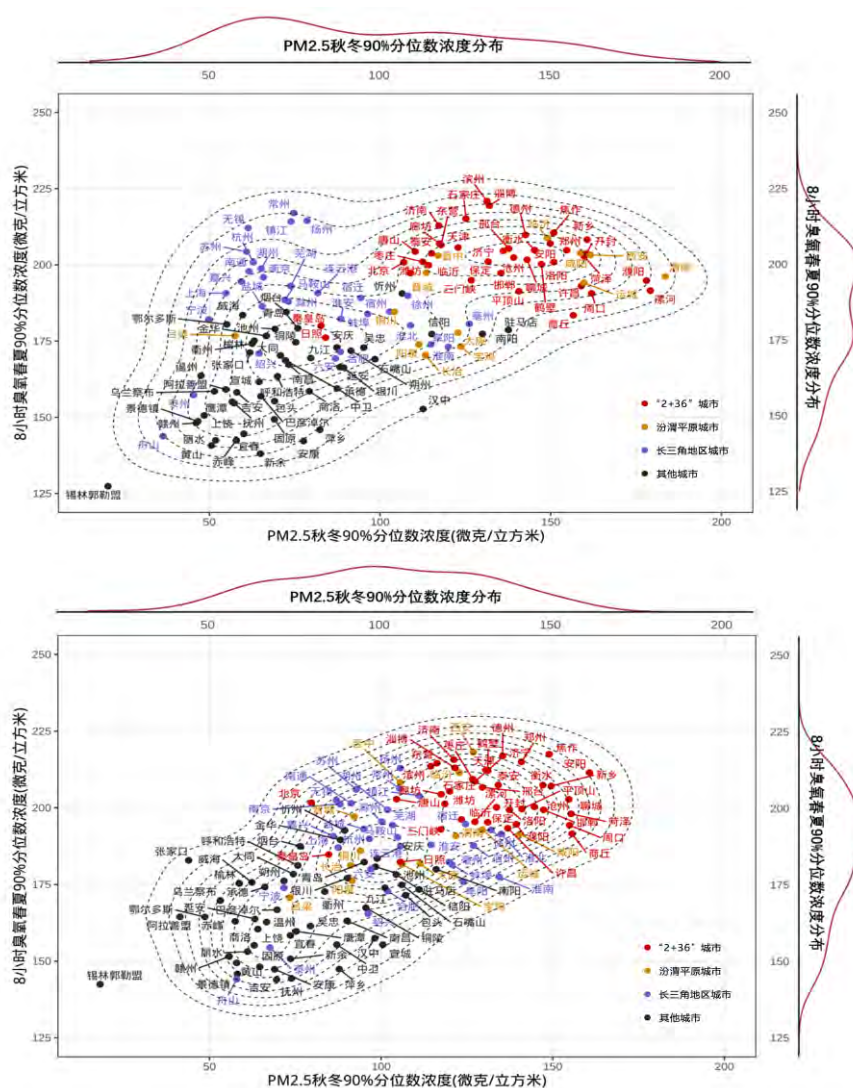


空气质量评估报告（十一）

“3+130” 城市 2013-2023 年区域污染状况评估

为了蓝天

让我们用数据解读污染



北京大学统计科学中心

江西财经大学财经数据科学重点实验室

大数据分析与应用技术国家工程实验室

二零二四年四月

前言

这是本环境统计团队完成的第十一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个年头。前十份报告分别发布于 2015 年 3 月、2016 年 3 月、2017 年 3 月和 8 月、2018 年 4 月、2019 年 4 月、2020 年 7 月、2021 年 5 月、2022 年 4 月和 2023 年 4 月。

报告一 [1] 分析了北京城区 2010 至 2014 季节年基于单站点（美国大使馆）的 $PM_{2.5}$ 污染状况；报告二 [2] 通过研究中国五城市 2013 至 2015 季节年美国使领馆和相邻国控站点的 $PM_{2.5}$ 数据，对比了两个数据源的数据质量和一致性，也度量和分析了这五个城市的 $PM_{2.5}$ 浓度的变化趋势；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 季节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] 通过分析京津冀地区 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数据，总结了京津冀地区空气质量的状况和变化趋势；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 季节年的状态和变化趋势；报告六 [6] 综合评估了“2+43”城市（相比于报告五增加了汾渭平原 11 市和延安市）247 个国控站点 2013 至 2018 季节年的状态和变化趋势；报告七 [7] 综合评估了“2+66”城市（相比于报告六补齐了山东、河南、山西、陕西余下的城市）354 个国控站点 2013 至 2019 季节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（相比于报告七增加了上海、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 季节年的状态和变化趋势。报告九 [9] 综合评估了“3+99”城市（相比于报告八增加了内蒙古呼和浩特、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 季节年的状态和变化趋势。该报告进一步完善了对河北和山西西北部区域的研究，统称“3+99”城市。报告十 [10] 综合评估了“3+110”城市（相比于报告九增加了江西省 11 个城市）620 个国控站点 2013 至 2022 季节年的状态和变化趋势。

本报告在上一份报告基础上增加宁夏全部 5 个地级以上城市、浙江全部 11 个地级市和内蒙古赤峰、锡林郭勒、巴彦淖尔和阿拉善 4 个城市，共新增了 20 个城市 96 个国控站点，这使得评估城市的总数为 133，统称“3+130”城市。报告将基于上述十一省三市“3+130”城市近 13 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。

本报告各章节内容编排如下：

- 第 1、2 章介绍评估区域背景和数据构成
- 第 3、4 章对六种常规污染物污染状态和变化趋势进行城市级别详细分析
- 第 5 章给出最近两年“人努力-天帮忙”指数结果与分析
- 第 6 章总结本年度各污染物主要结论和治理意见

感兴趣的读者可以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。用户可以生成适合于自己省市的评估报告。

目录

1	背景介绍	3
2	采用数据说明	4
3	六种常规空气污染物评估	6
3.1	PM _{2.5}	7
3.2	PM ₁₀	19
3.3	二氧化硫 (SO ₂)	29
3.4	一氧化碳 (CO)	38
3.5	二氧化氮 (NO ₂)	47
3.6	8 小时臭氧 (O ₃)	56
4	六种常规空气污染物综合评价	68
5	“人努力-天帮忙指数”	79
5.1	PM _{2.5} 的“人努力-天帮忙”情况	82
5.1.1	2023 年 PM _{2.5} 的“人努力”情况	82
5.1.2	2023 年 PM _{2.5} 的“天帮忙”情况	82
5.2	O ₃ 的“人努力-天帮忙”情况	83
5.2.1	2023 年 O ₃ 的“人努力”情况	83
5.2.2	2023 年 O ₃ 的“天帮忙”情况	86
6	主要结论与建议	87
6.1	颗粒物和春夏 8 小时 O ₃ 污染形势反复, 长三角地区反弹突出	87
6.2	九省市 PM _{2.5} 反弹、八省市 PM ₁₀ 反弹	89
6.3	九省市春夏 8 小时 O ₃ 反弹、七省市 NO ₂ 反弹	89
6.4	除少量省市外 SO ₂ 、CO 年均浓度下降	92
6.5	春、夏、秋三季多污染物浓度回升, 夏季 O ₃ 污染加剧	93
6.6	极端污染	93
6.7	整体污染水平仍低于疫情前, 但部分城市已反超疫情前水平	95
6.8	O ₃ 和 PM _{2.5} 仍是主要污染物, 提高空气质量“良”的标准	96

1 背景介绍

2013 年 9 月，国务院发布《大气污染防治行动计划》[11]（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》[12]。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》[13]，汾渭平原地区首次被提及。2020 年 2 月，生态环境部印发《2020 年挥发性有机物治理攻坚方案》，重点强调了苏皖鲁豫交界地区和长三角地区的臭氧防治任务。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》，进一步明确了“十四五”期间细颗粒物污染与臭氧污染治理的任务：在 2025 年实现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% [14]。2023 年 11 月，国务院印发《空气质量持续改善行动计划》，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），制定了“到 2025 年，全国地级及以上城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度比 2020 年下降 10%” [15] 的目标。

此次《空气质量持续改善行动计划》（简称《行动计划》）对全国大气污染防治重点区域城市进行了调整，共分为京津冀及周边地区、汾渭平原和长三角地区三个重点区域。京津冀及周边地区重点防治城市由原来的“2+26”和皖鲁豫交界地区调整为“2+36”城市，新增 14 市，调出 4 市，具体调整方案为：新增加河北秦皇岛，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；同时将原“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。汾渭平原共包括了山西和陕西的 13 个重点城市，其中山西新增 4 市（太原、阳泉、长治和晋城），原有洛阳和三门峡划入“2+36”；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。经调整，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。近年华北江淮及长江三角洲地区臭氧污染持续严重，防治任务也亟待关注。

我们 2021 年发布的空气质量报告（八），在原有“2+26”城市、汾渭平原地区 11 城市的基础上，补全河北、山东、河南、山西和陕西 5 省的其余城市，并将空气质量评估范围扩展至上海、安徽、江苏全部城市。2022 年发布的空气质量报告（九）在此基础上补充内蒙古呼和浩特、包头、鄂尔多斯和乌兰察布 4 市。去年的空气质量报告（十）在此基础上增加了江西省 11 市。今年的空气质量报告（十一）在此基础上增加了宁夏 5 市，浙江 11 市，内蒙古赤峰、锡林郭勒、巴彦淖尔和阿拉善 4 市。本次报告按照《行动计划》划分了大气污染防治重点区域，将报告（十）中“苏皖鲁豫交界地区”城市按照《行动计划》划分到相应区域（参看第二章数据说明）。此外，参照国家现行污染物年均浓度标准和近年来大气污染的总体改善情况，本次报告中我们将 $\text{PM}_{2.5}$ 的超标标准由报告（十）的 50 微克/立方米调整为 35 微克/立方米，同我国目前使用的国家二级标准相吻合。

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 ($\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、二氧化硫 (SO_2)、二氧化氮 (NO_2)、一氧化碳 (CO) 和臭氧 (O_3)) 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,共包含十一省三市(即河北、河南、山东、山西、陕西、安徽、江苏、江西、浙江、内蒙古和宁夏,以及北京、天津和上海三市)共“3+130”个地级及以上城市辖区内 873 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 48.5% 的人口。本报告按照 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(含 9 省 50 地级市,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”。

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(不包括定陵背景站)
- 天津市: 位于中心城区的 15 个国控空气质量监测站
- 上海市: 位于中心城区的 9 个国控空气质量监测站
- 河北省: 11 个地级市(石家庄、保定、邢台、衡水、邯郸、沧州、廊坊、唐山、秦皇岛、承德、张家口)共 61 个国控空气质量监测站(不包含石家庄封龙山、张家口北泵房、承德离宫背景站,以及县级市辛集和定州的 6 个站点)
- 河南省: 17 个地级市(郑州、开封、安阳、鹤壁、新乡、焦作、濮阳、洛阳、三门峡、平顶山、许昌、漯河、商丘、周口、南阳、信阳、驻马店)共 106 个国控空气质量监测站(不包含郑州岗李水库、安阳棉研所、焦作影视城、三门峡风景区 4 个背景站)
- 山东省: 16 个地级市(济南(含莱芜)、淄博、济宁、德州、聊城、滨州、菏泽、枣庄、东营、潍坊、泰安、日照、临沂、青岛、烟台、威海)共 124 个国控空气质量监测站(莱芜 2018 年并入济南市,本报告仍作为城市单元单独分析)
- 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(不包含太原上兰、晋城白马寺 2 个背景站)
- 陕西省: 10 个地级市(西安、铜川、宝鸡、咸阳、渭南、延安、榆林、汉中、安康、商洛)共 65 个国控空气质量监测站(不包含西安草滩、宝鸡庙沟村、咸阳气象站、渭南农科所、延安枣园、汉中汉川机床厂子校 6 个背景站)

- 安徽省：16 个地级市（合肥、蚌埠、淮南、滁州、六安、马鞍山、芜湖、淮北、亳州、宿州、阜阳、安庆、池州、铜陵、黄山、宣城）共 93 个国控空气质量监测站（不包含合肥董铺水库、淮南焦岗湖风景区、马鞍山市教育基地、黄山黄山区政府五号和池州平天湖 5 个对照站）
- 江苏省：13 个地级市（南京、无锡、常州、苏州、南通、淮安、盐城、扬州、镇江、泰州、徐州、连云港、宿迁）共 114 个监测站（不包含苏州上方山和南通南郊 2 个对照站，宜兴、江阴、溧阳、金坛、吴江、太仓、常熟、张家港、昆山、海门和句容 11 个县级市站点）
- 江西省：11 个地级市（抚州、赣州、吉安、景德镇、九江、南昌、萍乡、上饶、新余、宜春、鹰潭）共 72 个监测站
- 浙江省：11 个地级市（杭州、嘉兴、宁波、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：6 个地级市（呼和浩特、包头、赤峰、鄂尔多斯、巴彦淖尔、乌兰察布）和 2 个盟（锡林郭勒盟、阿拉善盟）共 42 个监测站
- 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（参看第三章介绍）。气象数据方面，河北、河南、山东、山西、陕西、安徽、江苏、江西、浙江、内蒙古和宁夏十一省 130 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 and 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。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 873 个污染物监测站点和 151 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 2024 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。与本团队之前发布的第三至第十份报告一致，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。

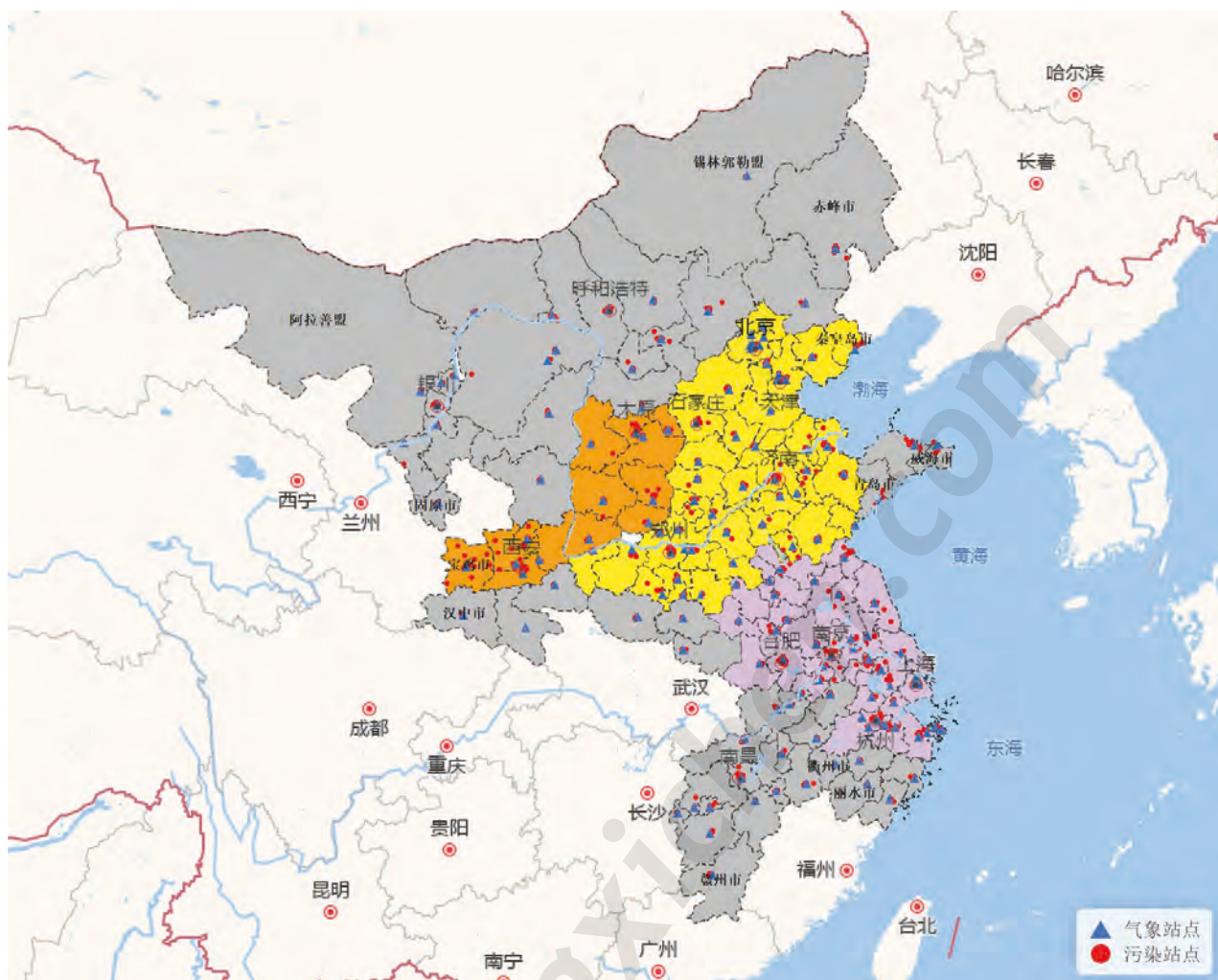


图 1: “3+130”城市区划及其站点分布 (●代表空气质量监测站点, △代表气象站点)
(图中黄色区域为京津冀及周边地区“2+36”城市, 橙色区域为汾渭平原 13 市, 紫色区域为长三角地区, 灰色区域为“其他城市”)

