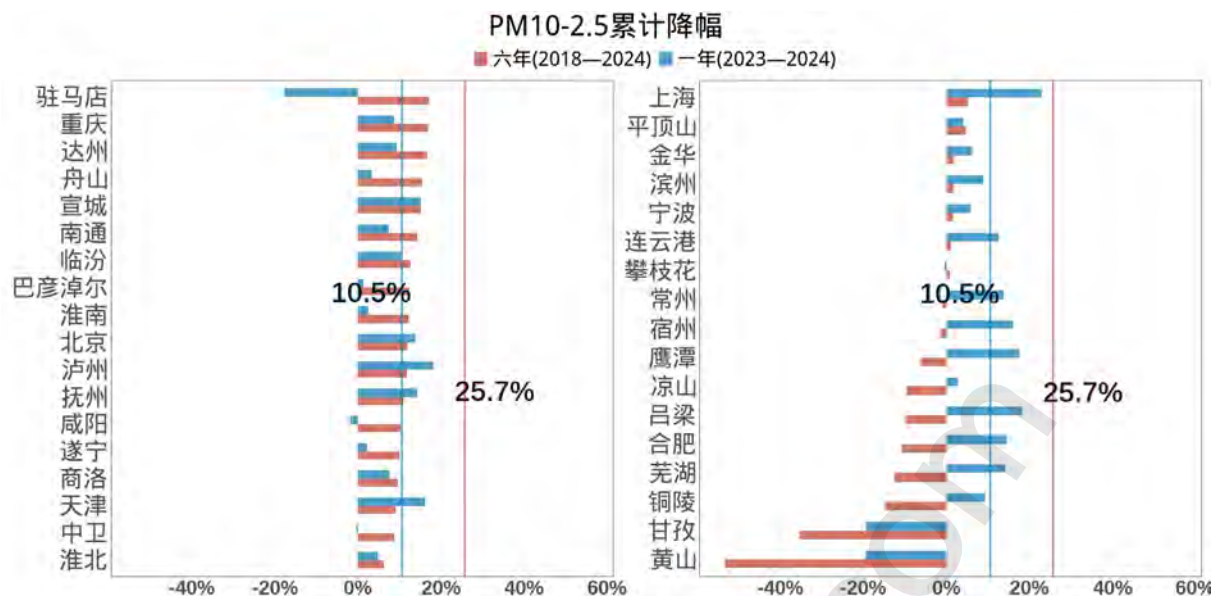


图 24: “4+151”城市气象调整后 $PM_{10-2.5}$ 浓度过去一年（蓝色）、六年（红色）的累计降幅，蓝色和红色竖线分别代表“4+151”城市的一年和六年平均降幅（注：负数代表平均浓度相对升高）

现不同程度下降，有 10 个城市年均 $PM_{10-2.5}$ 浓度上升。 $PM_{10-2.5}$ 六年累计降幅的城市均值为 25.7% (1.3%)。有 16 个城市累计降幅超过 42%，包括京津冀及周边“2+36”城市的 7 个城市（邯郸、邢台、临沂、石家庄、枣庄、唐山、郑州），汾渭平原的太原，长三角地区的六安。从城市降幅排名来看，河北、内蒙古、山东 $PM_{10-2.5}$ 治理效果相对较好。

相比 2023 年，“4+151”城市中，有 139 个城市年均 $PM_{10-2.5}$ 浓度下降，有 16 个城市年均 $PM_{10-2.5}$ 浓度上升。 $PM_{10-2.5}$ 浓度降幅的城市均值为 10.5% (0.7%)。从城市 $PM_{10-2.5}$ 浓度降幅排名来看，上海、江西、天津 $PM_{10-2.5}$ 治理效果相对较好。内江、张家口六年累计降幅排名靠前，但本年度升幅排名靠前，需防范浓度反弹风险。

3.3 二氧化硫

二氧化硫 (SO_2) 是一种无色、有刺激性气味的气体，一般认为无毒或者毒性不大，但是二氧化硫在大气中易被氧化形成 SO_3 ，再与水分子结合生成硫酸分子，经过均相或非均相成核作用，形成硫酸气溶胶，并同时发生化学反应生成硫酸盐。硫酸和硫酸盐可形成硫酸烟雾和酸性降水，造成较大的危害。二氧化硫之所以被认为是重要的大气污染物，原因就在于它参与了硫酸烟雾和酸雨的形成。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。

“十一五”规划（2006-2010 年）期间，酸雨和二氧化硫污染是我国大气污染防治的重点任务。经历十年治理，持续实施重点区域煤炭消费总量控制、重点区域二氧化硫全面执行大气污染物特别排放限值，燃煤锅炉综合整治等专项治理行动，2020 年《第二次全国污染源普查公报》显示，2017 年二氧化硫排放量比 2007 年已实现削减率 72%。根据生态环境部 2025 年 1 月数据，2024 年 1-12 月全国 339 个地级及

以上城市 SO₂ 平均浓度为 8 微克/立方米，这一浓度水平已稳定低于国家一级标准（适用于自然保护区）值。

中国目前二氧化硫浓度的限值标准如表 3。美国环境保护署关于二氧化硫浓度的限值标准为：一级标准为 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。

图 25-27和图 28分别展示了“4+151”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。根据上述图表，我们可以总结出二氧化硫浓度有如下几个特征：

表 3: 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	

3.3.1 二氧化硫季度评估

2018 年春季“4+151”城市 SO₂ 浓度均值（标准误差）为 16.3(0.6) 微克/立方米，2024 年下降至 9(0.2) 微克/立方米，累计降幅 44.8%；年均下降 1.2 微克/立方米。与 2019 年浓度均值 13.4(0.4) 微克/立方米相比，下降 4.4(0.4) 微克/立方米；与 2023 年浓度均值 9.7(0.2) 微克/立方米相比，下降 0.7(0.2) 微克/立方米，降幅 7.2%。

与 2023 年春季相比，“4+151”城市中，有 87 个城市 SO₂ 浓度均值显著下降，占比 56.1%，降幅平均值为 19.6%；有 48 个城市 SO₂ 浓度均值显著上升，占比 31%，升幅平均值为 17.7%。2024 年春季，攀枝花平均浓度最高，为 20.5 微克/立方米；成都平均浓度最低，为 3.7 微克/立方米。全部城市平均浓度达到国家年平均浓度二级标准。信阳为本季度 SO₂ 同比改善幅度最大城市，平均浓度相比 2023 年同期的 10 微克/立方米下降 48%。重点区域中，有 22 个城市浓度降幅超过 20%，包括京津冀及周边地区的 16 个城市（济宁、保定、菏泽、石家庄、邢台、廊坊、临沂、周口、沧州、衡水、邯郸、开封、漯河、唐山、安阳、聊城），汾渭平原的吕梁、运城、西安，长三角地区的宿迁、无锡、盐城。绵阳为浓度同比升幅最大城市，平均浓度相比去年同期的 5.7 微克/立方米上升 51.2%。重点区域中，有 6 个城市浓度升幅超过 20%，包括京津冀及周边地区的平顶山、秦皇岛、日照、泰安，长三角地区的绍兴、宁波。SO₂ 浓度显著上升城市主要集中于四川、山东、江西、河南、浙江，分别有 8、8、5、5、5 个城市浓度上升。

2018 年夏季“4+151”城市 SO₂ 浓度均值（标准误差）为 11.6(0.4) 微克/立方米，2024 年下降至 7.9(0.2) 微克/立方米，累计降幅 31.9%；年均下降 0.6 微克/立方米。与 2019 年浓度均值 10(0.4) 微克/立方米相比，下降 2.1(0.3) 微克/立方米；与 2023 年浓度均值 8.1(0.2) 微克/立方米相比，下降 0.2(0.2) 微克/立方米，降幅 2.5%。

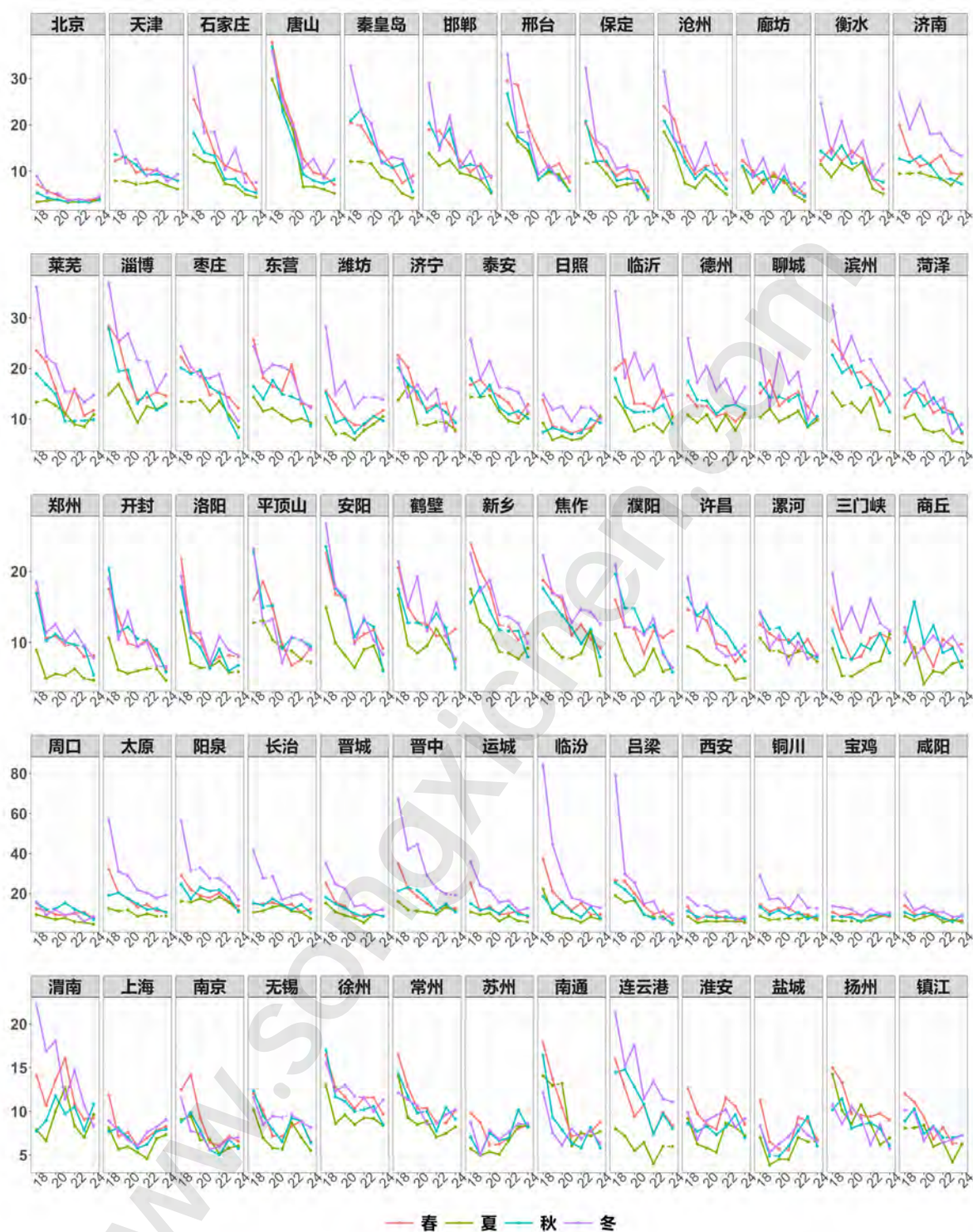


图 25: “4+151”城市气象调整后 2018 年至 2024 年 SO₂ 季节平均浓度 (微克/立方米) 变化序列图, 图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

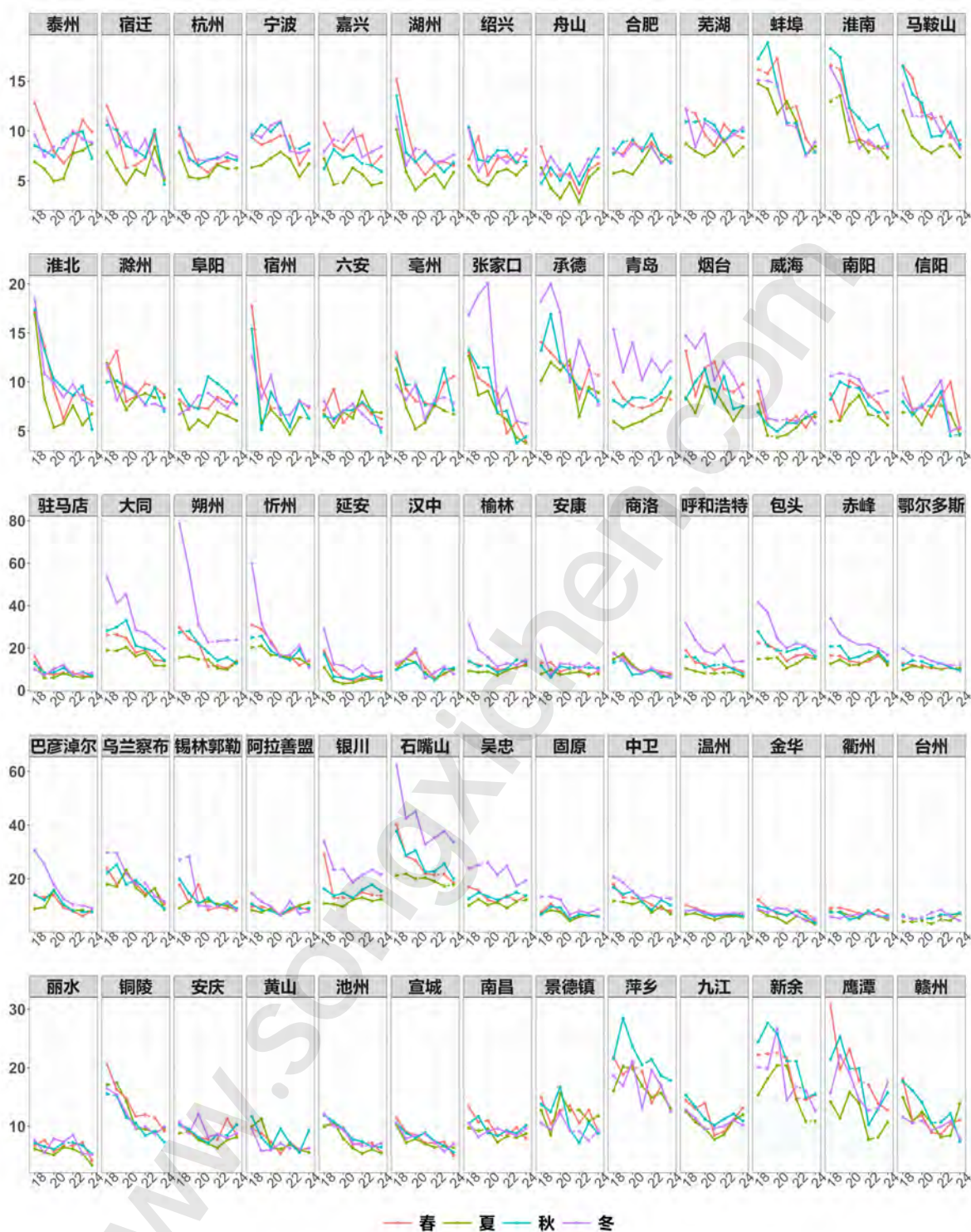


图 26: “4+151”城市气象调整后 2018 年至 2024 年 SO₂ 季节平均浓度 (微克/立方米) 变化序列图, 图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

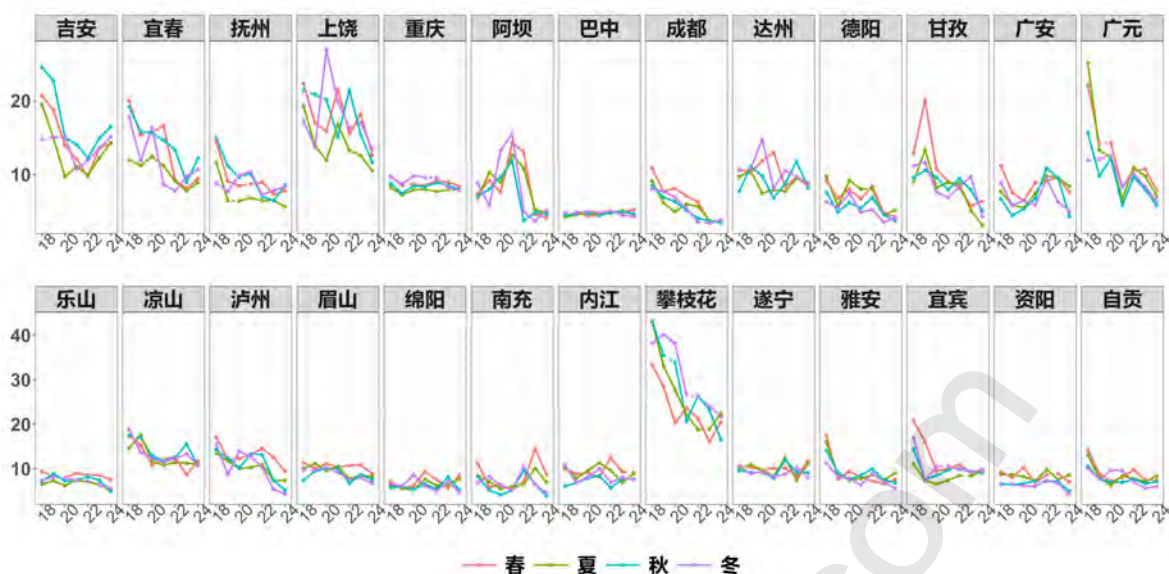


图 27: “4+151”城市气象调整后 2018 年至 2024 年 SO₂ 季节平均浓度 (微克/立方米) 变化序列图, 图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

与 2023 年夏季相比, “4+151”城市中, 有 70 个城市 SO₂ 浓度均值显著下降, 占比 45.2%, 降幅平均值为 19.5%; 有 62 个城市 SO₂ 浓度均值显著上升, 占比 40%, 升幅平均值为 19.7%。2024 年夏季, 攀枝花平均浓度最高, 为 22.5 微克/立方米; 金华平均浓度最低, 为 3.1 微克/立方米。全部城市平均浓度达到国家年平均浓度二级标准。焦作为本季度 SO₂ 同比改善幅度最大城市, 平均浓度相比 2023 年同期的 11.6 微克/立方米下降 53.8%。重点区域中, 有 15 个城市浓度降幅超过 20%, 包括京津冀及周边地区的 10 个城市 (焦作、保定、邢台、安阳、邯郸、廊坊、沧州、开封、枣庄、鹤壁), 汾渭平原的吕梁、长治、阳泉, 长三角地区的宿迁、无锡。赣州为浓度同比升幅最大城市, 平均浓度相比去年同期的 8.4 微克/立方米上升 65%。重点区域中, 有 11 个城市浓度升幅超过 20%, 包括京津冀及周边地区的 7 个城市 (泰安、莱芜、济南、日照、临沂、德州、三门峡), 汾渭平原的渭南, 长三角地区的宁波、湖州、镇江。SO₂ 浓度显著上升城市主要集中于山东、四川、江苏、江西, 分别有 11、9、7、7 个城市浓度上升。

2018 年秋季 “4+151” 城市 SO₂ 浓度均值 (标准误差) 为 14.6(0.5) 微克/立方米, 2024 年下降至 8.2(0.2) 微克/立方米, 累计降幅 43.8%; 年均下降 1.1 微克/立方米。与 2019 年浓度均值 12.7(0.5) 微克/立方米相比, 下降 4.5(0.4) 微克/立方米; 与 2023 年浓度均值 9.8(0.3) 微克/立方米相比, 下降 1.6(0.2) 微克/立方米, 降幅 16.3%。

与 2023 年秋季相比, “4+151”城市中, 有 111 个城市 SO₂ 浓度均值显著下降, 占比 71.6%, 降幅平均值为 23.5%; 有 28 个城市 SO₂ 浓度均值显著上升, 占比 18.1%, 升幅平均值为 18.8%。2024 年秋季, 石嘴山平均浓度最高, 为 19.9 微克/立方米; 成都平均浓度最低, 为 3.5 微克/立方米。全部城市平均浓度达到国家年平均浓度二级标准。广安为本季度 SO₂ 同比改善幅度最大城市, 平均浓度相比 2023 年同期的 9.5 微克/立方米下降 54.1%。重点区域中, 有 41 个城市浓度降幅超过 20%, 包括京津冀及周边地区的 22 个城市 (秦皇岛、安阳、邯郸、鹤壁、保定、郑州、枣庄、东营、开封、焦作、邢台、濮阳、新

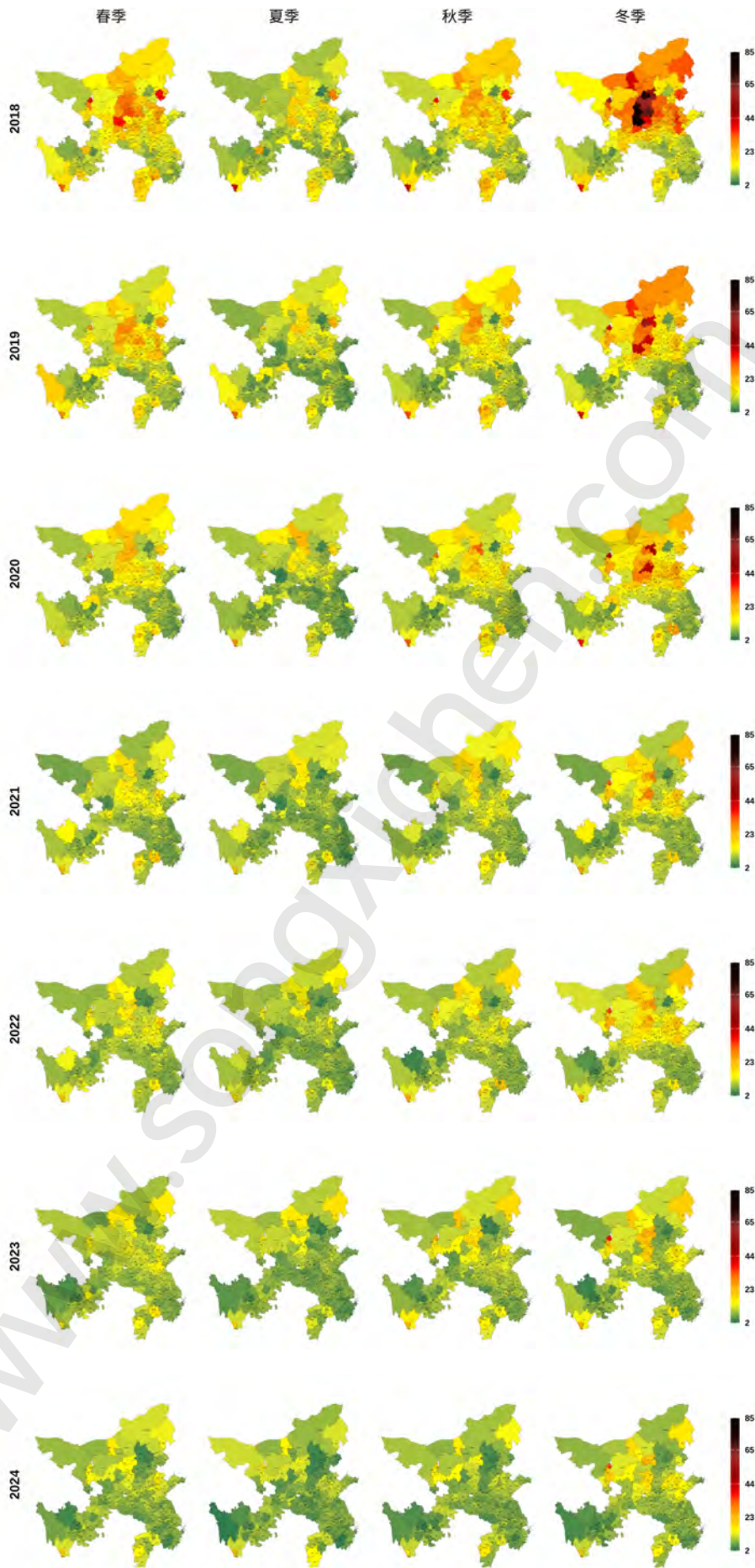


图 28: “4+151”城市气象调整后 2018 年至 2024 年 SO₂ 季节平均浓度 (微克/立方米)

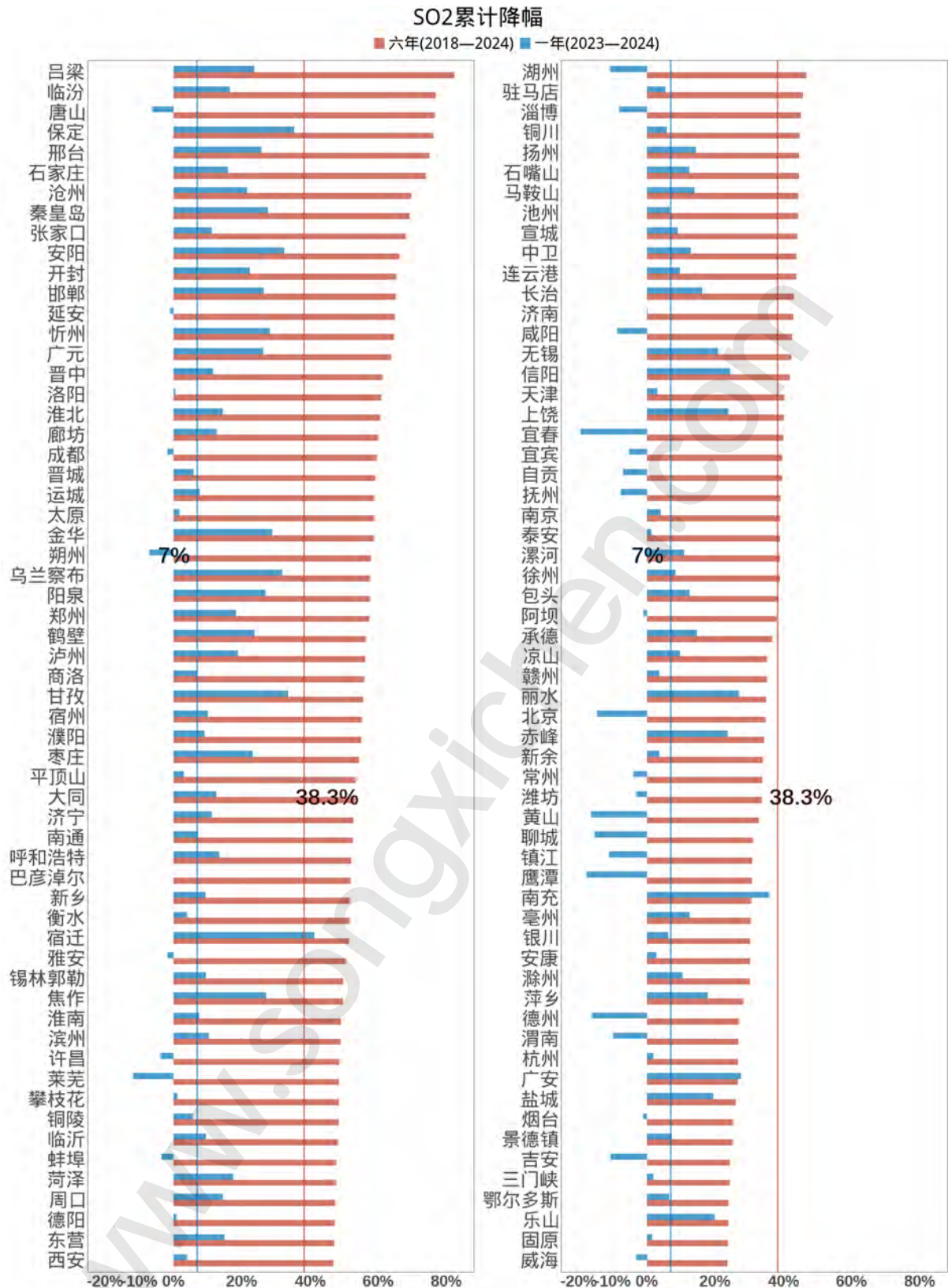


图 29: “4+151”城市气象调整后 SO₂ 浓度过去一年 (蓝色)、六年 (红色) 的累计降幅, 蓝色和红色竖线分别代表“4+151”城市的一年和六年平均降幅 (注: 负数代表平均浓度相对升高)

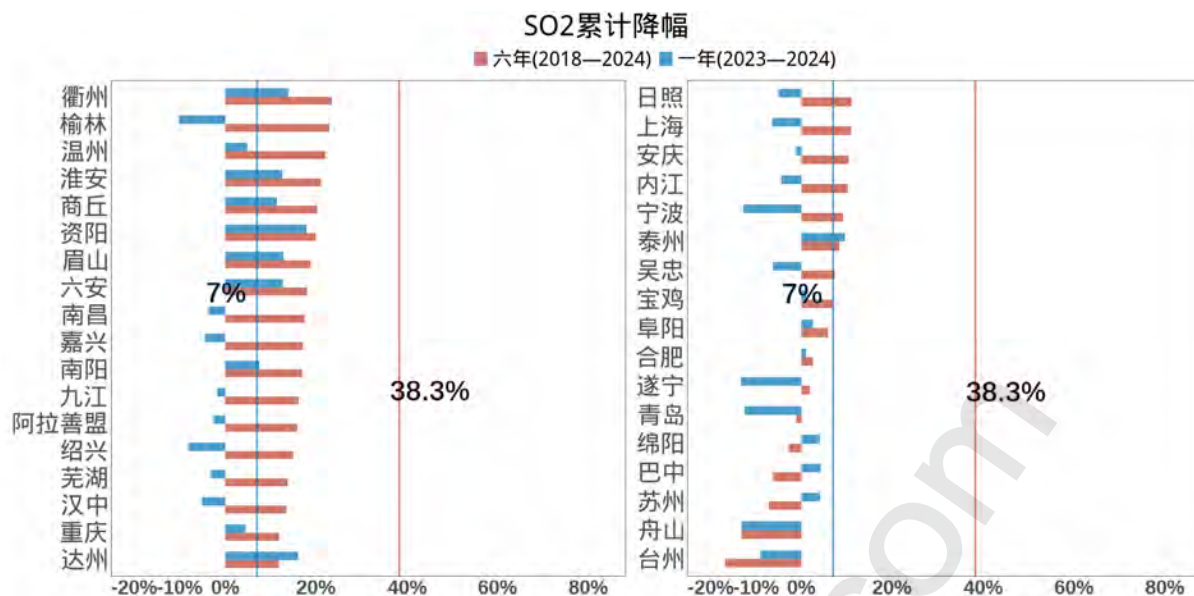


图 30: “4+151”城市气象调整后 SO₂ 浓度过去一年 (蓝色)、六年 (红色) 的累计降幅, 蓝色和红色竖线分别代表“4+151”城市的一年和六年平均降幅 (注: 负数代表平均浓度相对升高)

乡、菏泽、沧州、周口、商丘、临沂、滨州、三门峡、廊坊、许昌), 汾渭平原的 5 个城市 (临汾、阳泉、吕梁、长治、晋中), 长三角地区的 14 个城市 (宿迁、淮北、亳州、盐城、六安、南通、无锡、淮安、泰州、滁州、扬州、宿州、马鞍山、淮南)。黄山为浓度同比升幅最大城市, 平均浓度相比去年同期的 5.5 微克/立方米上升 68.7%。重点区域中, 有 4 个城市浓度升幅超过 20%, 包括京津冀及周边地区的聊城, 汾渭平原的渭南、咸阳, 长三角地区的舟山。SO₂ 浓度显著上升城市主要集中于山东、江西、浙江、陕西, 各有 5 个城市浓度上升。

2018 年冬季“4+151”城市 SO₂ 浓度均值 (标准误差) 为 20.3(1.2) 微克/立方米, 2024 年下降至 9.8(0.4) 微克/立方米, 累计降幅 51.7%; 年均下降 1.8 微克/立方米。与 2019 年浓度均值 14.5(0.7) 微克/立方米相比, 下降 4.7(0.5) 微克/立方米; 与 2023 年浓度均值 10.3(0.4) 微克/立方米相比, 下降 0.5(0.2) 微克/立方米, 降幅 4.9%。

与 2023 年冬季相比, “4+151”城市中, 有 78 个城市 SO₂ 浓度均值显著下降, 占比 50.3%, 降幅平均值为 17.2%; 有 61 个城市 SO₂ 浓度均值显著上升, 占比 39.4%, 升幅平均值为 16.2%。2024 年冬季, 石嘴山平均浓度最高, 为 33.7 微克/立方米; 成都平均浓度最低, 为 3.8 微克/立方米。全部城市平均浓度达到国家年平均浓度二级标准。甘孜为本季度 SO₂ 同比改善幅度最大城市, 平均浓度相比 2023 年同期的 9.7 微克/立方米下降 55.7%。重点区域中, 有 11 个城市浓度降幅超过 20%, 包括京津冀及周边地区的 8 个城市 (秦皇岛、鹤壁、泰安、枣庄、新乡、濮阳、安阳、商丘), 汾渭平原的阳泉、渭南, 长三角地区的扬州。济宁为浓度同比升幅最大城市, 平均浓度相比去年同期的 7.7 微克/立方米上升 59.6%。重点区域中, 有 11 个城市浓度升幅超过 20%, 包括京津冀及周边地区的 9 个城市 (德州、菏泽、北京、衡水、周口、廊坊、唐山、聊城、济宁), 汾渭平原的西安、吕梁。SO₂ 浓度显著上升城市主要集中于安徽、山东、河北, 分别有 8、8、6 个城市浓度上升。

	30.4	30.7	24.5	24.6	25.6	22.4	1 石嘴山
	34.2	30.0	23.3	23.2	20.5	20.3	2 攀枝花
	23.6	19.5	15.7	17.7	18.7	16.3	3 包头
	31.3	22.5	16.6	14.8	14.8	15.9	4 朔州
	15.1	15.3	14.2	16.3	16.8	15.7	5 银川
	17.9	13.5	12.0	11.0	13.6	15.1	6 吉安
	29.1	30.9	20.9	20.9	17.0	14.9	7 大同
	21.8	19.5	14.5	15.8	13.7	14.8	8 淄博
	17.0	15.5	14.0	15.2	13.8	14.7	9 吴忠
	19.6	19.5	16.5	11.9	12.0	14.2	10 鹰潭
	21.1	21.2	17.5	17.5	17.0	14.0	11 萍乡
	19.5	16.1	15.7	17.0	18.0	13.7	12 赤峰
	22.0	23.9	19.4	16.9	14.1	13.6	13 新余
	25.0	24.0	18.0	14.0	15.2	13.5	14 晋中
	21.7	23.1	20.6	22.0	18.3	13.3	15 阳泉
	12.8	11.9	9.1	10.6	11.9	13.1	16 榆林
	13.2	14.4	11.3	13.1	10.8	12.6	17 德州
	20.8	18.9	14.6	14.2	12.6	12.4	18 太原
	19.1	19.8	17.1	17.5	13.7	12.2	19 滨州
	16.4	18.7	18.4	16.7	15.8	12.0	20 上饶
	26.8	20.2	16.3	15.6	16.8	12.0	21 忻州
	18.6	16.2	11.7	12.5	10.6	11.8	22 莱芜
	17.0	18.7	14.9	14.2	14.0	11.7	23 长治
	11.0	11.2	8.6	10.0	11.1	11.5	24 潍坊
	12.1	11.1	9.0	9.7	11.3	11.5	25 九江
	14.2	14.9	13.9	15.3	9.9	11.4	26 聊城
	16.2	17.2	13.7	12.5	11.6	11.4	27 泰安
	16.0	13.8	12.8	13.4	12.5	11.3	28 临沂
	15.9	12.0	11.6	12.2	12.2	11.1	29 凉山
	15.7	16.8	15.4	16.0	12.6	10.7	30 东营
	8.9	8.8	8.8	10.7	10.7	10.5	31 三门峡
	13.5	13.0	11.8	11.4	11.0	10.3	32 鄂尔多斯
	13.6	15.0	12.8	9.9	8.6	10.3	33 宜春
	8.7	8.8	7.4	8.4	9.6	10.1	34 日照
	12.1	12.4	9.9	9.4	10.5	10.1	35 赣州
	9.9	9.5	8.6	10.9	8.8	10.0	36 遂宁
	8.0	8.9	8.0	8.7	8.8	9.9	37 青岛
	22.5	21.4	18.0	15.6	14.6	9.9	38 乌兰察布
	13.5	14.7	12.4	12.1	9.8	9.8	39 济南
	10.2	14.3	11.2	9.9	10.5	9.7	40 景德镇
	17.0	15.7	11.7	11.5	10.6	9.6	41 新乡
	14.3	16.0	8.2	6.0	9.2	9.6	42 汉中
	16.6	14.5	10.1	9.3	10.1	9.5	43 晋城
	10.8	13.4	12.5	11.1	8.7	9.5	44 渭南
	9.7	9.8	9.3	9.4	9.2	9.5	45 芜湖
	11.3	11.4	10.2	10.7	10.3	9.5	46 徐州
	9.6	8.8	9.4	9.8	9.1	9.5	47 宜宾
	14.3	13.5	12.0	10.0	10.9	9.5	48 中卫
	21.9	17.5	12.1	11.3	11.3	9.4	49 临汾
	11.3	9.8	9.5	8.0	9.1	9.4	50 常州
	17.0	13.8	11.5	12.8	10.4	9.3	51 济宁
	18.0	17.8	15.2	15.7	11.9	9.2	52 枣庄
	9.1	9.1	7.6	9.2	9.3	9.2	53 宝鸡
	9.2	10.0	10.4	10.1	9.5	9.2	54 安康
	15.4	12.5	11.7	13.0	10.7	9.2	55 呼和浩特
	16.5	12.4	10.7	9.9	10.2	9.2	56 锡林郭勒
	11.2	12.3	10.4	11.7	9.6	9.1	57 铜川
	9.2	9.0	6.5	9.5	8.9	9.1	58 阿拉善盟
	10.0	9.6	8.4	8.7	8.8	9.1	59 南昌
	9.1	9.0	7.5	7.8	8.8	9.0	60 安庆
	16.1	13.2	10.4	9.9	9.5	9.0	61 铜陵
	14.2	14.5	10.3	12.3	9.7	8.9	62 运城
	14.7	13.5	10.9	11.3	12.1	8.8	63 焦作
	15.5	13.1	11.1	9.6	10.4	8.8	64 承德
	14.8	13.4	8.8	9.2	9.0	8.7	65 平顶山
	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年	

图 31: “4+151” 城市气象调整后 2019 年至 2024 年 SO₂ 年平均浓度 (微克/立方米) 年际变化表 (浓度底纹从红到绿表示年平均浓度由大到小; 左侧红、橙、紫、灰方格分别标记京津冀 “2+36” 城市、汾渭平原、长三角地区、其他城市)

	8.0	7.2	7.3	8.8	9.6	8.7	66 泰州
	10.7	11.0	9.0	8.8	10.2	8.5	67 达州
	12.5	11.3	9.9	8.1	9.3	8.4	68 连云港
	5.9	6.7	6.2	7.1	8.8	8.4	69 苏州
	7.6	8.7	9.5	8.7	8.0	8.4	70 内江
	13.1	13.3	11.4	13.1	10.9	8.3	71 鹤壁
	16.0	14.6	11.7	11.1	8.0	8.3	72 蚌埠
	12.5	11.1	10.1	9.8	9.7	8.3	73 马鞍山
	9.7	11.8	9.8	9.9	8.2	8.3	74 烟台
	24.6	19.0	9.8	9.2	7.7	8.2	75 唐山
	15.4	11.1	9.5	8.9	8.9	8.2	76 淮南
	7.2	6.8	5.8	6.3	7.7	8.2	77 上海
	10.5	8.2	9.0	8.6	9.1	8.1	78 商丘
	8.6	8.2	6.9	7.8	9.2	8.1	79 亳州
	15.0	15.8	10.7	8.7	8.1	8.1	80 巴彦淖尔
	8.0	8.7	8.6	8.8	8.4	8.1	81 重庆
	7.6	7.9	7.6	9.7	9.1	8.0	82 淮安
	10.3	10.5	8.8	9.7	8.8	7.9	83 漯河
	8.8	9.2	9.8	8.2	7.0	7.9	84 宁波
	10.1	10.2	10.0	8.2	9.0	7.9	85 眉山
	11.4	10.2	9.0	9.4	8.1	7.8	86 天津
	10.2	8.6	8.7	8.5	8.8	7.8	87 滁州
	12.0	12.7	9.7	8.9	7.4	7.7	88 许昌
	12.5	15.1	12.3	13.3	7.9	7.6	89 衡水
	11.7	11.0	9.3	11.6	8.4	7.6	90 濮阳
	9.2	10.4	10.5	8.0	7.0	7.6	91 咸阳
	8.6	8.6	9.0	7.4	7.0	7.6	92 抚州
	6.8	7.3	8.0	8.3	7.7	7.5	93 阜阳
	15.5	14.2	9.3	11.7	10.9	7.4	94 安阳
	6.9	6.1	7.2	7.1	6.7	7.3	95 绍兴
	8.5	8.1	7.7	8.7	7.2	7.3	96 雅安
	17.2	11.9	8.6	11.7	9.2	7.2	97 沧州
	15.0	17.3	10.8	11.2	9.7	7.2	98 邯郸
	14.5	13.1	11.5	11.4	8.8	7.2	99 菏泽
	10.2	9.4	6.7	8.8	7.2	7.2	100 洛阳
	7.5	8.1	7.8	8.8	7.2	7.2	101 合肥
	10.9	9.4	6.9	6.9	7.7	7.2	102 南通
	8.0	7.6	8.3	8.1	6.8	7.2	103 自贡
	5.9	5.0	5.6	4.2	6.3	7.1	104 舟山
	20.2	17.1	10.1	10.5	9.4	7.0	105 邢台
	10.4	10.2	10.3	9.7	8.1	7.0	106 周口
	7.1	6.4	6.4	7.0	7.1	7.0	107 杭州
	10.9	9.2	9.5	8.2	8.1	7.0	108 扬州
	8.3	9.5	9.4	7.9	7.5	7.0	109 南阳
	7.3	8.0	9.7	7.4	7.4	7.0	110 驻马店
	11.5	8.7	7.4	8.6	8.0	6.9	111 淮北
	7.2	8.5	6.8	5.5	7.6	6.9	112 宿州
	15.3	10.5	8.2	10.1	7.4	6.9	113 商洛
	8.8	9.3	8.4	8.5	7.1	6.8	114 西安
	9.8	8.0	7.3	7.0	6.1	6.8	115 镇江
	12.4	12.8	7.3	10.3	9.2	6.8	116 广元
	8.5	6.5	7.0	6.9	5.9	6.8	117 黄山
	7.7	6.5	6.6	6.5	6.0	6.7	118 湖州
	7.6	7.3	8.3	7.3	6.4	6.7	119 嘉兴
	8.8	7.6	7.2	9.0	8.4	6.7	120 无锡
	10.5	9.2	5.4	6.6	6.8	6.7	121 固原
	19.5	16.4	11.7	10.7	9.2	6.6	122 秦皇岛
	23.4	19.9	12.0	10.4	8.7	6.6	123 吕梁
	11.2	11.6	12.4	12.3	8.2	6.6	124 泸州
	5.9	6.4	7.4	6.1	6.9	6.6	125 绵阳
	8.3	6.6	5.6	7.5	6.5	6.6	126 延安
	9.3	10.0	8.8	9.3	8.0	6.5	127 郑州
	5.2	5.3	5.8	8.2	8.0	6.5	128 盐城
	4.8	5.0	5.3	6.6	6.0	6.5	129 台州
	5.5	5.1	5.6	5.9	6.3	6.5	130 威海
	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年	

图 32: “4+151” 城市气象调整后 2019 年至 2024 年 SO₂ 年平均浓度 (微克/立方米) 年际变化表 (浓度底纹从红到绿表示年平均浓度由大到小; 左侧红、橙、紫、灰方格分别标记京津冀 “2+36” 城市、汾渭平原、长三角地区、其他城市)

	8.3	7.0	6.0	6.4	6.8	6.5	131 温州
	10.3	7.8	6.1	5.5	6.6	6.4	132 南京
	5.9	5.9	7.2	9.8	8.7	6.3	133 广安
	7.4	7.9	6.9	8.3	7.6	6.2	134 资阳
	10.5	9.1	7.0	6.7	6.6	6.1	135 池州
	6.6	5.6	5.4	8.4	9.4	6.1	136 南充
	8.2	8.2	7.9	7.1	6.6	6.0	137 宣城
	10.4	10.5	8.8	9.2	7.5	5.9	138 开封
	16.2	14.3	9.3	10.0	7.0	5.9	139 石家庄
	6.7	6.7	7.0	7.9	6.7	5.8	140 六安
	8.2	7.4	7.8	7.8	7.2	5.8	141 乐山
	7.5	6.5	6.3	7.5	6.8	5.8	142 衢州
	14.2	12.0	8.6	9.3	7.9	5.1	143 保定
	8.3	9.5	7.6	8.8	5.9	5.1	144 廊坊
	8.7	7.3	7.1	7.3	8.7	5.1	145 宿迁
	7.0	7.0	7.5	8.8	6.6	5.0	146 信阳
	8.3	9.9	13.6	8.2	4.6	4.7	147 阿坝
	4.7	4.7	4.6	4.9	4.9	4.7	148 巴中
	13.9	9.1	8.2	8.7	7.1	4.7	149 甘孜
	6.3	6.2	6.9	7.1	6.2	4.5	150 丽水
	12.4	12.6	7.6	6.8	5.0	4.4	151 张家口
	5.7	7.7	6.3	7.1	4.4	4.3	152 德阳
	8.0	7.3	6.3	7.2	5.7	4.1	153 金华
	4.7	4.4	3.5	3.6	3.5	4.0	154 北京
	7.1	6.6	5.9	4.9	3.6	3.7	155 成都
	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年	

图 33: “4+151”城市气象调整后 2019 年至 2024 年 SO₂ 年平均浓度 (微克/立方米) 年际变化表 (浓度底纹从红到绿表示年平均浓度由大到小; 左侧红、橙、紫、灰方格分别标记京津冀“2+36”城市、汾渭平原、长三角地区、其他城市)

3.3.2 二氧化硫年度评估: 年度变化趋势与城市相对排名

2018 年“4+151”城市 SO₂ 浓度均值 (标准误差) 为 15.7(0.6) 微克/立方米, 2024 年下降至 8.7(0.2) 微克/立方米, 累计降幅 44.6%; 年均下降 1.2 微克/立方米。与 2019 年浓度均值 12.6(0.5) 微克/立方米相比, 下降 3.9(0.3) 微克/立方米; 与 2023 年浓度均值 9.5(0.3) 微克/立方米相比, 下降 0.8(0.1) 微克/立方米, 降幅 8.4%。

2024 年, 汾渭平原是 SO₂ 平均浓度最高的重点地区, 浓度均值为 9.8(0.6) 微克/立方米, 比 2023 年的 10.9(0.9) 微克/立方米下降 1.1(0.4) 微克/立方米, 比 2019 年的 16.1(1.7) 微克/立方米下降 6.3(1.4) 微克/立方米, 比 2018 年的 23.5(2.9) 微克/立方米下降 13.7(2.7) 微克/立方米。京津冀及周边“2+36”城市 SO₂ 浓度均值为 8.6(0.4) 微克/立方米, 比 2023 年的 9.5(0.3) 微克/立方米下降 0.9(0.2) 微克/立方米, 比 2019 年的 14.1(0.7) 微克/立方米下降 5.5(0.6) 微克/立方米, 比 2018 年的 18.4(0.8) 微克/立方米下降 9.8(0.8) 微克/立方米。长三角地区 SO₂ 浓度均值为 7.5(0.2) 微克/立方米, 比 2023 年的 8(0.2) 微克/立方米下降 0.5(0.2) 微克/立方米, 比 2019 年的 9.2(0.5) 微克/立方米下降 1.7(0.4) 微克/立方米, 比 2018 年的 11.3(0.6) 微克/立方米下降 3.8(0.5) 微克/立方米。“其他城市” SO₂ 浓度均值为 9.1(0.4) 微克/立方米, 比 2023 年的 9.8(0.5) 微克/立方米下降 0.7(0.2) 微克/立方米, 比 2019 年的 12.7(0.8) 微克/立方米下降 3.6(0.5) 微克/立方米, 比 2018 年的 14.7(0.9) 微克/立方米下降 5.6(0.6) 微克/立方米。

2024 年“4+151”城市中, SO₂ 年均浓度超过 20 微克/立方米的城市有 2 个 (攀枝花、石嘴山), 与 2023 年持平, 均属于“其他城市”。年均浓度低于 13 微克/立方米的城市有 139 个, 比 2023 年增加 3 个。其中, 京津冀及周边“2+36”城市有 38 个, 比 2023 年增加 1 个; 汾渭平原 11 个, 比 2023 年增

加 1 个；长三角地区有 31 个，与 2023 年持平；“其他城市”有 59 个，比 2023 年增加 1 个。

根据图 29、图 30，相比 2018 年，2024 年“4+151”城市中，有 149 个城市年均 SO₂ 浓度呈现不同程度下降，有 6 个城市年均 SO₂ 浓度上升，分别为青岛、绵阳、巴中、苏州、舟山、台州。SO₂ 六年累计降幅的城市均值为 38.3% (1.6%)。有 21 个城市累计降幅超过 59%，包括京津冀及周边“2+36”城市的 11 个城市(唐山、保定、邢台、石家庄、沧州、秦皇岛、安阳、开封、邯郸、洛阳、廊坊)，汾渭平原的吕梁、临汾、晋中、晋城，长三角地区的淮北。从城市降幅排名来看，河北、山西、河南 SO₂ 治理效果相对较好。

相比 2023 年，“4+151”城市中，有 108 个城市年均 SO₂ 浓度下降，有 47 个城市年均 SO₂ 浓度上升。SO₂ 浓度降幅的城市均值为 7% (1%)。从城市 SO₂ 浓度降幅排名来看，河北、山西、河南 SO₂ 治理效果相对较好。

根据图 31、图 32、图 33，2024 年“4+151”城市中，SO₂ 年均浓度最高的城市为石嘴山 (22.4 微克/立方米)、攀枝花 (20.3 微克/立方米)、包头 (16.3 微克/立方米)。浓度最高的 10 个城市包括宁夏的 3 个城市(石嘴山、银川、吴忠)，山西的 2 个城市(朔州、大同)，江西的 2 个城市(吉安、鹰潭)，内蒙古包头，四川攀枝花，山东淄博；其中石嘴山、大同、攀枝花已连续 5 年在列，包头已连续 3 年在列。

3.4 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，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地传输。我国目前一氧化碳平均浓度标准如表 4。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 4: 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	年平均	4	10	毫克/立方米
	24 小时平均	4	10	

图 34-36 和图 37 分别展示了“4+151”城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。根据上述图表，我们可以总结出一氧化碳浓度如下几个特征：

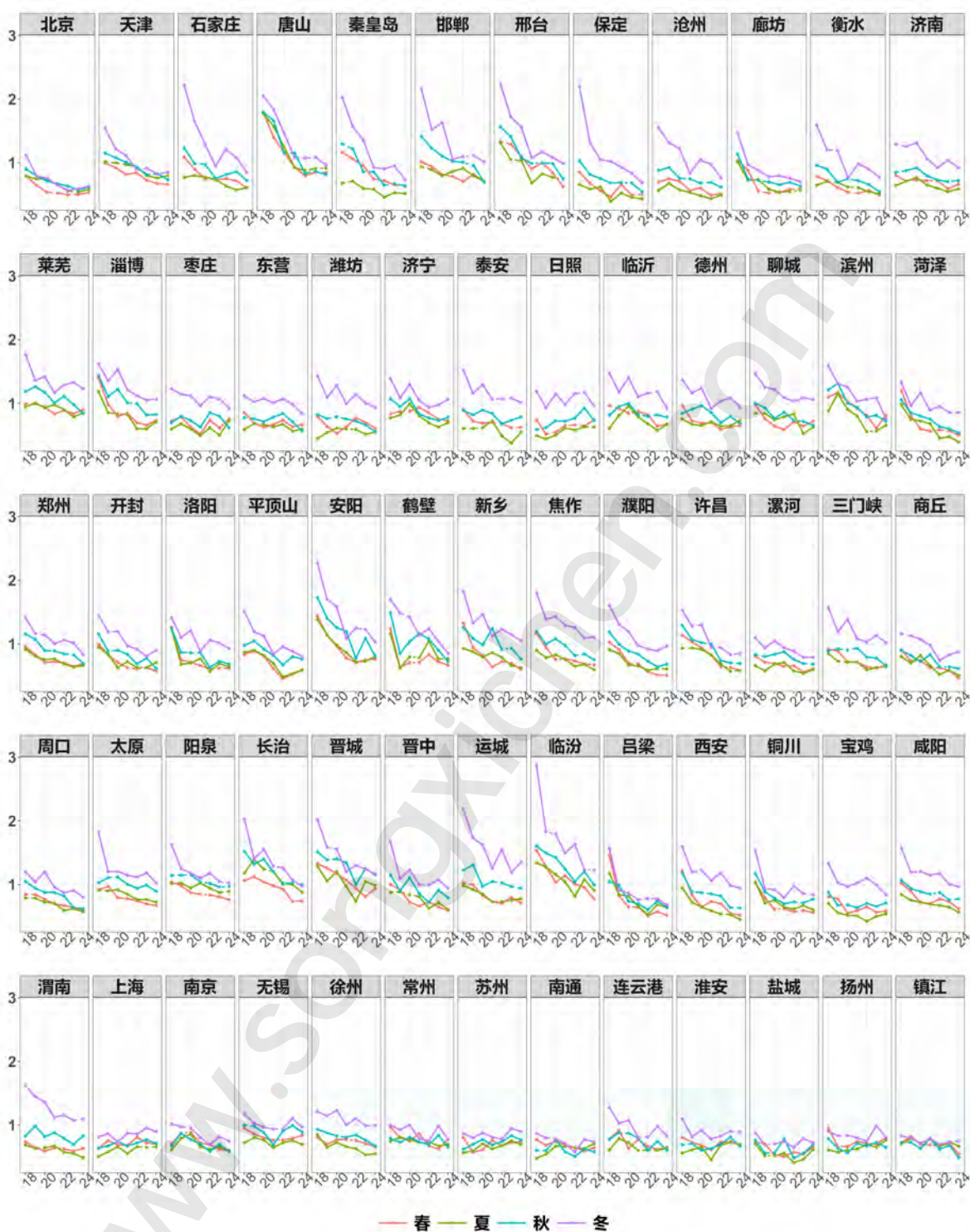


图 34: “4+151”城市气象调整后 2018 年至 2024 年 CO 季节平均浓度 (毫克/立方米) 变化序列图, 图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

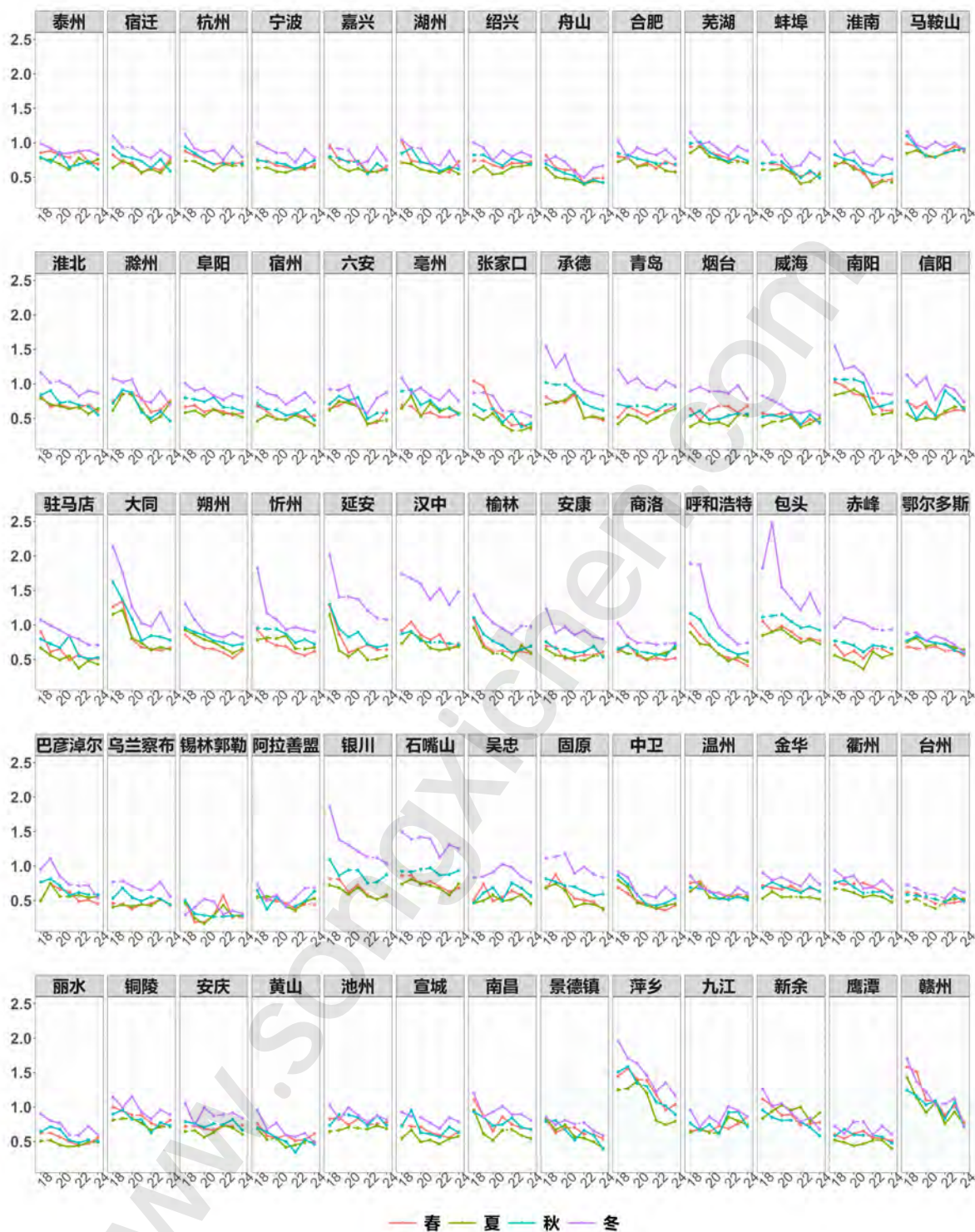


图 35: “4+151”城市气象调整后 2018 年至 2024 年 CO 季节平均浓度 (毫克/立方米) 变化序列图, 图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

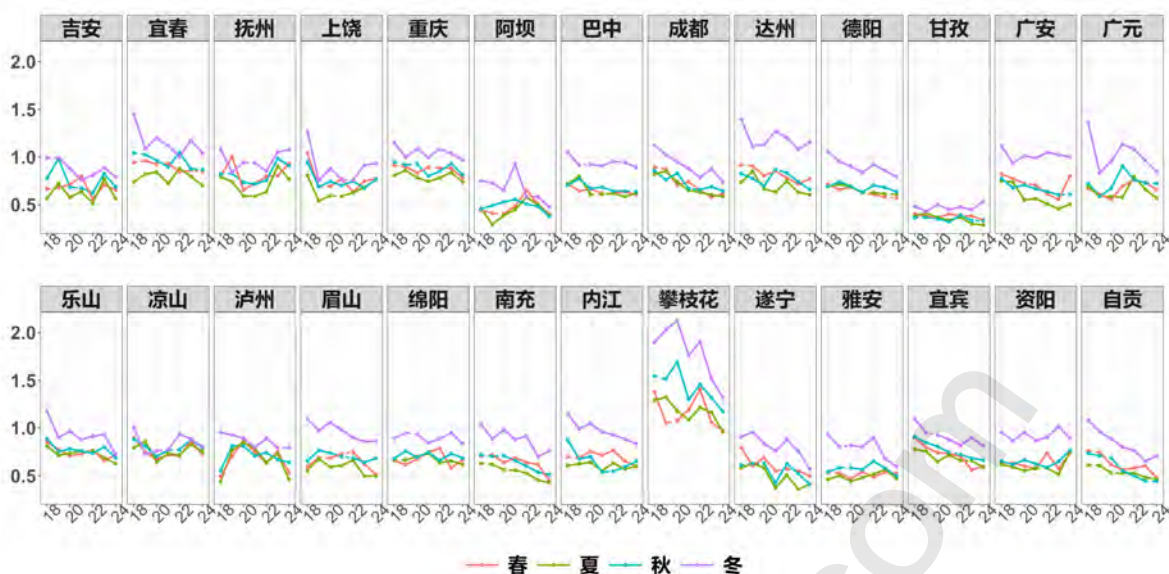


图 36: “4+151”城市气象调整后 2018 年至 2024 年 CO 季节平均浓度 (毫克/立方米) 变化序列图, 图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

3.4.1 一氧化碳季度评估

2018 年春季“4+151”城市 CO 浓度均值 (标准误差) 为 0.88(0.02) 毫克/立方米, 2024 年下降至 0.64(0.01) 毫克/立方米, 累计降幅 27.3%; 年均下降 0.04 毫克/立方米。与 2019 年浓度均值 0.79(0.02) 毫克/立方米相比, 下降 0.15(0.01) 毫克/立方米; 与 2023 年浓度均值 0.64(0.01) 毫克/立方米持平。

与 2023 年春季相比, “4+151”城市中, 有 63 个城市 CO 浓度均值显著下降, 占比 40.6%, 降幅平均值为 11.7%; 有 62 个城市 CO 浓度均值显著上升, 占比 40%, 升幅平均值为 12.8%。2024 年春季, 萍乡平均浓度最高, 为 1.04 毫克/立方米; 锡林郭勒平均浓度最低, 为 0.26 毫克/立方米。泸州为本季度 CO 同比改善幅度最大城市, 平均浓度相比 2023 年同期的 0.75 毫克/立方米下降 28.8%。重点区域中, 有 3 个城市浓度降幅超过 20%, 包括京津冀及周边地区的邢台、商丘, 长三角地区的镇江。广安为浓度同比升幅最大城市, 平均浓度相比去年同期的 0.56 毫克/立方米上升 44.5%。重点区域中, 有 8 个城市浓度升幅超过 20%, 包括京津冀及周边地区的枣庄、滨州, 长三角地区的 6 个城市 (滁州、盐城、常州、宿迁、湖州、六安)。CO 浓度显著上升城市主要集中于山东、安徽、江苏, 分别有 11、8、8 个城市浓度上升。

2018 年夏季“4+151”城市 CO 浓度均值 (标准误差) 为 0.76(0.02) 毫克/立方米, 2024 年下降至 0.61(0.01) 毫克/立方米, 累计降幅 19.7%; 年均下降 0.03 毫克/立方米。与 2019 年浓度均值 0.74(0.02) 毫克/立方米相比, 下降 0.13(0.01) 毫克/立方米; 与 2023 年浓度均值 0.62(0.01) 毫克/立方米相比, 下降 0.01(0.01) 毫克/立方米, 降幅 1.6%。

与 2023 年夏季相比, “4+151”城市中, 有 67 个城市 CO 浓度均值显著下降, 占比 43.2%, 降幅平均值为 11.1%; 有 62 个城市 CO 浓度均值显著上升, 占比 40%, 升幅平均值为 12.8%。2024 年夏季,

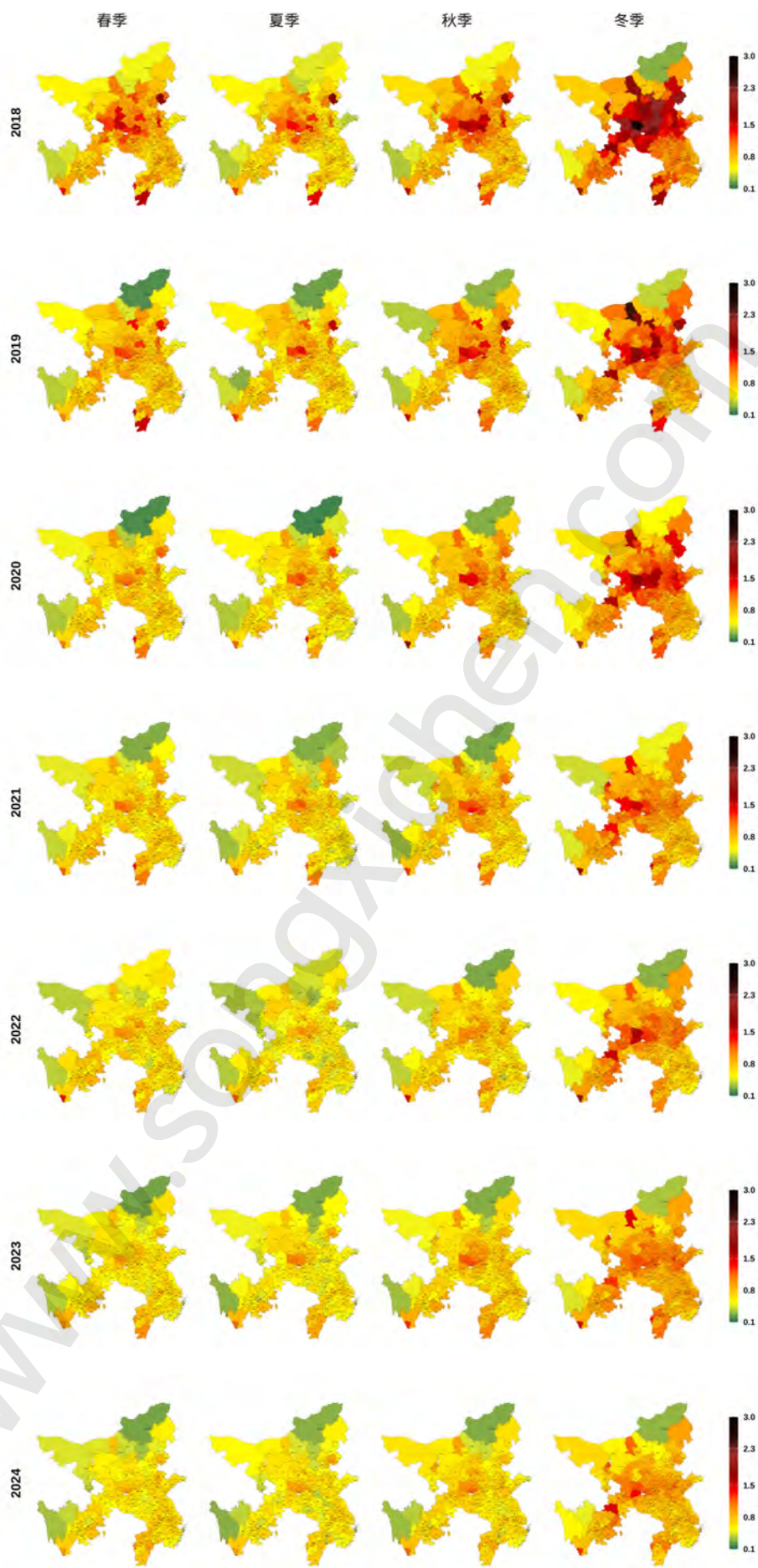


图 37: “4+151” 城市气象调整后 2018 年至 2024 年 CO 季节平均浓度 (毫克/立方米)

晋城平均浓度最高，为 0.99 毫克/立方米；甘孜平均浓度最低，为 0.29 毫克/立方米。泸州为本季度 CO 同比改善幅度最大城市，平均浓度相比 2023 年同期的 0.73 毫克/立方米下降 36.9%；此外还有 4 个城市降幅超过 20%，分别为吉安、鹰潭、吴忠、阿坝。资阳为浓度同比升幅最大城市，平均浓度相比去年同期的 0.51 毫克/立方米上升 46.4%。重点区域中，有 6 个城市浓度升幅超过 20%，包括京津冀及周边地区的枣庄、泰安，长三角地区的蚌埠、宿迁、盐城、滁州。CO 浓度显著上升城市主要集中于山东、江苏、河南，分别有 14、8、7 个城市浓度上升。

2018 年秋季“4+151”城市 CO 浓度均值（标准误差）为 0.92(0.02) 毫克/立方米，2024 年下降至 0.67(0.01) 毫克/立方米，累计降幅 27.2%；年均下降 0.04 毫克/立方米。与 2019 年浓度均值 0.86(0.02) 毫克/立方米相比，下降 0.19(0.01) 毫克/立方米；与 2023 年浓度均值 0.73(0.01) 毫克/立方米相比，下降 0.06(0.01) 毫克/立方米，降幅 8.2%。

与 2023 年秋季相比，“4+151”城市中，有 100 个城市 CO 浓度均值显著下降，占比 64.5%，降幅平均值为 13.8%；有 28 个城市 CO 浓度均值显著上升，占比 18.1%，升幅平均值为 10.5%。2024 年秋季，攀枝花平均浓度最高，为 1.17 毫克/立方米；锡林郭勒平均浓度最低，为 0.28 毫克/立方米。景德镇为本季度 CO 同比改善幅度最大城市，平均浓度相比 2023 年同期的 0.59 毫克/立方米下降 33.3%。重点区域中，有 13 个城市浓度降幅超过 20%，包括京津冀及周边地区的 8 个城市（邯郸、安阳、邢台、枣庄、日照、开封、东营、保定），长三角地区的 5 个城市（镇江、宿州、滁州、宿迁、常州）。阿拉善盟为浓度同比升幅最大城市，平均浓度相比去年同期的 0.49 毫克/立方米上升 28.8%；此外还有 2 个城市升幅超过 20%，分别为商洛、盐城。CO 浓度显著上升城市主要集中于陕西、宁夏、四川、河南，分别有 6、4、3、3 个城市浓度上升。

2018 年冬季“4+151”城市 CO 浓度均值（标准误差）为 1.29(0.03) 毫克/立方米，2024 年下降至 0.85(0.01) 毫克/立方米，累计降幅 34.1%；年均下降 0.07 毫克/立方米。与 2019 年浓度均值 1.07(0.03) 毫克/立方米相比，下降 0.22(0.02) 毫克/立方米；与 2023 年浓度均值 0.93(0.01) 毫克/立方米相比，下降 0.08(0.01) 毫克/立方米，降幅 8.6%。

与 2023 年冬季相比，“4+151”城市中，有 115 个城市 CO 浓度均值显著下降，占比 74.2%，降幅平均值为 12.7%；有 15 个城市 CO 浓度均值显著上升，占比 9.7%，升幅平均值为 8.8%。2024 年冬季，汉中平均浓度最高，为 1.48 毫克/立方米；锡林郭勒平均浓度最低，为 0.31 毫克/立方米。赣州为本季度 CO 同比改善幅度最大城市，平均浓度相比 2023 年同期的 1.13 毫克/立方米下降 34.8%。重点区域中，有 9 个城市浓度降幅超过 20%，包括京津冀及周边地区的 5 个城市（滨州、秦皇岛、临沂、沧州、石家庄），长三角地区的湖州、滁州、常州、嘉兴。甘孜为浓度同比升幅最大城市，平均浓度相比去年同期的 0.45 毫克/立方米上升 19.8%。CO 浓度显著上升城市主要集中于四川、河南，分别有 4、3 个城市浓度上升。

3.4.2 一氧化碳年度评估：年度变化趋势与城市相对排名

2018 年“4+151”城市 CO 浓度均值（标准误差）为 0.96(0.02) 毫克/立方米，2024 年下降至 0.69(0.01) 毫克/立方米，累计降幅 28.1%；年均下降 0.05 毫克/立方米。与 2019 年浓度均值 0.87(0.02) 毫克/立方米相比，下降 0.18(0.01) 毫克/立方米；与 2023 年浓度均值 0.73(0.01) 毫

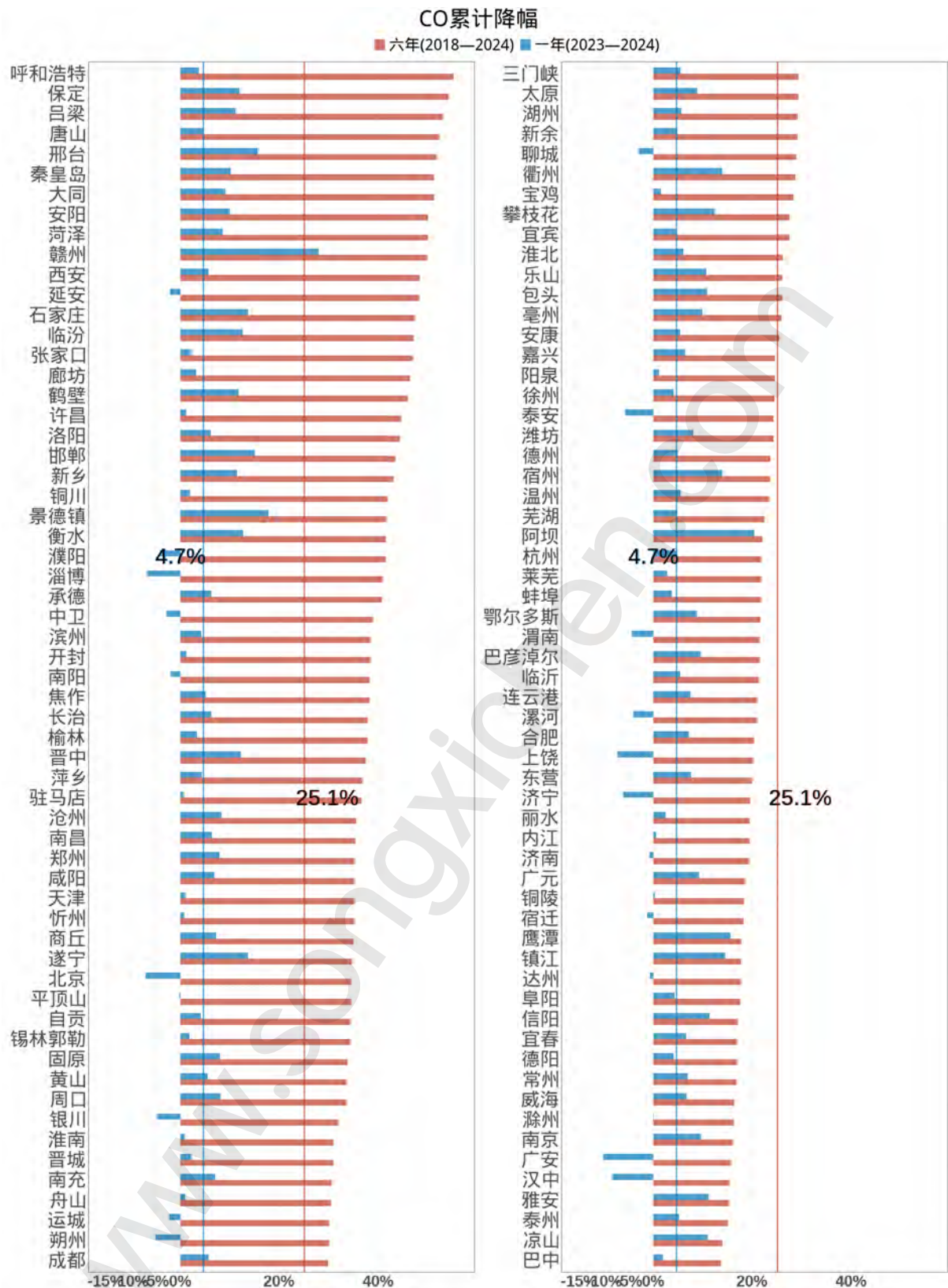


图 38: “4+151” 城市气象调整后 CO 浓度过去一年 (蓝色)、六年 (红色) 的累计降幅, 蓝色和红色竖线分别代表 “4+151” 城市的一年和六年平均降幅 (注: 负数代表平均浓度相对升高)

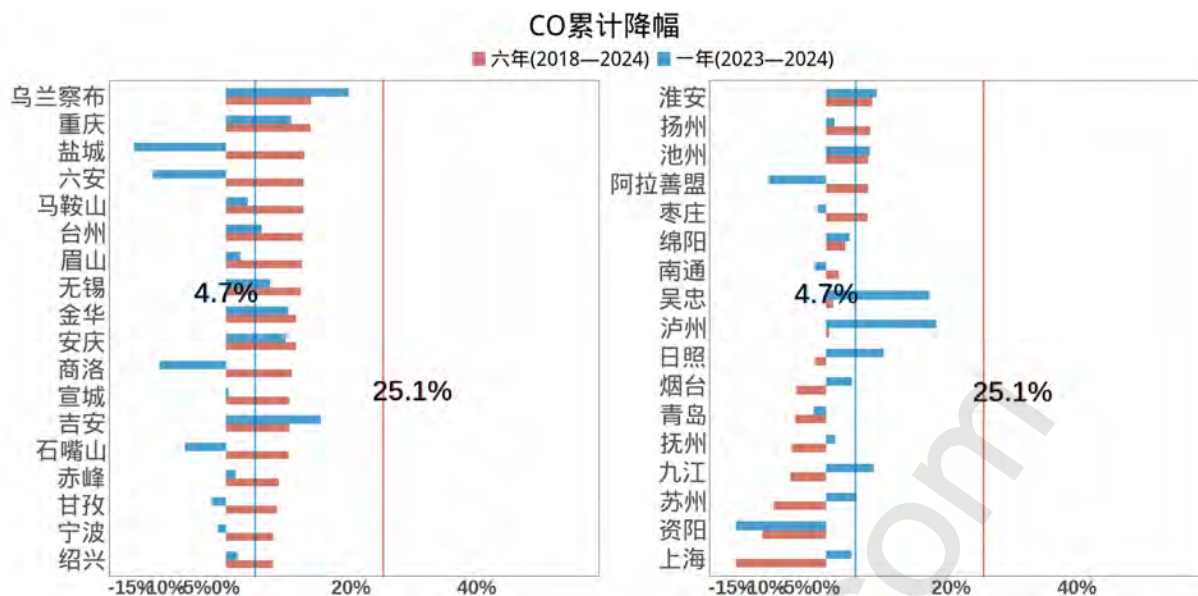


图 39: “4+151”城市气象调整后 CO 浓度过去一年（蓝色）、六年（红色）的累计降幅，蓝色和红色竖线分别代表“4+151”城市的一年和六年平均降幅（注：负数代表平均浓度相对升高）

克/立方米相比，下降 0.04(0) 毫克/立方米，降幅 5.5%。

2024 年，汾渭平原是 CO 平均浓度最高的重点地区，浓度均值为 0.8(0.04) 毫克/立方米，比 2023 年的 0.85(0.04) 毫克/立方米下降 0.05(0.01) 毫克/立方米，比 2019 年的 1.05(0.06) 毫克/立方米下降 0.25(0.03) 毫克/立方米，比 2018 年的 1.27(0.07) 毫克/立方米下降 0.47(0.05) 毫克/立方米。京津冀及周边“2+36”城市 CO 浓度均值为 0.72(0.01) 毫克/立方米，比 2023 年的 0.75(0.02) 毫克/立方米下降 0.03(0.01) 毫克/立方米，比 2019 年的 0.97(0.03) 毫克/立方米下降 0.25(0.03) 毫克/立方米，比 2018 年的 1.14(0.04) 毫克/立方米下降 0.42(0.04) 毫克/立方米。长三角地区 CO 浓度均值为 0.68(0.02) 毫克/立方米，比 2023 年的 0.71(0.02) 毫克/立方米下降 0.03(0.01) 毫克/立方米，比 2019 年的 0.79(0.02) 毫克/立方米下降 0.11(0.02) 毫克/立方米，比 2018 年的 0.82(0.02) 毫克/立方米下降 0.14(0.02) 毫克/立方米。“其他城市” CO 浓度均值为 0.66(0.02) 毫克/立方米，比 2023 年的 0.7(0.02) 毫克/立方米下降 0.04(0.01) 毫克/立方米，比 2019 年的 0.81(0.03) 毫克/立方米下降 0.15(0.02) 毫克/立方米，比 2018 年的 0.87(0.03) 毫克/立方米下降 0.21(0.02) 毫克/立方米。

2024 年“4+151”城市中，CO 年均浓度超过 1 毫克/立方米的城市有 2 个（晋城、攀枝花），比 2023 年减少 1 个。其中，汾渭平原原有 1 个（晋城），比 2023 年减少 1 个；“其他城市”有 1 个（攀枝花），与 2023 年持平。

根据图 38、图 39，相比 2018 年，2024 年“4+151”城市中，有 147 个城市年均 CO 浓度呈现不同程度下降，有 8 个城市年均 CO 浓度上升，分别为日照、烟台、青岛、抚州、九江、苏州、资阳、上海。CO 六年累计降幅的城市均值为 25.1% (1.2%)。有 25 个城市累计降幅超过 41%，包括京津冀及周边“2+36”城市的 15 个城市（保定、唐山、邢台、秦皇岛、安阳、菏泽、石家庄、廊坊、鹤壁、许昌、洛阳、邯郸、新乡、衡水、濮阳），汾渭平原的吕梁、西安、临汾、铜川。从城市降幅排名来看，河北、河南、山西 CO

	1.3	1.3	1.1	1.0	1.1	1.1	1 晋城
	1.5	1.5	1.3	1.5	1.3	1.1	2 攀枝花
	1.2	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	3 莱芜
	1.5	1.4	1.2	1.1	1.1	1.0	4 临汾
	1.5	1.4	1.3	1.1	1.0	1.0	5 萍乡
	1.3	1.2	1.0	0.9	0.9	0.9	6 安阳
	1.6	1.3	1.0	0.9	0.9	0.9	7 唐山
	1.1	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	8 阳泉
	1.2	1.1	0.9	1.0	0.9	0.9	9 运城
	1.3	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	10 长治
	0.9	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	11 马鞍山
	1.4	1.2	1.0	0.9	1.0	0.9	12 包头
	0.9	0.7	0.7	0.8	0.9	0.9	13 抚州
	1.1	1.0	0.9	0.9	0.8	0.9	14 汉中
	1.0	1.0	1.0	0.8	0.8	0.9	15 石嘴山
	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	16 宜春
	1.1	1.1	0.9	0.9	0.9	0.8	17 邯郸
	0.9	1.0	0.9	1.0	0.9	0.8	18 鹤壁
	0.9	1.1	0.9	0.8	0.8	0.8	19 济宁
	1.0	1.0	0.9	0.9	0.8	0.8	20 焦作
	0.9	0.8	0.8	0.8	0.7	0.8	21 聊城
	1.0	1.0	0.9	0.9	0.8	0.8	22 临沂
	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	23 日照
	1.1	1.0	0.9	0.8	0.8	0.8	24 天津
	1.1	1.0	1.0	0.9	0.9	0.8	25 新乡
	1.4	1.2	0.9	1.0	0.9	0.8	26 邢台
	0.9	0.8	0.7	0.8	0.7	0.8	27 枣庄
	1.1	1.1	1.0	0.9	0.8	0.8	28 淄博
	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.8	29 太原
	0.9	0.9	0.8	0.8	0.7	0.8	30 渭南
	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	31 苏州
	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9	0.8	32 无锡
	1.0	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	33 芜湖
	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	34 扬州
	0.8	0.8	0.8	0.7	0.8	0.8	35 池州
	0.9	0.8	0.9	0.9	0.8	0.8	36 达州
	1.4	1.0	0.8	0.8	0.8	0.8	37 大同
	0.7	0.7	0.7	0.9	0.9	0.8	38 九江
	0.8	0.7	0.7	0.8	0.9	0.8	39 凉山
	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	40 上饶
	0.9	0.9	0.8	0.7	0.8	0.8	41 铜陵
	0.9	0.9	0.9	0.8	0.7	0.8	42 银川
	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	43 重庆
	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	44 资阳
	1.2	1.0	0.9	0.8	0.8	0.7	45 滨州
	0.9	0.9	0.8	0.7	0.8	0.7	46 德州
	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	47 东营
	0.9	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7	48 济南
	0.9	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7	49 开封
	0.8	0.9	0.8	0.7	0.8	0.7	50 洛阳
	0.8	0.8	0.8	0.7	0.6	0.7	51 漯河
	1.0	0.9	0.7	0.6	0.7	0.7	52 平顶山
	1.0	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7	53 濮阳
	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.7	54 三门峡
	1.1	0.9	0.8	0.9	0.8	0.7	55 石家庄
	0.8	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7	56 泰安
	0.8	0.8	0.7	0.8	0.7	0.7	57 潍坊
	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.7	58 许昌
	1.0	0.9	0.8	0.8	0.8	0.7	59 郑州
	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	60 宝鸡
	0.9	1.0	0.8	0.8	0.8	0.7	61 晋中
	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	62 铜川
	0.9	0.9	0.8	0.9	0.8	0.7	63 咸阳
	0.8	0.8	0.8	0.7	0.8	0.7	64 常州
	0.9	0.9	0.7	0.6	0.7	0.7	65 滁州
	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年	

图 40: “4+151”城市气象调整后 2019 年至 2024 年 CO 年平均浓度 (毫克/立方米) 年际变化表 (浓度底纹从红到绿表示年平均浓度由大到小; 左侧红、橙、紫、灰方格分别标记京津冀“2+36”城市、汾渭平原、长三角地区、其他城市)

	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年	
0.8	0.8	0.7	0.7	0.8	0.7	66 杭州	
0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	67 合肥	
0.7	0.7	0.6	0.7	0.8	0.7	68 淮安	
0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	69 淮北	
0.8	0.7	0.7	0.6	0.7	0.7	70 嘉兴	
0.9	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	71 连云港	
0.7	0.7	0.7	0.6	0.7	0.7	72 南通	
0.8	0.7	0.7	0.6	0.7	0.7	73 宁波	
0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.7	74 上海	
0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	75 绍兴	
0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	76 宿迁	
0.8	0.8	0.7	0.8	0.8	0.7	77 泰州	
0.8	0.9	0.8	0.8	0.7	0.7	78 徐州	
0.6	0.6	0.6	0.5	0.6	0.7	79 盐城	
0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.7	80 安庆	
0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	81 巴中	
0.7	0.7	0.6	0.7	0.7	0.7	82 赤峰	
0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	83 德阳	
1.3	1.1	1.1	0.9	1.0	0.7	84 赣州	
0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	85 广安	
0.7	0.7	0.8	0.9	0.8	0.7	86 广元	
0.8	0.7	0.7	0.6	0.8	0.7	87 吉安	
0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	88 乐山	
0.7	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	89 绵阳	
0.8	0.7	0.8	0.8	0.8	0.7	90 南昌	
1.0	1.0	1.0	0.7	0.7	0.7	91 南阳	
0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	92 内江	
0.7	0.7	0.6	0.7	0.7	0.7	93 青岛	
0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	94 商洛	
0.9	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	95 朔州	
0.9	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7	96 忻州	
1.0	0.9	0.9	0.8	0.8	0.7	97 新余	
0.6	0.7	0.6	0.8	0.7	0.7	98 信阳	
0.8	0.7	0.6	0.6	0.7	0.7	99 宣城	
1.0	0.8	0.9	0.8	0.7	0.7	100 延安	
0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	101 宜宾	
0.9	0.8	0.7	0.6	0.7	0.7	102 榆林	
0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	103 北京	
0.9	0.8	0.7	0.7	0.6	0.6	104 沧州	
0.8	0.8	0.7	0.7	0.6	0.6	105 菏泽	
0.9	0.8	0.7	0.7	0.7	0.6	106 衡水	
0.8	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	107 廊坊	
1.1	0.9	0.8	0.7	0.7	0.6	108 秦皇岛	
0.8	0.8	0.8	0.6	0.7	0.6	109 商丘	
0.9	0.9	0.8	0.7	0.7	0.6	110 周口	
0.9	0.8	0.7	0.6	0.7	0.6	111 吕梁	
0.9	0.8	0.8	0.8	0.7	0.6	112 西安	
0.7	0.7	0.6	0.5	0.6	0.6	113 蚌埠	
0.8	0.7	0.7	0.6	0.7	0.6	114 亳州	
0.7	0.7	0.7	0.6	0.7	0.6	115 阜阳	
0.8	0.7	0.7	0.6	0.7	0.6	116 湖州	
0.8	0.7	0.6	0.5	0.6	0.6	117 淮南	
0.8	0.8	0.7	0.5	0.6	0.6	118 六安	
0.9	0.9	0.7	0.6	0.7	0.6	119 南京	
0.8	0.7	0.8	0.7	0.7	0.6	120 镇江	
0.5	0.5	0.4	0.4	0.5	0.6	121 阿拉善盟	
0.7	0.7	0.6	0.6	0.7	0.6	122 安康	
0.9	0.8	0.7	0.7	0.7	0.6	123 成都	
0.9	1.0	0.9	0.7	0.6	0.6	124 承德	
0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	125 鄂尔多斯	
1.1	0.9	0.7	0.6	0.6	0.6	126 呼和浩特	
0.7	0.7	0.7	0.6	0.7	0.6	127 金华	
0.8	0.9	0.8	0.7	0.7	0.6	128 泸州	
0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.6	129 眉山	
0.8	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	130 衢州	