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 133 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 [16-20]。

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 [21]。该方法

基于“3+130”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 PM₁₀ 浓度变化及与其他三种人为污染物 CO₂、NO₂ 和 SO₂ 的协方差矩阵，辅以 PM₁₀ 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 2-3、图 4、图 5和图 6-7分别展示了“3+130”市 PM_{2.5} 经气象调整后的季节平均浓度时间序列图、季节平均浓度地图、一年和六年累计降幅、年度平均浓度及排名。图 8-9还展示了 PM_{2.5} 经气象调整后的季节 90% 分位数浓度时间序列图。根据上述六图一表，我们可以总结出 PM_{2.5} 浓度如下特征：

• 季度评估

一般来讲，PM_{2.5} 浓度在冬季最高，春秋两季次之，夏季最低。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。

2017 年春季“3+130”城市 PM_{2.5} 浓度均值（标准误差）为 51.6(1) 微克/立方米，2023 年下降至 40.8(0.7) 微克/立方米，年均下降 1.8 微克/立方米。与 2019 年春季浓度均值 45.7(0.9) 微克/立方米相比，下降 4.9(0.6) 微克/立方米；与 2022 年春季浓度均值 36.6(0.7) 微克/立方米相比，上升 4.2(0.4) 微克/立方米。与 2022 年春季相比，“3+130”城市中，有 7 个城市 PM_{2.5} 浓度均值显著下降（本报告的显著下降或增加均指在 5% 统计学显著水平下），占比 5.3%，降幅平均值为 9.1%；有 83 个城市显著上升，占比 62.4%，升幅平均值为 21.3%。2023 年春季，中卫平均浓度最高，为 64.7 微克/立方米；锡林郭勒盟平均浓度最低，为 15.9 微克/立方米。有 97 个城市平均浓度超过国家年平均浓度二级标准。西安为本季度 PM_{2.5} 同比改善幅度最大城市，平均浓度相比 2022 年同期的 47.3 微克/立方米下降 13.0%；锡林郭勒盟为 PM_{2.5} 浓度同比升幅最大城市，平均浓度相比去年同期的 9.5 微克/立方米上升 67.7%。此外还有 36 个城市升幅超过 20%，其中包括 12 个重点城市，分别为京津冀及周边地区的 6 个城市（唐山、天津、廊坊、保定、秦皇岛、北京），汾渭平原的渭南，以及长三角地区的 5 个城市（苏州、宿迁、嘉兴、合肥、舟山）。PM_{2.5} 浓度显著上升城市主要集中于江西、浙江、河南三省，分别有 10、10、9 个城市浓度上升。

2017 年夏季“3+130”城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值(标准误差)为 37.4(0.9) 微克/立方米, 2023 年下降至 22.8(0.4) 微克/立方米, 年均下降 2.4 微克/立方米。与 2019 年夏季浓度均值 29.7(0.6) 微克/立方米相比, 下降 6.9(0.4) 微克/立方米; 与 2022 年夏季浓度均值 22(0.4) 微克/立方米相比, 上升 0.8(0.2) 微克/立方米。与 2022 年夏季相比, “3+130”城市中, 有 30 个城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值显著下降, 占比 22.6%, 降幅平均值为 10.8%; 有 56 个城市显著上升, 占比 42.1%, 升幅平均值为 18.5%。2023 年夏季, 中卫平均浓度最高, 为 37.7 微克/立方米; 黄山平均浓度最低, 为 10.8 微克/立方米。有 2 个城市平均浓度超过国家年平均浓度二级标准。石家庄为本季度 $\text{PM}_{2.5}$ 同比改善幅度最大城市, 平均浓度相比 2022 年同期的 32.5 微克/立方米下降 22.2%; 此外还有 1 个城市降幅超过 20%, 为常州。锡林郭勒盟为 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度同比升幅最大城市, 平均浓度相比去年同期的 6.9 微克/立方米上升 81.5%。此外还有 19 个城市升幅超过 20%, 其中包括 7 个重点城市, 分别为北京、汾渭平原的 2 个城市(吕梁、临汾), 以及长三角地区的 4 个城市(合肥、绍兴、宿迁、淮南)。 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度显著上升城市主要集中于江西、安徽、浙江三省, 分别有 11、7、7 个城市浓度上升。

2017 年秋季“3+130”城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值(标准误差)为 52.7(1.3) 微克/立方米, 2023 年下降至 37.9(0.9) 微克/立方米, 年均下降 2.5 微克/立方米。与 2019 年秋季浓度均值 46.2(1) 微克/立方米相比, 下降 8.3(0.5) 微克/立方米; 与 2022 年秋季浓度均值 36.7(1.1) 微克/立方米相比, 上升 1.2(0.6) 微克/立方米。与 2022 年秋季相比, “3+130”城市中, 有 38 个城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值显著下降, 占比 28.6%, 降幅平均值为 16.9%; 有 58 个城市显著上升, 占比 43.6%, 升幅平均值为 25%。2023 年秋季, 安阳平均浓度最高, 为 59.7 微克/立方米; 锡林郭勒盟平均浓度最低, 为 8.7 微克/立方米。有 77 个城市平均浓度超过国家年平均浓度二级标准。张家口为本季度 $\text{PM}_{2.5}$ 同比改善幅度最大城市, 平均浓度相比 2022 年同期的 26.1 微克/立方米下降 36.8%; 此外还有 11 个城市降幅超过 20%, 其中包括 3 个重点城市, 分别为北京和汾渭平原的西安、渭南。连云港为 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度同比升幅最大城市, 平均浓度相比去年同期的 22.4 微克/立方米上升 62.8%。此外还有 35 个城市升幅超过 20%, 其中包括 29 个重点城市, 分别为京津冀及周边地区的 4 个城市(泰安、枣庄、许昌、日照), 汾渭平原的吕梁, 以及长三角地区的 24 个城市。 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度显著上升城市主要集中于江苏、安徽、江西三省, 分别有 13、12、11 个城市浓度上升。

2017 年冬季“3+130”城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值(标准误差)为 85.9(2.6) 微克/立方米, 2023 年下降至 63.1(1.6) 微克/立方米, 年均下降 3.8 微克/立方米。与 2019 年冬季浓度均值 61.1(1.8) 微克/立方米相比, 上升 2(1) 微克/立方米; 与 2022 年冬季浓度均值 62.9(2.1) 微克/立方米相比, 上升 0.2(1) 微克/立方米。与 2022 年冬季相比, “3+130”城市中, 有 50 个城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值显著下降, 占比 37.6%, 降幅平均值为 15%; 有 61 个城市显著上升, 占比 45.9%, 升幅平均值为 23.4%。2023 年冬季, 周口平均浓度最高, 为 101.2 微克/立方米; 锡林郭勒盟平均浓度最低, 为 12.1 微克/立方米。有 125 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 $\text{PM}_{2.5}$ 同比改善幅度最大城市, 平均浓度相比 2022 年同期的 38.4 微克/立方米下降 28.9%; 此外还有 9 个城市降幅超过 20%, 其中包括 8 个重点城市, 分别为京津冀及周边地区的 2 个城市(许昌、濮阳), 和汾渭平原的 6 个城市(运城、渭南、临汾、晋城、西安、长治)。包头为 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度同比升幅最大城市, 平均浓度相比去年同期的 40.9 微克/立方米上升 60.9%。此外还有 29 个城市升幅超过 20%, 其中包括 21 个重点城市, 分别为长三角地区的 20

个城市和汾渭平原的吕梁。PM_{2.5} 浓度显著上升城市主要集中于安徽、江苏、浙江三省，分别有 13、13、11 个城市浓度上升。

- **PM_{2.5} 年度评估：年度变化趋势与城市相对排名**

2017 年“3+130”城市 PM_{2.5} 浓度均值（标准误差）为 56.9(1.3) 微克/立方米，2023 年下降至 41.2(0.8) 微克/立方米，年均下降 2.6 微克/立方米。与 2019 年浓度均值 45.7(1) 微克/立方米相比，下降 4.5(0.4) 微克/立方米；与 2022 年浓度均值 39.6(1) 微克/立方米相比，上升 1.6(0.4) 微克/立方米，四个季节 PM_{2.5} 浓度均较 2022 年上升。

2023 年，PM_{2.5} 呈现高浓度地区浓度下降，低浓度地区浓度回升的总体趋势；其中汾渭平原的改善尤为显著。分区域来看，京津冀及周边“2+36”城市为 2023 年平均浓度最高的重点地区，PM_{2.5} 浓度均值为 48.9(0.9) 微克/立方米，比 2022 年的 49.5(1.2) 微克/立方米下降 0.6(0.5) 微克/立方米，比 2019 年的 56.4(0.9) 微克/立方米下降 7.5(0.6) 微克/立方米。汾渭平原 2023 年浓度均值为 46.2(1.7) 微克/立方米，比 2022 年的 50.5(2.6) 微克/立方米下降 4.3(1.3) 微克/立方米；比 2019 年的 54.4(1.9) 微克/立方米下降 8.2(1.3) 微克/立方米。长三角地区 2023 年浓度均值为 40.5(1.3) 微克/立方米，比 2022 年的 34.7(1.4) 微克/立方米上升 5.8(0.4) 微克/立方米；比 2019 年的 43.2(1.5) 微克/立方米下降 2.7(0.6) 微克/立方米。“其他城市”2023 年浓度均值为 34.3(1) 微克/立方米，比 2022 年的 31.9(1.1) 微克/立方米上升 2.4(0.5) 微克/立方米；比 2019 年的 36.6(1.2) 微克/立方米下降 2.3(0.7) 微克/立方米。

根据图 6 和图 7，2023 年“3+130”城市中，年均 PM_{2.5} 浓度最高的三个城市分别是安阳（56.9 微克/立方米）、新乡（55.7 微克/立方米）和聊城（55.2 微克/立方米）。年均 PM_{2.5} 浓度排名前 10 的城市中，安阳、焦作已连续 5 年排名前 10，渭南已连续 4 年排名前 10，新乡、临汾已连续 3 年排名前 10。2017-2023 年，安阳有四次年均 PM_{2.5} 浓度排名第一，亟需加强治理。2023 年，PM_{2.5} 年均浓度超过 50 微克/立方米的的城市有 27 个，比 2022 年减少 2 个。其中京津冀及周边“2+36”城市有 20 个，与 2022 年持平；汾渭平原 4 个，比 2022 年减少 3 个；长三角地区有 3 个，比 2022 年增加 3 个。年均浓度超过 35 微克/立方米的的城市有 95 个，比 2022 年的 79 个增加 16 个。其中京津冀及周边“2+36”城市有 37 个，比 2022 年增加 1 个；汾渭平原 12 个，与 2022 年持平；长三角地区有 23 个，比 2022 年增加 7 个；“其他城市”有 23 个，比 2022 年增加 8 个。年均浓度低于 25 微克/立方米的的城市有 4 个，为黄山、张家口、舟山、锡林郭勒盟，比 2022 年减少 8 个。2023 年年均 PM_{2.5} 浓度在 35 微克/立方米到 50 微克/立方米的的城市与 2022 年相比有所增加，浓度高于 50 微克/立方米和低于 25 微克/立方米的的城市均减少，说明在高污染城市改善的同时，低浓度城市出现反弹。

从图 5 中展示的累计降幅来看，相比 2017 年，2023 年“3+130”城市中，有 130 个城市年均 PM_{2.5} 浓度呈现不同程度下降，有 3 个城市年均 PM_{2.5} 浓度上升，分别为鄂尔多斯、乌兰察布、中卫。PM_{2.5} 六年累计降幅的城市均值为 26.2% (0.8%)。有 8 个城市累计降幅超过 40%，分别为邯郸、石家庄、邢台、晋城、吕梁、西安、池州、赣州；降幅最大的 20 个城市主要位于安徽、山西、江西、河北。相比 2022 年，“3+130”城市中，有 44 个城市年均 PM_{2.5} 浓度下降，有 89 个城市年均 PM_{2.5} 上升。PM_{2.5} 浓度升幅的城市均值为 6.7% (1.1%)，升幅最大的 20 个城市主要位于浙江、江苏、安徽。

- **PM_{2.5} 极端污染 (90% 分位数)**

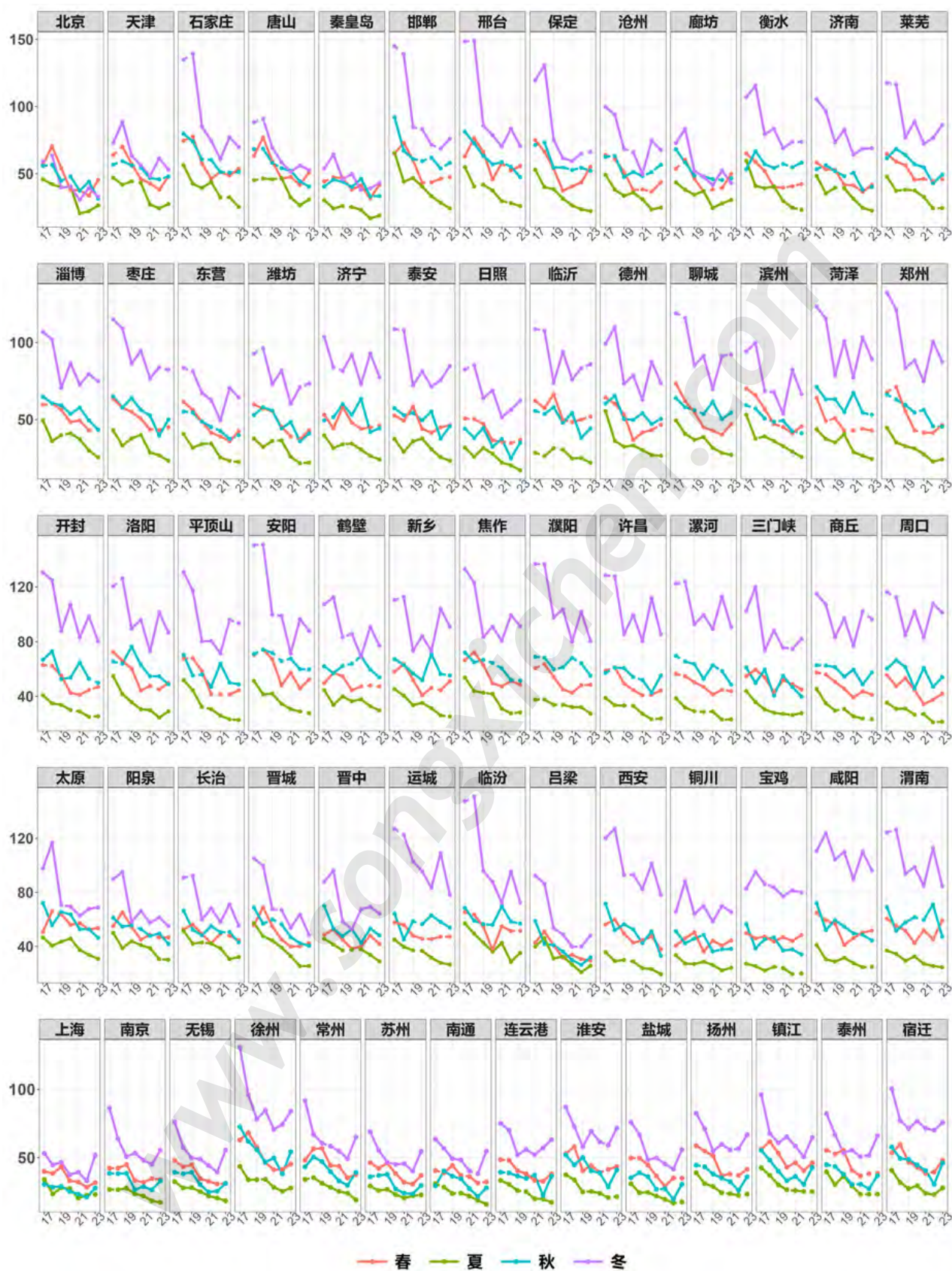


图 2: “3+130”城市气象调整后 2017 年至 2023 年 $PM_{2.5}$ 季节平均浓度 (微克/立方米) 变化序列图, 图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