图 41: “4+151”城市气象调整后 2019 年至 2024 年 CO 年平均浓度 (毫克/立方米) 年际变化表 (浓度底纹从红到绿表示年平均浓度由大到小; 左侧红、橙、紫、灰方格分别标记京津冀“2+36”城市、汾渭平原、长三角地区、其他城市)

	0.7	0.6	0.6	0.5	0.6	0.6	131 温州
	0.7	0.7	0.6	0.7	0.7	0.6	132 吴忠
	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.6	133 烟台
	0.8	0.7	0.6	0.7	0.6	0.5	134 保定
	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	135 宿州
	0.6	0.6	0.5	0.4	0.5	0.5	136 舟山
	0.9	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5	137 巴彦淖尔
	0.9	0.8	0.6	0.6	0.6	0.5	138 固原
	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	139 黄山
	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5	140 景德镇
	0.7	0.6	0.5	0.5	0.6	0.5	141 丽水
	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.5	142 南充
	0.7	0.7	0.5	0.6	0.5	0.5	143 遂宁
	0.6	0.5	0.5	0.5	0.6	0.5	144 台州
	0.6	0.6	0.6	0.4	0.5	0.5	145 威海
	0.6	0.5	0.5	0.5	0.6	0.5	146 乌兰察布
	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	147 雅安
	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	148 鹰潭
	0.7	0.5	0.5	0.4	0.5	0.5	149 中卫
	0.7	0.7	0.7	0.6	0.5	0.5	150 驻马店
	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5	151 自贡
	0.5	0.5	0.6	0.6	0.5	0.4	152 阿坝
	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	153 甘孜
	0.7	0.7	0.5	0.5	0.4	0.4	154 张家口
	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	155 锡林郭勒
	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年	

图 42: “4+151”城市气象调整后 2019 年至 2024 年 CO 年平均浓度 (毫克/立方米) 年际变化表 (浓度底纹从红到绿表示年平均浓度由大到小; 左侧红、橙、紫、灰方格分别标记京津冀“2+36”城市、汾渭平原、长三角地区、其他城市)

治理效果相对较好。

相比 2023 年, “4+151”城市中, 有 123 个城市年均 CO 浓度下降, 有 32 个城市年均 CO 浓度上升。CO 浓度降幅的城市均值为 4.7% (0.6%)。从城市 CO 浓度降幅排名来看, 重庆、河北、江西 CO 治理效果相对较好。

根据图 40、图 41、图 42, 2024 年“4+151”城市中, CO 年均浓度最高的城市为攀枝花 (1.11 毫克/立方米)、晋城 (1.06 毫克/立方米)、临汾 (0.97 毫克/立方米)。浓度最高的 10 个城市包括山西的 4 个城市 (晋城、临汾、运城、阳泉), 江西的 2 个城市 (萍乡、抚州), 四川攀枝花, 宁夏石嘴山, 山东莱芜, 陕西汉中; 其中萍乡、莱芜、晋城、临汾、攀枝花已连续 5 年在列。

3.5 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 N₂ 和 O₂ 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 (NO₂)。由于存在产生 NO₂ 的其他途径, 冬季的 NO₂ 污染会比较严重, 如 NO 在雾滴表面被催化氧化形成 NO₂, 以及逆温气象条件下使上空已形成的 NO₂ 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 PM_{2.5} 的重要组成部分之一。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。

NO₂ 在大气中的“存活”时间是本报告所考虑的四种气体 (SO₂, NO₂, CO 和 O₃) 中最短的, 一般在几个小时到两天之间, 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 NO₂ 的浓度限值如表 5 所示, 而美国环境保护署的一级和二级标准为: 年平均浓度 53ppb (约为 100 微克/立方米)。

表 5: 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 43-45和图 46分别展示了“4+151”城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。根据上述图表, 我们可以总结出二氧化氮浓度如下几个特征:

3.5.1 二氧化氮季度评估

2018 年春季“4+151”城市 NO₂ 浓度均值 (标准误差) 为 35.4(0.8) 微克/立方米, 2024 年下降至 25.5(0.5) 微克/立方米, 累计降幅 28%; 年均下降 1.6 微克/立方米。与 2019 年浓度均值 34.5(0.8) 微克/立方米相比, 下降 9(0.5) 微克/立方米; 与 2023 年浓度均值 27.2(0.6) 微克/立方米相比, 下降 1.7(0.2) 微克/立方米, 降幅 6.3%。

与 2023 年春季相比, “4+151”城市中, 有 77 个城市 NO₂ 浓度均值显著下降, 占比 49.7%, 降幅平均值为 13.3%; 有 24 个城市 NO₂ 浓度均值显著上升, 占比 15.5%, 升幅平均值为 9.8%。2024 年春季, 湖州平均浓度最高, 为 40.7 微克/立方米; 阿拉善盟平均浓度最低, 为 8.1 微克/立方米。有 1 个城市平均浓度超过国家年平均浓度二级标准。宿州为本季度 NO₂ 同比改善幅度最大城市, 平均浓度相比 2023 年同期的 23.9 微克/立方米下降 29.7%。重点区域中, 有 7 个城市浓度降幅超过 20%, 包括京津冀及周边地区的 6 个城市 (沧州、唐山、安阳、邢台、邯郸、保定), 长三角地区的宿州。驻马店为浓度同比升幅最大城市, 平均浓度相比去年同期的 17.1 微克/立方米上升 23.9%。

2018 年夏季“4+151”城市 NO₂ 浓度均值 (标准误差) 为 24.2(0.6) 微克/立方米, 2024 年下降至 17.2(0.4) 微克/立方米, 累计降幅 28.9%; 年均下降 1.2 微克/立方米。与 2019 年浓度均值 24.4(0.6) 微克/立方米相比, 下降 7.2(0.4) 微克/立方米; 与 2023 年浓度均值 18.5(0.4) 微克/立方米相比, 下降 1.3(0.2) 微克/立方米, 降幅 7%。

与 2023 年夏季相比, “4+151”城市中, 有 84 个城市 NO₂ 浓度均值显著下降, 占比 54.2%, 降幅平均值为 15.9%; 有 33 个城市 NO₂ 浓度均值显著上升, 占比 21.3%, 升幅平均值为 13.1%。2024 年夏季, 吕梁平均浓度最高, 为 28.9 微克/立方米; 黄山平均浓度最低, 为 6.7 微克/立方米。全部城市平均浓度达到国家年平均浓度二级标准。宣城为本季度 NO₂ 同比改善幅度最大城市, 平均浓度相比 2023 年同期的 15.9 微克/立方米下降 41.6%。重点区域中, 有 16 个城市浓度降幅超过 20%, 包括京津冀及周边地区的 9 个城市 (焦作、沧州、石家庄、鹤壁、邢台、安阳、开封、邯郸、莱芜), 汾渭平原的阳泉、渭

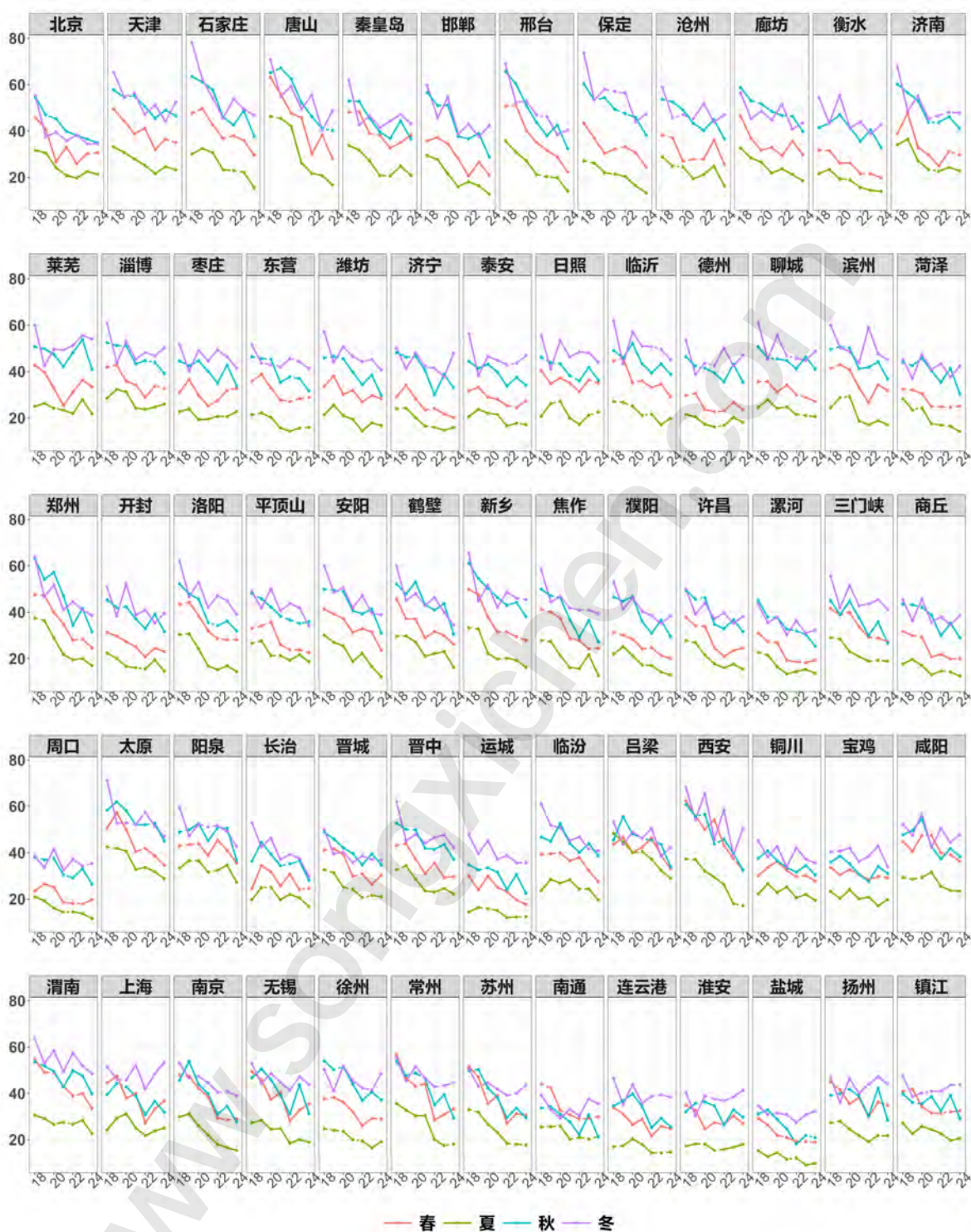


图 43: “4+151”城市气象调整后 2018 年至 2024 年 NO₂ 季节平均浓度 (微克/立方米) 变化序列图, 图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

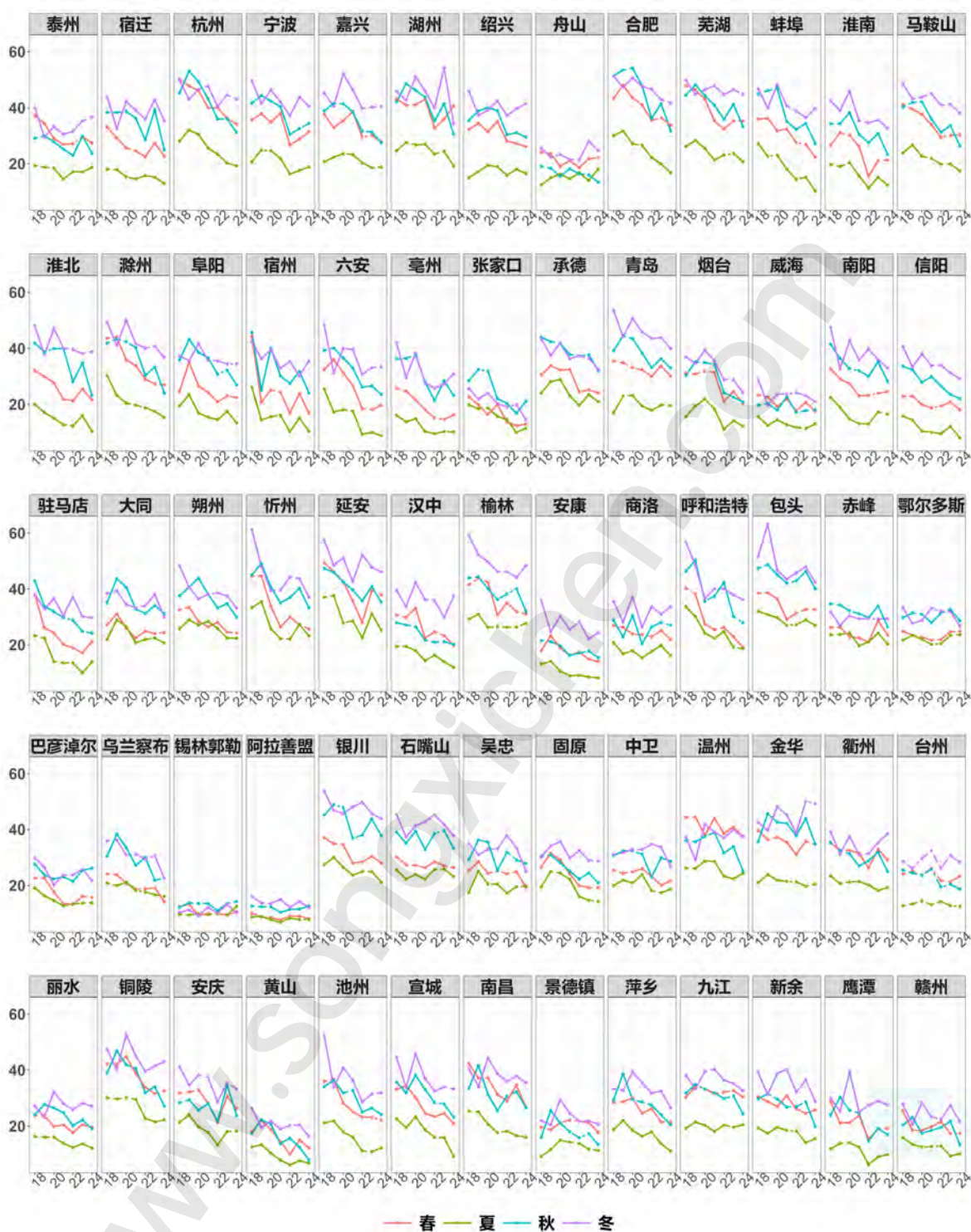


图 44: “4+151”城市气象调整后 2018 年至 2024 年 NO₂ 季节平均浓度 (微克/立方米) 变化序列图, 图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

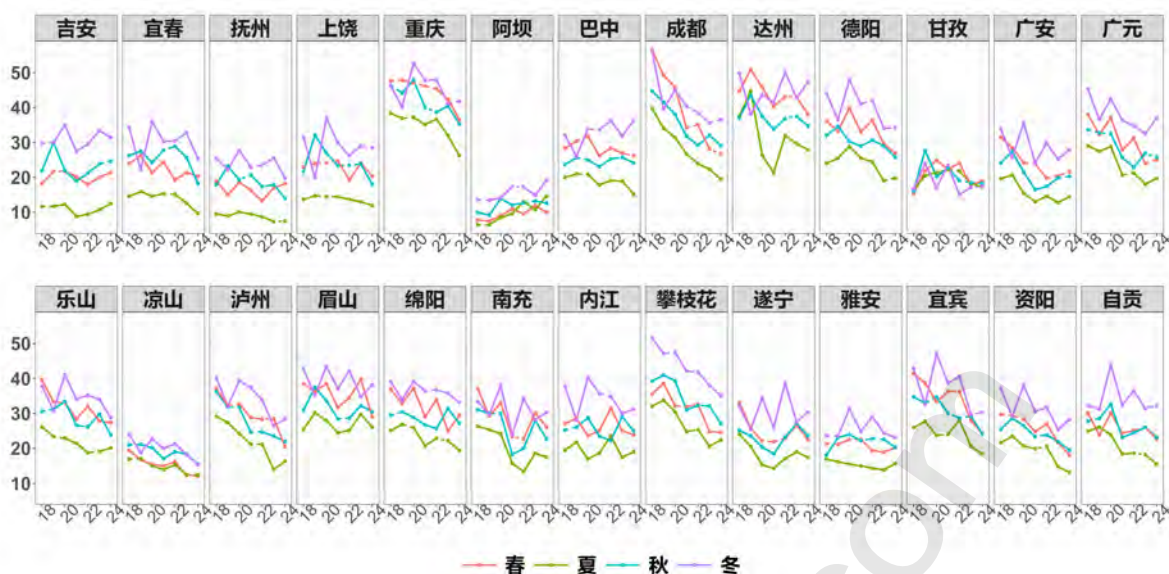


图 45: “4+151”城市气象调整后 2018 年至 2024 年 NO_2 季节平均浓度 (微克/立方米) 变化序列图, 图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

南, 长三角地区的 5 个城市 (淮北、蚌埠、宿州、阜阳、湖州)。驻马店为浓度同比升幅最大城市, 平均浓度相比去年同期的 10.1 微克/立方米上升 38.1%; 此外还有 3 个城市升幅超过 20%, 分别为阿坝、锡林郭勒、舟山。 NO_2 浓度显著上升城市主要集中于四川, 有 8 个城市浓度上升。

2018 年秋季“4+151”城市 NO_2 浓度均值 (标准误差) 为 39.1(1) 微克/立方米, 2024 年下降至 28.2(0.6) 微克/立方米, 累计降幅 27.9%; 年均下降 1.8 微克/立方米。与 2019 年浓度均值 39.6(0.9) 微克/立方米相比, 下降 11.4(0.5) 微克/立方米; 与 2023 年浓度均值 33.5(0.7) 微克/立方米相比, 下降 5.3(0.3) 微克/立方米, 降幅 15.8%。

与 2023 年秋季相比, “4+151”城市中, 有 135 个城市 NO_2 浓度均值显著下降, 占比 87.1%, 降幅平均值为 17.4%; 有 2 个城市 NO_2 浓度均值显著上升, 占比 1.3%, 升幅平均值为 17.9%。2024 年秋季, 天津平均浓度最高, 为 46.5 微克/立方米; 黄山平均浓度最低, 为 7.9 微克/立方米。有 7 个城市平均浓度超过国家年平均浓度二级标准。赣州为本季度 NO_2 同比改善幅度最大城市, 平均浓度相比 2023 年同期的 21.7 微克/立方米下降 39%。重点区域中, 有 31 个城市浓度降幅超过 20%, 包括京津冀及周边地区的 12 个城市 (鹤壁、菏泽、邯郸、三门峡、焦作、安阳、郑州、邢台、莱芜、石家庄、潍坊、枣庄), 汾渭平原的阳泉、运城、长治、吕梁, 长三角地区的 15 个城市 (宿迁、淮北、扬州、南通、无锡、滁州、湖州、镇江、常州、淮南、宿州、合肥、马鞍山、蚌埠、泰州)。张家口为浓度同比升幅最大城市, 平均浓度相比去年同期的 16.8 微克/立方米上升 26.1%。

2018 年冬季“4+151”城市 NO_2 浓度均值 (标准误差) 为 45.8(1) 微克/立方米, 2024 年下降至 36.2(0.7) 微克/立方米, 累计降幅 21%; 年均下降 1.6 微克/立方米。与 2019 年浓度均值 37.4(0.8) 微克/立方米相比, 下降 1.2(0.4) 微克/立方米; 与 2023 年浓度均值 37(0.7) 微克/立方米相比, 下降 0.8(0.3) 微克/立方米, 降幅 2.2%。

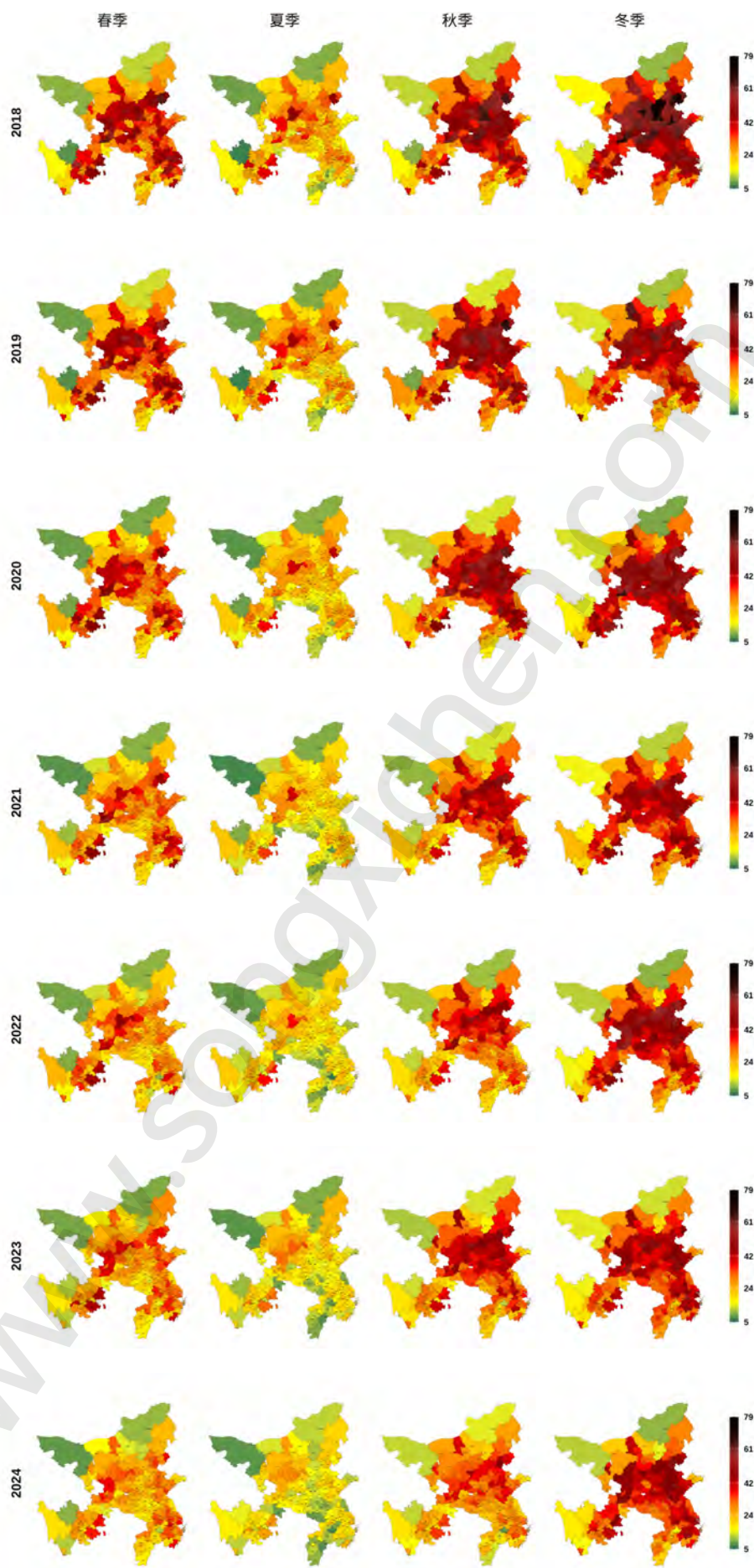


图 46: “4+151”城市气象调整后 2018 年至 2024 年 NO₂ 季节平均浓度 (微克/立方米)

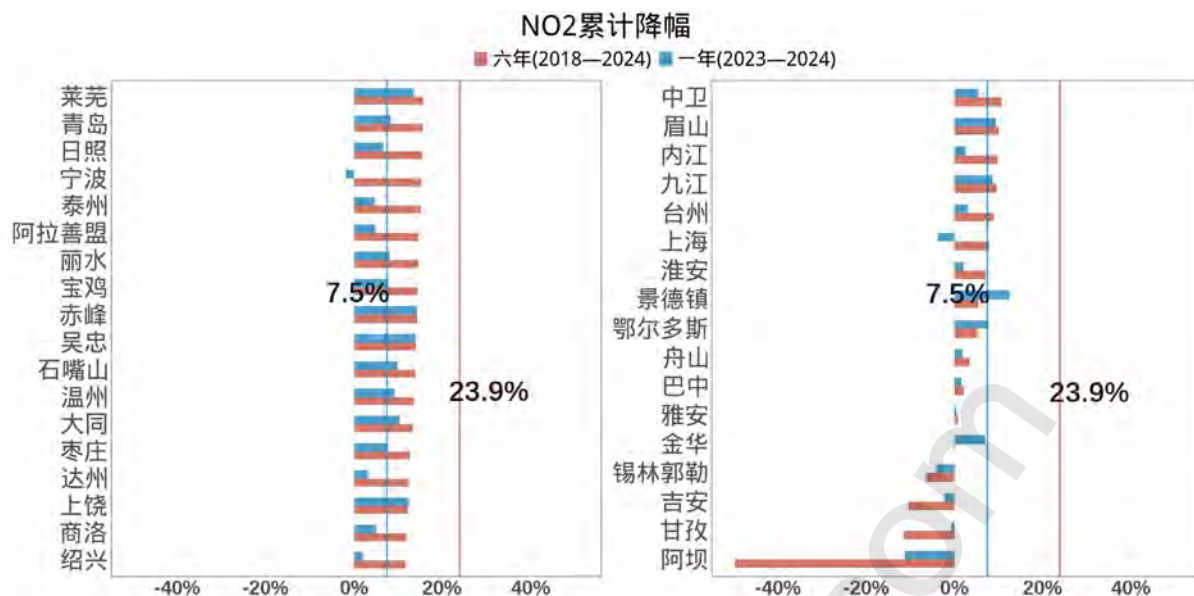


图 48: “4+151”城市气象调整后 NO₂ 浓度过去一年 (蓝色)、六年 (红色) 的累计降幅, 蓝色和红色竖线分别代表 “4+151” 城市的一年和六年平均降幅 (注: 负数代表平均浓度相对升高)

与 2023 年冬季相比, “4+151” 城市中, 有 71 个城市 NO₂ 浓度均值显著下降, 占比 45.8%, 降幅平均值为 12.1%; 有 48 个城市 NO₂ 浓度均值显著上升, 占比 31%, 升幅平均值为 11.4%。2024 年冬季, 莱芜平均浓度最高, 为 54.1 微克/立方米; 锡林郭勒平均浓度最低, 为 10.3 微克/立方米。有 56 个城市平均浓度超过国家年平均浓度二级标准。湖州为本季度 NO₂ 同比改善幅度最大城市, 平均浓度相比 2023 年同期的 54.2 微克/立方米下降 36.9%。重点区域中, 有 3 个城市浓度降幅超过 20%, 包括汾渭平原的长治、宝鸡, 长三角地区的湖州。西安为浓度同比升幅最大城市, 平均浓度相比去年同期的 38.9 微克/立方米上升 30%; 此外还有 4 个城市升幅超过 20%, 分别为阿坝、济宁、汉中、唐山。NO₂ 浓度显著上升城市主要集中于四川、河北、山东、陕西, 分别有 11、7、6、6 个城市浓度上升。

3.5.2 二氧化氮年度评估: 年度变化趋势与城市相对排名

2018 年 “4+151” 城市 NO₂ 浓度均值 (标准误差) 为 36.1(0.8) 微克/立方米, 2024 年下降至 26.8(0.5) 微克/立方米, 累计降幅 25.8%; 年均下降 1.6 微克/立方米。与 2019 年浓度均值 34(0.7) 微克/立方米相比, 下降 7.2(0.4) 微克/立方米; 与 2023 年浓度均值 29.1(0.5) 微克/立方米相比, 下降 2.3(0.2) 微克/立方米, 降幅 7.9%。

2024 年, 汾渭平原是 NO₂ 平均浓度最高的重点地区, 浓度均值为 31.8(1.3) 微克/立方米, 比 2023 年的 35.2(1.6) 微克/立方米下降 3.4(0.6) 微克/立方米, 比 2019 年的 41.5(2) 微克/立方米下降 9.7(1.1) 微克/立方米, 比 2018 年的 43.6(2.4) 微克/立方米下降 11.8(1.4) 微克/立方米。京津冀及周边 “2+36” 城市 NO₂ 浓度均值为 30.2(0.6) 微克/立方米, 比 2023 年的 32.9(0.7) 微克/立方米下降 2.7(0.3) 微克/立方米, 比 2019 年的 39.7(0.9) 微克/立方米下降 9.5(0.8) 微克/立方米, 比 2018 年的 44(1.1) 微克/立方米下降 13.8(1) 微克/立方米。长三角地区 NO₂ 浓度均值为 27.6(0.8) 微克/立方米, 比 2023 年的 29.9(0.9)

	46.2	44.6	41.1	37.6	38.5	39.3	1 天津
	53.5	50.4	44.4	46.3	43.7	38.9	2 太原
	39.6	38.5	35.1	38.2	43.4	37.6	3 莱芜
	42.6	42.8	36.8	36.4	37.3	37.1	4 淄博
	44.3	38.3	34.2	40.5	38.2	37.0	5 达州
	41.9	39.4	39.0	30.4	35.5	36.8	6 上海
	41.6	47.1	41.1	38.3	37.3	36.5	7 咸阳
	45.8	45.9	40.7	43.2	42.0	36.1	8 渭南
	44.6	41.0	36.6	34.6	39.8	36.1	9 延安
	44.3	46.4	41.8	45.1	43.9	35.6	10 阳泉
	45.3	39.5	35.4	36.8	39.0	35.5	11 包头
	47.4	42.0	35.6	34.5	37.5	35.3	12 济南
	42.3	46.2	42.3	42.2	39.0	34.9	13 重庆
	36.4	37.5	36.1	32.3	37.4	34.8	14 金华
	42.8	39.6	35.0	36.4	35.7	34.8	15 榆林
	43.9	39.5	35.0	33.6	37.8	34.7	16 秦皇岛
	47.7	44.3	43.9	44.9	38.4	34.6	17 吕梁
	36.5	40.3	34.9	33.3	36.9	34.5	18 日照
	38.7	39.1	37.6	34.6	35.2	34.4	19 聊城
	42.0	39.8	36.4	34.0	36.7	33.5	20 芜湖
	38.4	40.8	35.4	31.2	32.0	33.5	21 徐州
	55.9	52.9	43.4	38.4	35.1	33.4	22 唐山
	40.5	42.3	37.8	36.3	36.2	33.2	23 临沂
	50.8	51.1	43.3	43.5	33.6	33.2	24 西安
	40.9	39.6	37.0	37.8	36.0	32.9	25 廊坊
	43.4	40.9	35.2	36.7	36.3	32.8	26 晋中
	43.2	42.2	34.2	36.2	36.3	32.7	27 滨州
	35.8	35.7	32.3	33.2	35.4	32.7	28 枣庄
	40.2	38.7	34.1	35.3	36.2	32.7	29 银川
	51.3	46.3	37.9	39.3	39.1	32.4	30 石家庄
	42.3	39.1	37.4	29.7	35.9	32.3	31 无锡
	36.4	37.1	34.7	30.8	36.9	32.3	32 扬州
	45.0	40.5	34.9	35.8	34.7	31.9	33 新乡
	44.0	43.1	39.1	35.0	34.3	31.9	34 杭州
	41.2	42.6	38.6	37.3	35.6	31.7	35 临汾
	40.0	36.9	34.0	35.3	37.4	31.4	36 沧州
	34.2	35.2	33.5	29.7	30.8	31.4	37 泰安
	43.1	43.5	41.9	31.6	32.8	31.4	38 常州
	34.8	34.0	33.9	31.9	33.6	31.4	39 镇江
	39.7	42.4	38.6	32.0	32.2	31.3	40 铜陵
	37.1	37.1	35.6	27.7	30.7	31.2	41 宁波
	33.1	31.5	30.2	31.4	33.2	31.1	42 德州
	39.9	41.3	39.9	32.8	39.0	31.1	43 湖州
	33.8	36.5	37.7	32.6	34.3	31.1	44 温州
	45.1	43.9	40.8	35.1	35.2	31.0	45 合肥
	34.8	35.9	30.4	32.6	34.1	30.9	46 眉山
	42.4	41.2	40.0	39.3	34.2	30.8	47 保定
	39.6	36.8	32.3	31.3	31.2	30.8	48 晋城
	36.6	37.6	34.0	31.1	33.4	30.6	49 青岛
	38.9	33.9	32.4	30.5	30.9	30.4	50 北京
	43.1	37.3	35.6	28.5	30.8	30.3	51 苏州
	30.6	33.0	31.1	34.5	33.5	30.2	52 石嘴山
	44.3	34.9	30.8	33.3	34.6	29.8	53 忻州
	37.6	35.4	30.2	31.2	31.3	29.4	54 东营
	36.5	35.8	30.7	27.9	28.3	29.2	55 济宁
	29.2	29.5	28.8	26.4	29.6	29.0	56 淮安
	38.6	36.9	34.4	30.0	32.8	28.9	57 潍坊
	32.5	33.5	29.4	28.9	31.0	28.6	58 宝鸡
	34.4	38.1	36.7	30.3	30.1	28.6	59 嘉兴
	37.0	39.8	33.7	30.4	32.3	28.5	60 三门峡
	42.4	40.4	31.6	31.3	31.5	28.4	61 洛阳
	31.9	32.5	33.9	27.9	29.0	28.4	62 绍兴
	34.9	34.6	31.3	31.0	31.0	28.3	63 铜川
	33.8	37.0	30.9	30.2	30.1	28.0	64 菏泽
	37.8	36.6	34.2	30.4	31.2	28.0	65 马鞍山
	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年	

图 49: “4+151”城市气象调整后 2019 年至 2024 年 NO₂ 年平均浓度 (微克/立方米) 年际变化表 (浓度底纹从红到绿表示年平均浓度由大到小; 左侧红、橙、紫、灰方格分别标记京津冀“2+36”城市、汾渭平原、长三角地区、其他城市)

	46.1	44.4	36.2	31.5	32.8	27.9	66 郑州
	41.1	40.0	33.3	31.7	29.5	27.9	67 成都
	29.2	30.7	27.7	26.7	29.6	27.9	68 衢州
	37.4	37.3	31.6	30.9	30.6	27.8	69 平顶山
	44.8	39.9	36.2	29.7	30.1	27.8	70 南京
	36.4	36.4	28.6	27.4	28.2	27.5	71 许昌
	35.9	33.9	32.8	31.4	29.8	27.5	72 朔州
	35.4	36.2	32.4	29.7	30.7	27.4	73 承德
	35.4	37.0	32.0	29.2	28.8	27.3	74 衡水
	48.7	42.9	36.7	34.0	32.4	27.3	75 邢台
	31.0	32.8	28.2	29.8	28.6	27.3	76 绵阳
	40.1	37.4	32.5	33.0	28.9	27.3	77 攀枝花
	32.5	34.6	29.2	27.6	29.6	27.2	78 开封
	33.9	29.7	28.0	25.6	29.5	27.0	79 南通
	30.9	31.6	30.5	29.7	29.6	27.0	80 九江
	32.3	35.2	27.7	27.5	25.4	26.9	81 广元
	40.0	41.3	34.0	35.3	34.1	26.8	82 鹤壁
	32.4	36.7	32.1	33.4	28.0	26.7	83 德阳
	28.1	27.1	24.3	24.7	28.0	26.6	84 泰州
	35.7	31.9	27.3	28.1	29.7	26.6	85 大同
	41.1	40.5	33.1	35.4	32.3	26.4	86 安阳
	40.4	40.4	30.1	29.6	29.9	26.2	87 邯郸
	34.5	33.5	28.3	28.5	30.3	26.2	88 南昌
	26.5	26.1	25.7	26.5	28.1	26.0	89 鄂尔多斯
	39.7	37.9	30.9	28.4	30.8	25.9	90 焦作
	30.2	32.6	29.2	25.0	27.2	25.9	91 连云港
	37.9	37.2	33.9	29.6	29.7	25.8	92 滁州
	29.3	29.4	26.0	26.5	28.1	25.6	93 南阳
	25.8	27.9	25.2	27.2	25.9	25.5	94 巴中
	41.7	31.0	31.3	33.3	27.6	25.5	95 呼和浩特
	30.1	29.2	27.9	21.3	29.7	25.4	96 安庆
	35.3	35.7	29.5	27.8	26.8	25.2	97 濮阳
	32.3	33.5	27.1	26.1	26.0	25.1	98 商丘
	29.7	32.6	27.6	28.1	27.7	25.0	99 乐山
	36.6	35.7	29.3	31.9	29.6	24.9	100 长治
	36.2	37.5	31.5	28.3	28.2	24.9	101 蚌埠
	27.8	27.5	25.6	25.3	29.0	24.9	102 赤峰
	26.1	27.4	25.8	28.0	25.4	24.8	103 内江
	23.5	27.4	21.5	25.2	26.0	24.7	104 商洛
	34.3	30.9	28.0	25.4	26.8	24.3	105 阜阳
	33.0	34.7	32.3	33.4	26.9	24.3	106 宜宾
	28.5	31.3	20.3	22.6	26.2	24.1	107 南充
	29.5	30.5	28.6	25.7	31.2	24.0	108 宿迁
	27.6	27.8	28.5	24.8	25.3	24.0	109 中卫
	30.8	32.4	28.7	25.3	28.6	23.5	110 淮北
	23.9	23.0	20.1	25.5	25.1	23.5	111 遂宁
	27.4	32.6	24.6	26.2	25.5	23.4	112 自贡
	29.1	30.1	24.0	24.8	24.8	23.3	113 周口
	30.2	28.4	26.1	27.8	26.7	23.0	114 吴忠
	30.6	29.7	23.9	25.3	23.7	22.7	115 漯河
	32.2	29.7	27.6	22.0	23.0	22.6	116 池州
	23.4	22.7	18.8	19.6	22.0	22.5	117 吉安
	27.3	28.8	29.1	25.9	25.9	22.5	118 新余
	30.8	33.7	26.9	22.2	25.7	22.4	119 淮南
	27.5	30.0	23.7	24.5	22.1	22.4	120 汉中
	28.8	26.7	23.5	24.6	20.5	22.3	121 驻马店
	28.2	31.1	27.3	24.6	24.5	22.1	122 运城
	30.9	32.0	28.0	27.0	23.1	21.8	123 泸州
	24.1	30.1	25.9	22.5	25.2	21.7	124 宿州
	29.9	34.4	28.3	25.1	25.6	21.7	125 宣城
	31.1	31.5	29.2	21.1	21.9	21.4	126 六安
	25.5	24.2	19.4	20.4	19.6	21.1	127 广安
	30.4	29.4	25.3	22.7	21.8	20.8	128 固原
	22.3	22.9	24.3	20.4	21.3	20.7	129 台州
	25.7	24.2	22.0	19.3	20.3	20.5	130 盐城
	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年	

图 50: “4+151”城市气象调整后 2019 年至 2024 年 NO₂ 年平均浓度 (微克/立方米) 年际变化表 (浓度底纹从红到绿表示年平均浓度由大到小; 左侧红、橙、紫、灰方格分别标记京津冀“2+36”城市、汾渭平原、长三角地区、其他城市)

	26.1	28.1	21.0	17.9	20.1	20.1	131 亳州
	30.5	29.3	26.2	25.9	22.9	19.9	132 萍乡
	21.0	23.3	21.2	21.4	19.9	19.8	133 雅安
	22.7	25.6	23.1	20.7	22.5	19.7	134 上饶
	27.7	28.4	24.6	25.8	20.9	19.7	135 资阳
	19.8	18.5	18.8	18.3	20.0	19.6	136 舟山
	22.7	23.7	21.8	19.0	21.2	19.5	137 丽水
	22.3	18.7	18.3	18.0	20.3	19.4	138 巴彦淖尔
	30.0	32.0	29.9	21.3	22.5	19.4	139 烟台
	25.8	24.1	23.1	22.3	21.9	19.3	140 信阳
	29.6	26.6	23.9	24.0	22.1	18.9	141 乌兰察布
	23.0	24.0	24.5	23.4	23.1	18.4	142 宜春
	22.6	25.1	21.4	16.0	19.1	18.4	143 鹰潭
	23.5	20.9	22.7	20.0	17.9	18.0	144 甘孜
	18.8	18.8	20.2	17.7	18.2	17.4	145 威海
	19.1	21.7	19.7	18.3	18.0	15.8	146 景德镇
	19.0	19.2	18.5	19.2	18.9	15.6	147 赣州
	20.8	19.9	16.7	18.0	15.8	15.5	148 安康
	23.1	22.7	19.5	16.9	14.7	15.0	149 张家口
	17.4	19.0	17.4	15.7	17.0	14.9	150 抚州
	9.1	11.4	12.5	13.2	12.7	14.1	151 阿坝
	18.4	18.3	16.5	18.0	15.4	13.8	152 凉山
	11.9	10.5	11.3	10.3	11.4	11.9	153 锡林郭勒
	19.3	17.9	13.8	13.0	13.9	10.8	154 黄山
	11.0	10.6	10.0	10.3	10.7	10.2	155 阿拉善盟
	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年	

图 51: “4+151”城市气象调整后 2019 年至 2024 年 NO₂ 年平均浓度 (微克/立方米) 年际变化表 (浓度底纹从红到绿表示年平均浓度由大到小; 左侧红、橙、紫、灰方格分别标记京津冀“2+36”城市、汾渭平原、长三角地区、其他城市)

微克/立方米下降 2.3(0.4) 微克/立方米, 比 2019 年的 35(1.2) 微克/立方米下降 7.4(0.7) 微克/立方米, 比 2018 年的 37.1(1.1) 微克/立方米下降 9.5(0.8) 微克/立方米。“其他城市” NO₂ 浓度均值为 23.6(0.7) 微克/立方米, 比 2023 年的 25.5(0.8) 微克/立方米下降 1.9(0.2) 微克/立方米, 比 2019 年的 29.1(1) 微克/立方米下降 5.5(0.5) 微克/立方米, 比 2018 年的 30.1(1) 微克/立方米下降 6.5(0.5) 微克/立方米。

2024 年“4+151”城市中, NO₂ 年均浓度低于 30 微克/立方米的城市有 103 个, 比 2023 年增加 20 个。其中, 京津冀及周边“2+36”城市有 20 个, 比 2023 年增加 11 个; 汾渭平原有 4 个(宝鸡、运城、铜川、长治), 比 2023 年增加 2 个; 长三角地区有 19 个, 比 2023 年增加 4 个; “其他城市”有 60 个, 比 2023 年增加 3 个。

根据图 47、图 48, 相比 2018 年, 2024 年“4+151”城市中, 有 150 个城市年均 NO₂ 浓度呈现不同程度下降, 有 5 个城市年均 NO₂ 浓度上升, 分别为金华、锡林郭勒、吉安、甘孜、阿坝。NO₂ 六年累计降幅的城市均值为 23.9% (1%)。有 24 个城市累计降幅超过 37%, 包括京津冀及周边“2+36”城市的 11 个城市(邢台、郑州、唐山、鹤壁、邯郸、安阳、焦作、石家庄、洛阳、保定、新乡), 长三角地区的 5 个城市(宿州、六安、常州、滁州、南京), 汾渭平原的西安。从城市降幅排名来看, 北京、河北、河南 NO₂ 治理效果相对较好。

相比 2023 年, “4+151”城市中, 有 139 个城市年均 NO₂ 浓度下降, 有 16 个城市年均 NO₂ 浓度上升。NO₂ 浓度降幅的城市均值为 7.5% (0.5%)。从城市 NO₂ 浓度降幅排名来看, 重庆、江西、山西 NO₂ 治理效果相对较好。西安和张家口六年累计降幅排名靠前, 但本年度升幅排名靠前, 需防范浓度反弹风险。