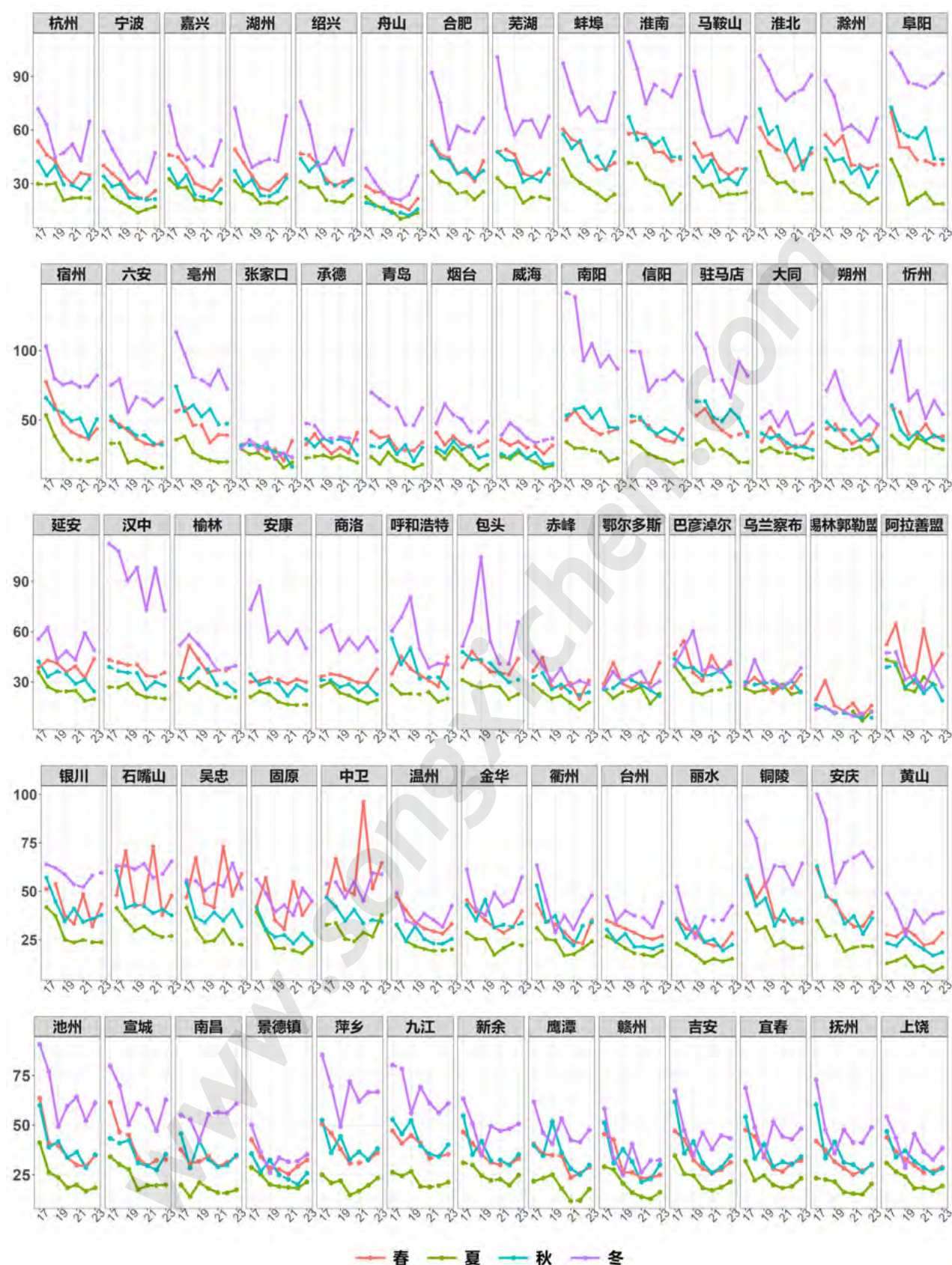


图 3: “3+130” 城市气象调整后 2017 年至 2023 年 $PM_{2.5}$ 季节平均浓度 (微克/立方米) 变化序列图, 图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

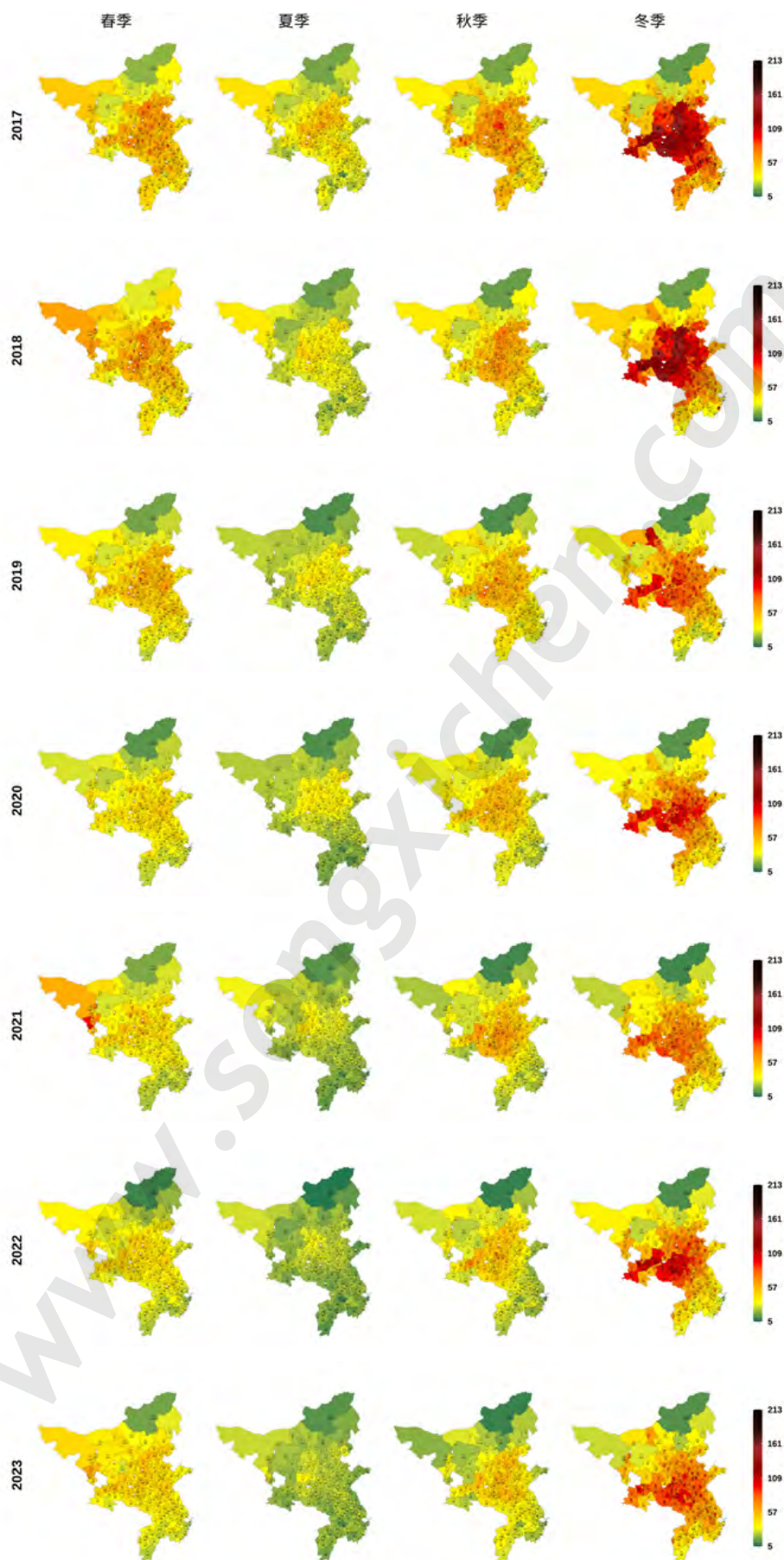


图 4: “3+130” 城市气象调整后 2017 年至 2023 年 PM_{2.5} 季节平均浓度 (微克/立方米)

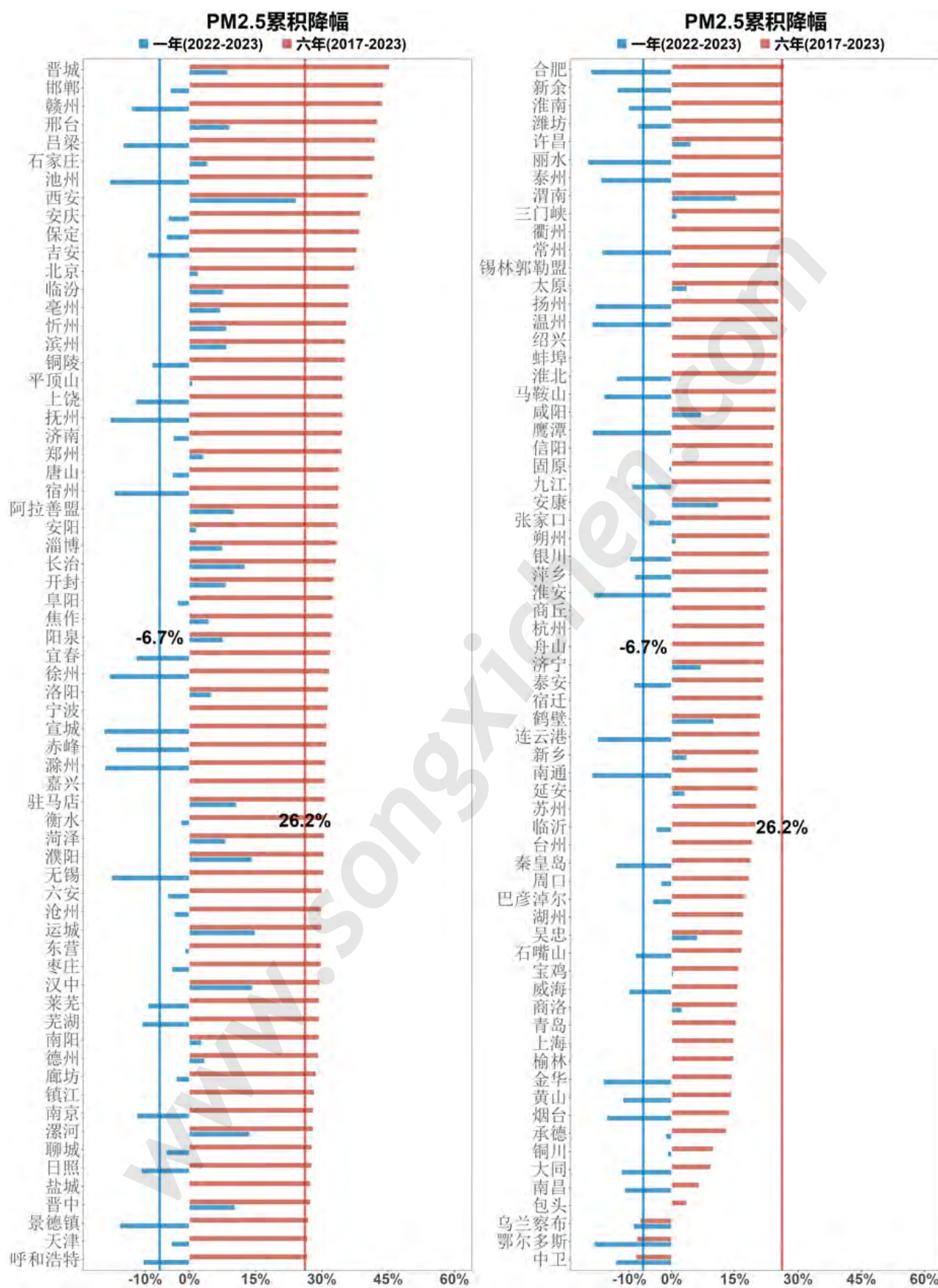


图 5: “3+130”城市气象调整后 PM_{2.5} 浓度过去一年(蓝色)、六年(红色)的累计降幅, 蓝色和红色竖线分别代表“3+130”城市的一年和六年平均降幅
(注: 负数代表平均浓度相对升高)

城市	2013年	排名	2014年	排名	2015年	排名	2016年	排名	2017年	排名	2018年	排名	2019年	排名	2020年	排名	2021年	排名	2022年	排名	2023年	排名
安阳	NA		102.7	● 8	91.5	● 16	94	● 4	85.7	● 4	85.2	● 1	70.1	● 1	61.8	● 1	56.7	● 2	57.8	● 7	56.9	● 1
新乡	NA		NA		104.8	● 2	82.8	● 13	70.2	● 29	69.9	● 18	54	● 43	53	● 34	55.4	● 8	57.8	● 8	55.7	● 2
聊城	NA		102	● 9	103.2	● 5	86.9	● 8	76.4	● 12	69.2	● 20	58.2	● 17	57.1	● 16	51.5	● 23	52.5	● 21	55.2	● 3
焦作	NA		86.9	● 23	90.7	● 17	86	● 9	81.3	● 6	76	● 8	63.9	● 4	61.7	● 2	54.8	● 9	57.5	● 10	54.9	● 4
周口	NA		89.1	● 19	94	● 12	63.7	● 47	66.9	● 38	64.3	● 38	57.6	● 21	54.8	● 24	51.3	● 25	53.3	● 18	54.6	● 5
商丘	NA		NA		85.2	● 25	71.6	● 31	70.2	● 31	65.2	● 30	56.1	● 33	57	● 18	50.2	● 30	54.6	● 17	54.6	● 6
咸阳	NA		62.8	● 50	73.1	● 40	90.5	● 5	72.1	● 21	66.4	● 26	62.3	● 7	59.3	● 6	53.3	● 16	58.4	● 6	54.3	● 7
临汾	NA		71.1	● 36	64.4	● 54	89.1	● 7	84.6	● 5	80.8	● 5	62.4	● 6	54.3	● 28	39.9	● 1	58.5	● 5	54	● 8
渭南	NA		66.8	● 46	67	● 50	84.9	● 10	72.7	● 19	66.9	● 25	58.1	● 19	58.8	● 7	55.9	● 3	63.7	● 1	53.9	● 9
洛阳	NA		72.4	● 35	83.1	● 27	75	● 25	78.3	● 9	74.4	● 9	65.5	● 2	58.5	● 10	51.3	● 24	56.4	● 12	53.6	● 10
淮北	NA		NA		61.8	● 60	59.1	● 59	70.6	● 28	59.6	● 52	55.8	● 34	50.7	● 41	49.7	● 34	46.9	● 41	53	● 11
徐州	84.8	● 13	68	● 42	65.9	● 52	60.6	● 55	77.5	● 11	65	● 34	56.4	● 32	53	● 32	47.5	● 42	44.8	● 48	52.9	● 12
濮阳	NA		NA		85.3	● 24	71.9	● 30	75.9	● 13	76.5	● 7	61.4	● 9	60.9	● 3	55.8	● 6	61.6	● 2	52.8	● 13
菏泽	NA		99.2	● 11	97.7	● 9	77.5	● 18	75.5	● 14	66.3	● 27	56.9	● 28	59.8	● 5	54.1	● 13	57.1	● 11	52.4	● 14
平顶山	NA		91.2	● 18	101.5	● 7	75.3	● 23	80.2	● 7	71.3	● 12	56.7	● 29	49.9	● 45	50.7	● 28	52.7	● 19	52.3	● 15
许昌	NA		NA		88	● 21	69.3	● 39	70.8	● 27	70.8	● 13	57.2	● 25	57.8	● 12	50.1	● 31	54.7	● 16	52.2	● 16
鹤壁	NA		NA		72.3	● 41	75.3	● 24	65.9	● 42	65.1	● 33	60	● 13	57.6	● 13	55.9	● 4	57.8	● 9	52	● 17
漯河	NA		NA		90.3	● 18	73.4	● 28	71.7	● 22	68.9	● 21	59	● 14	56.9	● 19	55.6	● 7	59.8	● 4	51.6	● 18
邯郸	131.6	● 3	111.8	● 4	91.7	● 15	83.6	● 11	91.9	● 1	80.8	● 4	63.2	● 5	56.6	● 21	52.6	● 19	49.4	● 31	51.5	● 19
莱芜	NA		96.8	● 13	89.4	● 19	76.9	● 19	73	● 18	70.3	● 17	58.9	● 15	57.3	● 15	51.5	● 22	47.1	● 39	51.5	● 20
运城	NA		NA		75.5	● 36	70.3	● 34	73.5	● 17	65.8	● 29	61.7	● 8	58.6	● 9	55.8	● 5	60.5	● 3	51.5	● 21
临沂	NA		NA		76	● 34	62.8	● 49	63.7	● 51	61.3	● 43	57.5	● 23	55.4	● 23	50.9	● 26	49.2	● 33	51	● 22
郑州	109.3	● 8	103.4	● 7	101.2	● 8	77.6	● 17	77.8	● 10	72.7	● 11	57.8	● 20	54.3	● 29	50	● 32	52.6	● 20	50.9	● 23
淮南	NA		NA		54.6	● 87	55.9	● 67	69	● 36	62.1	● 42	55.2	● 37	53.8	● 30	53.4	● 15	46.1	● 44	50.8	● 24
开封	NA		85.6	● 26	81.5	● 28	71.5	● 32	75.2	● 15	73.7	● 10	57.3	● 24	58.4	● 11	54.5	● 10	55.2	● 14	50.6	● 25
枣庄	NA		93.3	● 15	93.6	● 13	73.2	● 29	71.6	● 24	64.4	● 37	60.8	● 11	60.4	● 4	50.4	● 29	48.3	● 36	50.2	● 26
石家庄	152.4	● 1	115.5	● 3	88.7	● 20	106.3	● 1	86.4	● 3	83.4	● 3	60.7	● 12	56.3	● 22	49	● 37	52.3	● 22	50.1	● 27
泰安	NA		78.2	● 29	74.2	● 39	64.2	● 44	64	● 49	59.8	● 50	55.1	● 38	53.1	● 31	49.7	● 33	45.9	● 45	50	● 28
邢台	148.7	● 2	119.3	● 2	102.4	● 6	96.4	● 3	86.9	● 2	84.7	● 2	64.3	● 3	54.8	● 25	54.1	● 12	54.9	● 15	49.9	● 29
太原	NA		73.2	● 34	59.2	● 68	71.3	● 33	66.8	● 39	69.8	● 19	60.9	● 10	58.8	● 8	52.5	● 20	51.7	● 23	49.8	● 30
宿州	NA		NA		68.8	● 47	70.1	● 35	75	● 16	59.5	● 53	51.8	● 49	47.5	● 53	46.2	● 48	42.4	● 56	49.6	● 31
宿迁	NA		NA		67.4	● 48	53.8	● 72	63.2	● 52	54.5	● 59	48.6	● 58	48.5	● 51	43.6	● 54	40.8	● 63	49.4	● 32
衡水	123.6	● 5	109.4	● 5	104.3	● 3	90.3	● 6	71.3	● 25	70.5	● 16	56.9	● 27	54.6	● 26	48.9	● 38	48.5	● 35	49.4	● 33
德州	NA		107.6	● 6	106.2	● 1	81.2	● 14	69.8	● 33	68	● 23	52.4	● 48	49.6	● 49	47.2	● 43	51.2	● 25	49.4	● 34
南阳	NA		87	● 22	75	● 37	60.9	● 54	69.8	● 34	70.7	● 15	57.6	● 22	57	● 17	53.4	● 14	50.7	● 28	49.3	● 35
保定	127.8	● 4	133.4	● 1	104	● 4	105.4	● 2	79.7	● 8	77.6	● 6	55.5	● 35	46.3	● 55	44.8	● 53	46.6	● 42	49	● 36
中卫	NA		NA		48.7	● 96	47	● 93	45.1	● 101	49.2	● 76	39.5	● 89	42	● 67	50.9	● 27	43.2	● 51	48.9	● 37
阜阳	NA		NA		55.5	● 85	69.2	● 40	72.3	● 20	60.1	● 48	52.8	● 47	51.5	● 39	53	● 17	47.4	● 38	48.7	● 38
三门峡	NA		75.1	● 33	80.4	● 31	64	● 45	65.5	● 43	66.3	● 28	54.4	● 41	50	● 44	52.4	● 21	49.2	● 32	48.6	● 39
蚌埠	NA		NA		70.2	● 45	61.7	● 52	64.7	● 47	55.1	● 58	51.4	● 51	46.2	● 56	43	● 57	40.3	● 64	48.5	● 40
沧州	102.5	● 9	88.2	● 20	71.7	● 43	75.4	● 22	68.8	● 37	64.1	● 39	50.3	● 52	47.9	● 52	41.8	● 59	46.6	● 43	48.2	● 41
济宁	NA		86.6	● 24	95.7	● 10	66	● 43	61.5	● 55	52.8	● 62	58.4	● 16	56.9	● 20	52.7	● 18	51.6	● 24	48	● 42
淄博	NA		94.4	● 14	93.1	● 14	76.1	● 21	70.2	● 30	64.8	● 35	56.5	● 31	57.4	● 14	54.2	● 11	50.5	● 29	46.7	● 43
晋中	NA		NA		60.5	● 63	61.4	● 53	63	● 53	60.8	● 45	47	● 61	45.3	● 60	47	● 44	51	● 26	45.7	● 44
宝鸡	NA		60.8	● 55	63.1	● 57	60.1	● 56	54.1	● 75	51.3	● 67	50.2	● 53	49.7	● 48	46.2	● 49	45.7	● 46	45.5	● 45
驻马店	NA		NA		80.6	● 30	63.9	● 46	65.4	● 45	64.8	● 36	51.8	● 50	49.9	● 46	46.9	● 45	50.7	● 27	45.3	● 46
潍坊	NA		77.4	● 31	77	● 32	68.5	● 41	60.8	● 57	60.9	● 44	55.1	● 39	51.9	● 35	43.4	● 55	41.5	● 60	44.8	● 47
镇江	70.2	● 20	67.5	● 44	63	● 58	50.8	● 85	62.5	● 54	53.6	● 60	46.1	● 66	42	● 66	41.8	● 60	36.8	● 70	44.8	● 48
亳州	NA		NA		65.9	● 53	63.4	● 48	69.9	● 32	62.9	● 41	53.7	● 45	50.3	● 42	46.9	● 47	48.1	● 37	44.7	● 49
滨州	NA		86	● 25	81.3	● 29	78.5	● 16	69.1	● 35	65.1	● 32	53.8	● 44	49.9	● 47	45.2	● 51	48.8	● 34	44.7	● 50
信阳	NA		79.7	● 27	72.1	● 42	56.7	● 65	58.9	● 63	58.1	● 55	46.7	● 64	45.1	● 61	45	● 52	44.5	● 49	44.7	● 51
石嘴山	NA		51.7	● 62	46.2	● 103	46.9	● 94	53.3	● 78	52.6	● 63	44.1	● 71	45.5	● 59	49.3	● 35	40.9	● 62	44.4	● 52
淮安	72.4	● 19	67.2	● 45	60.3	● 64	51.7	● 78	57.4	● 67	52.4	● 64	43.4	● 74	44.8	● 62	40.9	● 63	37.5	● 68	44.4	● 53
天津	94.7	● 12	92.1	● 16	74.4	● 38	74.1	● 26	60.2	● 59	65.1	● 31	55.4	● 36	50.1	● 43	41.2	● 62	42.4	● 55	44.1	● 54
唐山	111.3	● 6	97.5	● 12	84.5	● 26	76.8	● 20	66.3	● 41	70.8	● 14	58.2	● 18	51.5	● 38	45.9	● 50	42.2	● 57	43.8	● 55
长治	NA		NA		76.6	● 33	69.7	● 38	65.4	● 44	60.6	● 46	50.1	● 54	51.9	● 37	49.1	● 36	50	● 30	43.7	● 56
济南	NA		91.2	● 17	95.5	● 11	73.6	● 27	66.4	● 40	60.4	● 47	54.4	● 40	53	● 33	46.9	● 46	41.9	● 58	43.4	● 57
阳泉	NA		67.6	● 43	55.3	● 86	57	● 63	64	● 48	63.4	● 40	53.1	● 46	51.2	● 40	48.2	● 40	47	● 40	43.4	● 58
铜川	NA		62.7	● 51	56.1	● 83	53.2	● 74	47.7	● 94	50.9	● 71	46.7	● 63	45.8	● 58	41.3	● 61	42.6	● 54	43	● 59
合肥	96.4	● 11	79.2	● 28	67.4	● 49	58.5	● 60	58.5	● 64	49.3	● 75	41.6	● 79	39.5	● 75	39.8	● 67	36	● 74	42.9	● 60
廊坊	110	● 7	99.7	● 10	86.8	● 23	70	● 36	59.6	● 61	60.1	● 49	45.4	● 68	42.4	● 64	37.6	● 75	41.3	● 61	42.5	● 61
东营	NA		77.7	● 30	87.6	● 22	69.9</															

城市	2013年	排名	2014年	排名	2015年	排名	2016年	排名	2017年	排名	2018年	排名	2019年	排名	2020年	排名	2021年	排名	2022年	排名	2023年	排名
吴忠	NA		NA		46.4	102	52.3	76	49.5	84	47.4	81	38.1	100	39.8	73	47.8	41	43.9	50	41.2	66
滁州	NA		NA		68.8	46	59.4	57	59.6	62	51.2	69	47.8	60	40.9	70	40.3	65	34.6	81	41.2	67
泰州	NA		NA		63.3	56	54.1	71	55.5	70	48.4	79	45.8	67	39	77	35.3	86	35.2	78	41.1	68
银川	51	28	54.4	59	51.5	91	56.1	66	53.5	76	49.4	74	38.9	93	37.8	82	39.9	66	37.4	69	41.1	69
萍乡	NA		NA		58.8	70	58.4	61	53.4	77	43.1	94	38.5	96	37.6	84	36.6	82	37.8	67	41.1	70
包头	NA		NA		48.9	95	54.6	68	42.4	108	46.5	85	54	42	39.9	72	34.5	87	31.3	98	40.9	71
芜湖	NA		65.3	47	58.7	71	50.3	86	57.4	66	48.2	80	43.4	75	37.7	83	38.7	72	36.6	71	40.5	72
常州	79.8	17	70	39	60.5	62	51.3	82	54.3	74	52.3	65	48.9	56	42.7	63	39.3	69	34.6	82	40.3	73
安庆	NA		NA		57.9	75	58.3	62	64.9	46	52.1	66	42.5	78	38.3	81	39.4	68	38	66	39.8	74
湖州	NA		NA		56	84	45.2	100	47.5	97	36.8	110	32.4	116	27.8	124	28	115	29.4	107	39.4	75
九江	NA		NA		52.8	90	51.5	80	51.6	82	47.3	82	45	69	42.3	65	37.2	79	36	73	39.4	76
忻州	NA		NA		56.5	82	66.8	42	60.9	56	59.6	51	42.6	77	47.1	54	42	58	42.8	53	39.2	77
晋城	NA		NA		63.9	55	62.7	50	71.7	23	68.3	22	56.7	30	51.9	36	43.3	56	42.9	52	39.2	78
汉中	NA		NA		56.8	80	51.2	83	55.4	71	53.3	61	48.8	57	49.3	50	38.4	73	45.5	47	39	79
连云港	69.5	22	61.5	54	58.2	74	43.4	106	49.1	89	46.9	83	38.8	94	38.5	78	35.7	85	33	89	38.8	80
铜陵	NA		NA		59.3	67	53.5	73	59.8	60	49	77	46.2	65	38.4	79	40.3	64	35.7	75	38.7	81
杭州	NA		NA		62.3	59	51.7	79	49.4	87	43.2	93	39.3	91	32.9	105	33.1	91	31.9	93	38.5	82
金华	NA		NA		59.2	69	47.2	92	44.5	104	35.2	114	35.9	106	32.3	106	31.1	104	32.8	91	38.1	83
朔州	NA		NA		50.8	93	62.6	51	49.5	86	51.3	68	44.1	72	39.7	74	37.4	78	38.4	65	38	84
日照	NA		61.6	53	71.2	44	59.1	58	52.3	81	49.9	73	46.7	62	41.4	69	36.7	81	34.1	84	37.8	85
宣城	NA		NA		49.3	94	54.3	69	54.7	72	46.9	84	41.3	81	35.6	92	34.2	88	31.6	95	37.7	86
池州	NA		NA		38.9	124	52.3	75	63.9	50	45.7	86	38.6	95	36.4	88	37.6	76	31.7	94	37.4	87
绍兴	NA		NA		57.8	76	47.6	90	49.3	88	43.4	92	37.4	101	31.1	109	31.9	97	29.8	105	36.9	88
南昌	NA		NA		45.2	106	43.1	108	39.5	116	31.6	124	34.3	108	35.2	94	32.7	94	33.2	88	36.9	89
六安	NA		NA		59.5	66	47.4	91	52.6	80	51.2	70	40.5	86	40.8	71	38.9	71	35.1	79	36.8	90
苏州	75	18	68.5	40	57.6	78	46.5	97	45.1	100	40.1	103	39.4	90	33.4	104	30.5	108	29.1	108	36	91
新余	NA		NA		41.4	117	49.5	88	48.9	91	39.2	105	34.1	109	33.8	102	33.1	92	31.9	92	36	92
衢州	NA		NA		46.9	99	44.8	101	47.7	95	34.8	118	30.9	118	27.4	125	23.5	129	29	109	35.4	93
青岛	NA		55.7	58	56.7	81	43.9	104	41.6	110	37.8	108	40.1	87	33.7	103	31.4	103	27.5	114	35.2	94
巴彦淖尔	NA		NA		44.7	109	42.2	110	42.5	107	43.9	91	39.7	88	31.1	110	36	83	33.6	86	35.1	95
大同	NA		42.2	67	37.1	128	40.1	118	38.6	119	42.1	97	37.2	102	36.3	89	31.8	98	31.3	96	35	96
南京	83.9	15	75.5	32	58.3	72	46.7	95	48.5	92	42.8	95	40.5	85	34.2	100	32.7	93	31.2	99	34.9	97
盐城	63.9	25	59.4	57	54.4	88	43.3	107	48	93	45	88	38.4	98	33.8	101	30.3	110	28.3	111	34.8	98
宜春	NA		NA		43.4	113	51.8	77	50.6	83	37.2	109	33.4	111	32.2	107	30.2	111	30.7	100	34.4	99
延安	NA		53.6	61	46.1	104	43.9	103	43.1	106	41.4	101	36.3	104	35.9	91	34.1	89	35.4	77	34.3	100
秦皇岛	66.7	24	60.5	56	46.6	100	51	84	42.3	109	45.4	87	40.7	83	38.4	80	37.1	80	30.3	101	34.3	101
北京	84.1	14	87.7	21	75.8	35	78.6	15	54.5	73	58.2	54	44.7	70	41.8	68	31.6	99	34.8	80	34.1	102
无锡	79.9	16	70.4	38	61.3	61	51.4	81	49	90	41.7	99	40.6	84	34.8	95	31	105	29	110	34.1	103
固原	NA		NA		37.1	127	35.5	122	44.8	103	41.6	100	30.4	120	30.3	114	33.8	90	33.8	85	34	104
吕梁	NA		NA		47.6	97	56.8	64	58.4	65	56.3	56	41.5	80	37.3	85	32.5	95	29.4	106	33.8	105
上海	60.4	26	54.3	60	53.6	89	43.5	105	39.4	117	33.8	120	36.7	103	30.9	113	28.8	113	26.3	118	33.6	106
嘉兴	NA		NA		57.7	77	45.4	99	47.5	96	38.3	106	36.1	105	29.9	115	27.5	118	26.9	117	32.9	107
呼和浩特	NA		NA		41	119	40.7	115	44.9	102	44.3	90	47.9	59	34.7	96	31.5	100	29.8	104	32.9	108
南通	67.1	23	64.5	48	57	79	44.7	102	41.1	111	41.1	102	38.5	97	36	90	31.5	102	27.5	113	32.7	109
吉安	NA		NA		43.8	111	49.7	87	52.7	79	37.9	107	33.4	110	30.9	111	26.7	121	29.9	102	32.7	110
抚州	NA		NA		39.8	122	46.5	96	49.5	85	35.3	113	32.6	115	30.9	112	28	114	27.4	115	32.3	111
商洛	NA		NA		43.9	110	38.4	121	37.9	120	39.9	104	33.3	112	34.5	98	30.7	106	32.8	90	32	112
烟台	NA		50.1	64	46.9	98	40.7	116	36.5	124	35.6	112	39.3	92	34.2	99	30.6	107	27.3	116	31.5	113
榆林	NA		NA		37.7	126	32.6	128	36.7	121	41.9	98	41	82	36.4	87	31.5	101	31.3	97	31.3	114
鹰潭	NA		NA		42.5	115	42.1	112	41	112	34.9	117	38.1	99	35.5	93	26.5	122	26.1	119	31	115
安康	NA		61.6	52	50.8	92	42.2	111	39.8	115	42.7	96	34.9	107	34.6	97	30	112	34.2	83	30.4	116
承德	52	27	51.4	63	41.5	116	39.9	119	34.8	125	35.1	116	32.7	114	29.9	116	32.3	96	29.9	103	30.3	117
温州	NA		NA		45.2	105	41.5	113	40.5	113	31	127	30.2	122	28.7	119	26.7	120	25.5	121	30.3	118
乌兰察布	NA		NA		43.6	112	34.6	126	28.1	130	32	123	28.5	125	27.3	126	27.6	127	27.7	112	30.2	119
阿拉善盟	NA		NA		36.3	129	34	127	45.5	99	48.5	78	31	117	29.8	117	35.9	84	33.5	87	30.1	120
鄂尔多斯	NA		NA		26.6	132	24.3	132	26.8	132	31.1	126	28.4	126	28.9	118	30.3	109	24.5	123	29	121
景德镇	NA		NA		45.1	107	41.1	114	39.3	118	30.6	128	26.7	128	26.3	128	24.6	126	24.8	122	28.7	122
上饶	NA		NA		45.1	108	42.9	109	44	105	35.2	115	30.7	119	31.3	108	27.5	119	25.6	120	28.7	123
台州	NA		NA		43.3	114	35.2	123	34.8	126	28.8	129	29.8	123	26.3	127	25.3	124	23.4	125	28.1	124
宁波	NA		NA		46.4	101	38.8	120	40.5	114	33.9	119	30.2	121	24.2	131	23.5	128	22.1	129	27.8	125
丽水	NA		NA		40.1	121	34.7	125	36.6	123	27.9	130	25.8	130	24.4	130	24.4	127	22.6	127	27.1	126
威海	NA		42.2	66	39.5	123	35	124	31.1	127	31.4	125	33.2	113	28.1	123	27.7	116	23.8	124	26.2	127
赣州	NA		NA		41.2	118	46.4	98	46	98	33.6	121	27.4	127	28.6	121	21.2	131	22.9	126	25.9	128
赤峰	NA		47.4	65	38.5	125	40.3	117	36.7	122	35.9	111	25.9	129	28.6	122	24.6	125	21.7	131	25.3	129
黄山	NA		NA		40.2	120	31.1	130	28.2	129	25.7	131	25.5	131	25.3	129	21.9	130	21.7	130	24.2	130
张家口	42.5	29	NA		34.3	130	32.2	129	30.7	128	32.2	122	29.5	124	28.6	120	25.4	123	22.3	128	23.5	131
舟山	NA		NA		31.9	131	25.4	131	27.2	131	23	132	20.4	132	17.2	132	15					