根据图 49、图 50、图 51，2024 年“4+151”城市中，NO₂ 年均浓度最高的城市为天津 (39.3 微克/立方米)、太原 (38.9 微克/立方米)、莱芜 (37.6 微克/立方米)。浓度最高的 10 个城市包括陕西的 3 个城市 (咸阳、延安、渭南)，山东的 2 个城市 (莱芜、淄博)，山西的 2 个城市 (太原、阳泉)，上海，四川达州，天津；其中太原、阳泉已连续 5 年在列，渭南已连续 3 年在列。

3.6 8 小时臭氧

臭氧 (O₃) 是一种强氧化性气体。在离地面高约 15-35km 的范围内有约 20km 的臭氧层，吸收太阳紫外线保护人类与环境。但是，对流层臭氧则不利于人体健康。臭氧具有强氧化性，被吸入呼吸道会与呼吸道中的细胞组织反应，导致肺功能减弱和组织损伤。同时，臭氧可促使空气中的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光化学反应。已知的低空臭氧生成的一个重要途径是：



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，氮氧化物是臭氧的重要前体物。

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。

由于臭氧的生成受到光照强度的影响，一天中臭氧浓度差异很大，光照越强，臭氧浓度越高。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。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 52-54、图 55 和图 61-63 分别展示了“4+151”城市 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、8 小时臭氧经气象调整的季节 90% 分位数浓度时间序列图。根据上述图表，我们可以总结出 8 小时臭氧浓度如下几个特征：

3.6.1 8 小时臭氧季度评估

2018 年春季“4+151”城市 O₃ 浓度均值 (标准误差) 为 115.1(1.2) 微克/立方米，2024 年上升至 121.5(1.2) 微克/立方米，累计升幅 5.6%；年均上升 1.1 微克/立方米。与 2019 年浓度均值

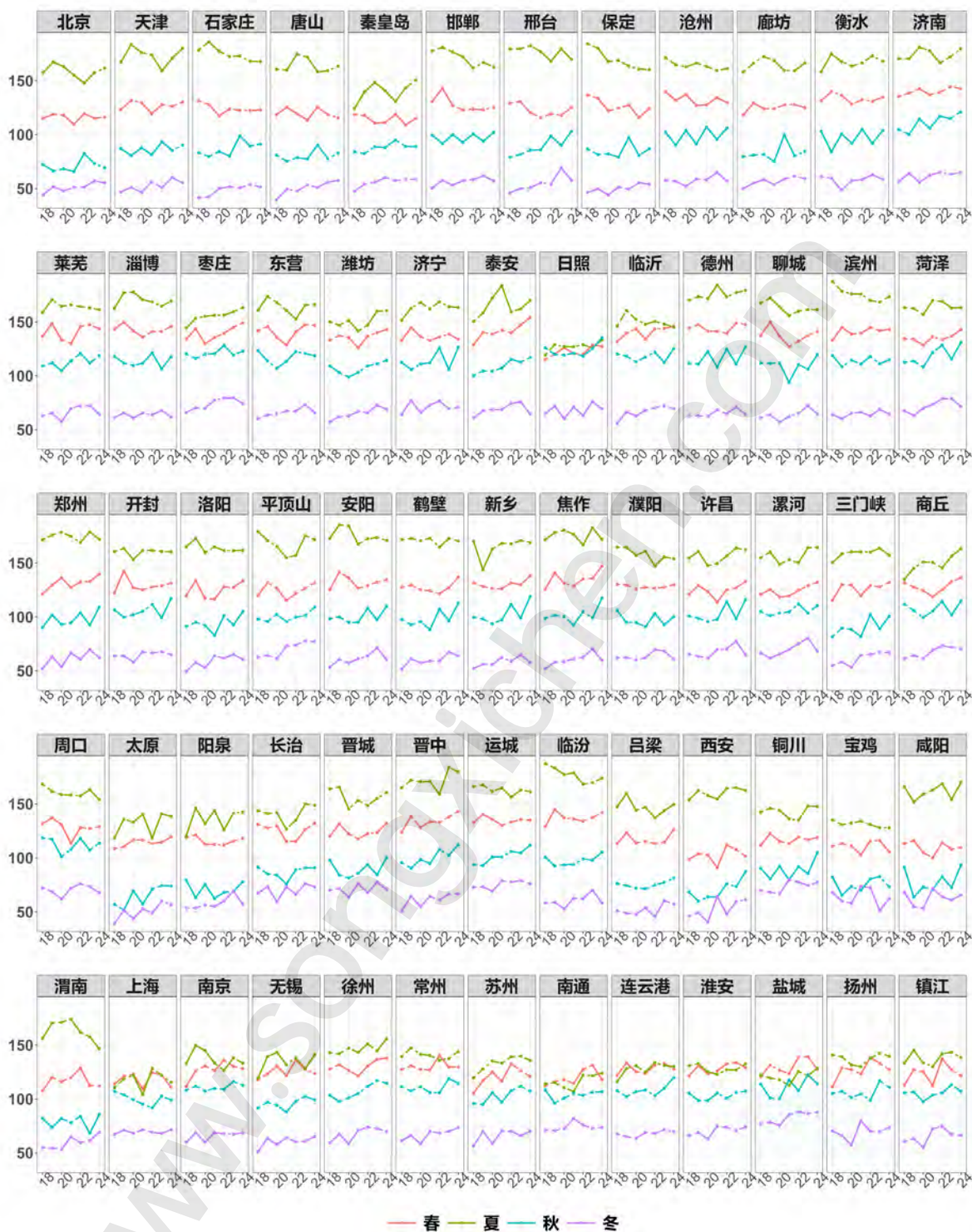


图 52: “4+151”城市气象调整后 2018 年至 2024 年 O₃ 季节平均浓度 (微克/立方米) 变化序列图, 图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

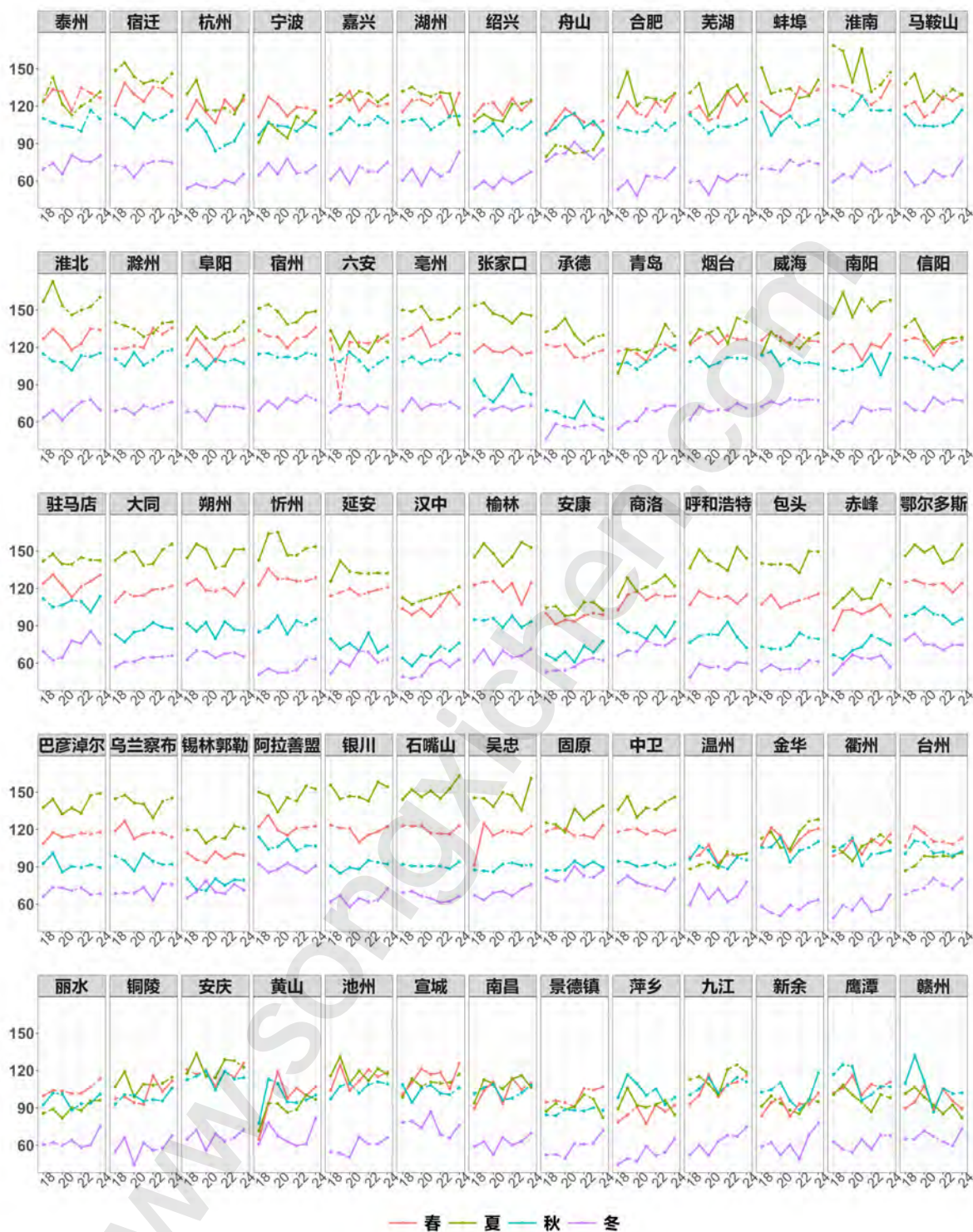


图 53: “4+151”城市气象调整后 2018 年至 2024 年 O₃ 季节平均浓度 (微克/立方米) 变化序列图, 图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

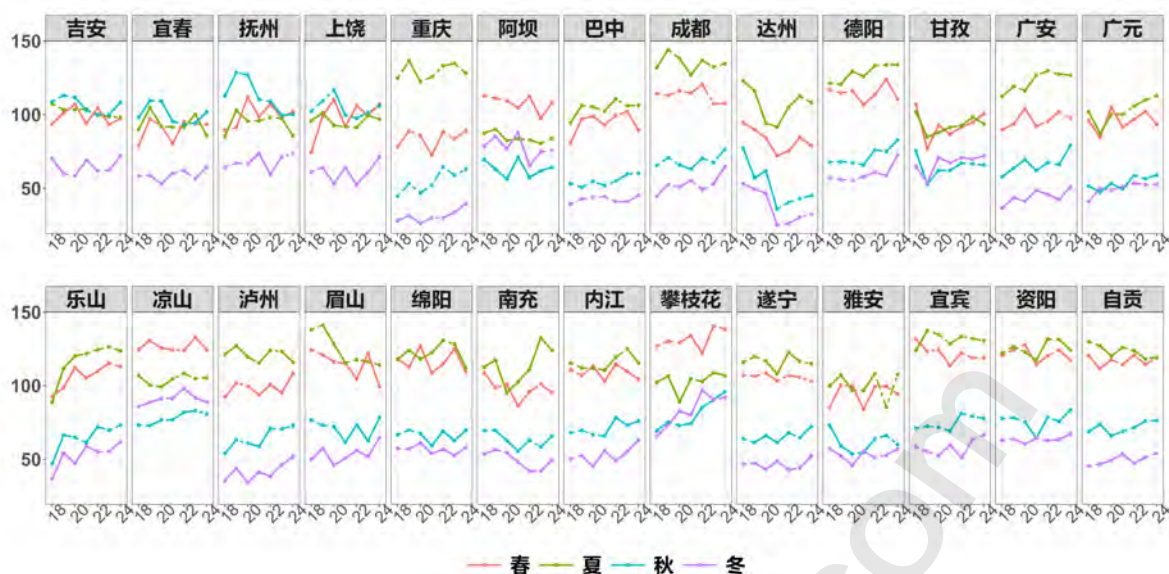


图 54: “4+151”城市气象调整后 2018 年至 2024 年 O₃ 季节平均浓度 (微克/立方米) 变化序列图, 图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

120.7(1.3) 微克/立方米相比, 上升 0.8(0.7) 微克/立方米; 与 2023 年浓度均值 119.7(1.1) 微克/立方米相比, 上升 1.8(0.5) 微克/立方米, 升幅 1.5%。

与 2023 年春季相比, “4+151”城市中, 有 20 个城市 O₃ 浓度均值显著下降, 占比 12.9%, 降幅平均值为 8.2%; 有 45 个城市 O₃ 浓度均值显著上升, 占比 29%, 升幅平均值为 7.6%。2024 年春季, 泰安平均浓度最高, 为 153.9 微克/立方米; 达州平均浓度最低, 为 78.8 微克/立方米。眉山为本季度 O₃ 同比改善幅度最大城市, 平均浓度相比 2023 年同期的 122 微克/立方米下降 18.6%; 宣城为浓度同比升幅最大城市, 平均浓度相比去年同期的 105.4 微克/立方米上升 19.3%。O₃ 浓度显著上升城市主要集中于安徽、河南、宁夏, 分别有 10、8、5 个城市浓度上升。

2018 年夏季“4+151”城市 O₃ 浓度均值 (标准误差) 为 133.7(2.1) 微克/立方米, 2024 年上升至 137.6(2) 微克/立方米, 累计升幅 2.9%; 年均上升 0.7 微克/立方米。与 2019 年浓度均值 139.4(2.1) 微克/立方米相比, 下降 1.8(0.8) 微克/立方米; 与 2023 年浓度均值 137.6(1.9) 微克/立方米持平。

与 2023 年夏季相比, “4+151”城市中, 有 24 个城市 O₃ 浓度均值显著下降, 占比 15.5%, 降幅平均值为 8.2%; 有 16 个城市 O₃ 浓度均值显著上升, 占比 10.3%, 升幅平均值为 8.3%。2024 年夏季, 天津平均浓度最高, 为 180.2 微克/立方米; 赣州平均浓度最低, 为 82.2 微克/立方米。湖州为本季度 O₃ 同比改善幅度最大城市, 平均浓度相比 2023 年同期的 130.1 微克/立方米下降 19.4%; 吴忠为浓度同比升幅最大城市, 平均浓度相比去年同期的 135.6 微克/立方米上升 18.8%。

2018 年秋季“4+151”城市 O₃ 浓度均值 (标准误差) 为 94(1.4) 微克/立方米, 2024 年上升至 98.8(1.4) 微克/立方米, 累计升幅 5.1%; 年均上升 0.8 微克/立方米。与 2019 年浓度均值 92.6(1.5) 微克/立方米相比, 上升 6.2(0.8) 微克/立方米; 与 2023 年浓度均值 94.1(1.4) 微克/立方米相比, 上升 4.7(0.6) 微克/立方米, 升幅 5%。

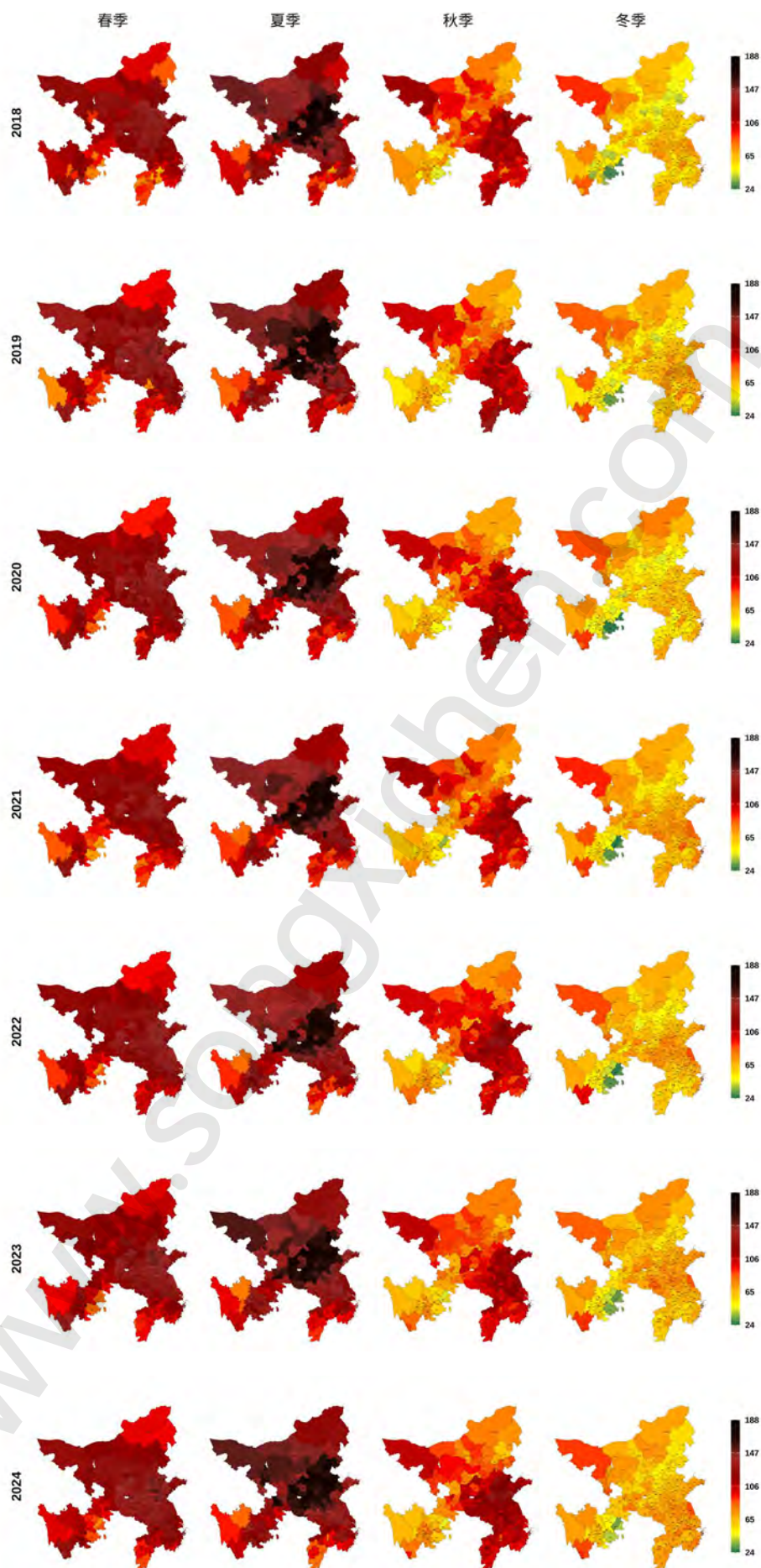


图 55: “4+151” 城市气象调整后 2018 年至 2024 年 O₃ 季节平均浓度 (微克/立方米)

与 2023 年秋季相比,“4+151”城市中,有 4 个城市 O₃ 浓度均值显著下降,占比 2.6%,降幅平均值为 7.6%;有 59 个城市 O₃ 浓度均值显著上升,占比 38.1%,升幅平均值为 13%。2024 年秋季,日照平均浓度最高,为 135.2 微克/立方米;达州平均浓度最低,为 45.1 微克/立方米。宝鸡为本季度 O₃ 同比改善幅度最大城市,平均浓度相比 2023 年同期的 82.6 微克/立方米下降 11.3%;咸阳为浓度同比升幅最大城市,平均浓度相比去年同期的 72.5 微克/立方米上升 28.7%。重点区域中,有 4 个城市浓度升幅超过 20%,包括京津冀及周边地区的新乡,汾渭平原的铜川、渭南、咸阳。O₃ 浓度显著上升城市主要集中于河南、四川、陕西,分别有 14、9、9 个城市浓度上升。

2018 年冬季“4+151”城市 O₃ 浓度均值(标准误差)为 59.4(0.8) 微克/立方米,2024 年上升至 67.5(0.7) 微克/立方米,累计升幅 13.6%;年均上升 1.4 微克/立方米。与 2019 年浓度均值 63(0.8) 微克/立方米相比,上升 4.5(0.5) 微克/立方米;与 2023 年浓度均值 66.4(0.8) 微克/立方米相比,上升 1.1(0.5) 微克/立方米,升幅 1.7%。

与 2023 年冬季相比,“4+151”城市中,有 39 个城市 O₃ 浓度均值显著下降,占比 25.2%,降幅平均值为 9.9%;有 57 个城市 O₃ 浓度均值显著上升,占比 36.8%,升幅平均值为 13.6%。2024 年冬季,攀枝花平均浓度最高,为 92.1 微克/立方米;达州平均浓度最低,为 32.2 微克/立方米。阳泉为本季度 O₃ 同比改善幅度最大城市,平均浓度相比 2023 年同期的 69.3 微克/立方米下降 17.5%;黄山为浓度同比升幅最大城市,平均浓度相比去年同期的 61.1 微克/立方米上升 33.7%。重点区域中,有 2 个城市浓度升幅超过 20%,包括汾渭平原的宝鸡,长三角地区的湖州。O₃ 浓度显著上升城市主要集中于四川、浙江、江西,分别有 14、10、9 个城市浓度上升。

3.6.2 8 小时臭氧年度评估:年度变化趋势与城市相对排名

2018 年“4+151”城市 O₃ 浓度均值(标准误差)为 100.6(1) 微克/立方米,2024 年上升至 106.4(1) 微克/立方米,累计升幅 5.8%;年均上升 1 微克/立方米。与 2019 年浓度均值 103.9(1) 微克/立方米相比,上升 2.5(0.4) 微克/立方米;与 2023 年浓度均值 104.5(1) 微克/立方米相比,上升 1.9(0.2) 微克/立方米,升幅 1.8%。

2024 年,京津冀及周边“2+36”城市 O₃ 平均浓度最高,浓度均值为 117.9(1.1) 微克/立方米,比 2023 年的 116.1(1.1) 微克/立方米上升 1.8(0.3) 微克/立方米,比 2019 年的 115.1(1.1) 微克/立方米上升 2.8(0.8) 微克/立方米,比 2018 年的 112.2(1.1) 微克/立方米上升 5.7(0.9) 微克/立方米。长三角地区 O₃ 浓度均值为 110.9(1) 微克/立方米,比 2023 年的 109.4(1.2) 微克/立方米上升 1.5(0.6) 微克/立方米,比 2019 年的 108.5(1.2) 微克/立方米上升 2.4(0.8) 微克/立方米,比 2018 年的 104.9(1.4) 微克/立方米上升 6(0.7) 微克/立方米。汾渭平原 O₃ 浓度均值为 108.8(2.8) 微克/立方米,比 2023 年的 106.1(2.7) 微克/立方米上升 2.7(0.9) 微克/立方米,比 2019 年的 104(2.9) 微克/立方米上升 4.8(1.3) 微克/立方米,比 2018 年的 103.1(3) 微克/立方米上升 5.7(1.8) 微克/立方米。“其他城市” O₃ 浓度均值为 97.7(1.3) 微克/立方米,比 2023 年的 95.8(1.3) 微克/立方米上升 1.9(0.4) 微克/立方米,比 2019 年的 95.9(1.4) 微克/立方米上升 1.8(0.7) 微克/立方米,比 2018 年的 91.9(1.4) 微克/立方米上升 5.8(0.9) 微克/立方米。

2024 年“4+151”城市中,O₃ 年均浓度超过 120 微克/立方米的城市有 21 个,比 2023 年增加 8 个。其中,京津冀及周边“2+36”城市有 19 个,比 2023 年增加 8 个;汾渭平原原有 2 个(晋中、运城),与

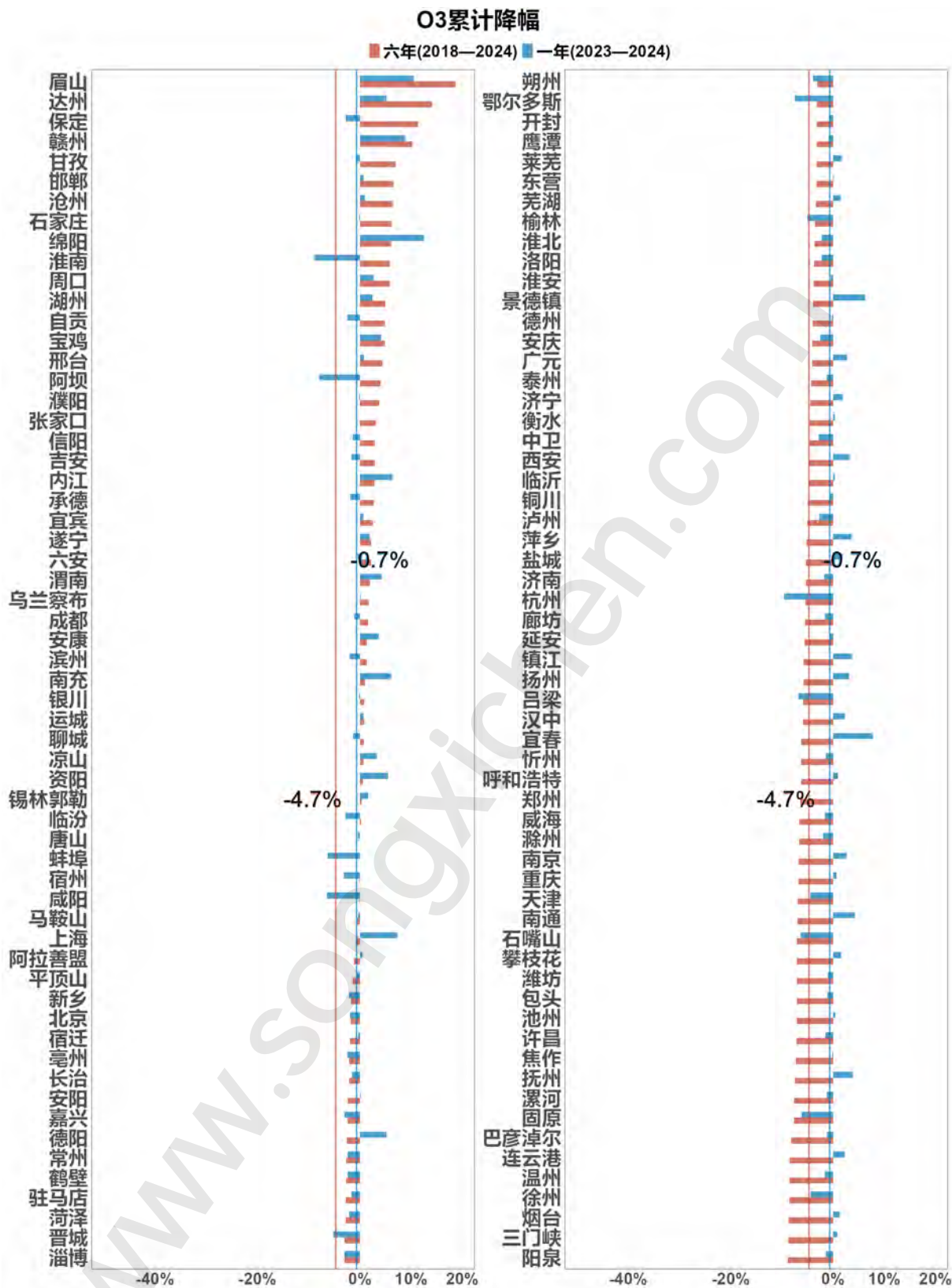


图 56: “4+151”城市气象调整后 O₃ 浓度过去一年（蓝色）、六年（红色）的累计降幅，蓝色和红色竖线分别代表“4+151”城市的一年和六年平均降幅（注：负数代表平均浓度相对升高）

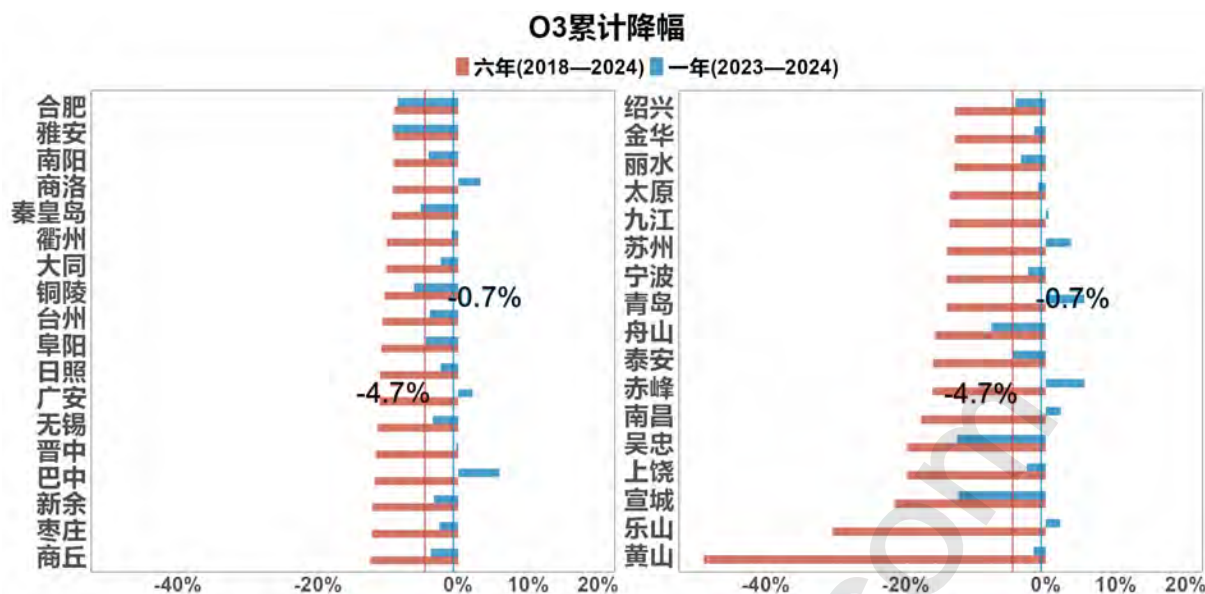


图 57: “4+151”城市气象调整后 O₃ 浓度过去一年（蓝色）、六年（红色）的累计降幅，蓝色和红色竖线分别代表“4+151”城市的一年和六年平均降幅（注：负数代表平均浓度相对升高）

2023 年持平。年均浓度低于 100 微克/立方米的城市有 47 个，比 2023 年减少 5 个。其中，汾渭平原原有 3 个（太原、宝鸡、阳泉），比 2023 年减少 2 个；长三角地区有 2 个（上海、舟山），比 2023 年减少 1 个；“其他城市”有 42 个，比 2023 年减少 2 个。

根据图 56、图 57，相比 2018 年，2024 年“4+151”城市中，有 40 个城市春夏 O₃ 浓度呈现不同程度下降，有 115 个城市春夏 O₃ 浓度上升。春夏 O₃ 六年累计升幅的城市均值为 4.7% (0.6%)。有 15 个城市累计升幅超过 13%，包括长三角地区的苏州、宁波、舟山，京津冀及周边“2+36”城市的泰安，汾渭平原的太原。从城市降幅排名来看，河北、上海、北京春夏 O₃ 治理效果相对较好。

相比 2023 年，“4+151”城市中，有 60 个城市春夏 O₃ 浓度下降，有 95 个城市春夏 O₃ 浓度上升。春夏 O₃ 浓度升幅的城市均值为 0.8% (0.4%)。从城市春夏 O₃ 浓度降幅排名来看，上海、四川、重庆春夏 O₃ 治理效果相对较好。淮南、阿坝六年累计降幅排名靠前，但本年度升幅排名靠前，需防范浓度反弹风险。

根据图 58、图 59、图 60，2024 年“4+151”城市中，O₃ 年均浓度最高的城市为德州 (129.5 微克/立方米)、枣庄 (127.3 微克/立方米)、菏泽 (127.1 微克/立方米)。浓度最高的 10 个城市包括山东的 8 个城市（德州、枣庄、菏泽、济南、泰安、东营、滨州、淄博），山西晋中，河南焦作；其中滨州、德州、济南、泰安、枣庄已连续 5 年在列，菏泽已连续 4 年在列。

3.6.3 8 小时臭氧极端污染 (90% 分位数)

图 61-63 展示了研究区域城市 2018 年以来经气象调整的 8 小时 O₃ 浓度 90% 分位数给定季节的时间序列。我们以按季度计算的 O₃ 90% 分位数浓度的全年最大值作为极端污染的衡量指标。按照国家标准，O₃ 年 90% 分位数应当低于 160 微克/立方米，以达到日尺度人群健康保护的需求。我们以 O₃ 浓度

	123.7	124.4	125.5	125.6	127.0	129.5	1 德州
	120.8	118.7	122.3	125.7	125.8	127.3	2 枣庄
	118.2	115.7	125.2	127.4	123.5	127.1	3 菏泽
	118.4	123.5	120.8	122.0	123.8	127.1	4 济南
	117.6	121.0	125.3	122.2	124.3	126.3	5 泰安
	116.4	113.1	115.9	115.2	122.7	125.5	6 晋中
	124.2	118.8	117.4	120.7	126.7	124.2	7 东营
	119.6	117.5	114.6	117.3	121.9	124.0	8 焦作
	123.0	123.6	123.1	123.7	122.5	123.8	9 滨州
	126.0	122.4	120.9	123.6	120.0	123.7	10 淄博
	122.6	120.3	119.9	126.8	119.5	123.5	11 济宁
	115.7	113.8	109.6	113.1	120.1	122.3	12 平顶山
	124.1	114.9	119.8	125.7	123.6	121.9	13 莱芜
	124.3	117.3	109.8	116.8	119.2	121.7	14 聊城
	112.3	112.0	109.3	114.7	120.9	121.6	15 潍坊
	121.2	117.9	116.8	121.5	119.1	121.4	16 临沂
	110.7	109.0	110.8	114.5	115.6	121.2	17 商丘
	118.5	116.9	118.7	118.3	120.5	121.1	18 运城
	114.0	112.2	111.1	113.1	115.9	120.9	19 鹤壁
	106.5	109.6	113.4	117.5	116.1	120.8	20 新乡
	117.5	115.3	115.7	116.4	118.4	120.6	21 郑州
	120.0	115.2	118.0	115.9	118.8	119.9	22 临汾
	121.5	112.9	108.7	115.6	119.6	119.8	23 淮北
	109.7	108.3	110.2	116.8	117.8	119.6	24 徐州
	119.5	113.1	124.0	109.2	112.2	119.3	25 淮南
	118.8	115.0	112.4	113.6	118.3	119.1	26 宿州
	112.9	107.1	107.6	116.4	116.6	118.9	27 许昌
	121.9	118.1	112.6	118.2	118.6	118.8	28 安阳
	112.1	109.1	111.7	115.4	119.2	118.8	29 漯河
	117.4	110.1	114.9	116.8	114.1	118.4	30 开封
	112.2	107.1	111.5	113.7	111.1	118.3	31 南阳
	117.1	111.9	116.6	114.1	117.1	118.2	32 阿拉善盟
	108.1	109.5	106.7	111.9	115.2	117.5	33 滁州
	117.5	116.5	111.9	112.4	116.7	116.9	34 亳州
	114.7	113.3	110.4	115.6	114.8	116.3	35 衡水
	118.6	109.8	112.4	115.0	115.1	116.3	36 宿迁
	110.1	108.2	109.8	107.6	113.9	116.2	37 日照
	121.3	113.2	112.8	120.0	117.8	116.1	38 周口
	113.2	103.3	108.2	108.2	110.1	116.0	39 晋城
	111.5	108.3	110.2	112.9	113.9	115.6	40 驻马店
	113.0	109.7	110.8	112.7	114.0	115.4	41 常州
	114.8	105.5	107.0	113.0	111.6	115.1	42 洛阳
	107.6	105.1	109.8	115.0	117.5	114.5	43 盐城
	103.3	104.9	110.0	109.4	109.9	114.3	44 蚌埠
	109.0	107.8	106.5	114.1	111.9	114.1	45 三门峡
	111.8	110.0	107.8	107.8	110.8	114.0	46 天津
	110.5	109.9	108.5	110.1	114.2	114.0	47 邢台
	111.0	114.0	111.0	114.0	113.6	113.5	48 沧州
	107.7	99.7	104.9	105.3	107.4	113.1	49 马鞍山
	110.3	104.4	109.5	111.3	115.5	112.8	50 扬州
	105.0	102.2	107.8	106.2	103.8	112.7	51 吴忠
	116.3	113.2	112.7	108.2	106.6	112.5	52 鄂尔多斯
	104.4	104.6	102.3	105.9	106.2	112.3	53 铜川
	111.8	108.9	108.9	108.6	114.1	112.2	54 烟台
	114.5	105.8	103.3	107.7	111.8	112.1	55 泰州
	107.3	106.7	106.5	109.2	111.4	111.9	56 连云港
	118.3	114.3	111.4	111.1	111.5	111.8	57 邯郸
	109.0	106.6	105.8	103.4	105.0	111.7	58 石嘴山
	110.6	102.4	104.8	108.1	109.4	111.3	59 阜阳
	106.9	103.8	97.8	101.4	110.9	111.2	60 长治
	112.7	109.5	110.3	111.6	111.1	111.1	61 濮阳
	107.8	102.5	107.3	108.5	109.4	110.8	62 淮安
	114.2	110.7	109.6	109.9	113.0	110.7	63 南京
	111.5	107.1	103.5	108.0	104.6	110.5	64 榆林
	101.2	99.1	101.0	106.2	113.2	110.4	65 青岛
	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年	

图 58: “4+151” 城市气象调整后 2019 年至 2024 年 O₃ 年平均浓度 (微克/立方米) 年际变化表 (浓度底纹从红到绿表示年平均浓度由大到小; 左侧红、橙、紫、灰方格分别标记京津冀 “2+36” 城市、汾渭平原、长三角地区、其他城市)

	104.4	103.7	102.2	103.9	108.3	110.3	66 银川
	111.0	110.7	102.6	105.3	107.9	110.2	67 忻州
	112.8	107.6	103.8	107.5	107.7	110.2	68 信阳
	114.6	108.0	108.8	108.4	109.6	109.9	69 威海
	102.7	101.3	109.1	104.0	105.7	109.8	70 固原
	96.6	97.6	101.4	107.4	99.0	109.6	71 咸阳
	110.8	104.5	105.0	105.5	104.6	109.6	72 中卫
	94.9	111.3	107.2	101.8	108.5	109.4	73 六安
	108.1	95.5	100.7	104.9	100.6	109.3	74 合肥
	108.0	109.1	105.4	111.5	107.3	108.8	75 廊坊
	109.6	102.7	98.9	107.8	105.4	108.8	76 安庆
	102.4	106.2	104.3	112.3	111.0	108.5	77 苏州
	109.0	107.3	107.1	111.3	108.4	108.4	78 石家庄
	110.6	102.9	104.7	114.9	112.7	108.4	79 镇江
	96.3	93.4	98.2	101.7	107.5	108.3	80 攀枝花
	106.4	106.4	106.1	107.0	105.8	108.1	81 嘉兴
	101.0	102.4	101.0	104.1	106.2	107.8	82 大同
	109.6	105.5	105.1	107.1	105.4	107.7	83 湖州
	105.8	106.4	101.4	108.1	104.7	107.3	84 无锡
	106.0	92.3	99.8	106.6	107.0	107.1	85 芜湖
	109.7	108.0	99.6	104.8	105.3	106.7	86 朔州
	109.5	102.4	107.7	101.1	106.9	106.7	87 乌兰察布
	111.3	104.0	106.0	109.5	103.3	106.4	88 保定
	99.4	102.1	105.7	99.7	95.6	106.3	89 宣城
	109.1	101.3	103.4	103.2	105.8	106.2	90 巴彦淖尔
	108.1	96.8	90.4	98.2	95.2	106.0	91 杭州
	98.7	98.2	94.9	102.2	100.6	105.9	92 绍兴
	99.6	100.5	102.1	107.2	108.1	105.7	93 南通
	99.6	96.1	89.9	97.1	103.0	105.7	94 金华
	95.2	98.0	91.2	101.5	104.2	105.0	95 九江
	102.6	105.1	104.1	106.4	103.0	104.8	96 唐山
	107.6	102.5	104.8	106.7	104.5	104.2	97 张家口
	101.5	94.4	96.9	92.7	99.0	103.6	98 吕梁
	98.5	100.9	100.1	100.6	100.0	103.4	99 秦皇岛
	104.6	105.6	109.3	108.5	100.0	103.4	100 渭南
	93.9	91.3	93.4	100.1	101.4	103.1	101 西安
	104.3	93.4	100.0	100.6	102.2	102.8	102 池州
	99.6	97.2	97.2	101.2	99.8	102.2	103 商洛
	103.9	98.1	97.0	99.3	99.4	101.6	104 宁波
	96.1	92.5	94.0	95.6	101.2	101.5	105 包头
	101.1	99.3	95.5	100.3	100.8	100.7	106 北京
	89.8	92.1	89.1	96.0	97.8	100.0	107 德阳
	96.2	84.4	89.8	94.2	91.6	100.0	108 铜陵
	98.1	98.1	99.3	103.0	103.0	99.9	109 凉山
	103.7	103.2	95.0	103.5	103.7	99.2	110 上海
	98.9	99.6	97.5	96.6	94.3	99.2	111 台州
	92.4	93.6	90.6	94.1	95.2	99.1	112 衢州
	96.1	94.1	93.5	91.5	98.9	98.9	113 阳泉
	96.4	95.5	90.4	96.2	96.6	98.6	114 南昌
	97.1	95.9	92.7	96.9	98.4	98.3	115 宜宾
	90.2	88.4	81.9	79.1	88.6	98.1	116 新余
	98.2	96.5	90.1	98.3	98.6	98.0	117 资阳
	102.6	98.8	97.9	98.9	100.6	97.7	118 呼和浩特
	95.3	99.7	100.1	94.3	94.0	97.4	119 舟山
	98.0	96.8	96.7	100.4	95.1	97.4	120 延安
	87.3	90.7	91.8	88.0	97.4	97.2	121 太原
	89.3	86.7	86.0	85.3	89.2	96.5	122 丽水
	94.5	97.5	85.5	87.2	89.4	96.4	123 黄山
	99.0	98.6	88.9	88.4	95.7	96.0	124 鹰潭
	95.1	92.8	90.0	94.2	90.1	95.8	125 成都
	93.5	93.2	86.8	86.9	90.3	95.3	126 上饶
	94.3	95.2	92.4	91.5	88.6	93.8	127 吉安
	93.3	92.1	86.4	88.2	90.5	93.7	128 温州
	82.8	86.1	86.8	90.3	91.6	92.9	129 乐山
	89.3	88.2	91.6	88.2	94.9	92.7	130 锡林郭勒
	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年	

图 59: “4+151” 城市气象调整后 2019 年至 2024 年 O₃ 年平均浓度 (微克/立方米) 年际变化表 (浓度底纹从红到绿表示年平均浓度由大到小; 左侧红、橙、紫、灰方格分别标记京津冀 “2+36” 城市、汾渭平原、长三角地区、其他城市)

	92.4	93.8	95.1	100.0	94.5	92.4	131 宝鸡
	77.9	82.6	83.6	89.2	90.3	92.1	132 汉中
	89.7	88.2	90.8	90.8	89.9	92.1	133 自贡
	95.7	96.5	90.1	91.9	91.5	90.9	134 承德
	97.4	100.2	94.6	93.5	91.5	90.4	135 抚州
	85.3	84.2	83.7	90.3	90.7	89.7	136 内江
	98.2	90.6	85.7	87.9	88.1	89.0	137 眉山
	80.0	82.7	82.4	84.6	84.4	88.6	138 广安
	84.2	89.8	86.9	90.2	94.9	88.3	139 赤峰
	81.5	80.3	82.9	88.7	88.4	87.3	140 景德镇
	84.0	78.5	77.2	83.5	83.8	87.3	141 泸州
	90.8	93.4	86.0	92.8	92.1	87.3	142 绵阳
	99.6	97.5	83.8	89.7	87.3	86.8	143 赣州
	92.6	86.6	81.9	85.5	86.3	86.4	144 宜春
	83.7	83.6	80.3	85.0	82.7	85.6	145 遂宁
	78.5	79.0	77.6	85.7	85.4	85.3	146 安康
	89.2	84.9	81.8	85.5	82.6	85.1	147 萍乡
	85.5	78.3	73.0	77.9	83.4	83.6	148 南充
	67.0	78.4	76.8	80.4	82.3	83.1	149 甘孜
	87.4	81.3	86.8	79.4	78.6	83.0	150 阿坝
	77.4	70.2	70.0	78.9	77.7	79.8	151 重庆
	79.7	74.0	72.7	80.7	75.9	79.7	152 雅安
	67.3	76.6	73.0	78.7	80.3	79.5	153 广元
	74.2	75.6	72.9	76.5	77.1	75.3	154 巴中
	78.1	71.6	56.1	61.8	67.5	66.1	155 达州
2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年		