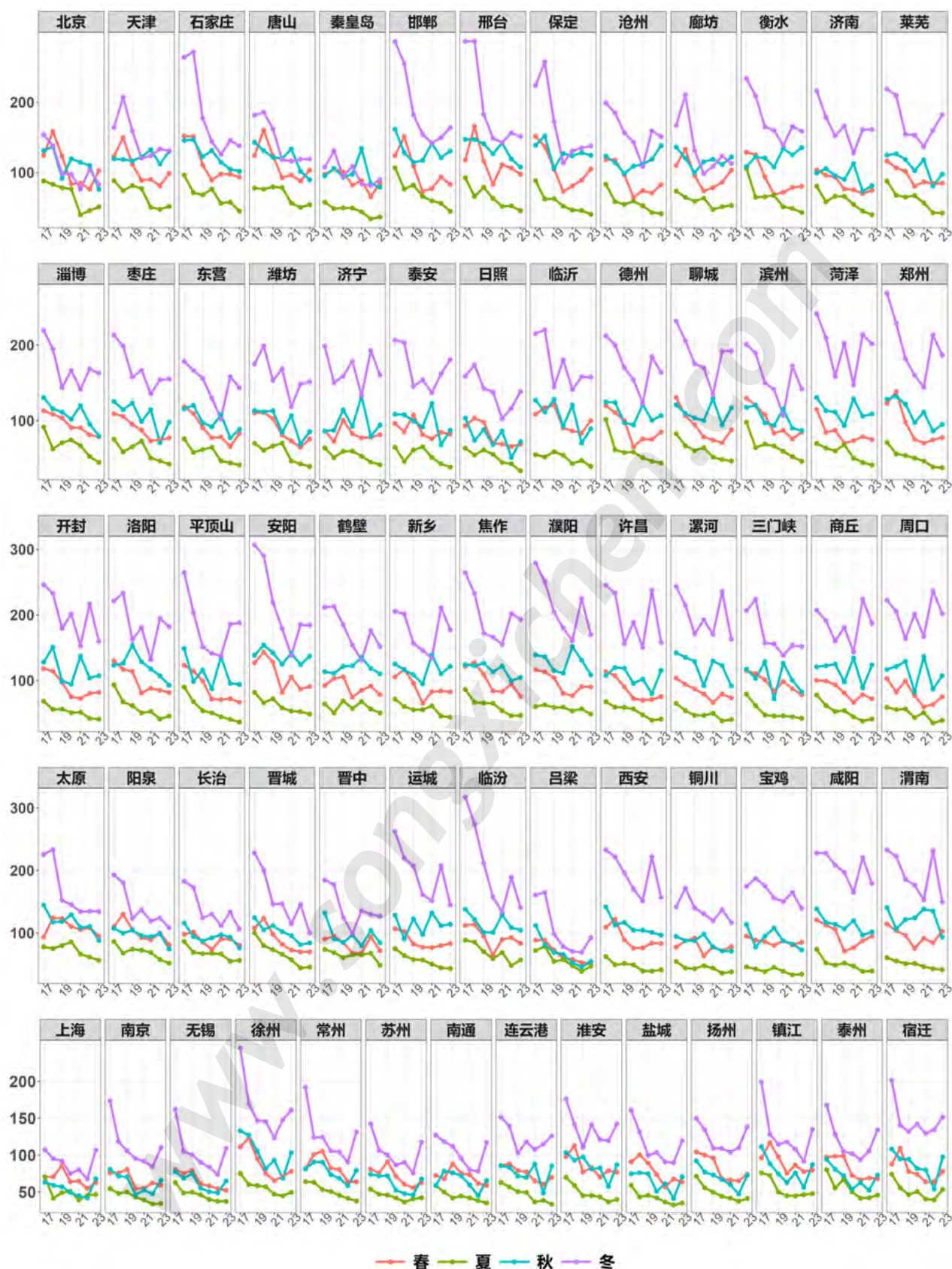


图 8: “3+130” 城市气象调整后 2017 年至 2023 年 $PM_{2.5}$ 季节 90% 分位数浓度 (微克/立方米) 变化序列图

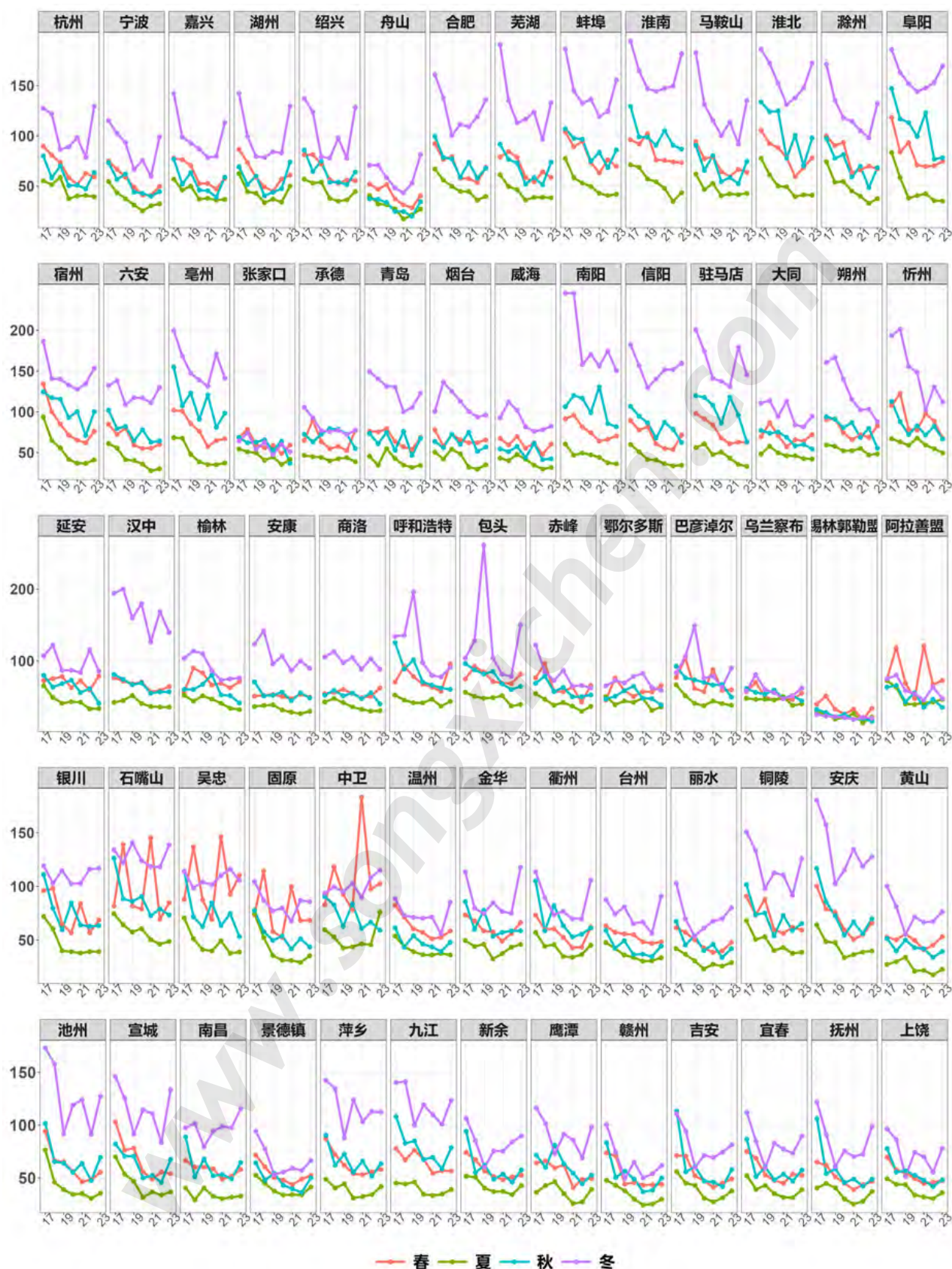


图 9: “3+130” 城市气象调整后 2017 年至 2023 年 PM_{2.5} 季节 90% 分位数浓度 (微克/立方米) 变化序列图

我们也计算了经过气象调整的 90% 分位数浓度，它们代表了最严重的 10% 污染情况。百分位数浓度在空气污染的短期健康风险控制领域有重要应用，常用于日尺度空气质量标准的对标分析，如美国的考核指标为三年平均的 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度的年 98% 分位数不超过 35 微克/立方米。图 8-9 展示了研究区域城市过去 28 个季节（2017 年春季至 2023 年冬季）经气象调整的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度 90% 分位数随时间变化的情况以及给定季节的时间序列。从 90% 分位数角度，各城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度仍具有同均值浓度类似的区域和季节特征。

我们以按季度计算的 $\text{PM}_{2.5}$ 90% 分位数浓度的全年最大值（以下简称“90% 分位数浓度”）作为极端污染的衡量指标，这在数值上与 $\text{PM}_{2.5}$ 原始日均浓度年第 92-99 分位值水平相当，可作为判断城市 $\text{PM}_{2.5}$ 日均值达标情况的评估指标。我们在附录中图 69 给出各城市 $\text{PM}_{2.5}$ 季节 90% 分位数浓度最大值折算的年百分位数浓度结果供读者参考。按照国家标准， $\text{PM}_{2.5}$ 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 $\text{PM}_{2.5}$ 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。2023 年，有 123 个城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 90% 分位数浓度最大值产生在冬季。有 9 个城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 90% 分位数浓度最大值产生在春季，包括北京和 8 个非重点城市（呼和浩特、赤峰、鄂尔多斯、锡林郭勒盟、阿拉善盟、吴忠、张家口、承德），均为 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度较低城市；除北京外，均位于大兴安岭和太行山脉以西。此外，廊坊市 $\text{PM}_{2.5}$ 90% 分位数浓度最大值产生在秋季，从气象条件来说不属于 $\text{PM}_{2.5}$ 极端污染高发的季节，应当加强排放控制。

2017 年“3+130”城市 $\text{PM}_{2.5}$ 的 90% 分位数浓度值（标准误差）为 168.3(5) 微克/立方米，2023 年下降至 127.7(3.1) 微克/立方米，年均下降 6.8 微克/立方米。与 2019 年 90% 分位数浓度值 125.9(3.8) 微克/立方米相比，上升 1.8(2.5) 微克/立方米；与 2022 年 90% 分位数浓度值 124.1(4.4) 微克/立方米相比，上升 3.6(2.5) 微克/立方米，极端污染状况持续反弹。

在区域和城市尺度，2023 年， $\text{PM}_{2.5}$ 90% 分位数浓度最高的城市为周口 (202.4 微克/立方米)、菏泽 (201.8 微克/立方米)、焦作 (193.3 微克/立方米)。污染排名前 30 位的城市中，周口、商丘、菏泽已连续 2 年排名前 10 位；周口、咸阳、漯河、濮阳、焦作、菏泽、郑州已连续 3 年排名前 20 位。河南、山东为本年度 $\text{PM}_{2.5}$ 极端污染较严重省份，分别有 13、9 个城市浓度排名前 30 位。 $\text{PM}_{2.5}$ 90% 分位数浓度最低的城市为锡林郭勒盟 (33.9 微克/立方米)、张家口 (59.2 微克/立方米)、赣州 (61.7 微克/立方米)。污染排名后 30 位的城市中，舟山、秦皇岛、吕梁为重点城市，极端污染状况控制得相对较好。内蒙古、江西、浙江、陕西为本年度 $\text{PM}_{2.5}$ 极端污染相对较轻省份，分别有 7、6、4、4 个城市进入污染排名后 30 位。

相比 2022 年，“3+130”城市有 58 个城市降幅超过 1%，占比 43.6%，降幅平均值为 11.9%；渭南为 $\text{PM}_{2.5}$ 极端污染改善幅度最大城市，90% 分位数浓度下降 35.3%。有 75 个城市升幅超过 1%，占比 56.4%，升幅平均值为 28%，包头为升幅最大城市，90% 分位数浓度上升 91.5%。安徽和江苏为 $\text{PM}_{2.5}$ 90% 分位数浓度上升较明显的省份，分别有 15、13 个城市浓度上升，平均升幅为 26.5%、31.6%。重点城市中，汾渭平原的渭南、晋城、运城、西安、临汾、长治、吕梁，长三角地区的南京、盐城、滁州、芜湖、嘉兴、常州、马鞍山、镇江、无锡、南通、舟山、苏州、湖州、上海、杭州、绍兴、宁波升幅超过 30%，需重点关注。京津冀及周边“2+36”城市的许昌、漯河、开封、濮阳，汾渭平原的渭南、晋城、运城、西安、临汾、长治、吕梁降幅超过 20%，改善较为明显。

2023 年，我国“3+130”城市中 $\text{PM}_{2.5}$ 90% 分位数浓度低于 75 微克/立方米的的城市仅有 8 个，占比

6%，包括内蒙古自治区的阿拉善盟、鄂尔多斯、赤峰、乌兰察布、锡林郭勒盟，江西省的赣州、景德镇，和河北省张家口，均属于非重点城市。以上达标城市中，乌兰察布、张家口、景德镇、赣州、赤峰、锡林郭勒盟已连续 3 年达标。其余绝大多数城市， $PM_{2.5}$ 日均浓度仍远远未达到标准要求， $PM_{2.5}$ 重污染仍然对公众的生命健康造成严重威胁。

• 五种风向下的平均污染浓度：不同城市有利减轻污染的风向不同

本报告延续从第五份报告开始计算的每个城市五个主要风向下的污染物气象调整浓度，这可以让我们探究各城市的污染输入和输出方向。通过图 4（详情可见 pdf 放大图片），我们发现由于 $PM_{2.5}$ 在静风条件下不易扩散，各个季节静风下的 $PM_{2.5}$ 浓度都显著高于其它风向。对于北部长城一线的大同、张家口、北京和承德来说，西北风普遍最有利于 $PM_{2.5}$ 的扩散，东南风普遍不利。对于环渤海城市来说，北侧边缘的秦皇岛东面临海，平时东风较强，较西风更有利于 $PM_{2.5}$ 的扩散；渤海内侧的唐山、天津则与河北北部相近，在西北风下最有利于污染物扩散。河北沧州及山东半岛的滨州、东营、潍坊、烟台和威海北邻渤海、黄海，故东北风最有利于 $PM_{2.5}$ 的扩散；而日照、青岛东南面沿海，东南风最有利于 $PM_{2.5}$ 的扩散。对于江淮地区临海城市，由于东临黄海、东海，故东风最有利于 $PM_{2.5}$ 的扩散。另外，各个城市污染源分布也影响着不同风向下 $PM_{2.5}$ 的扩散情况（对各城市感兴趣人员可从图 4 查阅细节）。

3.2 PM_{10}

PM_{10} 是指悬浮在空气中空气动力学当量直径小于或等于 10 微米的颗粒物，又称可吸入颗粒物。在 2013 年之前， PM_{10} 是我国使用的主要空气质量指标，用于计算城市的蓝天天数。2013 年 $PM_{2.5}$ 取代 PM_{10} 成为大气污染的主要指标。2014 年及以后， PM_{10} 缺失比例有所下降。 PM_{10} 数据缺失高的一个原因是 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 数值可能会发生“倒挂”，即 PM_{10} 的观测值低于 $PM_{2.5}$ 的观测值。因为 $PM_{2.5}$ 是 PM_{10} 的重要组成部分， PM_{10} 的浓度值应该大于 $PM_{2.5}$ ，但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 PM_{10} 的缺失进行插补，这样做会低估 PM_{10} 浓度，但比直接将倒挂的 PM_{10} 观测设为缺失的计算误差小。另一种方法是对 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 关系进行建模，以推算缺失的 PM_{10} 水平。本报告将使用前一种方法。

我国目前的 PM_{10} 平均浓度标准如表 2 所示。美国环境保护署关于 PM_{10} 的一、二级标准均是 24 小时平均浓度 150 微克/立方米，但其明确规定 3 年内平均每年不达标的次数不能超过一次。这实际上是非常严格的标准。

表 2: 我国目前 PM_{10} 平均浓度标准

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

图 10-11、图 12、图 13 和图 14-15 分别展示了“3+130”市 PM_{10} 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、一年和六年累计降幅、年度平均浓度及排名。根据上述四图一表，我们可以总结出 PM_{10} 浓度如下几个特征：

• 季度评估

同 $PM_{2.5}$ 一样， PM_{10} 浓度也有比较明显的季节特征，其中夏季污染最轻，冬季或春季最严重。此外， PM_{10} 还有独特的、不同于 $PM_{2.5}$ 的特征。一方面， PM_{10} 浓度最高的季节与城市的地理位置密切相关。河北中南部、河南、山东中西部、山西中南部、陕西中南部和安徽中北部，冬季的 PM_{10} 浓度最高；河北北部及京津地区、山西北部，春季浓度最高；陕西北部、江西大部分城市和苏沪城市冬春季 PM_{10} 浓度相差不大。另一方面，研究区域绝大部分城市和年份春季 PM_{10} 浓度要高于秋季。

2017 年春季“3+130”城市 PM_{10} 浓度均值（标准误差）为 103.5(2.2) 微克/立方米，2023 年下降至 95.3(2.1) 微克/立方米，年均下降 1.4 微克/立方米。与 2019 年春季浓度均值 93.8(2.2) 微克/立方米相比，上升 1.5(1.1) 微克/立方米；与 2022 年春季浓度均值 82.4(2.2) 微克/立方米相比，上升 12.9(0.9) 微克/立方米，反弹明显。与 2022 年春季相比，“3+130”城市中，有 2 个城市 PM_{10} 浓度均值显著下降，占比 1.5%，降幅平均值为 11.3%；有 98 个城市显著上升，占比 73.7%，升幅平均值为 24.9%。2023 年春季，中卫平均浓度最高，为 153.2 微克/立方米；赣州平均浓度最低，为 47.3 微克/立方米。有 106 个城市平均浓度超过国家年平均浓度二级标准。西安为本季度 PM_{10} 同比改善幅度最大城市，平均浓度相比 2022 年同期的 131.2 微克/立方米下降 14.1%；呼和浩特为浓度同比升幅最大城市，平均浓度相比去年同期的 71.4 微克/立方米上升 89.9%。此外还有 51 个城市升幅超过 20%，其中包括 25 个重点城市，分别为京津冀及周边地区的 11 个城市（保定、潍坊、济南、滨州、东营、唐山、廊坊、沧州、北京、天津、秦皇岛），汾渭平原的 2 个城市（太原、临汾），长三角地区的 12 个城市（合肥、宿迁、宿州、连云港、镇江、南通、上海、宁波、盐城、嘉兴、苏州、舟山）。 PM_{10} 浓度显著上升城市主要集中于山东、江苏、安徽三省，分别有 16、13、12 个城市浓度上升。

2017 年夏季“3+130”城市 PM_{10} 浓度均值（标准误差）为 71(1.8) 微克/立方米，2023 年下降至 45.9(1.1) 微克/立方米，年均下降 4.2 微克/立方米。与 2019 年夏季浓度均值 56.9(1.2) 微克/立方米相比，下降 11(1) 微克/立方米；与 2022 年夏季浓度均值 46(1.1) 微克/立方米相比，下降 0.1(0.6) 微克/立方米。与 2022 年夏季相比，“3+130”城市中，有 49 个城市 PM_{10} 浓度均值显著下降，占比 36.8%，降幅平均值为 11.3%；有 40 个城市显著上升，占比 30.1%，升幅平均值为 17.4%。2023 年夏季，中卫平均浓度最高，为 103.1 微克/立方米；舟山平均浓度最低，为 24.7 微克/立方米。有 5 个城市平均浓度超过国家年平均浓度二级标准。西安为本季度 PM_{10} 同比改善幅度最大城市，平均浓度相比 2022 年同期的 54.9 微克/立方米下降 23%；此外还有 2 个城市降幅超过 20%，分别为邯郸、鹤壁。锡林郭勒盟为浓度同比升幅最大城市，平均浓度相比去年同期的 23.2 微克/立方米上升 51.7%。此外还有 10 个城市升幅超过 20%，其中包括 2 个重点城市，分别为汾渭平原的临汾，长三角地区的淮南。 PM_{10} 浓度显著上升城市主要集中于江西、内蒙古、河北三省，分别有 8、6、5 个城市浓度上升。

2017 年秋季“3+130”城市 PM_{10} 浓度均值（标准误差）为 95.8(2.3) 微克/立方米，2023 年下降至 70.9(1.6) 微克/立方米，年均下降 4.2 微克/立方米。与 2019 年秋季浓度均值 89.7(1.9) 微克/立方米相比，下降 18.8(1) 微克/立方米；与 2022 年秋季浓度均值 68.3(1.7) 微克/立方米相比，上升

2.6(0.8) 微克/立方米。与 2022 年秋季相比,“3+130”城市中,有 25 个城市 PM_{10} 浓度均值显著下降,占比 18.8%,降幅平均值为 13.5%;有 59 个城市显著上升,占比 44.4%,升幅平均值为 18.8%。2023 年秋季,临汾平均浓度最高,为 105.8 微克/立方米;舟山平均浓度最低,为 29.1 微克/立方米。有 67 个城市平均浓度超过国家年平均浓度二级标准。西安为本季度 PM_{10} 同比改善幅度最大城市,平均浓度相比 2022 年同期的 97.5 微克/立方米下降 30%;此外还有 3 个城市降幅超过 20%,分别为乌兰察布、渭南、驻马店。连云港为浓度同比升幅最大城市,平均浓度相比去年同期的 46.6 微克/立方米上升 44.1%。此外还有 23 个城市升幅超过 20%,其中包括 21 个重点城市,分别为京津冀及周边地区的 3 个城市(枣庄、日照、济宁),长三角地区的 18 个城市(蚌埠、南京、马鞍山、苏州、徐州、上海、淮北、宿州、淮安、南通、常州、芜湖、镇江、扬州、盐城、泰州、宿迁、连云港)。 PM_{10} 浓度显著上升城市主要集中于江苏、安徽、山东三省,分别有 13、12、10 个城市浓度上升。

2017 年冬季“3+130”城市 PM_{10} 浓度均值(标准误差)为 131.4(3.4) 微克/立方米,2023 年下降至 95.9(2) 微克/立方米,年均下降 5.9 微克/立方米。与 2019 年冬季浓度均值 87.6(2.4) 微克/立方米相比,上升 8.3(1.4) 微克/立方米;与 2022 年冬季浓度均值 104.1(2.9) 微克/立方米相比,下降 8.2(1.3) 微克/立方米。与 2022 年冬季相比,“3+130”城市中,有 74 个城市 PM_{10} 浓度均值显著下降,占比 55.6%,降幅平均值为 16.1%;有 34 个城市显著上升,占比 25.6%,升幅平均值为 17.8%。2023 年冬季,平顶山平均浓度最高,为 144.6 微克/立方米;锡林郭勒盟平均浓度最低,为 29.7 微克/立方米。有 112 个城市平均浓度超过国家年平均浓度二级标准。汉中为本季度 PM_{10} 同比改善幅度最大城市,平均浓度相比 2022 年同期的 132.7 微克/立方米下降 33.5%;此外还有 21 个城市降幅超过 20%,其中包括 15 个重点城市,分别为京津冀及周边地区的 9 个城市(衡水、许昌、开封、滨州、漯河、沧州、郑州、洛阳、北京),汾渭平原的 6 个城市(西安、渭南、临汾、运城、吕梁、咸阳)。湖州为浓度同比升幅最大城市,平均浓度相比去年同期的 64.3 微克/立方米上升 49.7%。此外还有 9 个城市升幅超过 20%,其中包括 7 个重点城市(马鞍山、嘉兴、绍兴、杭州、上海、宁波、湖州),均位于长三角地区。 PM_{10} 浓度显著上升城市主要集中于浙江、安徽、江苏三省,分别有 11、7、7 个城市浓度上升。

• PM_{10} 年度评估:年度变化趋势与城市相对排名

2017 年“3+130”城市 PM_{10} 浓度均值(标准误差)为 100.4(2.2) 微克/立方米,2023 年下降至 77(1.5) 微克/立方米,年均下降 3.9 微克/立方米。与 2019 年浓度均值 82(1.8) 微克/立方米相比,下降 5(0.8) 微克/立方米;与 2022 年浓度均值 75.2(1.9) 微克/立方米相比,上升 1.8(0.6) 微克/立方米,浓度上升主要发生在春秋两季。

2023 年, PM_{10} 呈现与 $\text{PM}_{2.5}$ 相似的年际变化趋势,即高浓度地区浓度下降,低浓度地区浓度回升。分区域来看,京津冀及周边“2+36”城市 PM_{10} 浓度均值为 88.9(1.3) 微克/立方米,比 2022 年的 90.9(1.9) 微克/立方米下降 2(0.9) 微克/立方米,比 2019 年的 100.4(1.9) 微克/立方米下降 11.5(1.5) 微克/立方米。汾渭平原为 2023 年平均浓度最高的重点地区, PM_{10} 浓度均值为 94.9(2.6) 微克/立方米,比 2022 年的 101.8(3.1) 微克/立方米下降 6.9(2.6) 微克/立方米;比 2019 年的 100.9(3.2) 微克/立方米下降 6(3.4) 微克/立方米。长三角地区 2023 年浓度均值为 68.6(2.2) 微克/立方米,比 2022 年的 61.5(2.4) 微克/立方米上升 7.1(0.6) 微克/立方米;比 2019 年的 71.5(2.5) 微克/立方米下降 2.9(1) 微克/立方米。“其

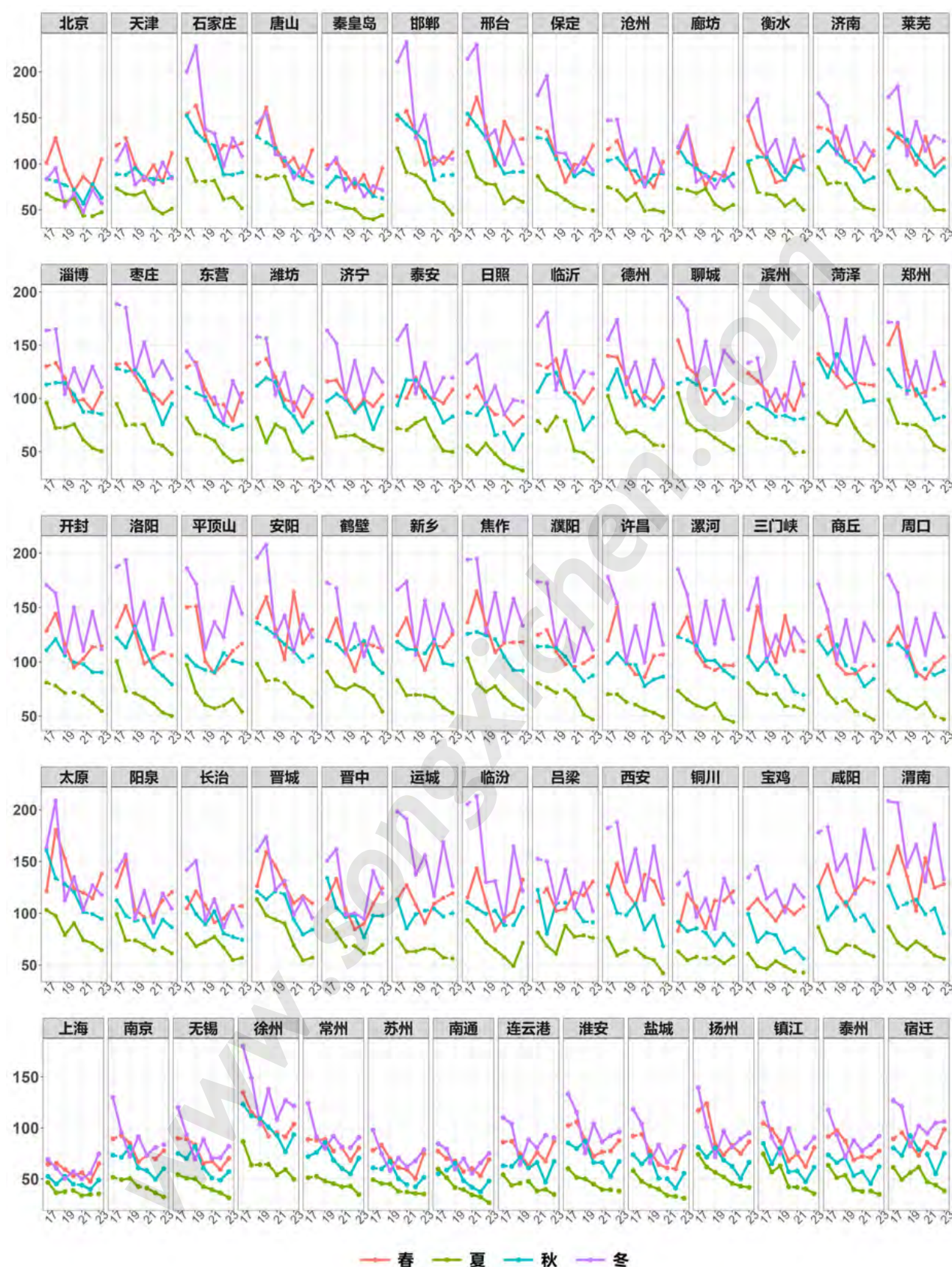


图 10: “3+130”城市气象调整后 2017 年至 2023 年 PM_{10} 季节平均浓度 ($\mu g/m^3$) 变化序列图, 图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

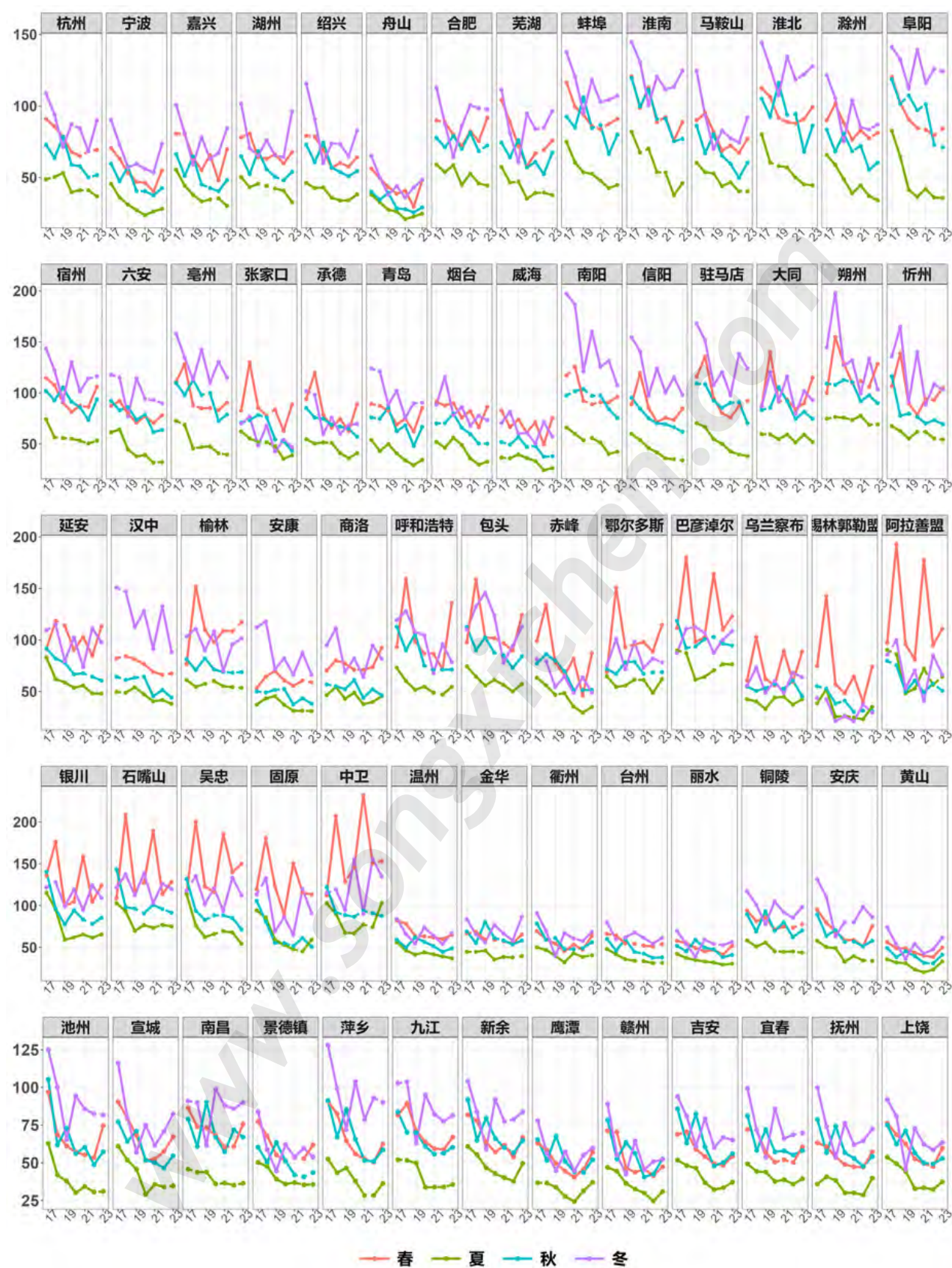


图 11: “3+130”城市气象调整后 2017 年至 2023 年 PM_{10} 季节平均浓度 ($\mu g/m^3$) 变化序列图, 图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