图 60: “4+151”城市气象调整后 2019 年至 2024 年 O₃ 年平均浓度 (微克/立方米) 年际变化表 (浓度底纹从红到绿表示年平均浓度由大到小; 左侧红、橙、紫、灰方格分别标记京津冀 “2+36” 城市、汾渭平原、长三角地区、其他城市)

最高的季节 90% 分位数统计, 较国家标准略微严格, 但对大多数城市而言, 仍较 WHO 提出的年 99% 分位数达标的要求更宽松。2024 年, 有 135 个城市的 O₃ 90% 分位数浓度最大值产生在夏季; 有 15 个城市的 O₃ 90% 分位数浓度最大值产生在春季, 包括长三角地区的湖州和 14 个非重点城市 (攀枝花、甘孜、自贡、阿坝、宣城、黄山、上饶、抚州、景德镇、赣州、鹰潭、丽水、台州、衢州); 有 5 个城市的 O₃ 90% 分位数浓度最大值产生在秋季, 包括 5 个非重点城市 (南昌、吉安、宜春、新余、萍乡)。

2018 年 “4+151” 城市 O₃ 90% 分位数浓度值 (标准误差) 为 197.4(2.5) 微克/立方米, 2024 年下降至 193.8(2) 微克/立方米, 年均下降 0.6 微克/立方米。与 2019 年 90% 分位数浓度值 203.9(2.4) 微克/立方米相比, 下降 10.1(1.2) 微克/立方米; 与 2023 年 90% 分位数浓度值 196.5(2.1) 微克/立方米相比, 下降 2.7(0.9) 微克/立方米。

在区域和城市尺度, O₃ 90% 分位数浓度最高的城市为天津 (243.3 微克/立方米)、济南 (238 微克/立方米)、临汾 (233.7 微克/立方米)。浓度最高的 30 个城市中, 临汾、安阳、德州、济南、淄博、滨州、焦作、郑州已连续 3 年在列。河南、山东、河北为本年度 O₃ 极端污染较严重省份, 分别有 8、7、7 个城市进入浓度最高的 30 个城市榜单。O₃ 90% 分位数浓度最低的城市为甘孜 (130.9 微克/立方米)、阿坝 (135.1 微克/立方米)、安康 (139.4 微克/立方米)。浓度最低的 30 个城市中, 舟山为重点城市, 极端污染状况控制得相对较好。四川、江西为本年度 O₃ 极端污染相对较轻省份, 分别有 11、9 个城市进入浓度最低的 30 个城市榜单。

2024 年 “4+151” 城市中 O₃ 年 90% 分位数低于 160 微克/立方米的城市有 13 个, 占比 8%。包括景德镇、温州、黄山、广元、萍乡、锡林郭勒、抚州、巴中、赣州、舟山、安康、阿坝、甘孜, 其中舟山

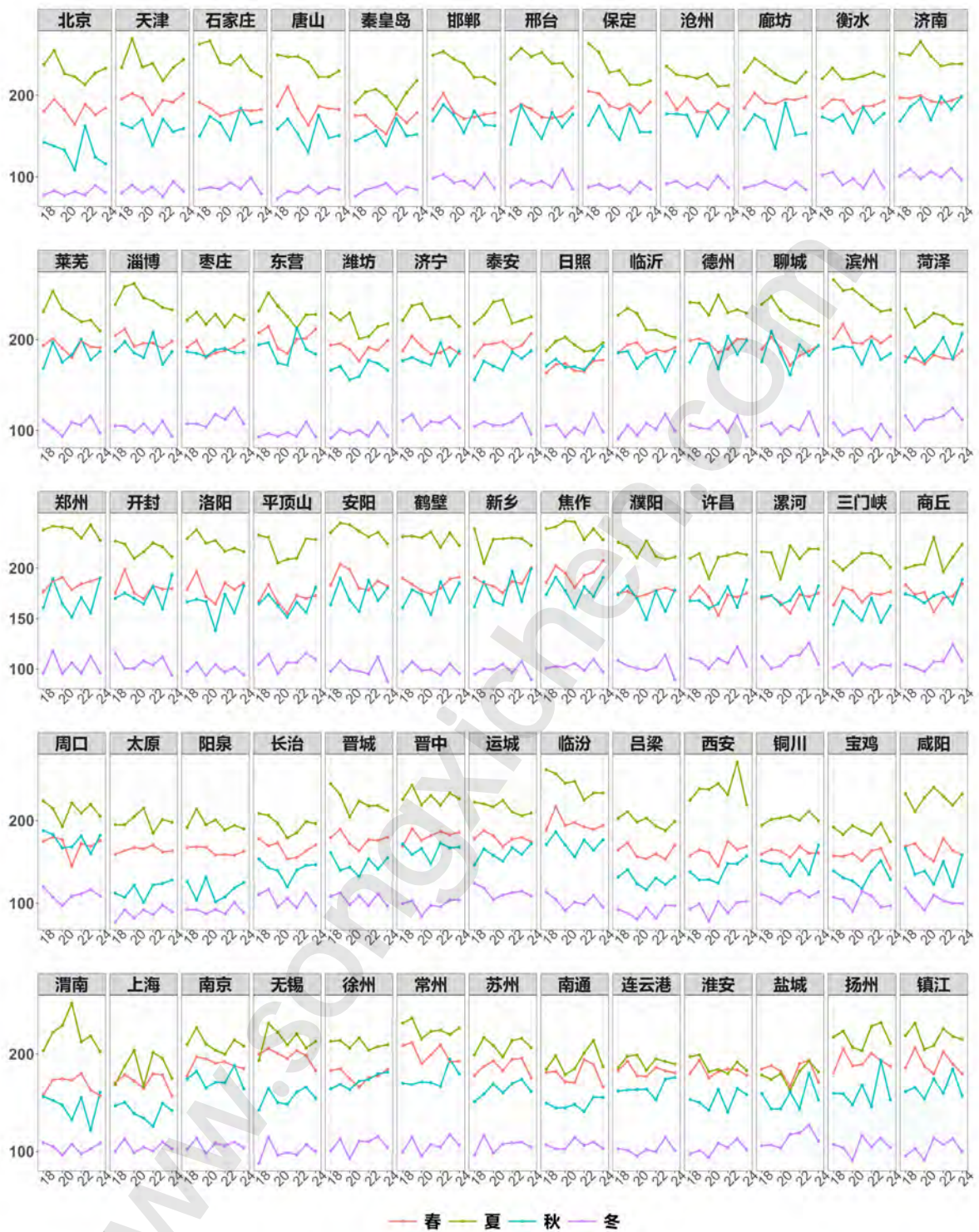


图 61: “4+151” 城市气象调整后 2018 年至 2024 年 8 小时 O₃ 季节 90% 分位数浓度 (微克/立方米) 变化序列图

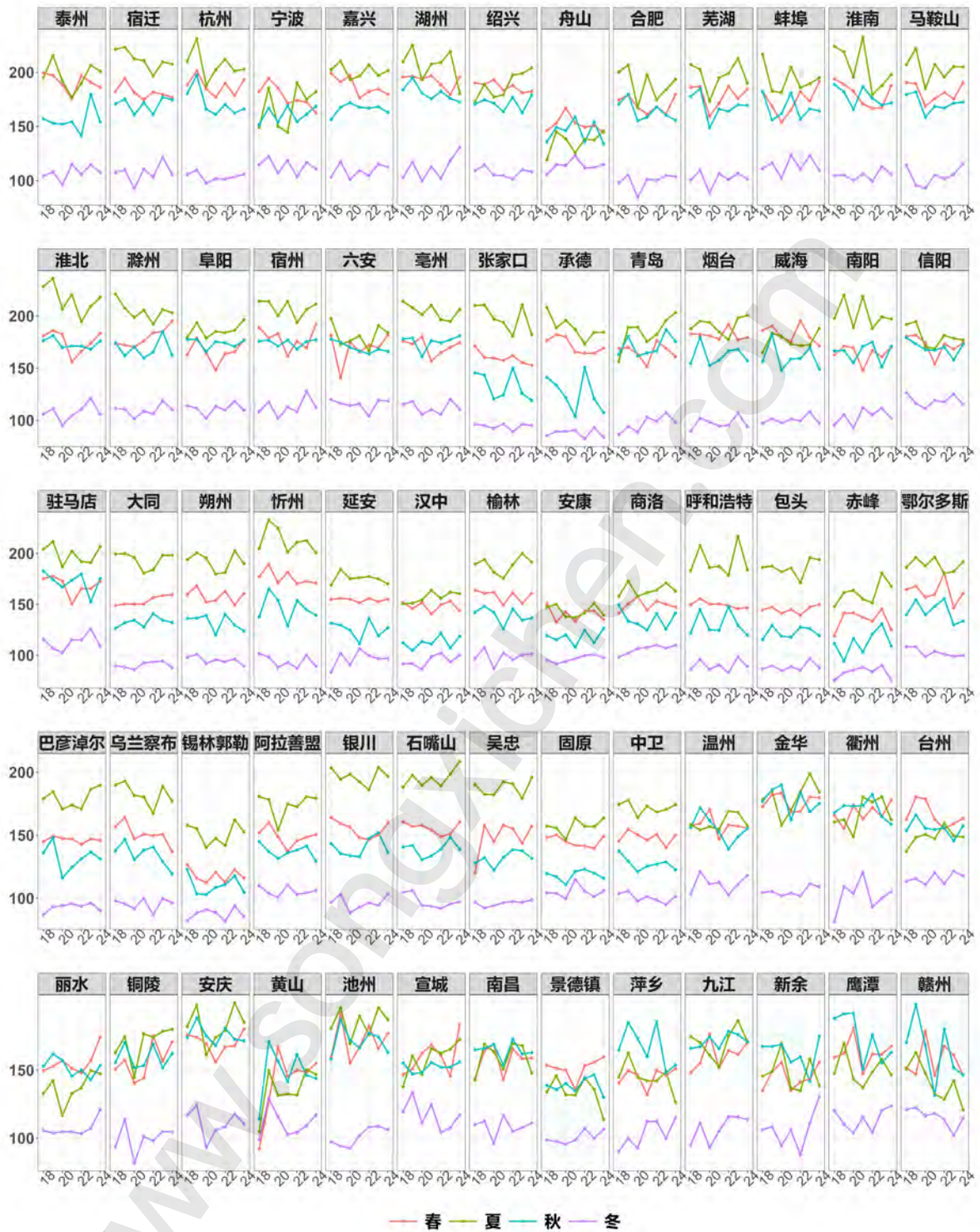


图 62: “4+151” 城市气象调整后 2018 年至 2024 年 8 小时 O₃ 季节 90% 分位数浓度 (微克/立方米) 变化序列图

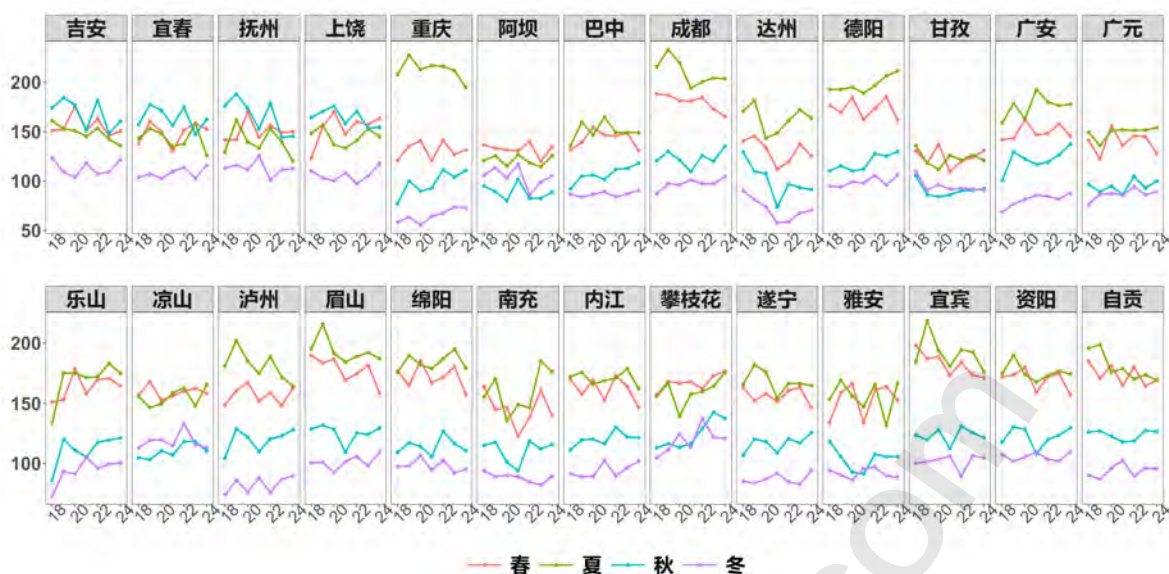


图 63: “4+151”城市气象调整后 2018 年至 2024 年 8 小时 O_3 季节 90% 分位数浓度 (微克/立方米) 变化序列图

为重点城市。以上达标城市中，四川巴中、广元、甘孜、阿坝，江西景德镇，浙江舟山，陕西安康已连续 3 年达标。

4 六种常规空气污染物综合评价

图 64 给出 2024 和 2023 年“4+151”城市秋冬 $PM_{2.5}$ 和春夏 8 小时臭氧平均浓度的联合分布。图中右上区域为高 $PM_{2.5}$ 和高臭氧的城市集群（双高群），主要由“2+36”城市和长三角地区的城市组成。焦作、安阳、商丘、郑州、菏泽、新乡、平顶山、漯河为 2024 年秋冬 $PM_{2.5}$ 和春夏臭氧综合污染程度最严重的城市，需要重点关注。图中左下区域为低 $PM_{2.5}$ 和低臭氧的城市集群（双低群），主要由其他城市的城市组成。甘孜、阿坝、景德镇、舟山、赣州、黄山、温州、上饶为 2024 年秋冬 $PM_{2.5}$ 和春夏臭氧浓度排名前 5% 的城市，空气较为清洁。中间区域为主要由其他城市和长三角地区组成的中等 $PM_{2.5}$ 和臭氧浓度城市集群。从区域一致性的角度，“2+36”城市中，秦皇岛、北京、日照、唐山、东营等城市不属于双高群，秋冬 $PM_{2.5}$ 和春夏臭氧污染相对于区域内其他城市较轻。从污染物协同治理的角度，以下城市的春夏臭氧与秋冬 $PM_{2.5}$ 污染程度差异较大：阿拉善盟、包头、北京、滨州、大同、德州、东营、固原、济南、晋中、廊坊、鄂尔多斯、秦皇岛、朔州、天津、乌兰察布、潍坊、威海、无锡、吴忠、烟台、榆林、张家口、淄博应当优先加强春夏臭氧治理；宝鸡、巴中、重庆、达州、阜阳、广安、汉中、泸州、眉山、南昌、南充、内江、萍乡、渭南、西安、信阳、新余、自贡、资阳应当优先加强秋冬 $PM_{2.5}$ 治理。

2024 年，“4+151”城市秋冬 $PM_{2.5}$ 浓度呈现轻微右偏分布（参考横向频率密度曲线），存在少数极高浓度城市；春夏臭氧浓度呈现轻微左偏分布（参考纵向频率密度曲线），存在少数极低浓度城市。与 2023 年相比，秋冬 $PM_{2.5}$ 浓度分布得更加分散，高值区城市数量增加，城市 $PM_{2.5}$ 浓度范围由 11~78

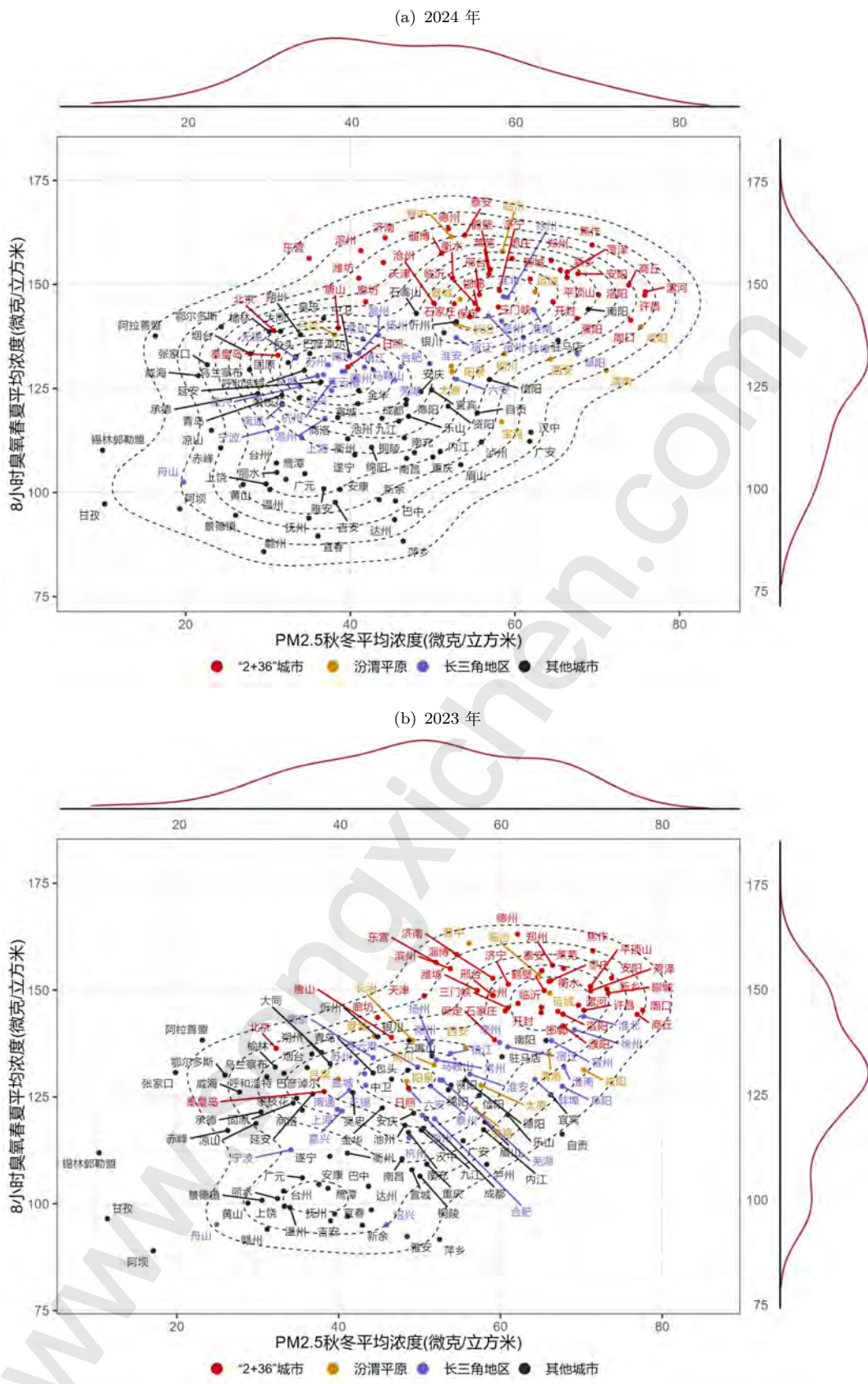


图 64: “4+151”城市 PM_{2.5} 秋冬和 8 小时臭氧春夏 (微克/立方米) 平均浓度散点图, 其中红色点代表 “2+36” 城市, 棕色点代表汾渭平原城市, 紫色点代表长三角地区城市, 黑色点代表其他城市

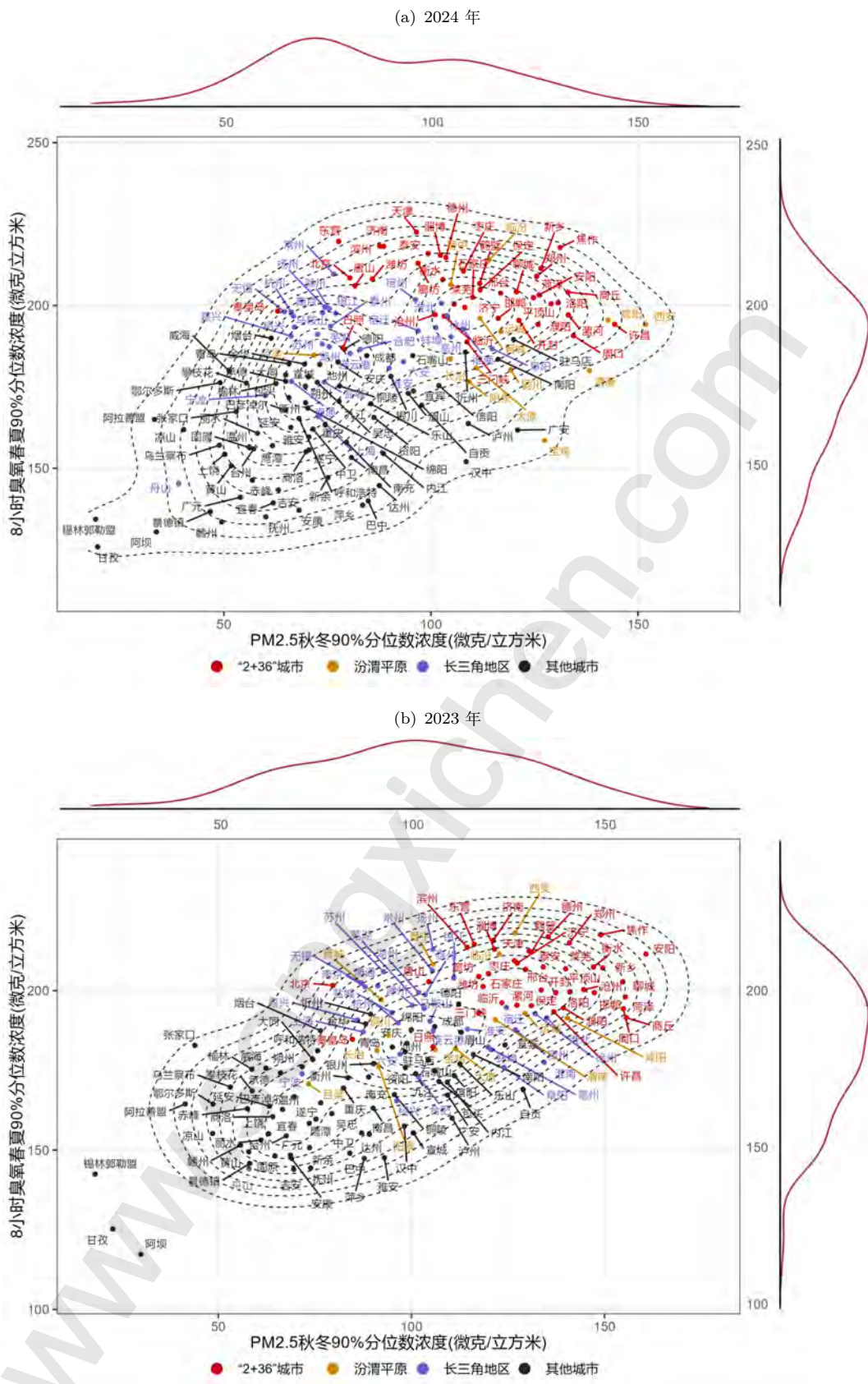


图 65: “4+151” 城市 PM_{2.5} 秋冬和 8 小时臭氧春夏 (微克/立方米) 年 90% 分位数浓度散点图, 其中红色点代表“2+36”城市, 棕色点代表汾渭平原城市, 紫色点代表长三角地区城市, 黑色点代表其他城市

微克/立方米下降至 10~76 微克/立方米, 浓度极大值降低 2 微克/立方米, 平均浓度由 50.3 微克/立方米降低至 46 微克/立方米。春夏臭氧浓度分布得更加分散, 低值区城市数量增加, 城市臭氧浓度范围由 89~163 微克/立方米扩大至 86~163 微克/立方米, 浓度极大值无显著变化, 平均浓度由 128.6 微克/立方米升高至 129.7 微克/立方米。双高群城市秋冬 $PM_{2.5}$ 和春夏臭氧平均浓度均较 2023 年下降。咸阳、淮南、晋城、亳州、驻马店为本年新增双高群城市, 应当更加关注协同治理问题。双低群城市秋冬 $PM_{2.5}$ 和春夏臭氧平均浓度均下降。萍乡、上海为本年新增双低群城市, 协同治理初见成效。

图 65 给出 2024 和 2023 年“4+151”城市秋冬 $PM_{2.5}$ 和春夏 8 小时臭氧 90% 分位数浓度的联合分布, 与均值浓度呈现相似的城市集群特征。图中右上区域为高 $PM_{2.5}$ 和高臭氧的城市集群(双高群), 主要由“2+36”城市和汾渭平原的城市组成。焦作、商丘、新乡、西安、咸阳、许昌、郑州、洛阳为 2024 年秋冬 $PM_{2.5}$ 和春夏臭氧极端污染程度最严重的城市, 需要重点关注。图中左下区域为低 $PM_{2.5}$ 和低臭氧的城市集群(双低群), 主要由非重点城市组成。甘孜、阿坝、舟山、景德镇、赣州、广元、黄山、阿拉善盟为 2024 年秋冬 $PM_{2.5}$ 和春夏臭氧 90% 分位数浓度排名前 5% 的城市, 极端污染控制较好。从区域一致性的角度, 长三角地区中, 阜阳、淮北、淮南位于双高群, 浓度相对于区域内其他城市偏高。“2+36”城市和汾渭平原中, 秦皇岛、吕梁、日照、东营、北京等城市不属于极端污染的双高群; 长三角地区中, 舟山位于双低群, 秋冬 $PM_{2.5}$ 和春夏臭氧污染相对于区域内其他城市较轻。从污染物协同治理的角度, 以下城市的春夏臭氧与秋冬 $PM_{2.5}$ 极端污染程度差异较大: 北京、滨州、常州、滁州、东营、杭州、嘉兴、济南、马鞍山、南京、秦皇岛、绍兴、唐山、天津、潍坊、威海、无锡、扬州、烟台应当优先加强春夏臭氧治理; 宝鸡、巴中、达州、广安、汉中、泸州、南昌、南阳、内江、萍乡、太原、铜川、渭南、阳泉、周口、自贡应当优先加强秋冬 $PM_{2.5}$ 治理。

2024 年,“4+151”城市秋冬 $PM_{2.5}$ 90% 分位数浓度呈现轻微右偏分布(参考横向频率密度曲线), 存在少数极高浓度城市; 春夏臭氧 90% 分位数浓度呈现轻微左偏分布(参考纵向频率密度曲线), 存在少数极低浓度城市。与 2023 年相比, 秋冬 $PM_{2.5}$ 浓度分布得更加分散, 高值区城市数量增加, 城市 $PM_{2.5}$ 90% 分位数浓度范围由 23~161 微克/立方米下降至 19~152 微克/立方米, 浓度极大值降低 9 微克/立方米, 90% 分位数浓度的城市均值由 100.6 微克/立方米降低至 86.7 微克/立方米。春夏臭氧浓度分布得更加分散, 高值区城市数量增加, 城市臭氧 90% 分位数浓度范围由 117~218 微克/立方米上升至 126~223 微克/立方米, 浓度极大值升高 4 微克/立方米, 但 90% 分位数浓度的城市均值由 182.3 微克/立方米降低至 181.2 微克/立方米。双高群城市秋冬 $PM_{2.5}$ 和春夏臭氧 90% 分位数浓度均下降。渭南、驻马店、晋城、晋中、阜阳、南阳、淮南、铜川为本年新增双高群城市, 应当更加关注极端污染的协同治理问题。双低群城市秋冬 $PM_{2.5}$ 和春夏臭氧 90% 分位数浓度均下降。鹰潭、张家口、遂宁为本年新增双低群城市, 极端污染的协同治理成效较好。

由表 6 可知, 2024 年“4+151”城市至多有四种污染物同时超标, 为山西晋城(O_3 、 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10-2.5}$ 、CO)。有 30 个城市 6 种污染物均已达标, 占比 19.4%; 主要位于江西(9 市)。六种污染物中, 超标城市数量最多的为 O_3 , 有 110 个城市超标, 占比 71%, 较上年度减少 1 个; 其次是 $PM_{2.5}$, 有 93 个城市超标, 占比 60%, 较上年度减少 17 个; $PM_{10-2.5}$ 超标城市有 51 个, 占比 32.9%, 较上年度减少 14 个; CO 超标城市有 2 个, 分别为攀枝花、晋城, 较上年度减少 4 个; NO_2 无超标城市, 较上年度减少 4 个。在污染物协同控制层面, 当前多污染物超标城市最常见类型为 O_3 、 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10-2.5}$ 同时超标, 共 41 个城

市；其次是 O₃、PM_{2.5} 同时超标，共 36 个城市。分区域来看，2024 年，京津冀“2+36”城市、长三角地区、非重点城市超标城市数量最多的污染物为 O₃，汾渭平原超标城市数量最多的污染物为 PM_{2.5}。山东、河南、山西超标污染物超过 3 种的城市数量较多，污染状况相对严重。

表 6: 2024 年超标污染物情况汇总，“X”和“(X)”分别代表 2024 和 2023 年过高（超过报告拟定标准）

序号	城市	污染物（年均浓度限值）					
		PM _{2.5} (35μg/m ³)	PM _{10-2.5} (35μg/m ³)	臭氧(春夏) (120μg/m ³)	二氧化氮 (40μg/m ³)	二氧化硫 (20μg/m ³)	一氧化碳 (1mg/m ³)
1	晋城	X(X)	X(X)	X(X)			X(X)
2	保定	X(X)	X(X)	X(X)			
3	廊坊	X(X)	X(X)	X(X)			
4	石家庄	X(X)	X(X)	X(X)			
5	邢台	X(X)	X(X)	X(X)			
6	滨州	X(X)	X(X)	X(X)			
7	德州	X(X)	X(X)	X(X)			
8	菏泽	X(X)	X(X)	X(X)			
9	济南	X(X)	X(X)	X(X)			
10	济宁	X(X)	X(X)	X(X)			
11	莱芜	X(X)	X(X)	X(X)	(X)		
12	聊城	X(X)	X(X)	X(X)			
13	泰安	X(X)	X(X)	X(X)			
14	枣庄	X(X)	X(X)	X(X)			
15	淄博	X(X)	X(X)	X(X)			
16	晋中	X(X)	X(X)	X(X)			
17	临汾	X(X)	X(X)	X(X)			(X)
18	吕梁	X	X(X)	X(X)			
19	太原	X(X)	X(X)	X(X)	(X)		
20	阳泉	X(X)	X(X)	X(X)	(X)		
21	运城	X(X)	X(X)	X(X)			
22	铜川	X(X)	X(X)	X(X)			
23	渭南	X(X)	X(X)	X(X)	(X)		
24	西安	X(X)	X(X)	X(X)			
25	咸阳	X(X)	X(X)	X(X)			
26	安阳	X(X)	X(X)	X(X)			
27	鹤壁	X(X)	X(X)	X(X)			

表 6: 2024 年超标污染物情况汇总, “X” 和 “(X)” 分别代表 2024 和 2023 年过高 (超过报告拟定标准)

序号	城市	污染物 (年均浓度限值)					
		PM _{2.5} (35 μ g/m ³)	PM _{10-2.5} (35 μ g/m ³)	臭氧 (春夏) (120 μ g/m ³)	二氧化氮 (40 μ g/m ³)	二氧化硫 (20 μ g/m ³)	一氧化碳 (1mg/m ³)
28	焦作	X(X)	X(X)	X(X)			
29	开封	X(X)	X(X)	X(X)			
30	洛阳	X(X)	X(X)	X(X)			
31	漯河	X(X)	X(X)	X(X)			
32	平顶山	X(X)	X(X)	X(X)			
33	新乡	X(X)	X(X)	X(X)			
34	周口	X(X)	X(X)	X(X)			
35	驻马店	X(X)	X(X)	X(X)			
36	巴彦淖尔	X(X)	X(X)	X(X)			
37	石嘴山	X(X)	X(X)	X(X)			
38	吴忠	X(X)	X(X)	X(X)			
39	银川	X(X)	X(X)	X(X)			
40	中卫	X(X)	X(X)	X(X)			
41	亳州	X(X)	X(X)	X(X)			
42	宿州	X(X)	X(X)	X(X)			
43	天津	X(X)	(X)	X(X)			
44	沧州	X(X)		X(X)			
45	邯郸	X(X)	(X)	X(X)			
46	衡水	X(X)	(X)	X(X)			
47	唐山	X(X)	(X)	X(X)			
48	临沂	X(X)	(X)	X(X)			
49	潍坊	X(X)	(X)	X(X)			
50	大同		X(X)	X(X)			
51	朔州	(X)	X(X)	X(X)			
52	忻州	X(X)	(X)	X(X)			
53	长治	X(X)	(X)	X(X)			
54	延安		X(X)	X(X)			
55	榆林		X(X)	X(X)			
56	南阳	X(X)		X(X)			
57	濮阳	X(X)		X(X)			

表 6: 2024 年超标污染物情况汇总, “X” 和 “(X)” 分别代表 2024 和 2023 年过高 (超过报告拟定标准)

序号	城市	污染物 (年均浓度限值)					
		PM _{2.5} (35 μ g/m ³)	PM _{10-2.5} (35 μ g/m ³)	臭氧 (春夏) (120 μ g/m ³)	二氧化氮 (40 μ g/m ³)	二氧化硫 (20 μ g/m ³)	一氧化碳 (1mg/m ³)
58	三门峡	X(X)	(X)	X(X)			
59	商丘	X(X)		X(X)			
60	信阳	X(X)		X(X)			
61	许昌	X(X)	(X)	X(X)			
62	郑州	X(X)	(X)	X(X)			
63	阿拉善盟		X(X)	X(X)			
64	包头	(X)	X(X)	X(X)			(X)
65	鄂尔多斯		X(X)	X(X)			
66	呼和浩特		X(X)	X(X)			
67	固原		X(X)	X(X)			
68	常州	X(X)		X(X)			
69	淮安	X(X)		X(X)			
70	宿迁	X(X)		X(X)			
71	徐州	X(X)	(X)	X(X)			
72	扬州	X(X)		X(X)			
73	镇江	X(X)		X(X)			
74	安庆	X(X)		X(X)			
75	蚌埠	X(X)		X(X)			
76	滁州	X(X)		X(X)			
77	阜阳	X(X)		X(X)			
78	合肥	X(X)		X			
79	淮北	X(X)	(X)	X(X)			
80	淮南	X(X)		X(X)			
81	六安	X(X)		X(X)			
82	马鞍山	X(X)		X(X)			
83	芜湖	X(X)		X(X)			
84	成都	X(X)		X			
85	德阳	X(X)		X(X)			
86	攀枝花			X(X)			X(X)
87	宜宾	X(X)		X(X)			

表 6: 2024 年超标污染物情况汇总, “X” 和 “(X)” 分别代表 2024 和 2023 年过高 (超过报告拟定标准)

序号	城市	污染物 (年均浓度限值)					
		PM _{2.5} (35 μ g/m ³)	PM _{10-2.5} (35 μ g/m ³)	臭氧 (春夏) (120 μ g/m ³)	二氧化氮 (40 μ g/m ³)	二氧化硫 (20 μ g/m ³)	一氧化碳 (1mg/m ³)
88	资阳	X(X)		X(X)			
89	北京			X(X)			
90	承德			X(X)			
91	秦皇岛			X(X)			
92	张家口			X(X)			
93	东营	(X)	(X)	X(X)			
94	青岛	(X)		X(X)			
95	日照	(X)		X(X)			
96	威海			X(X)			
97	烟台			X(X)			
98	宝鸡	X(X)		(X)			
99	汉中	X(X)					
100	乌兰察布			X(X)			
101	连云港	(X)		X(X)			
102	南京			X(X)			
103	南通			X(X)			
104	苏州	(X)		X(X)			
105	泰州	(X)		X(X)			
106	无锡			X(X)			
107	盐城			X(X)			
108	杭州	(X)		X			
109	嘉兴			X(X)			
110	金华	(X)		X(X)			
111	绍兴	(X)		X			
112	铜陵	X(X)					
113	宣城	(X)		X			
114	九江	X(X)					
115	萍乡	X(X)					(X)
116	巴中	X(X)					
117	广安	X(X)					

表 6: 2024 年超标污染物情况汇总, “X” 和 “(X)” 分别代表 2024 和 2023 年过高 (超过报告拟定标准)

序号	城市	污染物 (年均浓度限值)					
		PM _{2.5} (35μg/m ³)	PM _{10-2.5} (35μg/m ³)	臭氧 (春夏) (120μg/m ³)	二氧化氮 (40μg/m ³)	二氧化硫 (20μg/m ³)	一氧化碳 (1mg/m ³)
118	乐山	X(X)		(X)			
119	泸州	X(X)					
120	眉山	X(X)					
121	绵阳	X(X)		(X)			
122	南充	X(X)					
123	内江	X(X)					
124	自贡	X(X)					
125	重庆	X(X)					

江西抚州、赣州、吉安、景德镇、南昌、上饶、新余、宜春、鹰潭, 无超标
 四川阿坝、达州、甘孜、广元、凉山、遂宁、雅安, 浙江湖州、丽水、
 宁波、衢州、台州、温州、舟山, 内蒙古赤峰、锡林郭勒, 安徽池
 州、黄山, 陕西安康、商洛, 上海

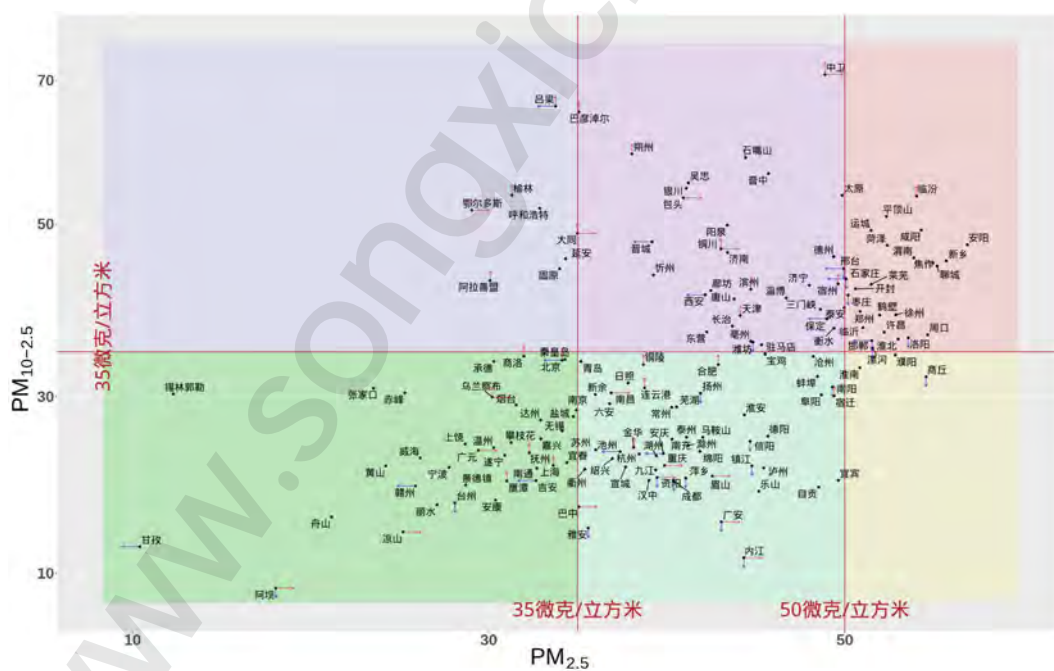


图 66: “4+151” 城市 2024 年 PM_{2.5} 和 PM_{10-2.5} 的监视坐标图, 其中横向 (纵向) 蓝色箭头表示该城市过去六年 (相比 2018 年) PM_{2.5} (PM_{10-2.5}) 降幅大于城市均值 + 标准差, 横向 (纵向) 红色箭头表示该城市过去六年 (相比 2018 年) PM_{2.5} (PM_{10-2.5}) 降幅小于城市均值-标准差

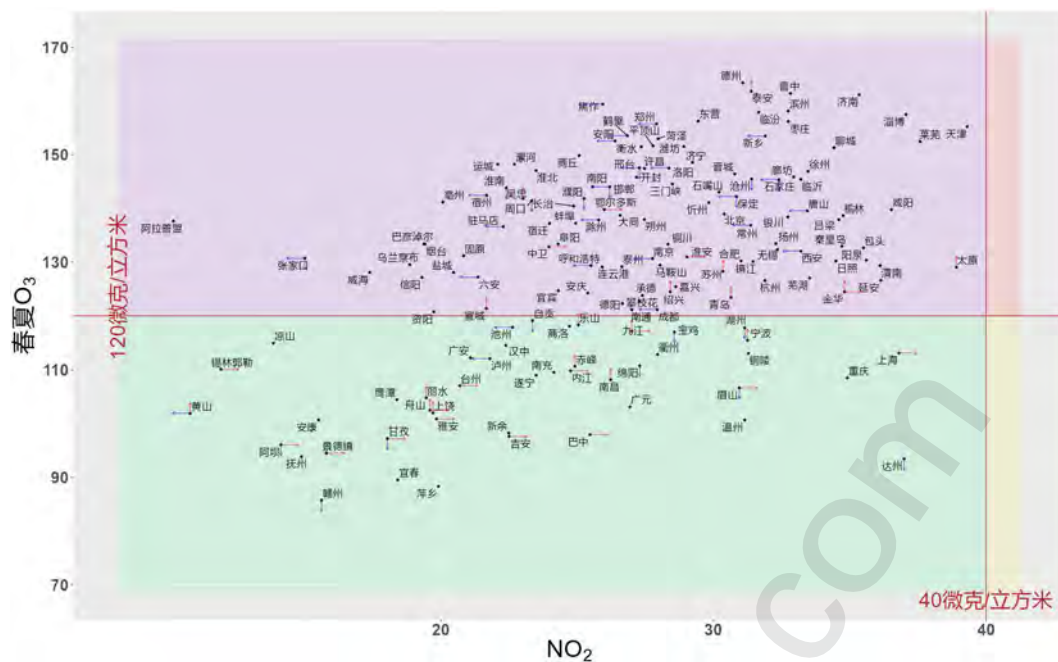


图 67: “4+151”城市 2024 年 NO₂ 和春夏 O₃ 的监视坐标图, 其中横向 (纵向) 蓝色箭头表示该城市过去六年 (相比 2018 年) NO₂ (春夏 O₃) 降幅大于城市均值 + 标准差, 横向 (纵向) 红色箭头表示该城市过去六年 (相比 2018 年) SO₂ (CO) 降幅小于城市均值-标准差

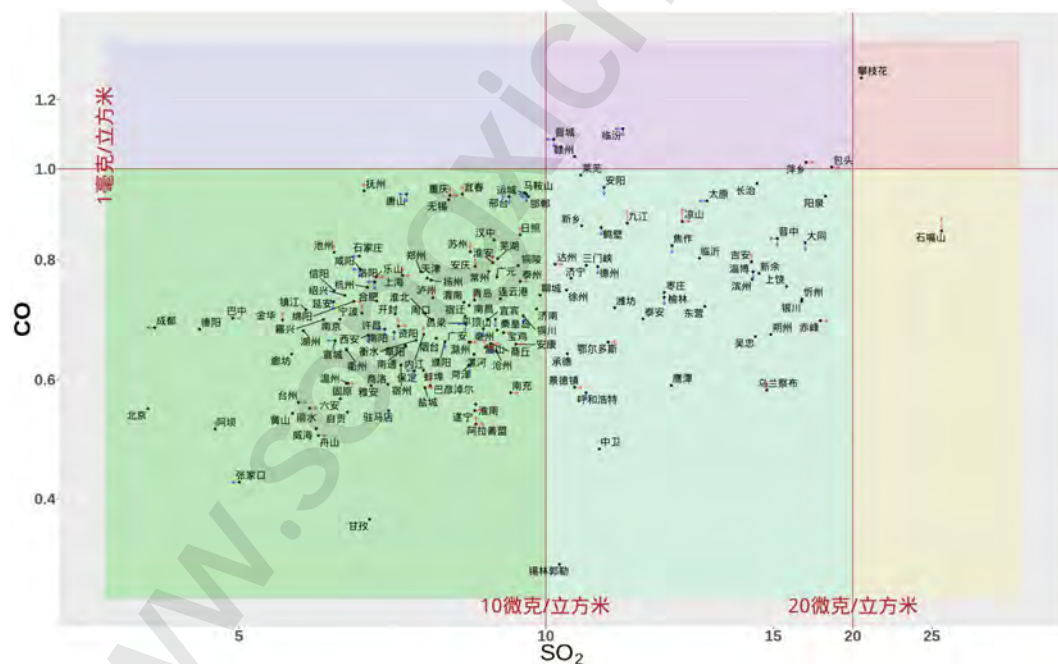


图 68: “4+151”城市 2024 年 SO₂ 和 CO 的监视坐标图, 其中横向 (纵向) 蓝色箭头表示该城市过去六年 (相比 2018 年) SO₂ (CO) 降幅大于城市均值 + 标准差, 横向 (纵向) 红色箭头表示该城市过去六年 (相比 2018 年) SO₂ (CO) 降幅小于城市均值-标准差



图 69: “4+151”城市 2024 年超标污染物词云图。城市名称中,绿色代表无污染物超标,橙色代表 1 个污染物超标,紫色代表 2 个污染物超标,红色代表 3 个污染物超标,黑色代表 4 个污染物超标,超标标准为: 35 微克/立方米 (PM_{2.5})、35 微克/立方米 (PM_{10-2.5})、20 微克/立方米 (SO₂)、1 毫克/立方米 (CO)、120 微克/立方米 (春夏两季 8 小时 O₃)、40 微克/立方米 (NO₂)

根据表 7, 相比 2019 年, 2024 年“4+151”城市六种空气污染物综合降幅的均值为 13.9%。部分城市的 5 年 (1 年) 累计综合降幅为负, 这说明相比 2019(2023) 年, 这些城市 2024 年的空气质量有所降低。

重点区域中, 从 5 年累计降幅来看, 长三角地区综合改善情况居中, 多数城市 (13 个) 综合降幅排名中间 1/3; 京津冀“2+36”城市、汾渭平原综合改善情况相对较好, 多数城市 (25、7 个) 综合降幅排名前 1/3。长三角地区的南京、淮南、无锡、淮北、滁州、镇江综合降幅排名位于前 1/3 区间, 与区域内其他城市差异较大, 空气质量改善情况较好; 京津冀“2+36”城市的三门峡、德州、日照, 汾渭平原的咸阳、铜川、宝鸡综合降幅排名位于后 1/3 区间, 与区域内其他城市差异较大, 空气污染综合治理工作需要加强。从 1 年累计降幅来看, 长三角地区综合改善情况处于中等偏上水平, 综合降幅排名前 1/3 的城市各 12 个; 京津冀“2+36”城市区域内不同城市间污染治理效果差异较大, 综合降幅排名前后 1/3 的城市各 13 个; 汾渭平原区域内不同城市间污染治理效果差异较大, 综合降幅排名前后 1/3 的城市各 6 个。京津冀“2+36”城市的安阳、邢台、邯郸、东营、保定、石家庄、沧州、秦皇岛、鹤壁、焦作、郑州、潍坊、滨州综合降幅排名位于前 1/3 区间, 与区域内其他城市差异较大, 空气质量改善情况较好; 京津冀“2+36”城市的商丘、濮阳、天津、泰安、济宁、平顶山、德州、洛阳、聊城、淄博、北京、漯河、许昌, 长三角地区的亳州、绍兴、舟山、蚌埠、阜阳、宁波、六安综合降幅排名位于后 1/3 区间, 与区域

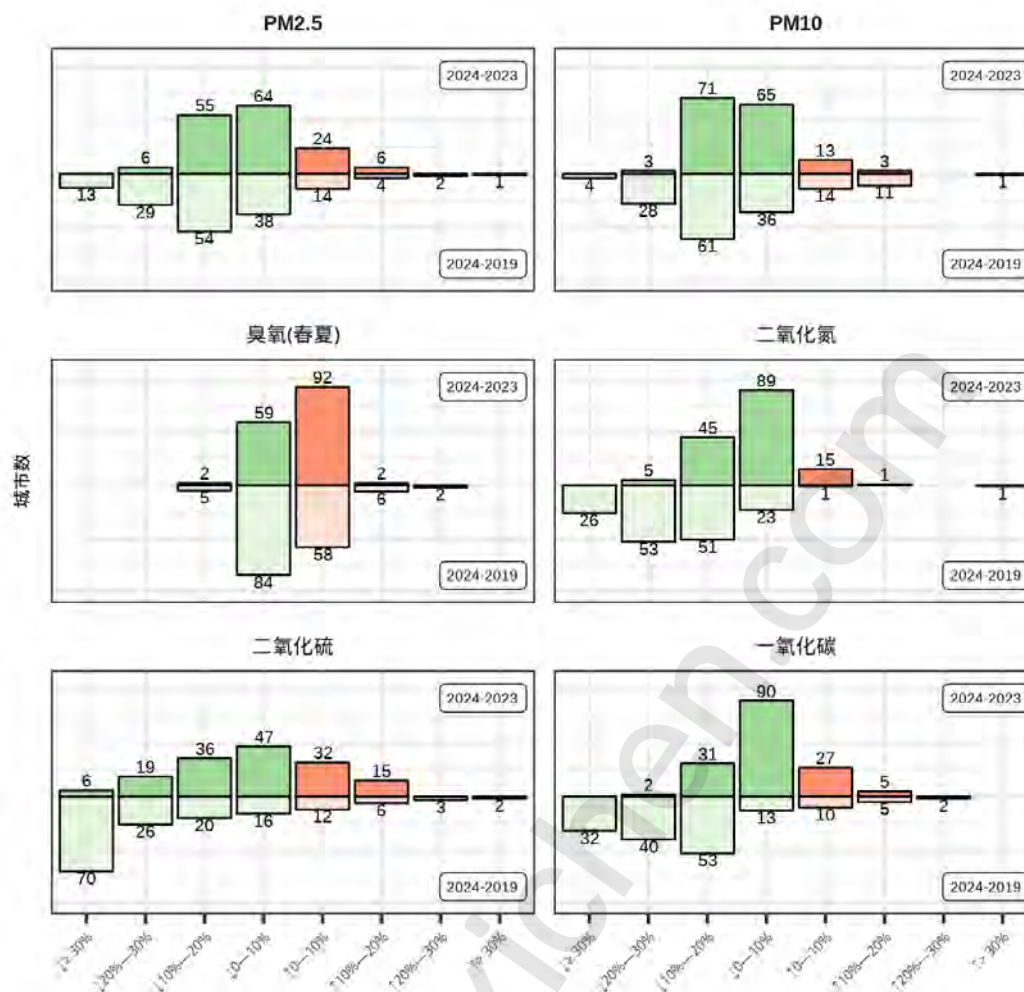


图 70: 2024 年“4+151”城市横坐标为城市污染物平均浓度变化率 (%) 区间上下限, 各面板坐标刻度一致。图中绿色柱体标记浓度下降, 橘红色柱体标记浓度上升, 上方 (下方) 柱体及数字表示 2024 年较 2023 年 (2019 年) 变化率对应城市数量

内其他城市差异较大, 空气污染综合治理工作需要加强。

图 70 展示了 2024 年“4+151”城市六类污染物浓度较 2019 年降幅的频率分布。相比 2019 年, 六种污染物浓度均在半数以上城市呈现下降趋势。O₃(春夏) 浓度变化率集中分布区间为降 0—10%, PM_{2.5}、PM₁₀、一氧化碳浓度变化率集中分布区间为降 10—20%, 二氧化氮浓度变化率集中分布区间为降 20—30%, 二氧化硫浓度变化率集中分布区间为降 30% 及以上。相比 2023 年, 除 O₃(春夏) 外, 其他污染物浓度均在半数以上城市呈现下降趋势。O₃(春夏) 浓度变化率集中分布区间为升 0—10%, PM_{2.5}、二氧化氮、二氧化硫、一氧化碳浓度变化率集中分布区间为降 0—10%, PM₁₀ 浓度变化率集中分布区间为降 10—20%。

为了方便各级部门了解 2024 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 66、67 和

68)。为了剔除 PM₁₀ 中 PM_{2.5} 的部分，我们将 PM₁₀ 替换成了 PM_{10-2.5}。PM_{10-2.5} 是 PM₁₀ 中空气动力学当量直径介于 2.5 微米到 10 微米之间的颗粒物，通过用 PM₁₀ 的浓度减去 PM_{2.5} 的浓度而得到。我们将六种污染物分成三对给出监视坐标图，同时结合污染物浓度的国家标准限值划分象限，用于区分污染物浓度是否处于偏高状态。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或上升（降幅在全部城市降幅均值的一个标准差区间范围之外）。

表 7: 2019(2023)—2024 年六种污染物气象调整后浓度综合改善情况城市排名表

1. 括号外为六种污染物 2019 年到 2024 年经气象调整后的 5 年累计降幅的平均值，括号内为 2023 年到 2024 年经气象调整后的一年降幅的平均值。2. 红、橙、紫色底纹分别标记京津冀及周边“2+36”城市、汾渭平原和长三角地区

序号	城市	降幅百分比	序号	城市	降幅百分比	序号	城市	降幅百分比
1	唐山	36(4.5)	53	南通	17.1(9.1)	105	合肥	10.1(5.5)
2	邢台	34.6(12.7)	54	廊坊	17.1(6)	106	中卫	9.8(5.8)
3	石家庄	31.9(11)	55	忻州	17.1(4.9)	107	六安	9.8(-1)
4	呼和浩特	31.7(8)	56	池州	17.1(6.3)	108	德阳	9.8(7)
5	张家口	31.2(2.8)	57	常州	16.9(5.3)	109	南昌	9.7(5.6)
6	邯郸	31.1(12.3)	58	蚌埠	16.9(1.9)	110	宁波	9.7(-0.1)
7	安阳	28.4(12.8)	59	新乡	16.8(7)	111	抚州	9.5(6.6)
8	保定	27.8(11.2)	60	宣城	16.7(6.6)	112	泰州	9.5(8.7)
9	秦皇岛	27.4(9.8)	61	北京	16.4(-0.7)	113	南充	9.2(10.1)
10	南京	25.5(7.8)	62	巴彦淖尔	16.3(1.7)	114	上饶	9.1(8.7)
11	大同	25.3(10)	63	宿迁	16.2(14.8)	115	安康	9.1(1)
12	包头	24.9(12.8)	64	达州	16.1(3.8)	116	凉山	9(10.1)
13	吕梁	24.9(7.7)	65	周口	16(4.8)	117	三门峡	8.8(4.9)
14	朔州	24.3(3.7)	66	许昌	15.8(-1.7)	118	吴忠	8.7(5.5)
15	临汾	24.2(10.4)	67	晋中	15.6(8)	119	商洛	8.7(0.3)
16	沧州	23.5(10.7)	68	阳泉	15.3(8.3)	120	咸阳	8.1(-3.1)
17	滨州	23.1(7.5)	69	马鞍山	15.2(7.7)	121	宿州	8(9)
18	衡水	23(7)	70	景德镇	15.1(14.1)	122	石嘴山	8(4.7)
19	承德	22.9(9.3)	71	潍坊	15.1(7.9)	123	铜川	8(1.2)
20	萍乡	22.7(9.7)	72	平顶山	15(2.1)	124	德州	7.8(1.8)
21	晋城	22.5(-0.9)	73	杭州	15(6.1)	125	驻马店	7.2(-5.2)
22	淮南	22(3.9)	74	连云港	15(8.6)	126	阜阳	7(0.6)
23	东营	21.8(11.4)	75	攀枝花	14.7(3.4)	127	衢州	6.9(9)

序号	城市	降幅百分比	序号	城市	降幅百分比	序号	城市	降幅百分比
24	濮阳	21.7(2.6)	76	宜春	14.4(5.9)	128	宝鸡	6.8(2.3)
25	太原	21.6(7.9)	77	延安	14(2.9)	129	安庆	6.5(5.7)
26	成都	21.5(2.6)	78	泰安	13.9(2.4)	130	绍兴	6.4(3.2)
27	焦作	20.9(8.4)	79	聊城	13.7(0.4)	131	青岛	6.3(6.1)
28	郑州	20.8(8)	80	亳州	13.6(3.7)	132	锡林郭勒	6(3.4)
29	菏泽	20.6(6.9)	81	新余	13.5(5.5)	133	乐山	5.9(11.2)
30	长治	20.1(7.7)	82	南阳	13.2(0.4)	134	广元	4.7(7.8)
31	赣州	19.9(11.9)	83	嘉兴	13.2(5.9)	135	甘孜	4.2(3.3)
32	济南	19.8(4.1)	84	湖州	13.2(8.8)	136	眉山	4.2(5.5)
33	临沂	19.6(6.9)	85	商丘	13.1(3.6)	137	九江	3.9(5.2)
34	洛阳	19(1.4)	86	渭南	13.1(0.5)	138	上海	3.7(4)
35	乌兰察布	18.9(14.6)	87	赤峰	13.1(11.6)	139	舟山	3.7(2.2)
36	无锡	18.9(11.5)	88	榆林	13(2.1)	140	雅安	3.2(5.1)
37	淄博	18.9(-0.4)	89	汉中	12.9(-6.9)	141	日照	3.1(5.4)
38	运城	18.9(5.3)	90	黄山	12.8(2.3)	142	遂宁	2.8(0.7)
39	淮北	18.7(9.6)	91	温州	12.5(6.3)	143	盐城	2.5(5)
40	滁州	18.7(6.4)	92	金华	12.4(10.9)	144	阿拉善盟	1.8(4.5)
41	烟台	18.5(8)	93	威海	12.1(6.7)	145	重庆	1.7(4.8)
42	开封	18.4(5.9)	94	丽水	11.9(8.4)	146	淮安	1.6(6.3)
43	固原	18.3(5.5)	95	吉安	11.8(2)	147	台州	1.4(0.5)
44	枣庄	18.3(6.9)	96	信阳	11.7(8.1)	148	绵阳	1.2(6.9)
45	济宁	18.3(2.2)	97	泸州	11.5(7.6)	149	银川	0.7(1.1)
46	西安	18.1(-1.5)	98	自贡	11.2(3.1)	150	苏州	0.2(6.8)
47	天津	18(2.4)	99	宜宾	11.1(7.7)	151	巴中	-2.8(1.6)
48	镇江	18(7.3)	100	扬州	11.1(10)	152	资阳	-2.8(1.7)
49	鹤壁	17.9(9.8)	101	漯河	10.7(-0.9)	153	内江	-3.6(2.3)
50	铜陵	17.6(0.9)	102	芜湖	10.7(5.4)	154	阿坝	-4.3(0.3)
51	鹰潭	17.6(5.2)	103	鄂尔多斯	10.7(6.4)	155	广安	-8.7(-0.9)
52	莱芜	17.4(4.6)	104	徐州	10.3(3.9)	平均	降幅	13.9(5.5)

5 人努力-天帮忙指数

不同于常用的基于原始污染物浓度计算年际变化率的方法，本报告通过结合原始污染物浓度与气象

调整后的污染物浓度，计算“人努力-天帮忙”指数。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、上一年度某季节调整后浓度、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：

$$\frac{x_2 - x_1}{x_1} = \frac{x_2 - \tilde{x}_2}{x_1} + \frac{\tilde{x}_2 - \tilde{x}_1}{x_1} + \frac{\tilde{x}_1 - x_1}{x_1} \quad (1)$$

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。与以前的报告不同，我们基于此式构建本年该季节“天帮忙”指数 $\left(\frac{x_2 - \tilde{x}_2}{x_1} + \frac{\tilde{x}_1 - x_1}{x_1}\right) \times 100\%$ ，以表示本年该季度气象条件相对于去年该季度气象条件发生的变化。正值表示本年气象条件更不利，即“天不帮忙”，负值表示本年气象条件更有利，即“天帮忙”；“人努力”指数和以前相同，为 $\frac{\tilde{x}_2 - \tilde{x}_1}{x_1} \times 100\%$ ，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”。

5.1 $PM_{2.5}$ 的“人努力-天帮忙”情况

图 71和图 72分别展示了“4+151”城市 2024 年和 2023 年各季节 $PM_{2.5}$ “人努力”和“天帮忙”指数地图。综合来看，2024 年春季与冬季在气象条件及人为减排方面均取得较好协同效果，夏季呈现气象条件有利但人为减排不足的特征，秋季则表现为减排措施加强而气象条件转差。特别地，春、夏、秋、冬季分别有 11、54、10、10 个城市在气象扩散条件有利的情形下仍出现 $PM_{2.5}$ 浓度上升，表明这些区域人为排放对污染形成具有主导作用。跨季节分析发现，安徽省六安、阜阳存在多季度持续性人为排放主导型污染特征。

5.1.1 2024 年 $PM_{2.5}$ 的“人努力”情况

图 71和图 72左侧图表展示了“4+151”城市 2024 年和 2023 年各季节 $PM_{2.5}$ “人努力”的情况，即调整气象后，由排放变化带来的污染物平均浓度变化率。

春季“人努力”城市共有 120 个，占比 77.4%，比 2023 年同期增加 95 个。“人努力”城市占比较高的城市和省份依次为北京、天津、重庆、宁夏 (5/5)、河北 (11/11)、山东 (16/17)、江苏 (12/13)、江西 (10/11)、陕西 (9/10)、内蒙古 (7/8)、山西 (9/11)、浙江 (9/11)、四川 (15/21)、河南 (8/17)、安徽 (6/16)；上海春季“人不努力”，整体排放水平上升。春季“人努力”城市中，有 12 个城市已连续两年春季排放贡献下降，主要位于四川 (3 市)、山西 (3 市)。“人不努力”城市中，有 22 个城市已连续两年春季排放贡献上升，安徽 (7 市) 为连续两年排放贡献上升城市分布最集中的省份，需重点关注。

夏季“人努力”城市共有 59 个，占比 38.1%，比 2023 年同期增加 5 个。“人努力”城市占比较高的城市和省份依次为上海、重庆、江西 (11/11)、浙江 (11/11)、安徽 (7/16)、宁夏 (2/5)、四川 (8/21)、山西 (4/11)、江苏 (4/13)、陕西 (3/10)、河南 (3/17)、内蒙古 (1/8)、山东 (2/17)、河北 (1/11)；北京、

天津夏季“人不努力”，整体排放水平上升。夏季“人努力”城市中，有12个城市已连续两年夏季排放贡献下降，主要位于浙江(3市)、陕西(3市)。“人不努力”城市中，有54个城市已连续两年夏季排放贡献上升，四川(9市)、安徽(8市)、内蒙古(7市)、河南(7市)、陕西(7市)为连续两年排放贡献上升城市分布最集中的省份，需重点关注。

秋季“人努力”城市共有108个，占比69.7%，比2023年同期增加51个。“人努力”城市占比较高的城市和省份依次为上海、天津、重庆、江苏(13/13)、江西(11/11)、浙江(11/11)、山东(16/17)、四川(19/21)、河北(9/11)、安徽(13/16)、内蒙古(4/8)、山西(4/11)、宁夏(1/5)、河南(3/17)、陕西(1/10)；北京秋季“人不努力”，整体排放水平上升。秋季“人努力”城市中，有21个城市已连续两年秋季排放贡献下降，主要位于山西(4市)。“人不努力”城市中，有11个城市已连续两年秋季排放贡献上升，河南(3市)为连续两年排放贡献上升城市分布最集中的省份，需重点关注。

冬季“人努力”城市共有126个，占比81.3%，比2023年同期增加58个。“人努力”城市占比较高的城市和省份依次为上海、北京、天津、宁夏(5/5)、山东(17/17)、江苏(13/13)、河北(11/11)、河南(15/17)、内蒙古(7/8)、山西(9/11)、浙江(9/11)、安徽(13/16)、江西(8/11)、四川(12/21)、陕西(4/10)；重庆冬季“人不努力”，整体排放水平上升。冬季“人努力”城市中，有48个城市已连续两年冬季排放贡献下降，主要位于河南(14市)、山东(7市)、河北(7市)。“人不努力”城市中，有9个城市已连续两年冬季排放贡献上升，四川(3市)为连续两年排放贡献上升城市分布最集中的省份，需重点关注。

5.1.2 2024年PM_{2.5}的“天帮忙”情况

图71和图72右侧图表展示了“4+151”城市2024年和2023年各季节PM_{2.5}“天帮忙”的情况，即每季度气象条件相对于去年同期气象条件发生变化带来的污染物平均浓度变化率。

春季“天帮忙”城市共有81个，占比52.3%，比2023年同期减少4个。“天帮忙”城市占比较高的城市和省份依次为上海、重庆、江苏(11/13)、安徽(13/16)、江西(8/11)、浙江(8/11)、山东(12/17)、陕西(5/10)、四川(8/21)、河北(4/11)、河南(5/17)、内蒙古(2/8)、宁夏(1/5)、山西(2/11)；北京、天津春季“天不帮忙”，整体气象条件较为不利。春季“天帮忙”城市中，有28个城市近两年春季气象条件均有利于污染扩散，主要位于安徽(5个)、江苏(4个)，需警惕实际排放污染状况被低估的可能性。

夏季“天帮忙”城市共有98个，占比63.2%，比2023年同期增加12个。“天帮忙”城市占比较高的城市和省份依次为北京、天津、重庆、江苏(12/13)、山东(15/17)、安徽(14/16)、河南(13/17)、河北(8/11)、陕西(7/10)、江西(6/11)、浙江(5/11)、四川(8/21)、内蒙古(3/8)、山西(3/11)、宁夏(1/5)；上海夏季“天不帮忙”，整体气象条件较为不利。夏季“天帮忙”城市中，有44个城市近两年夏季气象条件均有利于污染扩散，主要位于山东(7个)、河北(6个)、江苏(5个)、河南(5个)，需警惕实际排放污染状况被低估的可能性。

秋季“天帮忙”城市共有42个，占比27.1%，比2023年同期减少68个。“天帮忙”城市占比较高的城市和省份依次为上海、四川(12/21)、浙江(5/11)、陕西(4/10)、江西(4/11)、山西(3/11)、安徽(4/16)、宁夏(1/5)、山东(3/17)、江苏(2/13)、内蒙古(1/8)、河北(1/11)、河南(1/17)；北京、天津、重庆秋季“天不帮忙”，整体气象条件较为不利。秋季“天帮忙”城市中，有19个城市近两年秋季气象条件均有利于污染扩散，主要位于四川(7个)，需警惕实际排放污染状况被低估的可能性。

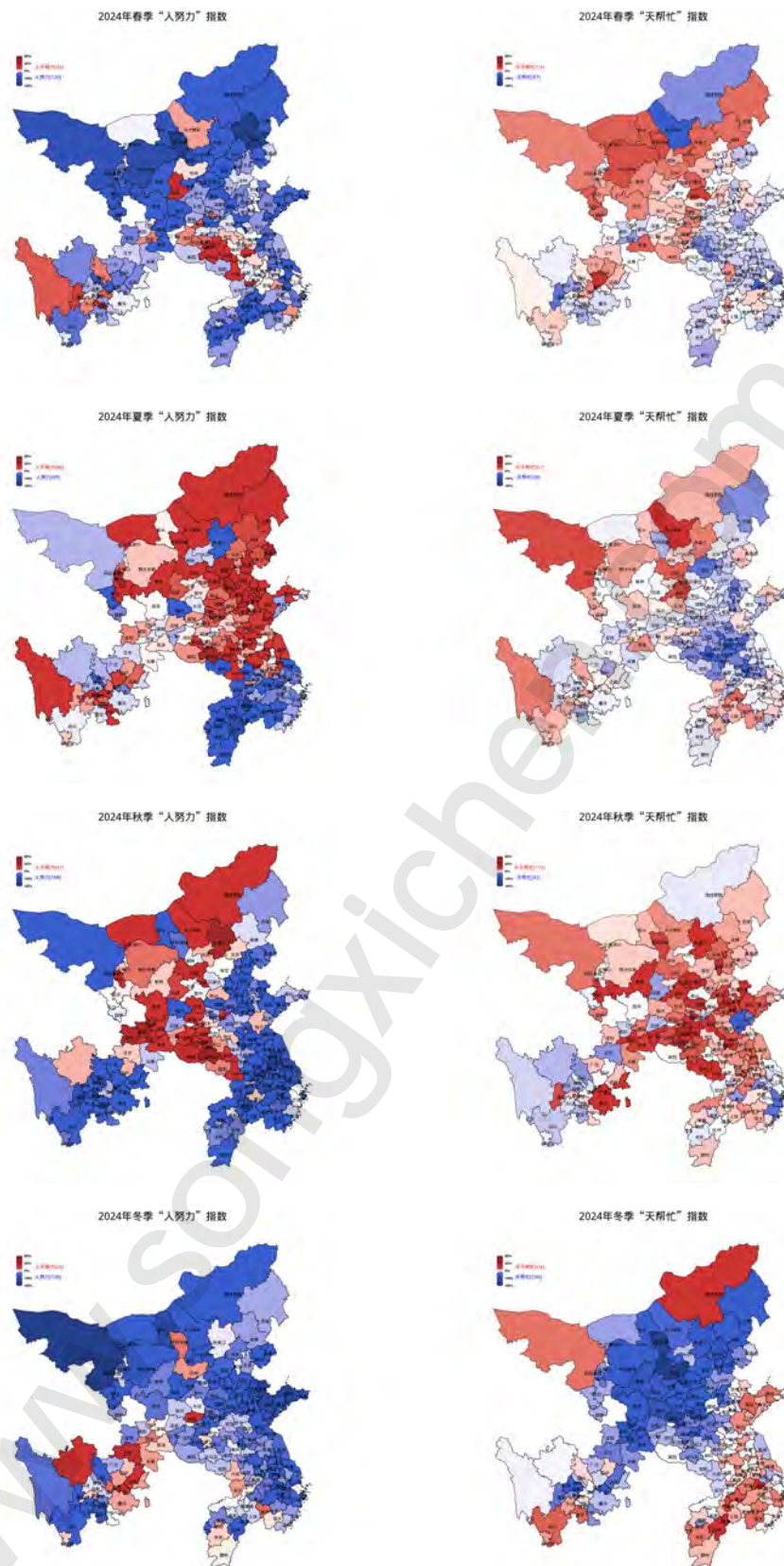


图 71: “4+151”城市 2024 年各季节 PM_{2.5} “人努力”和“天帮忙”指数地图, 左(右)侧蓝色表示“人努力(天帮忙)”, 左(右)侧红色表示“人不努力(天不帮忙)”

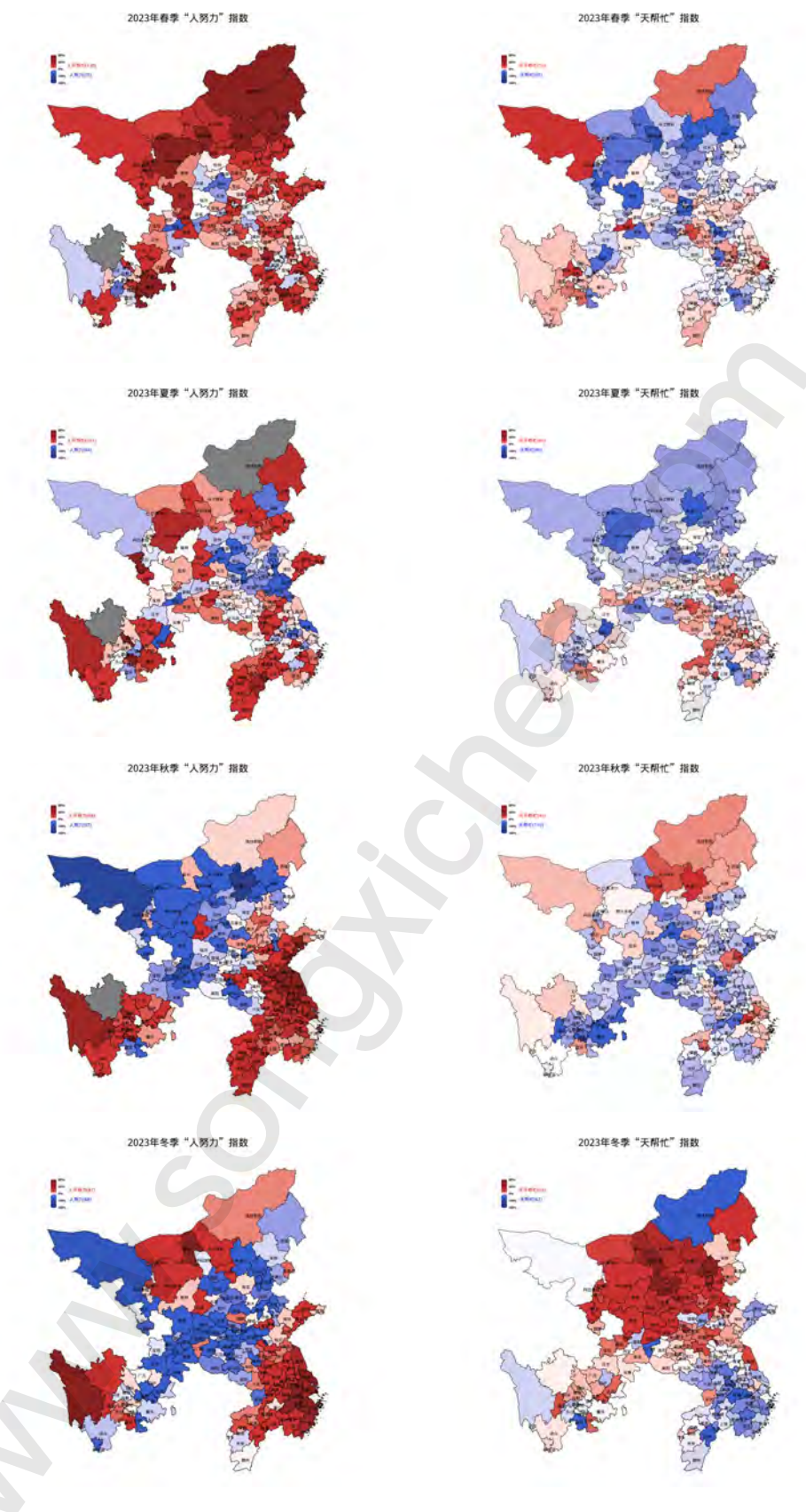


图 72: “4+151”城市 2023 年各季节 PM_{2.5} “人努力”和“天帮忙”指数地图, 左(右)侧蓝色表示“人努力(天帮忙)”, 左(右)侧红色表示“人不努力(天不帮忙)”

冬季“天帮忙”城市共有 100 个，占比 64.5%，比 2023 年同期增加 38 个。“天帮忙”城市占比较高的城市和省份依次为上海、北京、天津、重庆、宁夏 (5/5)、山西 (11/11)、河北 (11/11)、河南 (17/17)、陕西 (10/10)、内蒙古 (6/8)、四川 (14/21)、山东 (9/17)、江苏 (5/13)、安徽 (5/16)、江西 (3/11)；浙江冬季无“天帮忙”城市，整体气象条件较为不利。

5.2 O₃ 的“人努力-天帮忙”情况

图 73和图 74分别展示了“4+151”城市 2024 年和 2023 年各季节 O₃“人努力”和“天帮忙”指数地图。综合来看，2024 年仅夏季减排情况较好，夏、秋季气象扩散条件较好。值得注意的是，春、夏、秋、冬季分别有 23、31、35、21 个城市在气象条件有利的情况下仍呈现臭氧浓度升高现象。跨季度分析显示，安徽省合肥市多季节出现人为排放驱动型污染特征。

5.2.1 2024 年 O₃ 的“人努力”情况

图 73和图 74左侧图表展示了“4+151”城市 2024 年和 2023 年各季节臭氧“人努力”的情况，即调整气象后，由排放变化带来的污染物平均浓度变化率。

春季“人努力”城市共有 54 个，占比 34.8%，比 2023 年同期减少 26 个。“人努力”城市占比较高的城市和省份依次为上海、江苏 (12/13)、四川 (16/21)、陕西 (5/10)、山东 (8/17)、内蒙古 (3/8)、河北 (3/11)、江西 (2/11)、安徽 (2/16)、山西 (1/11)、浙江 (1/11)；北京、天津、宁夏、河南、重庆春季无“人努力”城市，整体排放水平上升。春季“人努力”城市中，有 20 个城市已连续两年春季排放贡献下降，主要位于江苏 (8 市)。“人不努力”城市中，有 41 个城市已连续两年春季排放贡献上升，河南 (11 市)、山西 (9 市)、山东 (7 市) 为连续两年排放贡献上升城市分布最集中的省份，需重点关注。

夏季“人努力”城市共有 79 个，占比 51%，比 2023 年同期增加 29 个。“人努力”城市占比较高的城市和省份依次为上海、重庆、江西 (11/11)、河南 (12/17)、陕西 (7/10)、内蒙古 (5/8)、四川 (13/21)、河北 (6/11)、江苏 (5/13)、安徽 (6/16)、山西 (4/11)、山东 (5/17)、宁夏 (1/5)、浙江 (2/11)；北京、天津夏季“人不努力”，整体排放水平上升。夏季“人努力”城市中，有 22 个城市已连续两年夏季排放贡献下降，主要位于四川 (7 市)。“人不努力”城市中，有 48 个城市已连续两年夏季排放贡献上升，安徽 (9 市)、山东 (8 市)、山西 (7 市) 为连续两年排放贡献上升城市分布最集中的省份，需重点关注。

秋季“人努力”城市共有 44 个，占比 28.4%，比 2023 年同期减少 50 个。“人努力”城市占比较高的城市和省份依次为上海、北京、内蒙古 (6/8)、江苏 (9/13)、宁夏 (2/5)、浙江 (4/11)、山西 (3/11)、江西 (3/11)、河北 (3/11)、安徽 (4/16)、四川 (4/21)、山东 (3/17)、陕西 (1/10)；天津、河南、重庆秋季无“人努力”城市，整体排放水平上升。秋季“人努力”城市中，有 14 个城市已连续两年秋季排放贡献下降，主要位于内蒙古 (3 市)、河北 (3 市)。“人不努力”城市中，有 31 个城市已连续两年秋季排放贡献上升，安徽 (6 市)、四川 (5 市)、浙江 (5 市) 为连续两年排放贡献上升城市分布最集中的省份，需重点关注。

冬季“人努力”城市共有 69 个，占比 44.5%，比 2023 年同期增加 26 个。“人努力”城市占比较高的城市和省份依次为北京、天津、河南 (17/17)、山东 (14/17)、内蒙古 (6/8)、山西 (8/11)、河北 (8/11)、

安徽 (7/16)、江苏 (4/13)、陕西 (1/10)、江西 (1/11)、四川 (1/21); 上海、宁夏、浙江、重庆冬季无“人努力”城市, 整体排放水平上升。冬季“人努力”城市中, 有 6 个城市已连续两年冬季排放贡献下降, 主要位于河南 (3 市)。“人不努力”城市中, 有 49 个城市已连续两年冬季排放贡献上升, 四川 (12 市)、安徽 (7 市)、江西 (7 市)、浙江 (7 市) 为连续两年排放贡献上升城市分布最集中的省份, 需重点关注。

5.2.2 2024 年 O₃ 的“天帮忙”情况

图 73和图 74右侧图表展示了“4+151”城市 2024 年和 2023 年各季节臭氧“天帮忙”的情况, 即每季度气象条件相对于去年同期气象条件发生变化带来的污染物平均浓度变化率。

春季“天帮忙”城市共有 56 个, 占比 36.1%, 比 2023 年同期减少 28 个。“天帮忙”城市占比较高的城市和省份依次为上海、北京、重庆、江西 (10/11)、江苏 (9/13)、安徽 (9/16)、浙江 (6/11)、四川 (9/21)、河北 (3/11)、内蒙古 (2/8)、山东 (4/17)、山西 (1/11); 天津、宁夏、河南、陕西春季无“天帮忙”城市, 整体气象条件较为不利。春季“天帮忙”城市中, 有 31 个城市近两年春季气象条件均有利于污染扩散, 主要位于江苏 (9 个)、安徽 (7 个), 需警惕实际排放污染状况被低估的可能性。

夏季“天帮忙”城市共有 120 个, 占比 77.4%, 比 2023 年同期增加 45 个。“天帮忙”城市占比较高的城市和省份依次为上海、北京、天津、重庆、江苏 (12/13)、四川 (19/21)、山东 (15/17)、安徽 (14/16)、江西 (9/11)、河北 (8/11)、河南 (12/17)、山西 (7/11)、内蒙古 (5/8)、宁夏 (3/5)、陕西 (6/10)、浙江 (6/11)。夏季“天帮忙”城市中, 有 51 个城市近两年夏季气象条件均有利于污染扩散, 主要位于江苏 (10 个)、四川 (9 个)、安徽 (8 个)、河南 (6 个), 需警惕实际排放污染状况被低估的可能性。

秋季“天帮忙”城市共有 134 个, 占比 86.5%, 比 2023 年同期增加 92 个。“天帮忙”城市占比较高的城市和省份依次为上海、北京、天津、重庆、宁夏 (5/5)、山东 (17/17)、江苏 (13/13)、河北 (11/11)、山西 (10/11)、浙江 (10/11)、内蒙古 (7/8)、安徽 (14/16)、四川 (17/21)、河南 (13/17)、陕西 (7/10)、江西 (6/11)。秋季“天帮忙”城市中, 有 28 个城市近两年秋季气象条件均有利于污染扩散, 主要位于四川 (10 个)、江西 (6 个), 需警惕实际排放污染状况被低估的可能性。

冬季“天帮忙”城市共有 36 个, 占比 23.2%, 比 2023 年同期减少 76 个。“天帮忙”城市占比较高的城市和省份依次为宁夏 (5/5)、四川 (15/21)、山西 (5/11)、江西 (3/11)、陕西 (2/10)、内蒙古 (1/8)、河南 (2/17)、河北 (1/11)、浙江 (1/11)、安徽 (1/16); 上海、北京、天津、山东、江苏、重庆冬季无“天帮忙”城市, 整体气象条件较为不利。冬季“天帮忙”城市中, 有 14 个城市近两年冬季气象条件均有利于污染扩散, 主要位于四川 (6 个), 需警惕实际排放污染状况被低估的可能性。

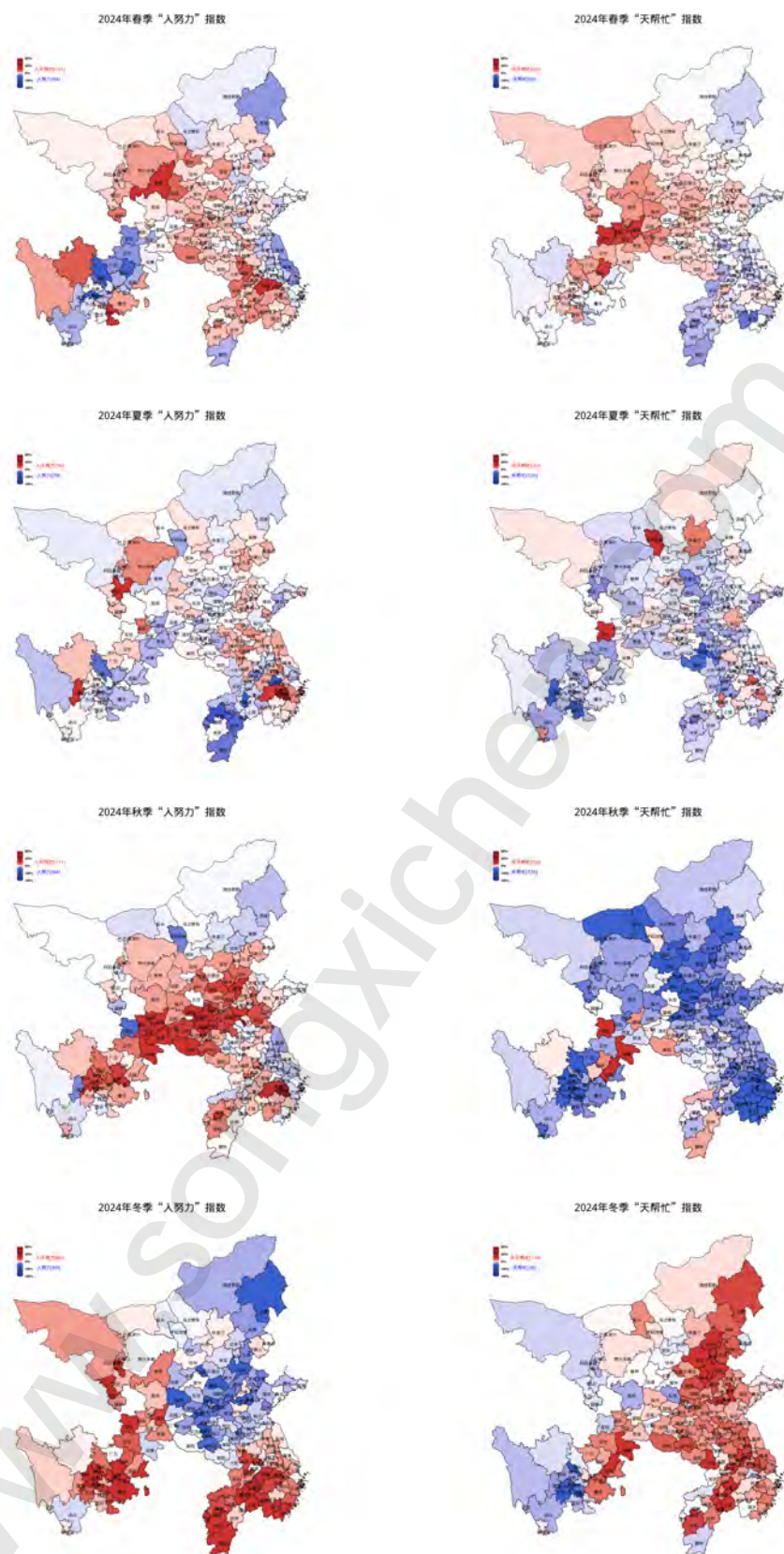


图 73: “4+151”城市 2024 年各季节 O₃ “人努力”和“天帮忙”指数地图, 左(右)侧蓝色表示“人努力(天帮忙)”, 左(右)侧红色表示“人不努力(天不帮忙)”