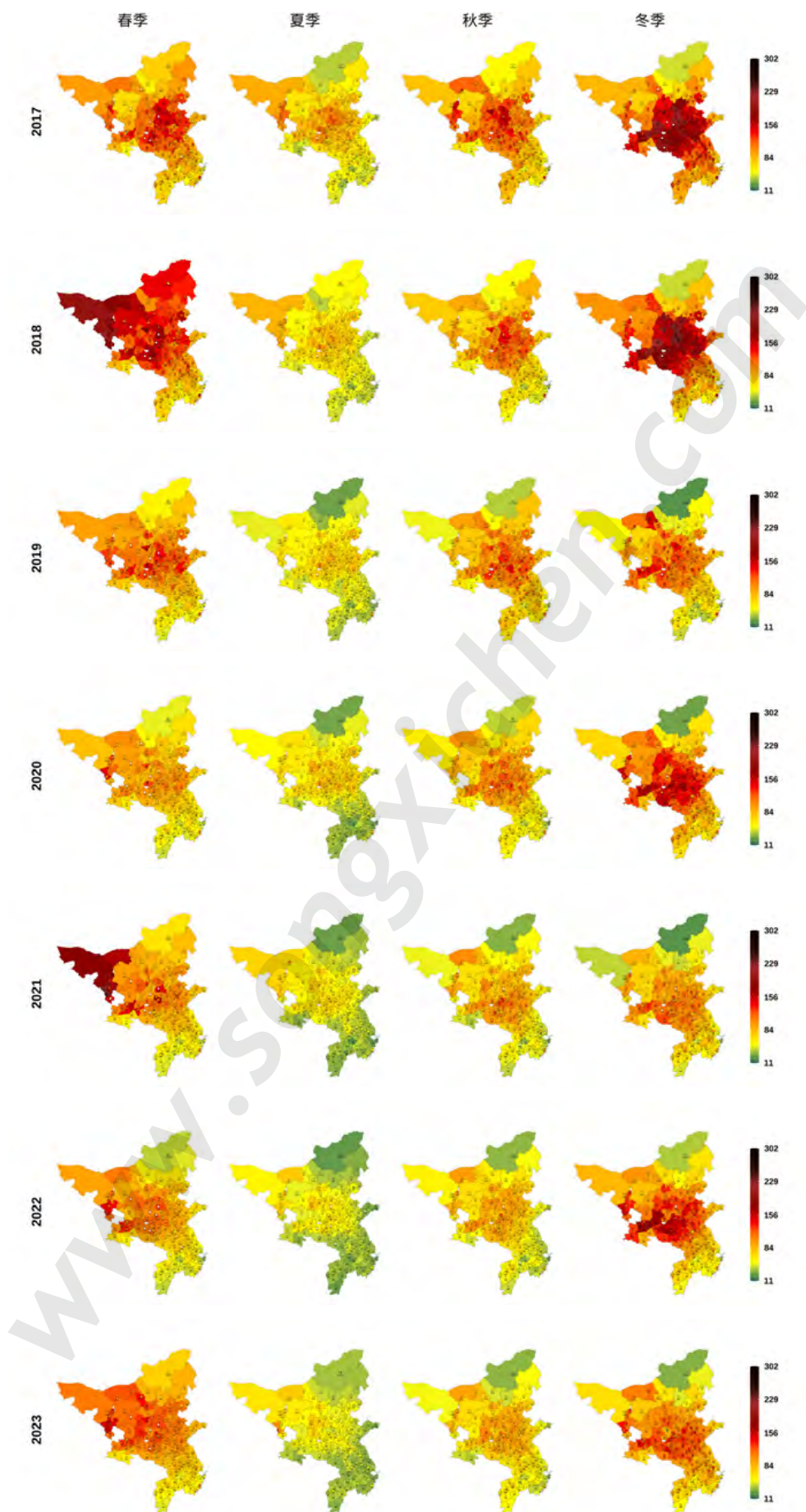


图 12: “3+130” 城市气象调整后 2017 年至 2023 年 PM₁₀ 季节平均浓度 (微克/立方米)

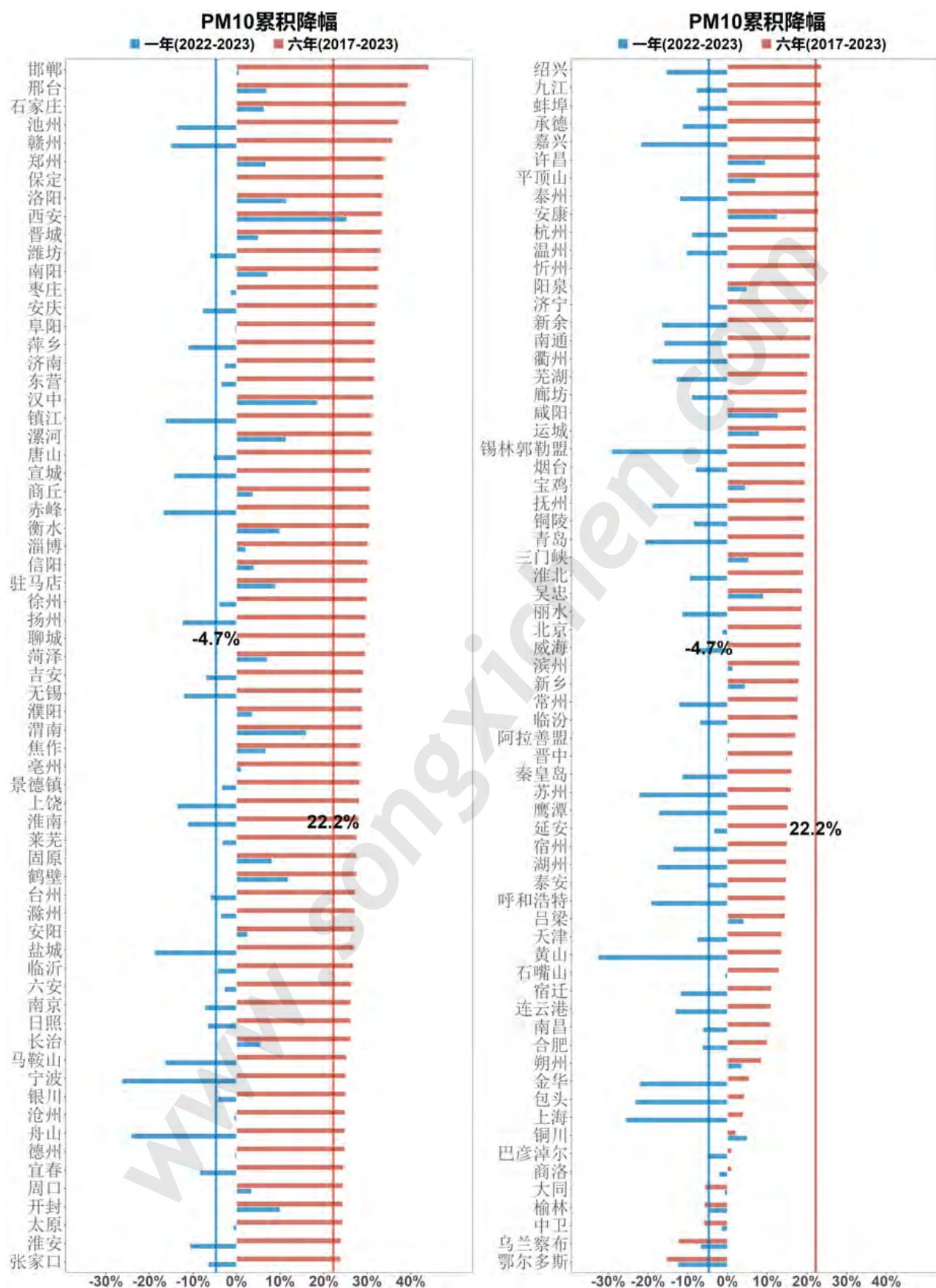


图 13: “3+130”城市气象调整后 PM₁₀ 浓度过去一年（蓝色）、六年（红色）的累计降幅，蓝色和红色竖线分别代表“3+130”城市的一年和六年平均降幅（注：负数代表平均浓度相对升高）

城市	2013年	排名	2014年	排名	2015年	排名	2016年	排名	2017年	排名	2018年	排名	2019年	排名	2020年	排名	2021年	排名	2022年	排名	2023年	排名
中卫	NA		NA		104.5	57	103	59	113	49	127	19	94.7	41	113.6	6	123.4	1	117.9	3	119.7	1
临汾	NA		108.3	54	98.9	67	140.5	15	131.1	17	136.1	9	103.2	22	95.5	40	83.5	49	100.9	21	107.9	2
安阳	NA		161.7	12	160.1	13	160.3	5	142.5	4	145.2	5	115.4	6	110.5	12	113.5	3	106.7	9	104	3
太原	NA		139.5	28	112.3	51	133	20	137.3	9	155.2	3	118.1	5	117.3	3	99.8	15	103	16	103.8	4
石嘴山	NA		130.6	32	118.6	46	113.6	47	119.2	41	134.2	11	99.3	32	108.4	15	116.6	2	103.1	14	103.7	5
咸阳	NA		125.2	38	132	36	158.8	6	129.1	20	122.3	33	107.2	16	111	11	100.7	13	118.5	2	103.4	6
平顶山	NA		149.4	19	158.5	15	125.1	31	134.6	13	122.7	32	91.3	51	93.5	49	97.1	21	111.3	5	103.4	7
晋中	NA		NA		104.3	58	110.5	51	122.8	33	120.5	36	91.9	47	87.7	59	80.7	55	102.3	17	102.7	8
新乡	NA		NA		173.2	4	140.2	16	123.1	31	123.7	29	100	31	106.4	20	105.2	7	105.8	11	101	9
巴彦淖尔	NA		NA		95.7	73	100.5	61	101.7	64	117.7	43	91.4	49	93.6	45	106.3	6	95.9	29	100.6	10
运城	NA		NA		115.1	48	114.2	46	125.4	27	116.7	44	102	26	103.8	27	98.9	16	109.4	6	100.6	11
吕梁	NA		NA		80.5	105	107.1	57	117.1	42	105.7	60	95.7	40	111.1	10	101.9	11	104.5	12	100.2	12
焦作	NA		148.5	20	158.8	14	145.5	13	139.9	8	141.8	6	114.5	9	117.7	2	102.4	10	107.2	7	100	13
聊城	NA		171.4	10	168.8	8	151.2	8	142	5	127	20	105.5	18	106.6	18	97.4	20	100.4	22	99.9	14
渭南	NA		122.2	40	125.9	41	147.7	12	139.9	7	137	7	114	10	113.6	7	112.6	4	118.6	1	99.5	15
菏泽	NA		163.1	11	161.1	12	137.7	17	141	6	126.3	23	115.2	8	124.9	1	105.1	8	107	8	99.4	16
朔州	NA		NA		86.1	91	109.8	52	107	57	134.3	10	111.1	13	106.5	19	95.1	22	101.5	20	97.8	17
吴忠	NA		NA		103	61	108.4	54	119.4	40	126.5	22	92.4	46	97.7	35	109.3	5	106.5	10	96.9	18
银川	111.9	20	113.1	45	111.7	52	116.5	42	128.3	21	123.9	28	83.7	69	95	42	100.6	14	92.1	34	96.1	19
德州	NA		160.1	14	175.1	2	148.8	10	126.5	22	129.1	18	100.3	29	101.2	30	90.1	34	94.7	31	95.1	20
包头	NA		NA		108.4	54	110.7	50	98.8	68	111.5	52	101.7	27	93.6	47	79.1	61	76.8	67	94.6	21
邢台	273.3	2	213.4	2	170.2	7	161.2	3	156	2	157.1	1	118.7	3	104.7	25	97.9	19	101.5	19	94.4	22
莱芜	NA		145.8	25	145.6	24	132.9	21	129.9	19	130	16	106.5	17	106.9	17	101.1	12	91.1	36	94.1	23
石家庄	302.9	1	194.6	4	146.6	22	170.1	1	152.8	3	151.7	4	118.7	4	110	13	91.8	29	99.6	23	93.3	24
阳泉	NA		149.8	18	114.3	49	115.4	44	119.7	38	119.8	39	91.4	50	95.4	41	82.5	51	98.1	26	93.2	25
开封	NA		137.6	30	138.3	31	123.5	33	122.7	34	126.5	21	100.4	28	104	26	94.8	24	103	15	92.7	26
宿州	NA		NA		94.4	77	95.3	66	108.6	55	94.8	72	86	64	89.6	53	82	53	81.2	60	92.3	27
徐州	134.6	13	124.9	39	128.1	40	118.6	38	131.2	16	109.8	55	96.2	39	98.7	33	87.6	40	88.4	42	92	28
枣庄	NA		174	7	163.4	11	137.6	18	135.9	11	129.6	17	111.9	12	112.9	8	94.9	23	90.3	38	91.6	29
周口	NA		147.9	21	139.9	30	115.3	45	121.3	35	119.2	40	97.5	38	93.6	46	86.8	42	94.9	30	91.6	30
鹤壁	NA		NA		130.3	39	132.8	22	125.7	26	125.4	25	100	30	104.7	24	104.3	9	103.4	13	91.1	31
济宁	NA		154.7	16	156.4	16	113.5	48	115.8	47	109	58	91.6	48	94	44	89.2	35	86.5	48	90.5	32
郑州	164	9	172.9	8	179.2	1	148.5	11	136.9	10	132.5	13	103.3	21	105.2	23	93	25	96.9	27	90.4	33
洛阳	NA		126.2	36	136.7	32	128.5	29	135.5	12	132.8	12	115.3	7	107.9	16	92.9	28	101.9	18	90.1	34
泰安	NA		137.1	31	131.2	37	111	49	105.6	60	114	48	104.5	19	105.7	22	90.6	33	85.7	50	89.9	35
铜川	NA		115.7	42	103.3	60	99.7	62	91.6	76	98.8	67	86.6	61	84.3	65	81.2	54	94.4	32	89.7	36
济南	NA		174.7	6	170.9	5	145.3	14	131.5	15	125.7	24	107.7	15	106.2	21	91.1	31	87.3	46	89.7	37
许昌	NA		NA		149.9	18	121	36	116.6	44	120.4	37	90.3	54	94.8	43	79.9	57	98.8	24	89.4	38
淮北	NA		NA		95.5	75	94	68	110.5	52	96.6	69	93.4	43	93.6	48	87.7	38	81.6	59	89.4	39
临沂	NA		NA		149.6	19	122.1	34	121.3	36	125.3	26	112.8	11	108.8	14	90.7	32	85	52	88.7	40
三门峡	NA		137.7	29	140.4	29	127.4	30	109.4	54	122.9	31	98.2	36	95.8	39	98.7	17	93.4	33	88.4	41
淄博	NA		171.5	9	168	9	132.4	23	125.7	25	121.2	35	102.4	24	101.2	31	88.4	37	89.7	40	87.8	42
邯郸	224.8	3	183.9	5	170.2	6	161	4	157.2	1	155.8	2	120.7	2	114.1	5	87.7	39	88.3	43	87.8	43
保定	214.8	4	224	1	167	10	163.6	2	132.4	14	132.4	14	98.6	35	89	56	82.8	50	87.6	45	87.7	44
濮阳	NA		NA		153.6	17	135.6	19	123.1	30	123	30	102.3	25	103.7	28	88.9	36	90.8	37	87.5	45
衡水	213	5	197.6	3	174.9	3	153	7	125.3	28	116.6	45	97.5	37	91.4	51	77.8	65	96.7	28	87.1	46
漯河	NA		NA		146.5	23	129.9	27	126.4	23	122	34	98.6	34	102.5	29	92.9	27	98.2	25	87	47
商丘	NA		NA		134.2	35	124.7	32	125.1	29	114.4	47	94.5	42	97.1	36	84.1	47	90.2	39	86.8	48
滨州	NA		129.8	33	131.1	38	130.2	25	106.1	59	104.2	61	88.2	57	85.3	62	83.7	48	88	44	86.8	49
晋城	NA		NA		149	20	108.3	55	130.2	18	136.3	8	121	1	116.8	4	92.9	26	91.3	35	86.7	50
榆林	NA		NA		87.2	89	82.1	89	80.6	98	97	68	84.8	67	84.5	64	75.7	68	81.6	58	85.3	51
呼和浩特	NA		NA		96.9	71	92.3	75	99.5	67	109.3	56	91	52	80.4	70	68.6	80	71.4	76	85.1	52
唐山	176.7	8	160.5	13	140.5	28	131.7	24	122.9	32	131	15	108.5	14	98.5	34	85.6	45	80.4	61	84.7	53
廊坊	182	7	160	15	142.2	25	116.9	40	105.5	61	113.3	50	85.8	65	81.4	68	75.9	67	77.4	63	84.4	54
淮南	NA		NA		87.9	87	90.5	77	116.8	43	99.2	66	98.8	33	88.5	58	87.1	41	75.4	69	84.1	55
大同	NA		98.8	60	81.6	103	84.2	83	79.2	102	101.2	62	86	63	90.2	52	72.5	74	83.1	54	83.7	56
西安	185.1	6	142.2	27	136.4	33	149	9	125.7	24	123.9	27	103.1	23	111.5	9	98.1	18	112.1	4	83.6	57
天津	153.5	10	144.7	26	124.5	42	109	53	96.4	71	101.2	63	84.5	68	81	69	78	64	77.3	64	83.2	58
忻州	NA		NA		83	97	121.6	35	106.5	58	111	53	79	71	89.2	55	78.6	63	82.7	55	82.9	59
沧州	134.7	12	145.9	24	120.5	44	119	37	110.2	53	112.8	51	89.2	56	88.7	57	71.4	76	82.3	56	82.8	60
长治	NA		NA		121.3	43	115.7	43	110.6	51	109.9	54	90.7	53	96.1	38	82.3	52	86.3	49	81.6	61
驻马店	NA		NA		136.4	34	116.8	41	116	46	115.6	46	87.5	59	84	66	76.7	66	89	41	81.1	62
鄂尔多斯	NA		NA		70.7	122	66.3	123	70.2	117	93.4	74	74.6	82	83.6	67	74.9	71	72	75	81	63
潍坊	NA		147.7	22	141.5	27	129.9	26	120.9	37	117.8	42	103.4	20	96.4	37	79.7	58	76.2	68	80.9	64
亳州	NA		NA		95.9	72	96.4	64	112.9	50	107.5	59	89.7	55	93.1	50	85.7	43	81.8	57	80.9	65