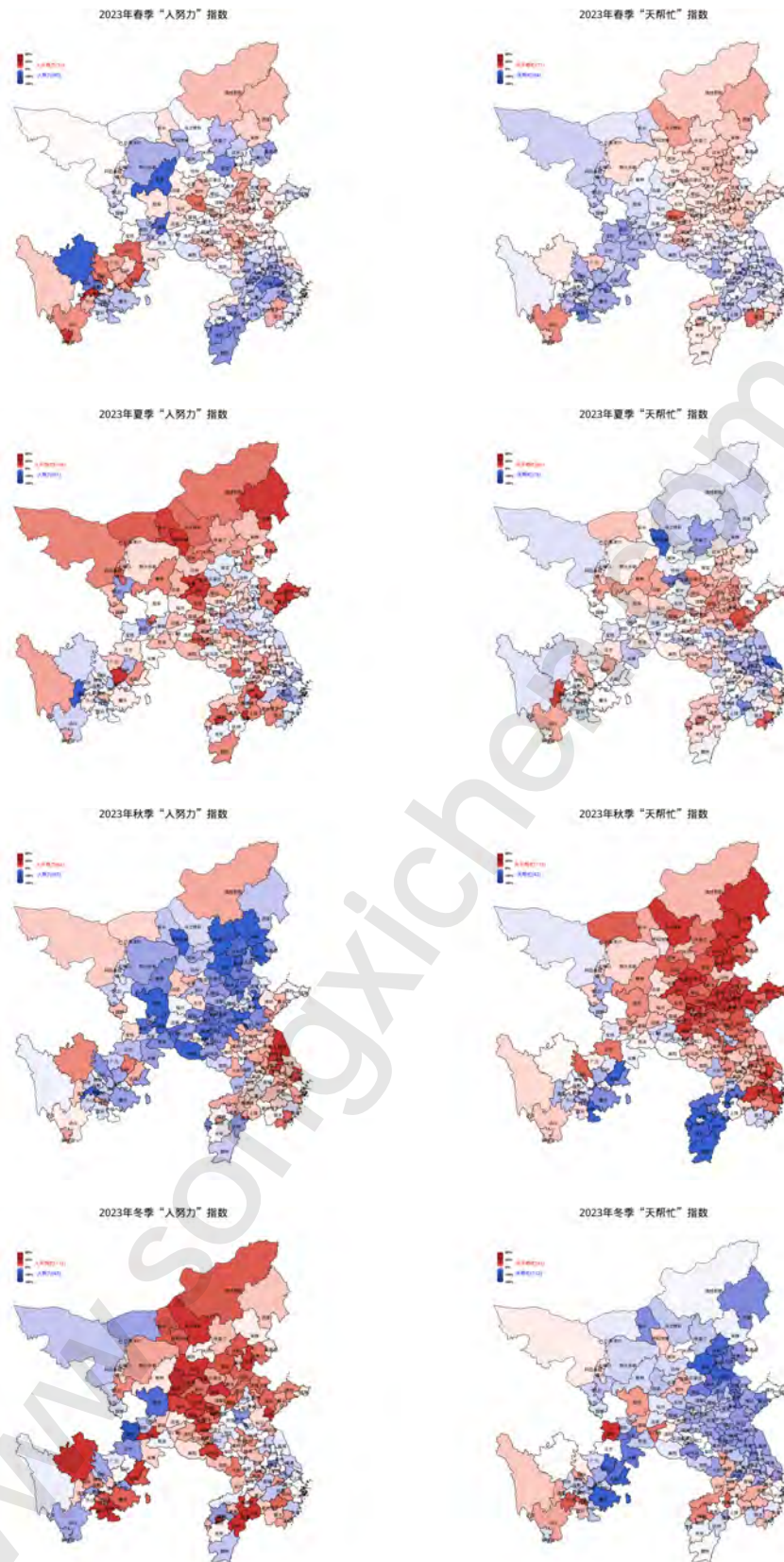


图 74: “4+151”城市 2023 年各季节 O₃ “人努力”和“天帮忙”指数地图, 左(右)侧蓝色表示“人努力(天帮忙)”, 左(右)侧红色表示“人不努力(天不帮忙)”

6 主要结论与建议

我国大气环境质量在 2022-2023 年经济复苏期污染反弹后，2024 年迎来转折性改善。除春夏臭氧污染仍面临反弹压力外，其他五项污染物在超七成城市实现同步下降。综合前几章的结果，我们得到如下关于 16 省市空气质量的主要结论，并提出建议供有关部门参考。

6.1 后疫情时期 PM_{2.5} 及其前体物首迎大范围改善

2024 年我国空气污染在疫情结束后首次呈现大范围改善特征。由于我们的统计评估结果已去除了年际间气象影响的差异，空气污染的改善表明本年度的大气污染防治工作减少了污染物的排放。与 2023 年相比，六种常规污染物中 PM₁₀、二氧化氮、二氧化硫、PM_{2.5}、一氧化碳年平均浓度均实现 5% 以上降幅。其中，二氧化硫在年均浓度稳定低于 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的水平下连续两年降幅超 7%；一氧化碳自 2020 年以来始终维持下降趋势，累计降幅 15.8%，印证我国燃煤源治理成效持续巩固。与此同时，秋冬 PM_{2.5} 污染治理取得明显进展：“4+151”城市中有 128 个城市秋冬 PM_{2.5} 浓度较 2023 年同期下降，有 110 个城市冬季 PM_{2.5} 浓度在统计学意义下显著下降。

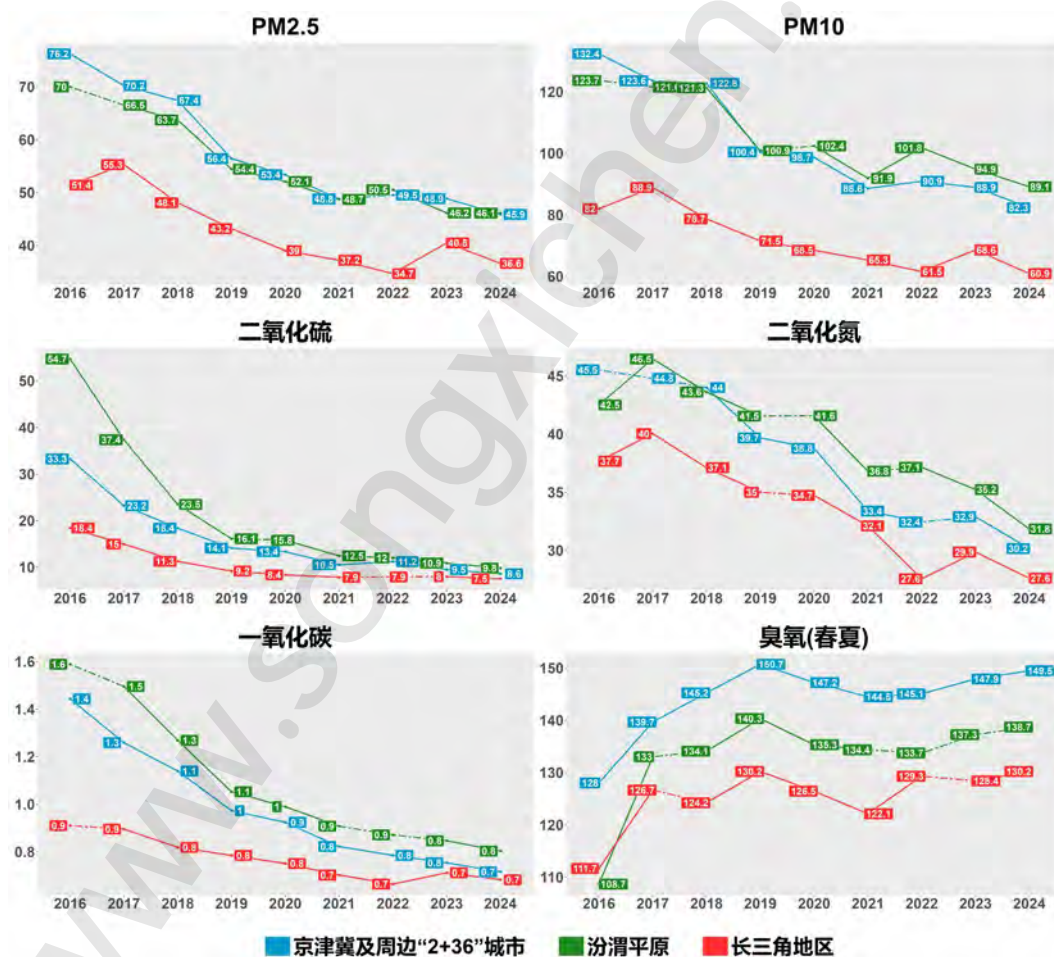


图 75: “2+36”城市、汾渭平原和长三角地区六种污染物年平均浓度时间序列图 (一氧化碳的单位为毫克/立方米, 其余污染物的单位为微克/立方米), 实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上年有 (无) 显著增加或减少

在区域和省市方面, 相较 2023 年, 京津冀及周边“2+36”城市、汾渭平原、长三角地区呈现出高度一致的变化特征(图 75): $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、二氧化氮、二氧化硫、一氧化碳年均浓度均较 2023 年下降, 但春夏臭氧浓度小幅反弹。**颗粒物污染控制方面(图 76), $\text{PM}_{2.5}$ 在 14 省市浓度下降**, 其中江苏、山东、河北改善最为显著, 北京、山西已连续两年保持下降趋势。空间分布显示, 河南是 $\text{PM}_{2.5}$ 污染最重省份, 年均浓度高达 $52\mu\text{g}/\text{m}^3$, 较次高的天津 ($41.9\mu\text{g}/\text{m}^3$) 超出 24.1%。 **PM_{10} 在全部 16 省市浓度均下降**, 江苏、上海、江西降幅居前, 山西、宁夏、河南、陕西 4 省实现连续两年改善。宁夏以 $91.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 居 PM_{10} 年均浓度首位, 远高于其他西北地区省份; 其次是河南和山西, PM_{10} 年均浓度超过 $85\mu\text{g}/\text{m}^3$, 其余省份浓度降至 $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下。**气态污染物方面(图 77、78), 二氧化氮在 14 省市浓度降低**, 重庆、山西、河北改善尤为显著, 且连续两年浓度降低; 河南、宁夏、陕西、四川 4 省也连续两年取得减排成效。目前二氧化氮高值区出现在天津、上海、重庆三个直辖市, 年均浓度分别为 39.3 、 36.8 、 $34.9\mu\text{g}/\text{m}^3$; 山东、山西、北京二氧化氮浓度略高于 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$, 其余 10 省市均低于 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。**二氧化硫在内蒙古、山西、河北等 13 省市浓度下降**。宁夏自 2022 年起二氧化硫浓度超过山西, 成为 16 省市中浓度最高的省份, 2024 年二氧化硫浓度为 $13.8\mu\text{g}/\text{m}^3$, 排名第二位的山西降至 $11.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。**一氧化碳在重庆、河北、江西等 14 省市取得积极改善**, 河北、河南、内蒙古、四川、山东、宁夏、天津 7 省市一氧化碳浓度连续两年降低。目前仅山西、重庆两省市超过 $0.8\text{mg}/\text{m}^3$ 。

我们关注到近年来部分省市在污染物协同治理方面的成果: 河北在二氧化氮和一氧化碳污染治理方面表现突出, 年均浓度较 2021 年实现三连降, 累计降幅均超过 15%。山西(二氧化硫、二氧化氮、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$)、河南(二氧化硫、二氧化氮、 PM_{10} 、一氧化碳)和陕西(PM_{10} 、二氧化氮、一氧化碳、春夏臭氧)均有 4 种污染物浓度较 2022 年实现两连降。

与 2019 年(疫情前)相比, 2024 年六种污染物年均浓度平均累计降幅 13.9%。“4+151”城市中, 有 105 个城市平均累计降幅超过 10%, 实现空气污染的稳定改善。京津冀及周边“2+36”城市、汾渭平原、长三角地区、“其他城市”六种污染物浓度均有显著下降, 平均降幅分别为 19.5%、16.7%、12.2%、11.1%。在省市方面, 六种污染物浓度在十六省市均实现综合下降, 山河四省和京津综合改善排名靠前, 平均累计降幅均超过 15%, 其中河北以 27.9% 的平均累计降幅居于首位。四川、上海、重庆综合改善幅度较小。四川平均累计降幅 5.6%, 也是仅有的 5 个六种污染物年均浓度综合上升的城市(广安、阿坝、内江、资阳、巴中)所在省份。上海、重庆平均累计降幅仅 3.7%, 1.7%。

6.2 臭氧污染加重, 重点区域多城市浓度回升

2024 年, 在多数污染物协同下降背景下, 臭氧浓度上升特征凸显(图 77)。“4+151”城市中有 95 个城市春夏臭氧浓度较 2023 年反弹。从城市均值来看, 春夏臭氧浓度已连续三年(2022-2024 年)呈现升高态势。值得注意的是, 2024 年升幅(1.9 微克/立方米)已超过 2018-2024 年平均水平(1 微克/立方米)。重点区域中, 长三角地区、京津冀及周边“2+36”城市、汾渭平原春夏臭氧平均浓度均较 2023 年上升, 上升城市数量分别占比 67.7%、69.2%、69.2%, 与 $\text{PM}_{2.5}$ 等污染物的大范围改善趋势形成反差。臭氧污染已成为区域大气污染治理的突出问题。

2024 年, 十六省市中有 10 个省市(宁夏、天津、浙江、安徽、山西、北京、河南、河北、山东、内

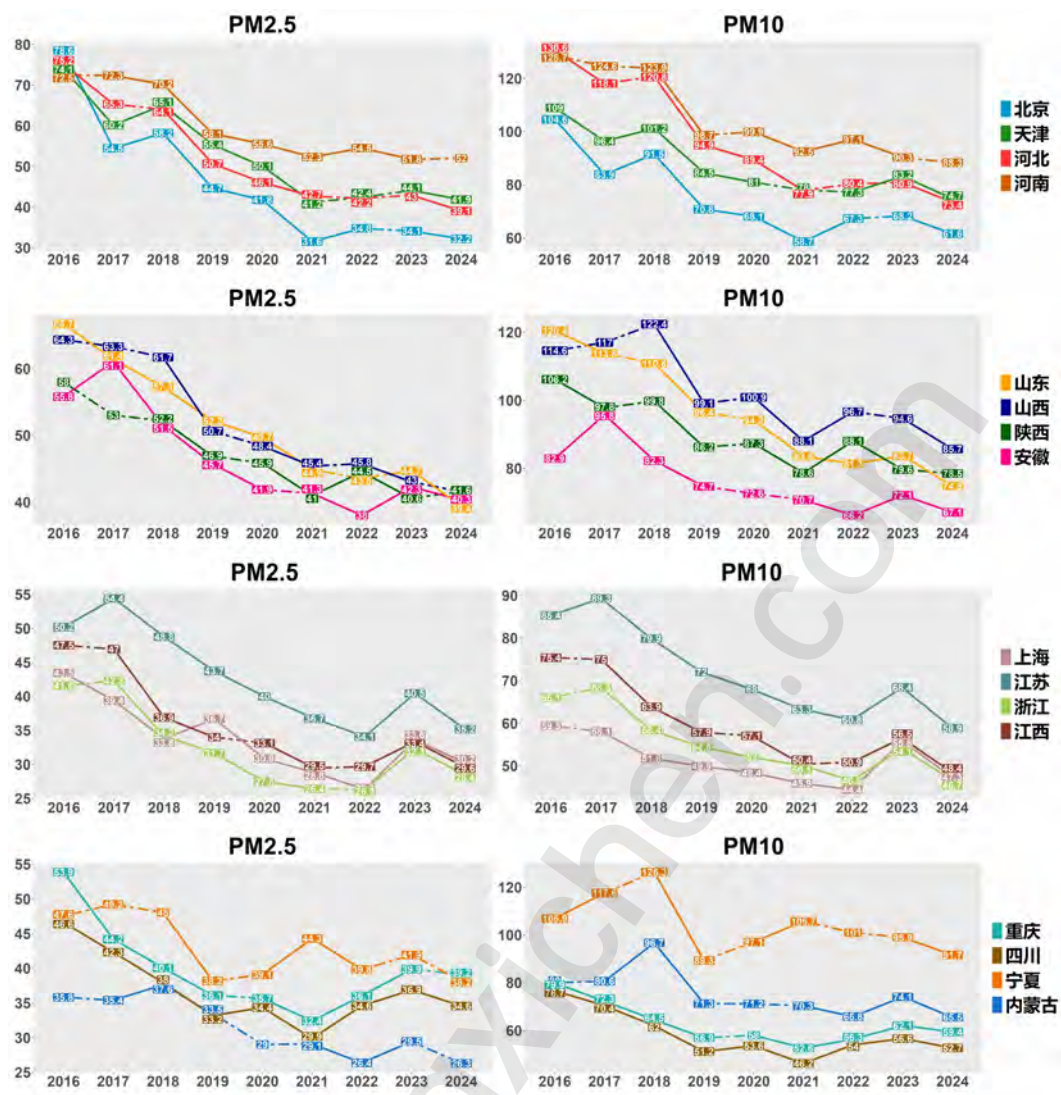


图 76: “4+151”城市去除气象因素影响后 PM_{2.5}、PM₁₀ 年平均浓度时间序列 (微克/立方米), 实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上年有 (无) 显著增加或减少

蒙古) 春夏臭氧浓度出现反弹。其中, 宁夏、浙江较 2023 年升幅超过 5%; 安徽、河南、北京、山东已连续三年浓度反弹。相比 2021 年, 安徽春夏臭氧平均浓度已持续上升 9.6 微克/立方米, 累计升幅 8%; 河南、北京、山东分别持续上升 8(5.8%)、6.6(5%)、5.6(4%) 微克/立方米。与此同时, 我们也关注到上海市春夏臭氧浓度在 2023 年下降 4.3 微克/立方米的基础上, 又下降 8.9 微克/立方米, 累计降幅 10.4%。此外, 江苏、陕西、重庆也已连续两年浓度下降, 但累计降幅均不足 2%。目前, 春夏臭氧浓度高值区集中在天津、山东、河南, 三省市春夏臭氧平均浓度均超过 147 微克/立方米; 而同属京津冀及周边地区的河北只有衡水和邢台两市达到同等污染强度。

从臭氧的生成机制来看, 控制前体物 (氮氧化物和 VOCs) 浓度是治理臭氧污染的关键。2024 年, 在 57 个臭氧浓度上升的重点城市中, 仅有 21%(12 个城市) 同步出现春夏季二氧化氮浓度反弹; 在 38 个臭氧浓度上升的非重点城市中, 37%(14 个城市) 伴随二氧化氮浓度回升。综合来看, 在超过 2/3 的城市, 二氧化氮减排尚未有效抑制臭氧生成, 这在重点城市体现得尤为明显。这一现象说明, 在当前阶段, 对

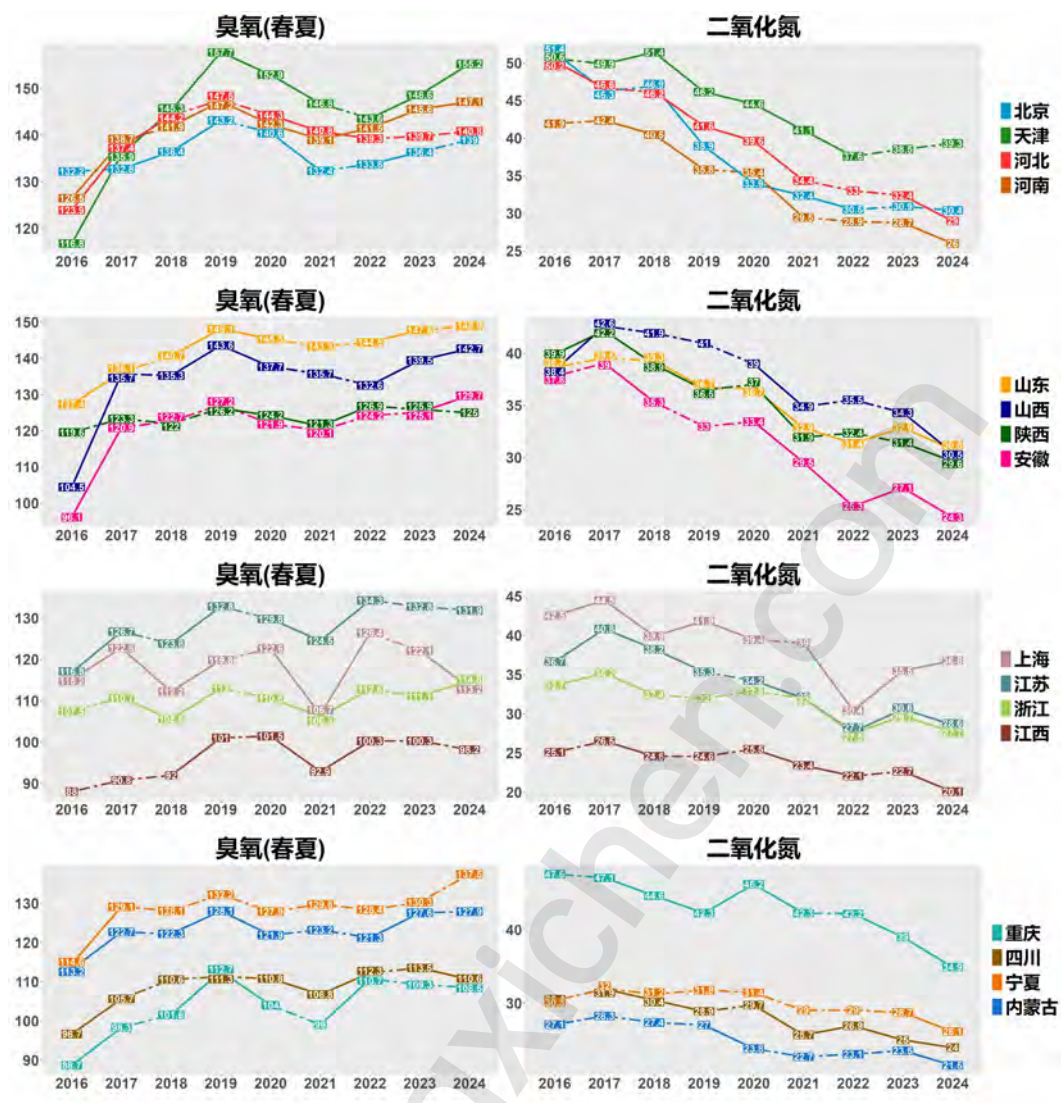


图 77: “4+151” 城市去除气象因素影响 8 小时臭氧 (春夏) 和二氧化氮平均浓度时间序列 (微克/立方米), 实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上年有 (无) 显著增加或减少

臭氧浓度的控制还需通过强化 VOCs 管控来实现。

6.3 京津空气质量差距明显，沪渝二氧化硫和一氧化碳浓度偏高

2024 年, 我国四个直辖市空气质量呈现显著区域差异性。天津市作为北方重要工业基地, PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、臭氧和二氧化氮浓度均为四市最高, 六种污染物浓度均高于河北省平均水平。其中臭氧与二氧化氮污染尤为严重, 2024 年这两种污染物浓度在 16 省市中达到最高, 并且已连续 2 年呈现同步上升趋势 (图 77)。尽管天津机动车保有总量在直辖市中不高, 但考虑到较低的常住人口基数, 较高人均机动车保有量及燃油车占比可能是二氧化氮污染维持高位的重要原因, 并通过光化学反应间接加剧臭氧污染。叠加钢铁、化工等重工业集聚带来的废气排放, 进一步推升了大气污染治理难度。

北京市当前二氧化氮、二氧化硫、一氧化碳浓度均处于四市最低水平, 并且除二氧化氮外其他 5 种

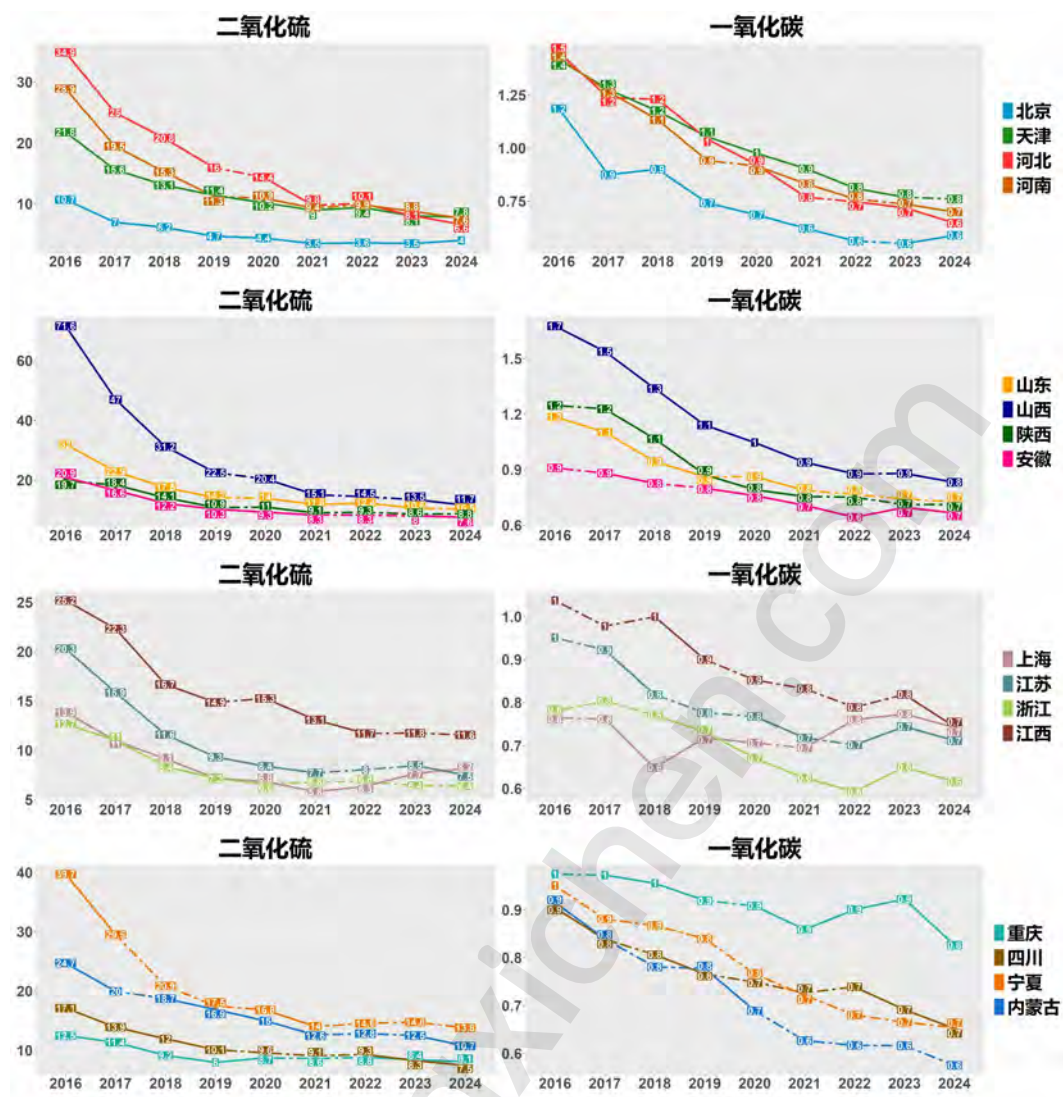


图 78: “4+151” 城市去除气象因素影响后二氧化硫 (微克/立方米) 和一氧化碳 (毫克/立方米) 年平均浓度时间序列, 实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上年有 (无) 显著增加或减少

污染物浓度显著低于周边山河四省。这可能与其开展“煤改气”“煤改电”等能源替代工程及较高的新能源车占比密切相关, 反映出能源结构调整对大气污染治理的重要性。但是, 相对于 2023 年, 北京二氧化硫、一氧化碳出现小幅回升趋势。

与北京、天津相比, 上海与重庆的臭氧与 PM_{10} 污染水平明显偏低, 但两市燃煤指示性污染物二氧化硫和一氧化碳浓度分别位居四个直辖市最高水平。上海作为电力需求旺盛的经济发达地区, 2024 年火电发电量在直辖市中居首, 这可能是其二氧化硫年均浓度相对较高的原因, 其 2024 年浓度超过周边的江苏和浙江。但该市在颗粒物管控方面成效显著, $PM_{2.5}$ 年均浓度连续四年稳定低于国家二级标准 ($35\mu g/m^3$), PM_{10} 浓度在直辖市中始终处于较低水平。重庆受山地盆地地形制约及煤炭依赖型能源结构影响, 一氧化碳年均浓度为四市最高, 目前在 16 省市中仅低于山西省。但重庆春夏臭氧浓度相对较低, 2020 年以来稳定低于四川省平均水平。近两年重庆二氧化氮浓度持续削减, 进一步巩固了臭氧污染控制成果, 但目前除春夏臭氧外其余 5 种污染物浓度仍然显著高于四川省。

6.4 “十四五”空气质量目标：6 省市有望达标，10 省市存在挑战

2025 年是“十四五”的收官之年，也是国务院《空气质量持续改善行动计划》和生态环境部《臭氧污染防治攻坚行动方案》制定空气质量改善目标的关键节点。我们总结了十六省市政府对其“十四五”期间空气质量改善行动方案所设定的 PM_{2.5} 浓度控制目标 (附表 8)，并基于 2024 年的 PM_{2.5} 调整浓度对各省市区空气质量改善目标的完成情况进行了评估。

十六省市“十四五”空气质量改善目标可归纳为两类。第一类以 PM_{2.5} 浓度降幅为目标：内蒙古八市和江苏 2024 年相比 2020 年浓度降幅已分别达到 9.4% 和 12%，提前完成目标；河北省已实现降幅 15.2%，2025 年需要继续削减 2.2 微克/立方米以完成 20% 降幅目标。第二类以 PM_{2.5} 浓度均值为目标：四川省已率先达标，2024 年 PM_{2.5} 年均浓度达到 34.6 微克/立方米；基于 2020 年至 2024 年平均降速推算，上海、北京和山东预计能够在 2025 年完成目标，2024 年 PM_{2.5} 浓度与 2025 年目标值仅相差 0.2、0.2 和 1.4 微克/立方米。但是山西、浙江、江西、天津、安徽、陕西、宁夏、重庆和河南 2024 年 PM_{2.5} 浓度分别距离目标值 2.6、4.1、4.8、4.9、5.3、6.6、7.7、8.2 和 9.5 微克/立方米，需要在 2025 年以超过 2020-2024 年平均降速的水平削减方可达标。要顺利完成目标，2025 年山西、天津、江西、浙江、安徽需要在 2020-2024 年平均降速的基础上多削减 0.9、2.9、3.9、4.3、4.9 微克/立方米，**陕西、宁夏需要在往年平均降速基础上多完成 5.5(2024 年浓度的 13.2%) 和 7.5(19.6%) 微克/立方米的年度削减任务，达标面临巨大挑战。**2024 年，河南省 PM_{2.5} 平均浓度为 16 省市最高，较周边省市高出 10 微克/立方米，并且是仅有的 2 个 PM_{2.5} 浓度相比 2023 年上升的省份之一。**河南要实现 42.5 微克/立方米的浓度目标，需要在 2025 年实现 10% 以上的浓度降幅，形势异常严峻。**重庆市 2024 年 PM_{2.5} 浓度较 2020 年不降反增，PM_{2.5} 年均浓度距离目标值尚余 8.2 微克/立方米，需要在 2024 年浓度的基础上削减 20.9%，远超常规减排措施可达范围。**从 PM_{2.5} 浓度变化趋势来看，河南、重庆“十四五”期间的 PM_{2.5} 污染治理效果不甚理想，对 2025 年目标的实现形成制约，需要尽快调整策略，寻求有效的 PM_{2.5} 污染治理方案。**

6.5 臭氧极端污染风险上升，PM_{2.5} 极端污染改善

极端污染是衡量空气质量的另一重要标准。如美国环保署的考核指标是 PM_{2.5} 年日均浓度 98% 分位数 (三年平均) 不超过 35 微克/立方米，臭氧每年第四高日最大 8 小时滑动平均浓度 (三年平均) 不超过 137 微克/立方米，分别对应每年不能出现超过 7 个和 4 个超标日。我们用 PM_{2.5} 和臭氧年 90% 分位数浓度最大值 (图 79) 衡量全年的极端污染情况。与 2023 年相比，2024 年 PM_{2.5} 的年 90% 分位数浓度在 15 个省市下降，山东、浙江、内蒙古、河北降幅最为显著，较 2023 年分别下降 47.4(28.9%)、31.7(27.9%)、19.1(26.3%)、34.4(25.3%) 微克/立方米。**陕西成为唯一 PM_{2.5} 极端污染与年均浓度双反弹省份，年 90% 分位数浓度上升 14.8(10%) 微克/立方米，年均浓度上升 1(2.5%) 微克/立方米。**值得注意的是，本年度的显著降幅可能部分归因于 2022 年北方省份及川渝、2023 年江浙沪皖赣地区先后浓度反弹形成的基数效应。截至 2024 年，重庆、陕西、上海、四川、浙江、江西的极端污染水平仍高于 2021 年基准值，仅北京 PM_{2.5} 极端污染在三年间维持持续改善趋势。

相对而言，臭氧极端污染的改善情况不甚理想，除达标城市数量下降外，臭氧年 90% 分位数浓度最大值在天津、宁夏、北京、江西、安徽、河北 6 个省份出现上升。其中，**天津、北京、安徽、宁夏已连续**

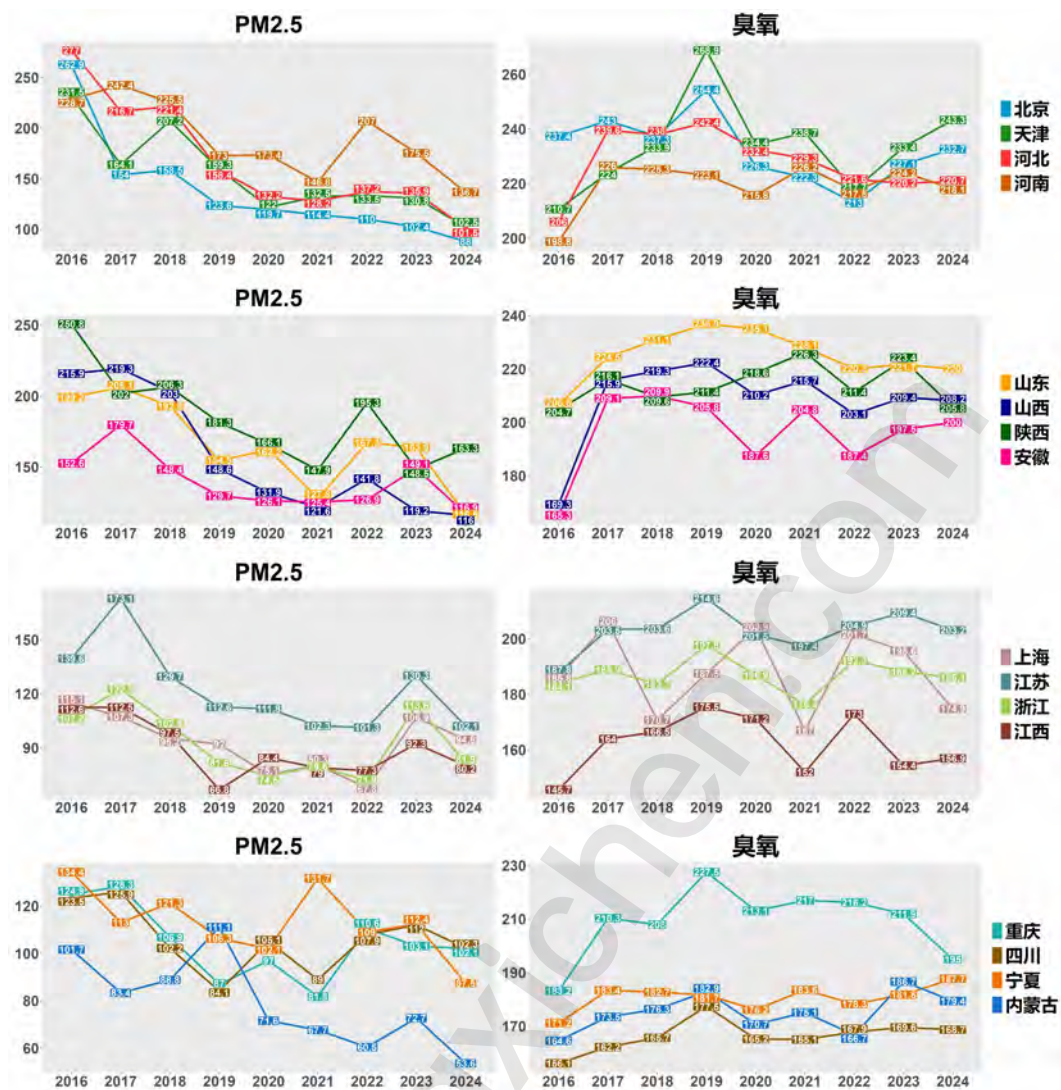


图 79: “4+151”城市去除气象因素影响 PM_{2.5} 和 8 小时臭氧年 90% 分位数浓度最大值时间序列 (微克/立方米)

两年浓度上升, 90% 分位数浓度分别累计升高 25.6(11.8%)、19.7(9.3%)、12.6(6.7%)、9.4(5.3%) 微克/立方米。近年来, 十六省市中除重庆、山东、河北臭氧极端污染基本保持改善趋势, 其余省市臭氧极端污染呈现波动特征, 2024 年仍有上海、四川、浙江、江西、江苏、内蒙古、北京、天津、宁夏 9 省市浓度高于 2021 年基准值。

6.6 臭氧和 PM_{2.5} 仍是主要污染物, 标准修订为二氧化氮治理加压

在生态环境部明确启动《环境空气质量标准》修订工作的背景下, 报告对比分析了现行国家标准 (对应 WHO “过渡期” 第 1 级指标) 与 WHO “过渡期” 第 2 级指标对城市污染物超标情况的影响 (具体标准值见图 80, 一氧化碳国家标准已达 WHO 准则值水平)。2024 年监测数据显示, 按现行标准, 臭氧和 PM_{2.5} 仍是核心治理难点。“4+151”城市中, 春夏臭氧超标的有 110 个城市, PM_{2.5} 超标的有 93 个城

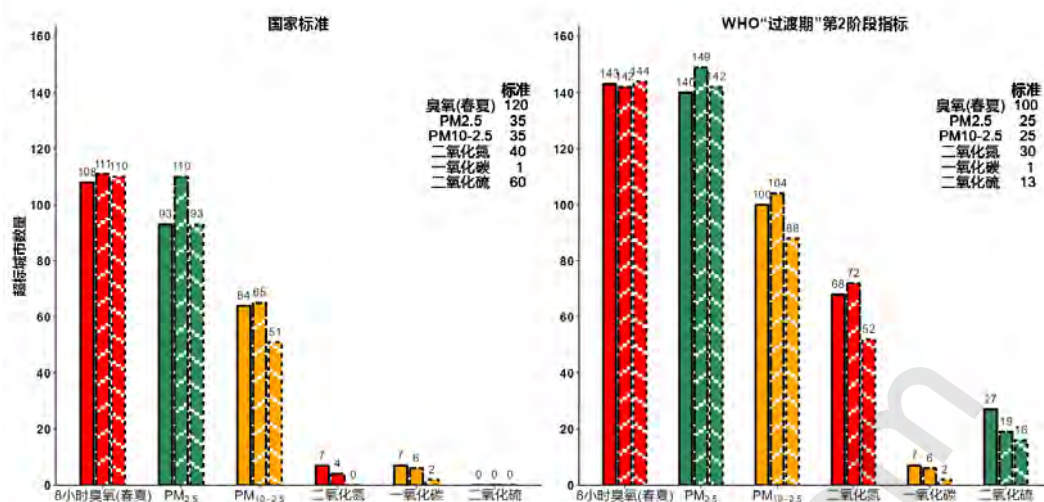


图 80: “4+151” 城市各污染物超标情况, 同一污染物从左至右依次为 2024/2023/2022 年超标城市数。左右图标准分别基于国家标准和 WHO “过渡期” 第 2 级指标制定, 标准限值见图例 (单位: 一氧化碳为毫克/立方米, 其他污染物为微克/立方米)

市。其次是 PM_{10-2.5}, 有 51 个城市超标。与 2023 年相比, PM_{2.5}、PM_{10-2.5} 超标城市分别减少 17 个 (降幅 15.5%)、14 个 (降幅 21.5%), 颗粒物暴露风险降低。但臭氧超标城市维持高位, 较上年度仅减少 1 个。2024 年, 在现行标准下二氧化氮、二氧化硫已实现全域达标, 一氧化碳仅余 2 市超标, 印证工业污染治理与能源结构转型成效。

若将空气质量标准提高到 WHO “过渡期” 第 2 级指标, 2024 年超标格局将发生显著变化: 二氧化氮将成为主要新增超标项, 新增 52 个超标城市, 占比约 1/3。PM_{2.5} 和 PM_{10-2.5} 超标城市分别增加 49 和 37 个, 粗细颗粒物达标率差距扩大。春夏臭氧仍然是超标率最高的污染物, 超标城市将增加 34 个, 达到 144 个超标城市。二氧化硫受新标准影响较小, 预计新增 16 个超标城市 (占比 10.3%)。以上预评估结果表明, 标准提升后二氧化氮将成为新增治理重点, 而 PM_{2.5} 与臭氧的超标压力仍将存在。

6.7 提高空气质量“良”的标准

大量实证研究证实, 长期暴露于 35-75 微克/立方米 PM_{2.5} 浓度之下将导致显著健康损害。相比空气质量标准, 空气质量指数是更为公众所熟知的空气污染反映形式, “优良” 级别的提示直接关系到群众是否自主采取空气污染防范措施。我国自 2012 年起执行当前的空气质量指数 (AQI) 级别标准, “良” 等级上界对应 PM_{2.5} 标准 75 微克/立方米, 等同于 WHO “过渡期” 第 1 级指标。我们注意到印度和孟加拉国当前使用的 PM_{2.5} “良” 的上界分别为 60 和 35.4 微克/立方米 [24,25], 均比中国目前使用的标准更严格, 尽管两国的大气污染比我国更严重。在 2013 年, 全国城市 PM_{2.5} 年均浓度达标率仅 4.1% (根据《中国生态环境状况公报》), 因此 75 微克/立方米是一个兼顾人群健康保护需求与经济技术可行性的合理标准。但是截至 2023 年, 全国 PM_{2.5} 年均浓度达标率已增加到 69%。我们的统计结果显示, 对于大气污染防治重点区域及周边城市, 按照目前标准 2024 年 PM_{2.5} 优良天数比例已达 80% 以上 (附图 82 和 83)。

若将“良”的等级上界提高到 WHO “过渡期” 第 2 级指标, 即 PM_{2.5} 浓度 50 微克/立方米, “4+151” 城

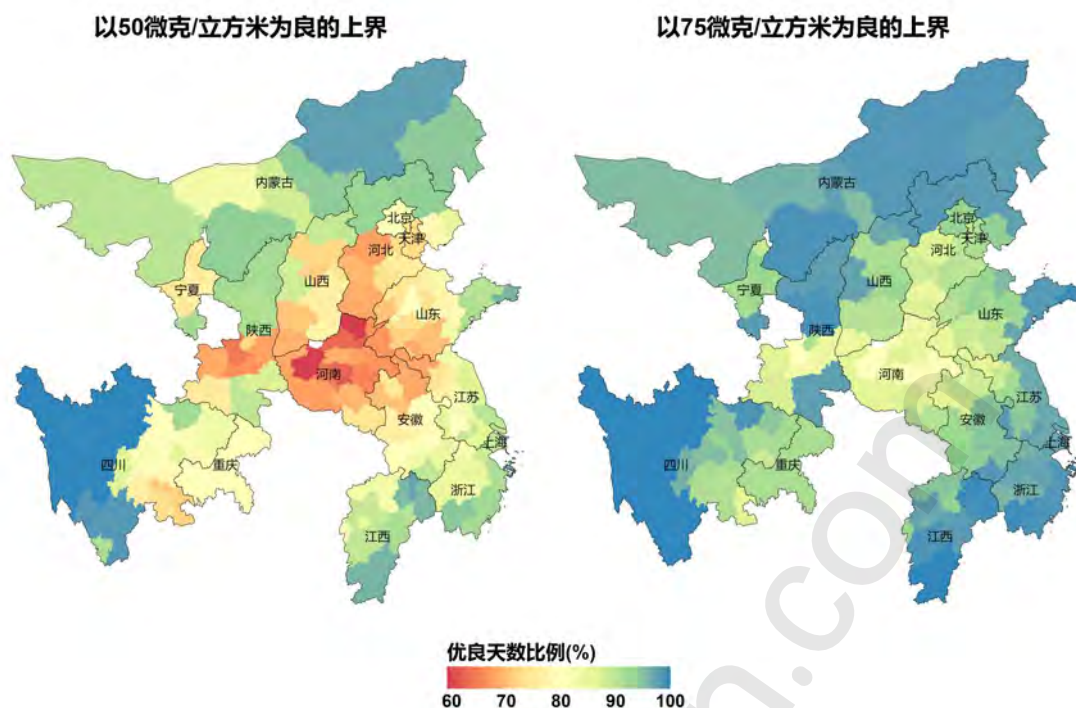


图 81: 2024 年“4+151”城市 PM_{2.5} 优良天数比例地图。左右图分别基于 50 微克/立方米和 75 微克/立方米作为“良”的上界统计得出

市优良天数比例平均下降 13.3%。目前空气较清洁的地区，内蒙古、江西、上海、浙江等，使用 50 微克/立方米标准后 PM_{2.5} 优良率下降不超过 10%；优良率降幅最大的省份为河南，下降 19.4%，至 65%。“4+151”城市中只有 9 个城市优良率降幅超过 20%，有 124 个城市 PM_{2.5} 优良率仍可保持 70% 以上。这说明在**当前阶段，我国已具备执行 WHO 建议的 PM_{2.5} “过渡期”第 2 级指标的基础**。本团队自 2018 年报告(五)起持续呼吁空气质量级别标准修订，现结合最新监测数据重申此建议。

将“良”等级的上界调整为 50 微克/立方米，将形成三重效益：其一，**强化公众健康防护**，通过降低污染预警阈值促使居民采取主动防护措施，有效减少 PM_{2.5} 的暴露健康损害，降低由此产生的医疗支出负担；其二，**巩固达标城市治理成果**，当前“4+151”城市中已有 30 个实现六项污染物全面达标，提高标准有利于激励已达标城市重视污染治理成果的巩固提升，促进空气质量持续改善。其三，**调动污染区域治理积极性**，2024 年监测数据显示，75 微克/立方米标准下，我国重点区域城市 PM_{2.5} 优良天数比例的区域差异性已不再显著。但提高标准后，山河四省及陕西关中平原地区优良率显著低于外围区域，形成以污染核心区为中心、向外阶梯式提升的空间分布格局(图 81)。这种差异化的空气污染治理进程，有利于充分激活未达标城市治理动能，**助力实现“美丽中国”2035 年 PM_{2.5} 的 25 微克/立方米目标**。

附录

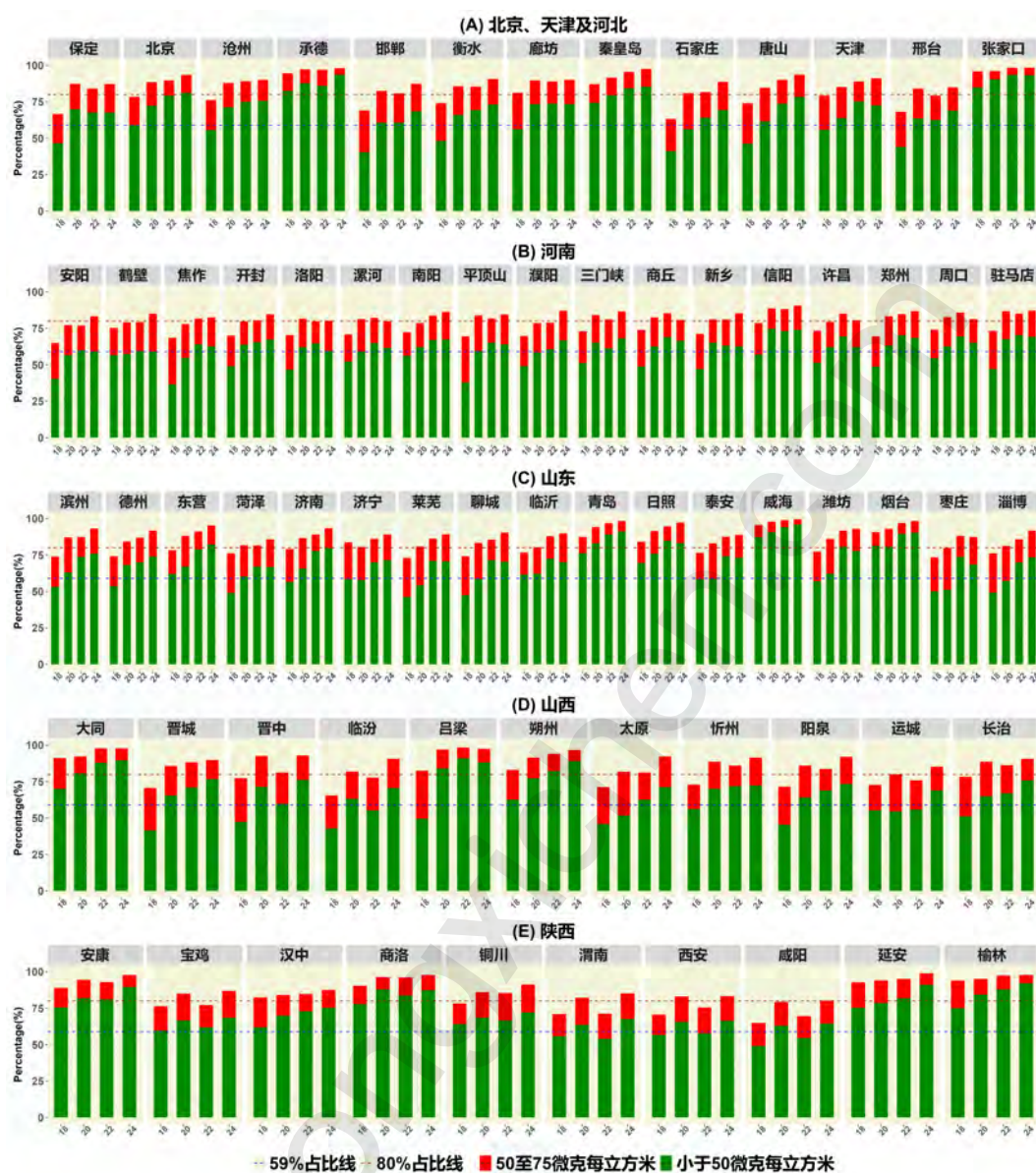


图 82: 绿色表示小于 50 微克/立方米的比例, 红色表示介于 50 至 75 微克/立方米的比例, 虚线 80 % 和 59 % 分别代表在 75 和 50 微克/立方米“良”的标准下 2024 年“4+151”城市优良天数比例的最低值, 为方便阅读, 图中仅展示 2018、2020、2022、2024 四年的数据

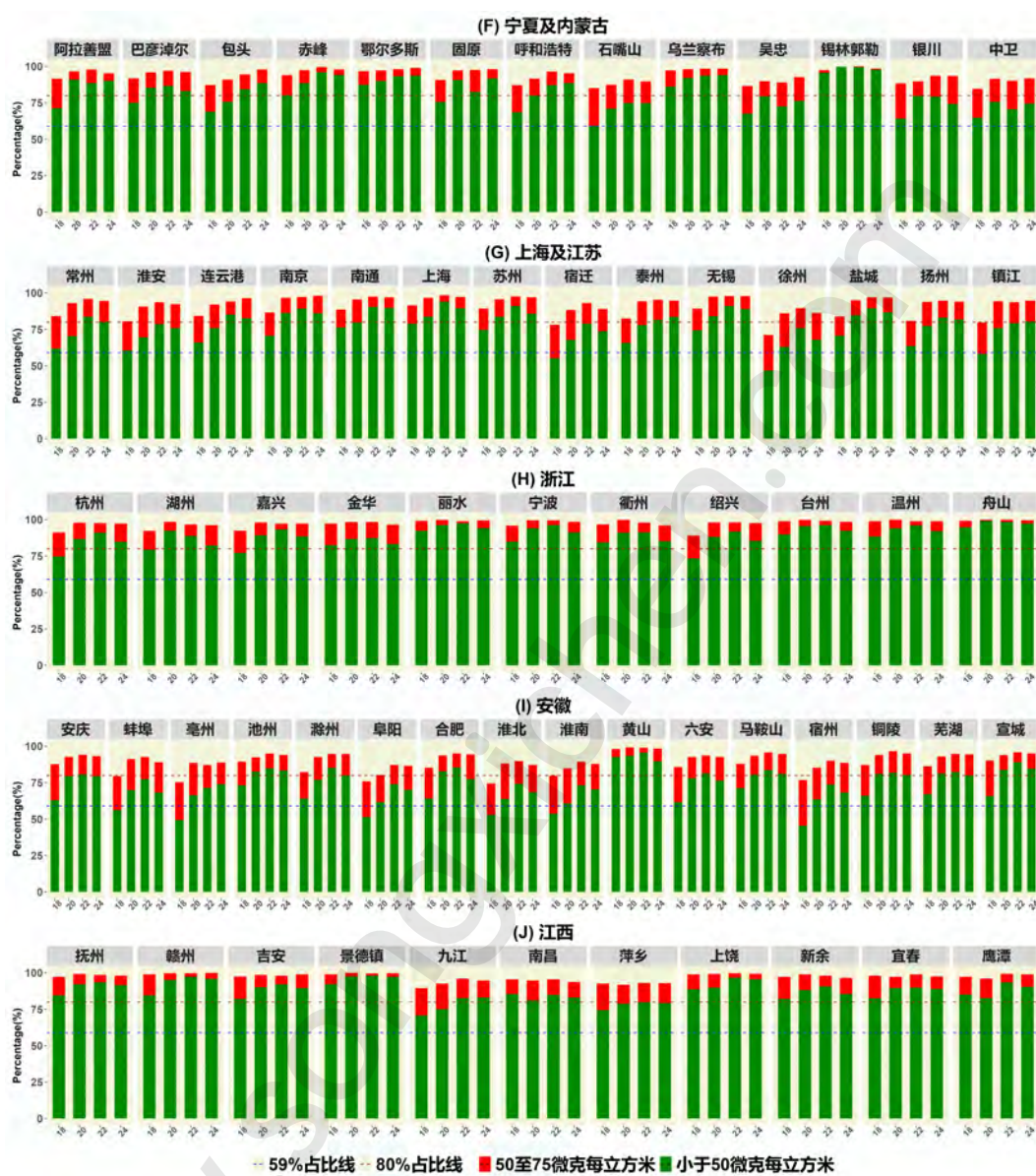


图 83: 绿色表示小于 50 微克/立方米的比例, 红色表示介于 50 至 75 微克/立方米的比例, 虚线 80 % 和 59 % 分别代表在 75 和 50 微克/立方米“良”的标准下 2024 年“4+151”城市优良天数比例的最低值, 为方便阅读, 图中仅展示 2018、2020、2022、2024 四年的数据

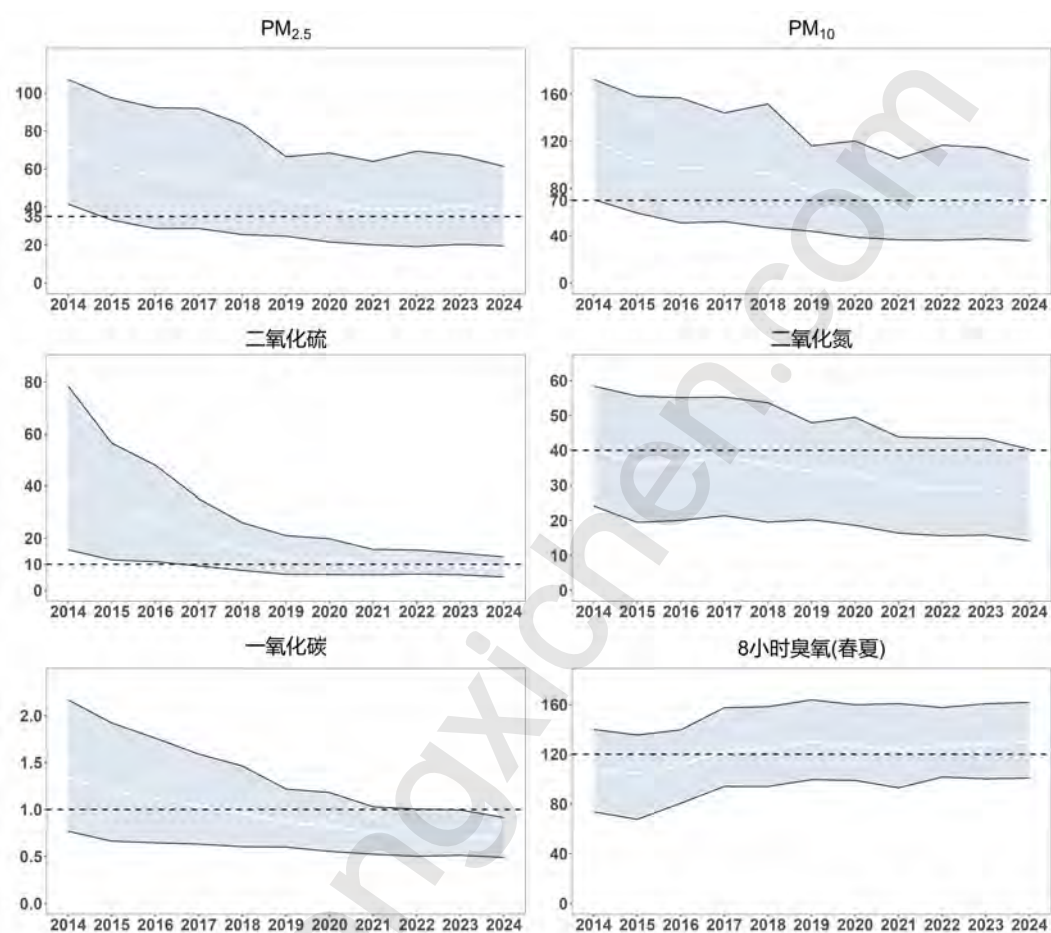


图 84: “4+151”城市 2014 - 2024 年平均浓度 (白色折线) 和 10%(下黑实线)-90%(上黑实线) 分位数区间变化趋势 (蓝色区间为“4+151”城市年均浓度 10%-90% 分位数区间, 白色折线为“4+151”城市逐年平均浓度。一氧化碳浓度单位为毫克/立方米, 其余污染物为微克/立方米。黑色虚线为第四章设定参考标准, 其中 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 使用国家二级标准)

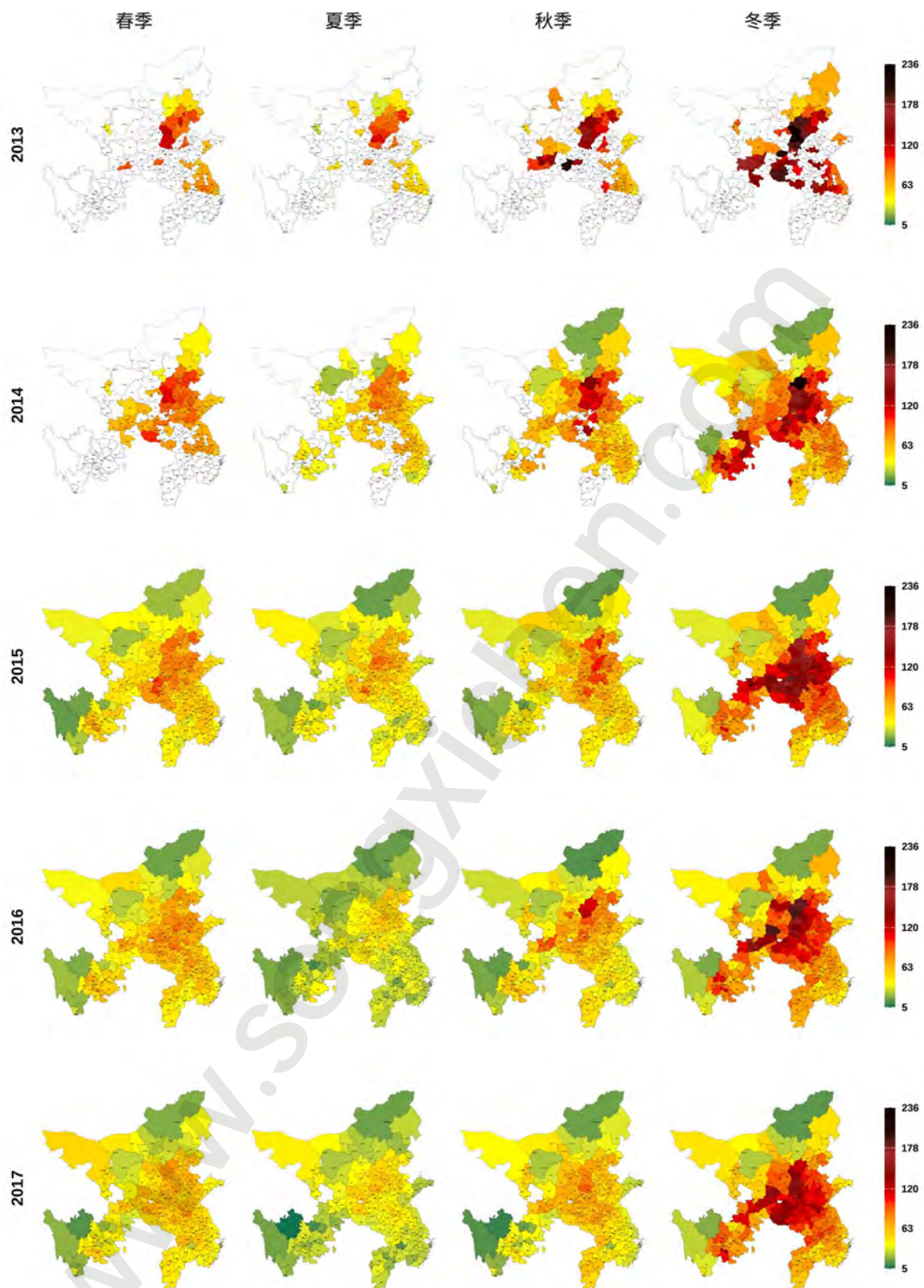


图 85: “4+151”城市气象调整后 2013 年至 2017 年 PM_{2.5} 季节平均浓度 (微克/立方米)

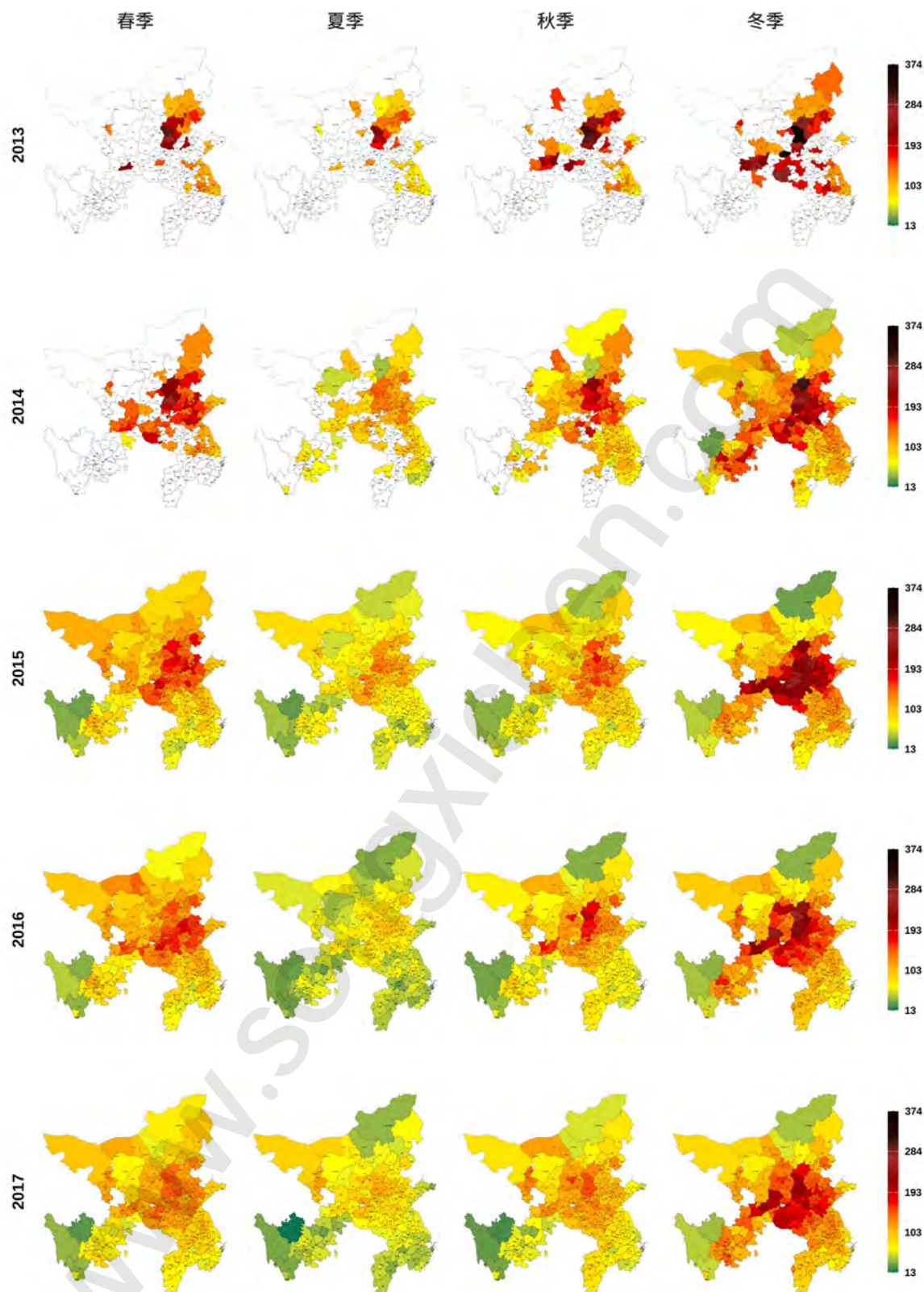


图 86: “4+151”城市气象调整后 2013 年至 2017 年 PM₁₀ 季节平均浓度 (微克/立方米)

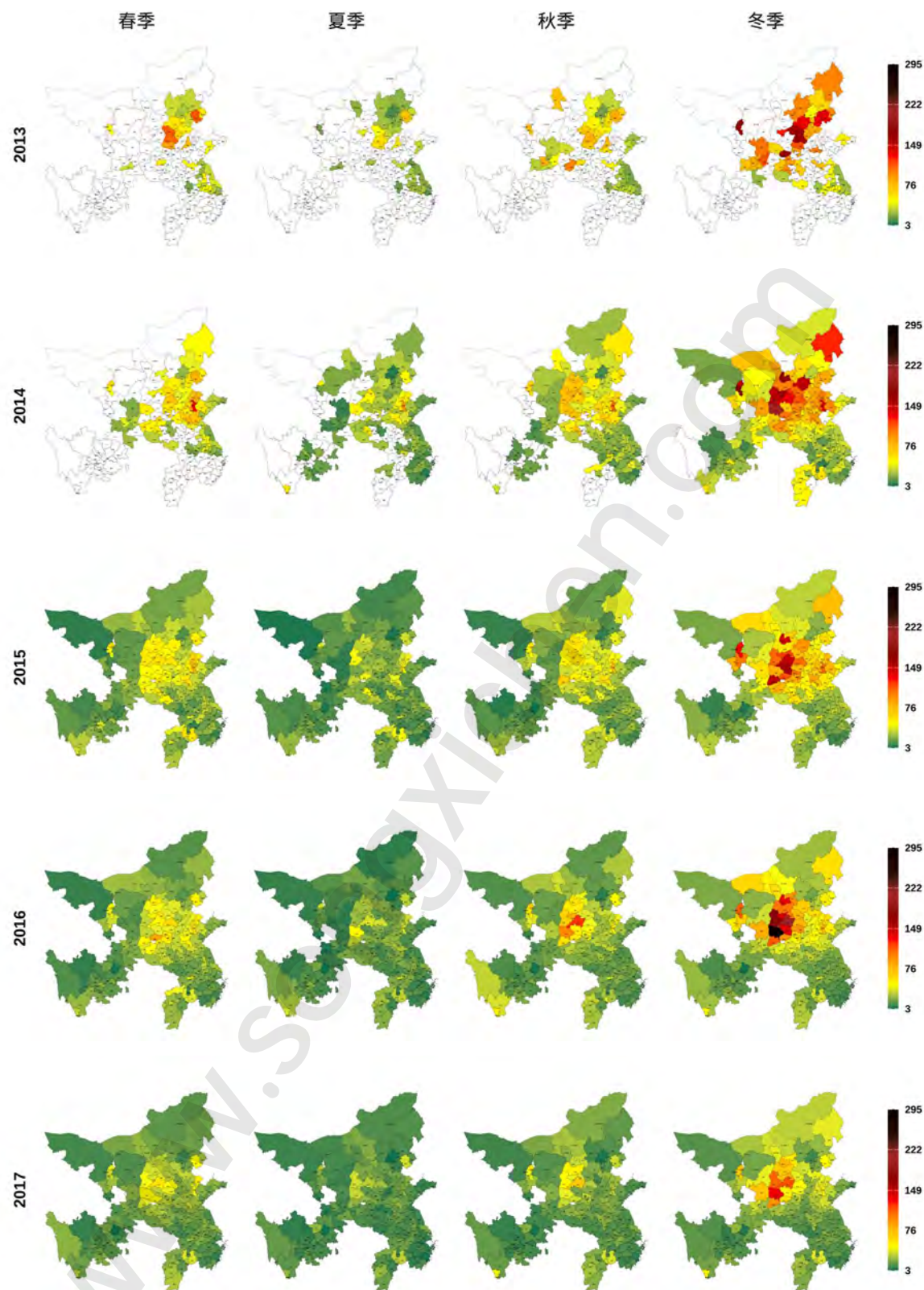


图 87: “4+151”城市气象调整后 2013 年至 2017 年 SO₂ 季节平均浓度 (微克/立方米)

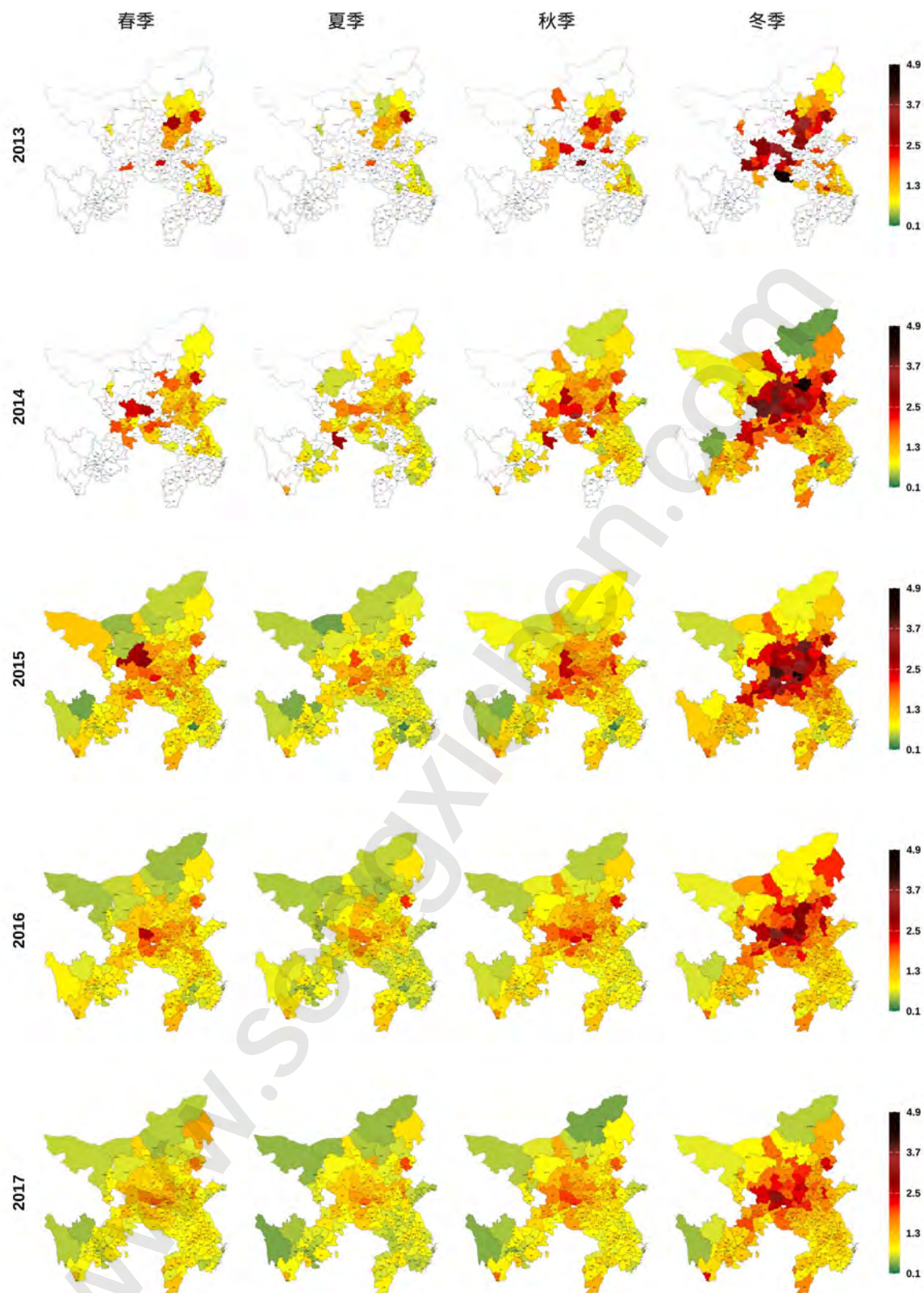


图 88: “4+151”城市气象调整后 2013 年至 2017 年一氧化碳季节平均浓度 (毫克/立方米)

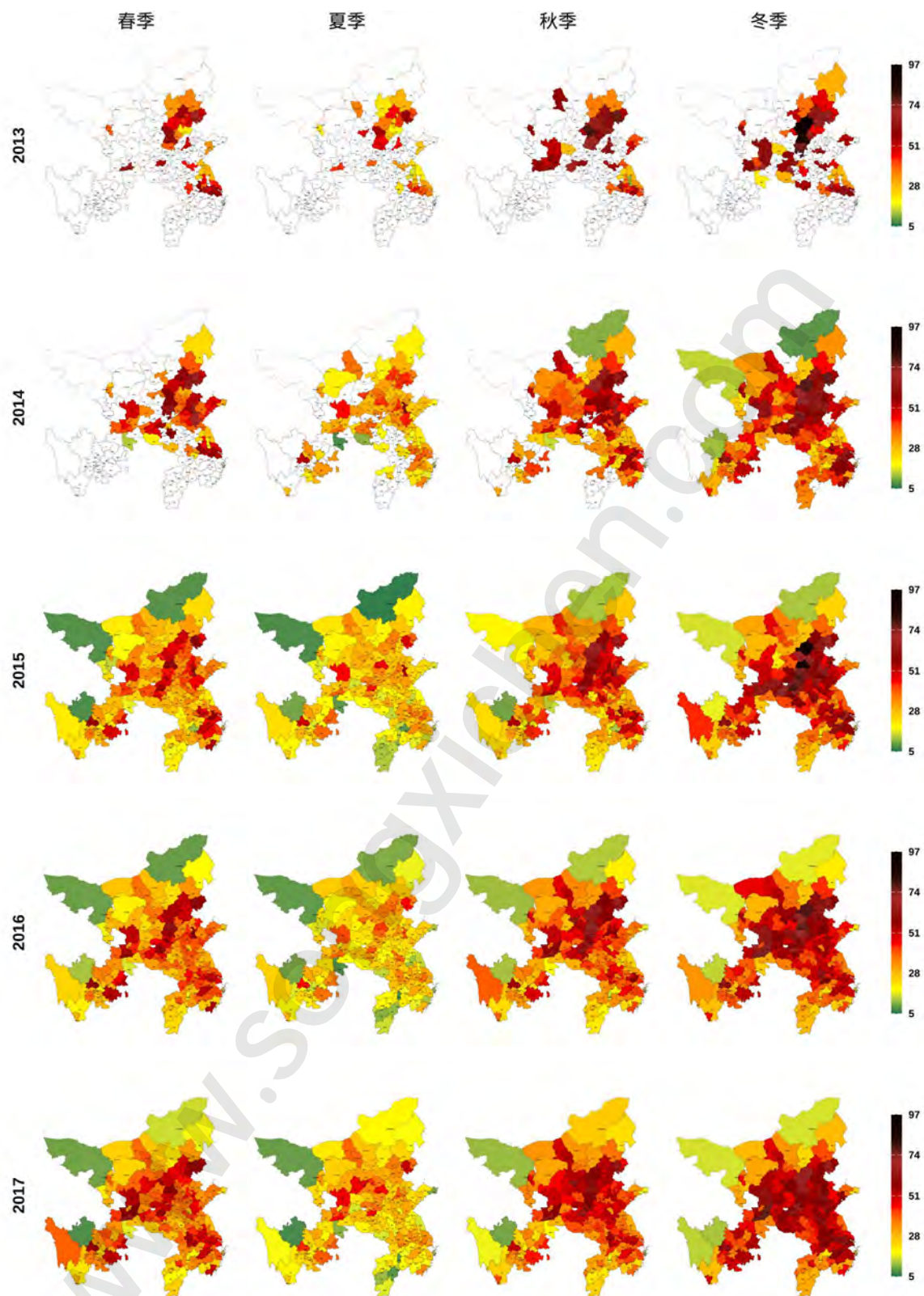


图 89: “4+151”城市气象调整后 2013 年至 2017 年 NO₂ 季节平均浓度 (微克/立方米)

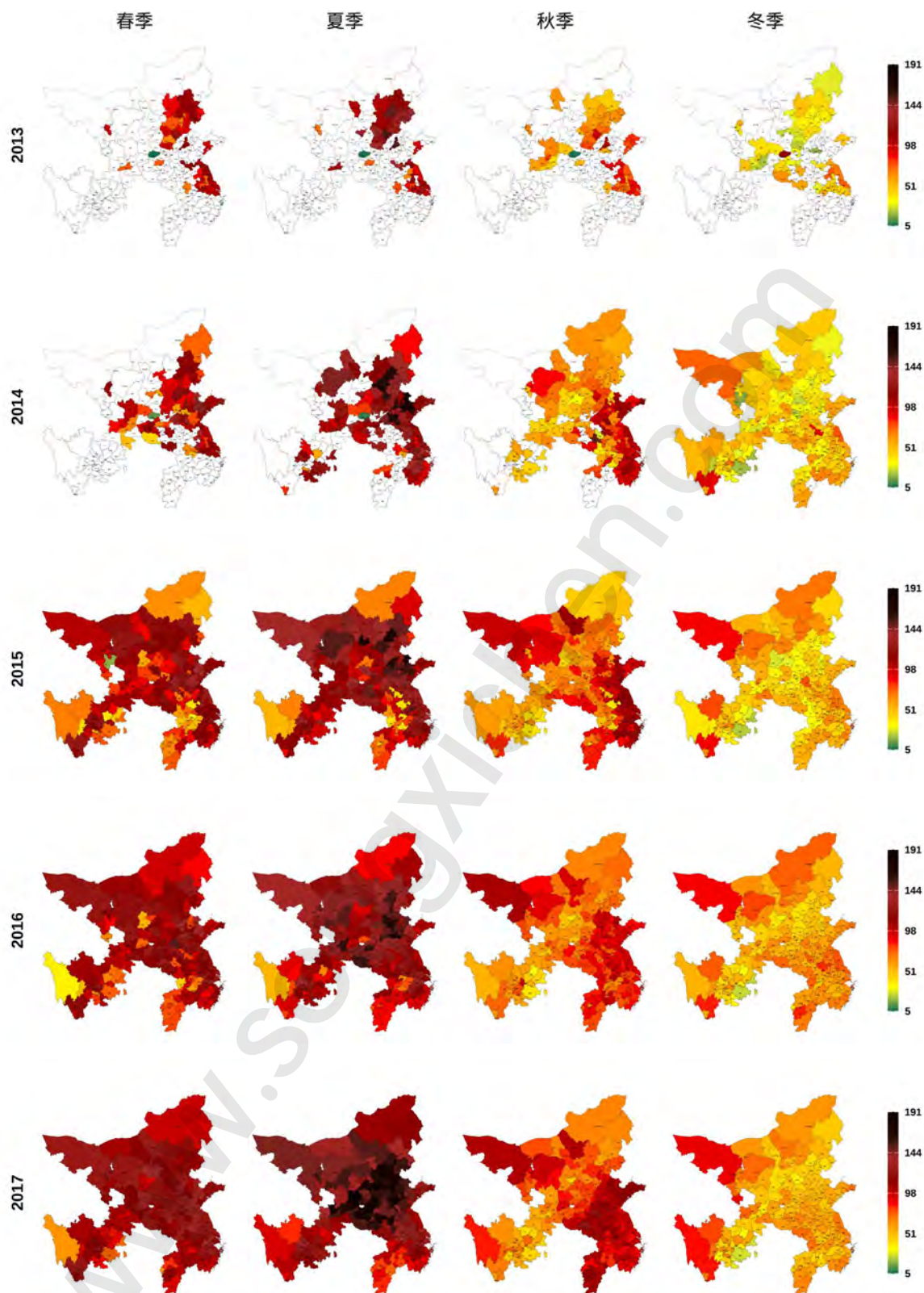


图 90: “4+151”城市气象调整后 2013 年至 2017 年 8 小时臭氧季节平均浓度 (微克/立方米)

表 8: 十六省市“十四五”空气质量改善目标

省市	2025 年 PM _{2.5} 浓度目标
北京	控制在 32 微克/立方米以内
天津	控制在 37 微克/立方米以内
河北	比 2020 年下降 20%
河南	低于 42.5 微克/立方米
山西	降至 39 微克/立方米以下
山东	达到 38 微克/立方米
陕西	不超过 35 微克/立方米
宁夏	控制在 30.5 微克/立方米以内
内蒙古	比 2020 年下降 7.1%
上海	控制在 30 微克/立方米以下
江苏	总体达标, 设区市比 2020 年下降 10%
浙江	达到 24.3 微克/立方米
安徽	控制在 35 微克/立方米以下
江西	控制在 24.8 微克/立方米以内
四川	除宜宾市、自贡市外其余城市实现达标
重庆	下降到 31 微克/立方米

参考文献

- [1] 北京大学统计科学中心环境统计组 (2015). 空气质量评估报告 (一): 北京城区 2010-2014 年 PM_{2.5} 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 月月. (http://songxichen.gsm.pku.edu.cn/images/231cities_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] 北京大学统计科学中心环境统计组 (2021). 空气质量评估报告 (八): “3+95” 城市 2013-2020 年区域污染状况评估. 2021 年 5 月. (https://songxichen.com/Uploads/Files/Report/Air_Quality_Assessment_Report_VII.pdf).
- [9] 北京大学统计科学中心环境统计组 (2022). 空气质量评估报告 (九): “3+99” 城市 2013-2021 年区域污染状况评估. 2022 年 4 月. (https://songxichen.com/Uploads/Files/Report/Air_Quality_Assessment_Report_IX.pdf).
- [10] 北京大学统计科学中心环境统计组 (2023). 空气质量评估报告 (十): “3+110” 城市 2013-2022 年区域污染状况评估. 2023 年 4 月. (https://www.songxichen.com/Uploads/Files/Report/Air_Quality_Assessment_Report_X.pdf).

- [11] 北京大学统计科学中心环境统计组 (2024). 空气质量评估报告 (十一): “3+130” 城市 2013-2023 年区域污染状况评估. 2024 年 4 月. (https://www.songxichen.com/Uploads/Files/Report/Air_Quality_Assessment_Report_XI.pdf).
- [12] 中国国务院 (2013). 大气污染防治行动计划. 国发〔2013〕37号, 2013.
- [13] 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, 2013.
- [14] 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, 2018.
- [15] 中国生态环境部 (2020). 2020 年挥发性有机物治理攻坚方案. 环大气〔2020〕33号, 2020.
- [16] 中国国务院 (2021). 关于深入打好污染防治攻坚战的意见. 2021 年 11 月 2 日.
- [17] 中国国务院 (2023). 关于印发《空气质量持续改善行动计划》的通知. 国发〔2023〕24号, 2023 年 11 月 30 日.
- [18] Xuan Liang, Tao Zou, Bin Guo, Shuo Li, Haozhe Zhang, Shuyi Zhang, Hui Huang, and Song Xi Chen. Assessing Beijing's pm_{2.5} pollution: severity, weather impact, apec and winter heating. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 471(2182):20150257, 2015.
- [19] Xuan Liang, Shuo Li, Shuyi Zhang, Hui Huang, and Song Xi Chen. Pm_{2.5} data reliability, consistency, and air quality assessment in five Chinese cities. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(17):10–220, 2016.
- [20] Shuyi Zhang, Bin Guo, Anlan Dong, Jing He, Ziping Xu, and Song Xi Chen. Cautionary tales on air-quality improvement in Beijing. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 473(2205):20170457, 2017.
- [21] Lei Chen, Bin Guo, Jiasheng Huang, Jing He, Hengfang Wang, Shuyi Zhang, and Song Xi Chen. Assessing air-quality in Beijing-Tianjin-Hebei region: The method and mixed tales of PM_{2.5} and O₃. *Atmospheric Environment*, 193:290–301, 2018.
- [22] 张澍一, 陈松溪, 郭斌, 王恒放和林伟. 气象调整下的区域空气质量评估. *中国科学: 数学*, 50(4):527–558, 2020.
- [23] Pei Feng Tong, Song Xi Chen, and Cheng Yong Tang. Detecting and evaluating dust-events in north china with ground air quality data. *Earth and Space Science*, 9(1):e2021EA001849, 2022.
- [24] National Informatics Centre, Government of India. National air quality index. http://www.arthapedia.in/index.php?title=National_Air_Quality_Index, 2015.

- [25] Ministry of Environment, Forest and Climate Change (MoEFCC) and Department of Environment (DoE). Bangladesh national air quality management plan 2024-2030, 2024.

www.songxichen.com

课题组成员



李虹霖，北京大学数学科学学院博士后



刘奔，西南财经大学统计交叉创新研究院博士研究生



刘俊，江西财经大学财经数据科学重点实验室讲师



王佳，江西财经大学财经数据科学重点实验室讲师



詹皓翔，北京大学数学科学学院博士研究生



郭斌，西南财经大学统计交叉创新研究院教授



陈松蹊，清华大学统计与数据科学系教授，课题负责人

致谢：本报告得到国家自然科学基金数理学部重大项目 **12292983**，地球科学部集成项目 **92358303** 的资助。感谢国家重大科技基础设施项目“地球系统数值模拟装置” (<http://cstr.cn/31134.02.EL>)提供的算力支持。感谢中国环境监测总站，青悦开放环境数据中心和中國气象局气象数据中心为本次报告提供部分数据。感谢王文庆在数据库方面、陈力在建立并维护空气质量平台方面一如既往地帮助，感谢北大统计科学中心博士生陈涵玥，北大数学科学学院博士生边明远，北大前沿交叉学科研究院硕士生冯宇宁、彭阿晓，北大光华管理学院本科生杨巧诗在之前报告的写作和参与，为本次算法生成报告提供了高质量训练样本。感谢北大、清华统计与数据科学同仁的长期鼓励和支持，北大统计科学中心张苑新，数量经济与数理金融教育部重点实验室曹锦的协助。

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

https://www.songxichen.com/Uploads/Files/Report/Air_Quality_Assessment_Report_I.pdf

空气质量评估报告(二): 中国五城市空气污染状况之统计学分析, 2016 年 3 月.

https://www.songxichen.com/Uploads/Files/Report/Air_Quality_Assessment_Report_II.pdf

空气质量评估报告(三): 北京 2013-2016 年区域污染状况评估, 2017 年 3 月.

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

空气质量评估报告(四): 京津冀 2013-2016 年区域污染状况评估, 2017 年 8 月.

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

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

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

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

https://www.songxichen.com/Uploads/Files/Report/Air_Quality_Assessment_Report_VI.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://www.songxichen.com/Uploads/Files/Report/Air_Quality_Assessment_Report_VII.pdf

空气质量评估报告(八): “2+95”城市 2013-2020 年区域污染状况评估, 2021 年 5 月.

https://www.songxichen.com/Uploads/Files/Report/Air_Quality_Assessment_Report_VIII.pdf

空气质量评估报告(九): “3+99”城市 2013-2021 年区域污染状况评估, 2022 年 4 月.

https://www.songxichen.com/Uploads/Files/Report/Air_Quality_Assessment_Report_IX.pdf

空气质量评估报告(十): “3+110”城市 2013-2022 年区域污染状况评估, 2023 年 4 月.

https://www.songxichen.com/Uploads/Files/Report/Air_Quality_Assessment_Report_X.pdf

空气质量评估报告(十一): “3+130”城市 2013-2023 年区域污染状况评估, 2024 年 4 月.

https://www.songxichen.com/Uploads/Files/Report/Air_Quality_Assessment_Report_XI.pdf

Song Xi Chen Lab

www.songxichen.com

空气质量评估平台

<http://www.songxichen.com/AQAssess/#/>