图 14: “3+130” 城市气象调整后 2013 年至 2023 年 PM₁₀ 年平均浓度 (微克/立方米) 年际变化表
(浓度列底纹从红到绿表示年平均浓度由大到小; 排名列前/中/后 1/3 分别用红/黄/绿圆点标记)

城市	2013年	排名	2014年	排名	2015年	排名	2016年	排名	2017年	排名	2018年	排名	2019年	排名	2020年	排名	2021年	排名	2022年	排名	2023年	排名
蚌埠	NA		NA		98.1	69	94.1	67	105.4	62	91.4	76	87.2	60	85.3	61	80.3	56	75.2	70	80.7	66
南阳	NA	153.2	17	141.8	26	117.6	39	119.5	39	118.5	41	92.7	45	100.4	32	91.3	30	86.6	47	80.4	67	
宝鸡	NA	114.9	43	119.6	45	108.2	56	99.8	65	95.1	71	86.3	62	87	60	79.7	59	84.2	53	80.3	68	
延安	NA	126.9	35	101	65	93.2	71	93.9	74	94.4	73	82.6	70	78.4	73	75	70	77.2	65	79.8	69	
东营	NA	147.5	23	147.2	21	129	28	116.4	45	109.2	57	93.3	44	84.6	63	74.1	72	76.8	66	79.5	70	
宿迁	NA	NA	NA	110.4	53	81.8	91	89.4	82	84.6	84	78.7	72	78.8	72	75.4	69	71.1	77	79.5	71	
阜阳	NA	NA	NA	75.8	112	102.2	60	115.7	48	100.2	64	87.9	58	89.4	54	85.6	44	78.6	62	78.9	72	
固原	NA	NA	NA	92.4	82	93	73	108.2	56	120	38	76.6	76	70.8	83	78.7	62	85.4	51	78.4	73	
合肥	120.1	17	109.1	52	95.1	76	84.8	82	85	91	75.3	99	70.4	92	68.2	87	79.2	60	72	74	76.5	74
阿拉善盟	NA	NA	NA	82.5	101	79.6	97	88.2	83	113.6	49	61.8	106	66.3	91	85	46	73.5	71	73.1	75	
铜陵	NA	NA	NA	92.7	80	81.4	93	89.7	81	75.6	98	77.9	73	72.8	77	72.7	73	66.6	79	72.3	76	
淮安	98.6	26	102.9	58	101.1	64	93.9	69	95.2	72	88.1	80	75.2	81	71.8	81	67.1	83	65.3	80	72.3	77
扬州	98.6	27	108.4	53	103.4	59	91.4	76	102.9	63	89.4	77	73.2	85	72.6	78	67.9	81	64.3	83	72.3	78
连云港	120.1	16	112.5	46	101	66	81.8	90	78.3	104	74.3	101	63.8	101	65	97	65.2	85	61.6	87	69.7	79
信阳	NA	127	34	113.7	50	95.6	65	99.6	66	99.7	65	76	79	76.9	75	70.3	78	72.5	73	69.6	80	
芜湖	NA	97.9	61	84.4	94	75.4	106	86.9	84	70.2	106	64	100	61.2	104	62.7	88	61.5	89	69.4	81	
日照	NA	111.9	47	116.9	47	99.3	63	94.1	73	96	70	85.2	66	77.3	74	69.2	79	65.1	82	69.4	82	
青岛	NA	105.3	57	101.9	62	85.7	79	85.8	89	81.6	87	76.7	75	68.6	85	63.1	87	57.3	97	69.2	83	
常州	111.7	21	107.4	55	104.7	56	85.6	80	84	94	76.9	94	75.6	80	70.8	82	66	84	61.6	88	69.1	84
秦皇岛	128.6	14	110.1	50	95.6	74	93.7	70	81.7	97	87.6	81	74.2	83	71.9	80	67.8	82	61.5	90	68.5	85
北京	112	19	121.5	41	101.2	63	104.6	58	83.9	96	91.5	75	70.8	91	68.1	88	58.7	101	67.3	78	68.2	86
马鞍山	NA	107.4	56	88.5	86	77.5	100	90.2	78	77.3	92	71.2	88	65.2	96	64	86	57.9	94	67.4	87	
南昌	NA	NA	NA	82	102	80.6	95	75.5	107	67.2	111	67.2	94	67.5	89	60.6	96	63.4	86	67.3	88	
镇江	122.2	15	114.3	44	88.9	85	83.2	87	97.2	70	77.7	90	76.2	77	66.5	90	62.6	89	57.5	96	66.9	89
商洛	NA	NA	NA	76.5	110	71.6	114	67.2	121	75.3	100	60.4	111	65.7	93	54.2	110	65.1	81	66.5	90	
泰州	NA	NA	NA	107.9	55	92.6	74	86.4	86	76.9	95	70.8	90	62.3	102	61.1	94	59.4	91	66.5	91	
新余	NA	NA	NA	75.8	111	83.8	85	84.7	93	70.5	105	62.3	104	64.6	98	59.8	97	56.8	99	66.2	92	
六安	NA	NA	NA	91.4	84	76.6	103	89.7	80	88.6	79	71.8	87	74.2	76	72.3	75	64.2	84	66	93	
滁州	NA	NA	NA	93.4	79	82.3	88	90.2	79	83.5	86	73.3	84	72	79	71.2	77	63.4	85	65.7	94	
承德	111.7	22	110.1	51	86.5	90	85.2	81	83.9	95	86	82	66.3	96	65.3	95	60.6	95	57.8	95	64.3	95
南京	142.3	11	126.2	37	98.3	68	84	84	86	88	77.2	93	72.2	86	65.3	94	61.4	93	59.1	92	63.4	96
安庆	NA	NA	NA	76.7	109	77.2	101	93.5	75	76	96	63	103	57	113	58.8	100	58.8	93	63.4	97	
湖州	NA	NA	NA	87.4	88	68.1	118	73.7	111	61.7	118	60.9	108	59.7	105	56	105	53.3	107	62.7	98	
盐城	99.6	24	95.4	62	91.9	83	76.9	102	85.6	90	77.5	91	64.8	99	59.5	106	52.8	112	52.6	108	62.5	99
金华	NA	NA	NA	79.7	107	66.8	121	66	123	58.4	122	60.5	110	58.1	110	55.1	107	51.1	113	62.4	100	
杭州	NA	NA	NA	97.7	70	83.6	86	80.4	99	73.5	102	70.4	93	63.4	100	62.1	90	56.9	98	62	101	
萍乡	NA	NA	NA	92.5	81	93.2	72	90.6	77	73	103	67.1	95	65.9	92	52.8	113	55.6	104	61.8	102	
池州	NA	NA	NA	62.2	127	76.5	104	97.5	69	68.1	110	59.4	114	59.4	107	58.9	99	53.8	105	61.2	103	
九江	NA	NA	NA	82.9	98	77.8	99	80	101	78.7	89	63.5	102	63.4	101	57.8	102	56.7	100	61.1	104	
烟台	NA	NA	NA	81.3	65	82.6	100	76.5	105	75.4	108	80	88	76.1	78	69.2	84	61.4	92	56.1	102	
无锡	118.2	18	110.5	49	94.1	78	81.4	92	84.7	92	75.8	97	71.1	89	64.2	99	57	104	53.7	106	60.2	106
乌兰察布	NA	NA	NA	73.3	115	68.6	117	53.5	131	66.7	112	49.4	126	54.3	116	58.9	98	56.3	101	60.1	107	
苏州	93.5	28	93	63	83.7	95	71.7	112	71.5	114	65.8	113	60	112	54.8	115	50.6	117	49.1	116	60	108
绍兴	NA	NA	NA	86	92	71.8	111	78.5	103	68.2	109	61.7	107	55.8	114	55.3	106	51.9	111	59.9	109	
宣城	NA	NA	NA	78.8	108	72.2	110	86.2	87	68.9	107	60.5	109	51.9	121	50	118	52.2	110	59.7	110	
汉中	NA	NA	NA	80.1	106	86.8	78	86.8	85	85.4	83	77.8	74	79.1	71	61.6	91	73.1	72	59.5	111	
嘉兴	NA	NA	NA	83.6	96	73	109	75.8	105	64.3	117	56.4	118	53	120	51.5	114	47.7	118	58.1	112	
衢州	NA	NA	NA	71.1	121	69.4	116	72.2	112	58.7	121	48.8	128	48.1	127	51.1	115	48.1	117	57.2	113	
宜春	NA	NA	NA	64.8	125	80.4	96	75.5	106	61.5	119	56.6	117	57.8	111	53.7	111	52.5	109	56.9	114	
抚州	NA	NA	NA	64.5	126	66.4	122	69.4	118	58.1	124	55	121	53	119	48	120	47	122	55.9	115	
上海	82.7	29	75.8	67	71.5	118	59.5	129	58.1	128	51.8	129	49.9	124	48.4	126	45.9	126	44.4	125	55.8	116
赤峰	NA	NA	NA	82.6	99	78.9	98	80.2	100	88.9	78	64.9	98	62.1	103	54.5	109	47.7	119	55.7	117	
南通	101.8	23	100.3	59	85.3	93	66.8	120	69.1	119	64.8	116	58.6	115	53.7	118	48	121	47.1	121	54.6	118
温州	NA	NA	NA	73.9	114	73.7	108	70.3	116	60.1	120	55.3	120	59.3	108	54.7	108	49.4	115	54.5	119	
张家口	98.7	25	NA	81.5	104	81.1	94	71.6	113	83.8	85	66.1	97	68.3	86	57.1	103	51.2	112	54.5	120	
上饶	NA	NA	NA	73.2	116	71.6	113	74.2	110	65.4	115	55.9	119	53.7	117	48.8	119	46.9	123	53.3	121	
吉安	NA	NA	NA	59.4	129	74.1	107	75.1	109	65.6	114	62.3	105	57.7	112	47.5	123	49.7	114	53.2	122	
鹰潭	NA	NA	NA	68.8	123	64.6	125	60.8	126	50.8	130	49	127	45.1	129	38.4	130	43.9	126	51.5	123	
宁波	NA	NA	NA	71.1	120	61.8	127	66.5	122	55	127	49.7	125	43.6	130	41.6	128	39.4	130	49.8	124	
威海	NA	NA	NA	78.1	66	71.4	119	64.4	126	60.4	127	58.3	123	57.5	116	51.4	122	50.7	116	45.7	125	
景德镇	NA	NA	NA	73.1	117	67.1	119	67.9	120	56.1	125	50.7	123	50.1	123	46.6	125	47.1	120	48.7	126	
安康	NA	NA	NA	83.3	64	74.4	113	64.6	124	63.2	125	68.7	108	59.7	113	58.2	109	47.7	122	55.7	127	
黄山	NA	NA	NA	51.2	132	49.8	131	53.7	130	43	132	40.4	131	40.1	131	33.5	132	35	131	46.4	128	
台州	NA	NA	NA	66.3	124	59.7	128	63.4	124	52.9	128	53	122	50	124	47.3	124	43.5	127	46.1	129	
赣州	NA	NA	NA	60.3	128	70	115	71.4	115	55.7	126	47.2	129	49.2	125	40.5	129	39.8	129	45.8	130	
丽水	NA	NA	NA	58.5	130	54.1	130	55.3	129	47.9	131	45.4	130	46.8	128	45.1	127	40.3	128	44.9	131	
锡林郭勒	NA	NA	NA	52.8	131	43.1	133	53.1	132	72.5	104	35.6	133	35.5	132	35.2	131	33	132	42.6	132	

他城市” 2023 年浓度均值为 68.2(2.5) 微克/立方米, 比 2022 年的 64.5(2.8) 微克/立方米上升 3.7(0.9) 微克/立方米; 比 2019 年的 69.2(2.4) 微克/立方米下降 1(1.1) 微克/立方米。

根据图 14 和图 15, 2023 年“3+130”城市中, 年均 PM_{10} 浓度最高的三个城市分别是中卫 (119.7 微克/立方米)、临汾 (107.9 微克/立方米) 与安阳 (104 微克/立方米)。其中, 中卫已连续 4 年浓度排名前 10, 且 PM_{10} 浓度较 2022 年上升; 安阳已连续 3 年排名前 10; 临汾为近 5 年首次进入浓度排名前 10 位。2023 年, 年均浓度超过 100 微克/立方米的城市有 12 个, 比 2022 年减少 10 个。其中京津冀及周边“2+36”城市有 3 个, 比 2022 年减少 7 个; 汾渭平原 6 个, 比 2022 年减少 2 个; “其他城市”有 3 个, 比 2022 年减少 1 个; 年均浓度超过 70 微克/立方米的城市有 78 个, 比 2022 年增加 1 个。其中京津冀及周边“2+36”城市有 36 个, 与 2022 年持平; 汾渭平原 13 个, 与 2022 年持平; 长三角地区有 11 个, 比 2022 年增加 2 个; “其他城市”有 18 个, 比 2022 年减少 1 个。年均浓度低于 50 微克/立方米的城市有 10 个, 比 2022 年减少 10 个。长三角地区有 2 个, 比 2022 年减少 4 个; “其他城市”有 8 个, 比 2022 年减少 6 个。 PM_{10} 浓度超过 100 微克/立方米和低于 50 微克/立方米的城市数量明显减少, 浓度超过 70 微克/立方米的城市数量没有明显变化。

从图 13 中展示的累计降幅来看, 相比 2017 年, 2023 年“3+130”城市中, 有 128 个城市年均 PM_{10} 浓度呈现不同程度下降, 有 5 个城市年均 PM_{10} 浓度上升, 分别为鄂尔多斯、乌兰察布、中卫、大同、榆林。 PM_{10} 六年累计降幅的城市均值为 22.2% (0.9%), 邯郸累计降幅超过 40%。相比 2022 年, “3+130”城市中, 有 91 个城市年均 PM_{10} 浓度上升, 有 42 个城市年均 PM_{10} 浓度下降。 PM_{10} 浓度升幅的城市均值为 4.7% (0.9%)。

• $PM_{10-2.5}$ 的浓度

“3+130”城市 2017 年至 2023 年各季度 $PM_{10-2.5}$ 平均浓度具有如下特征。

从季节分布来看: $PM_{10-2.5}$ 平均浓度随季节变动明显, 从 2017-2023 年整体来看, 春季浓度最高, 七年平均值为 51.4 微克/立方米; 秋冬两季较高, 七年平均值分别为 37.5 微克/立方米和 37.7 微克/立方米; 夏季浓度最低, 七年平均值仅 27.1 微克/立方米。

从年际变化来看: 2017 年至 2022 年, $PM_{10-2.5}$ 平均浓度整体下降趋势缓慢。2017 年“3+130”城市 $PM_{10-2.5}$ 浓度均值 (标准误差) 为 43.5(1.2) 微克/立方米, 2023 年下降至 35.8(1) 微克/立方米, 年均下降 1.3 微克/立方米。与 2019 年浓度均值 36.3(1) 微克/立方米相比, 下降 0.5(0.6) 微克/立方米; 与 2022 年浓度均值 35.7(1.1) 微克/立方米相比, 上升 0.1(0.4) 微克/立方米。

2023 年京津冀及周边“2+36”城市 $PM_{10-2.5}$ 浓度均值为 40.1(0.7) 微克/立方米, 比 2022 年的 41.4(1) 微克/立方米下降 1.3(0.7) 微克/立方米, 比 2019 年的 44(1.3) 微克/立方米下降 3.9(1.2) 微克/立方米。汾渭平原 2023 年浓度均值为 48.7(2.3) 微克/立方米, 比 2022 年的 51.3(2.7) 微克/立方米下降 2.6(2) 微克/立方米; 比 2019 年的 46.4(2.4) 微克/立方米上升 2.3(2.7) 微克/立方米。长三角地区 2023 年浓度均值为 28.1(1) 微克/立方米, 比 2022 年的 26.9(1.2) 微克/立方米上升 1.2(0.5) 微克/立方米; 比 2019 年的 28.3(1.2) 微克/立方米下降 0.2(0.9) 微克/立方米。“其他城市” 2023 年浓度均值为 33.9(2) 微克/立方米, 比 2019 和 2022 年的 32.6(2.1) 微克/立方米上升 1.3(0.6) 微克/立方米。

从地理分布来看: 地区间差异较大。2023 年宁夏、山西、内蒙古、山东、天津、陕西、河南、河北和

北京全年平均值分别为 57.0、51.6、44.6、39.1、39.1、39.0、38.5、37.9 和 34.1 微克/立方米，而安徽、江苏、江西、上海和浙江全年平均值仅 29.9、27.9、23.2、22.2 和 21.8 微克/立方米。

具体来看，2023 年“3+130”城市中，年均浓度超过 35 微克/立方米的的城市有 65 个，比 2022 年增加 1 个。其中京津冀及周边“2+36”城市有 33 个，比 2022 年增加 2 个；汾渭平原 12 个，比 2022 年减少 1 个；长三角地区有 4 个，比 2022 年增加 1 个；“其他城市”有 16 个，比 2022 年减少 1 个；年均浓度低于 25 微克/立方米的的城市有 32 个，比 2022 年减少 4 个。长三角地区有 10 个，比 2022 年减少 4 个；“其他城市”有 22 个，与 2022 年持平。“3+130”城市中，中卫 PM_{10-2.5} 浓度最高，年平均值为 70.8 微克/立方米，舟山 PM_{10-2.5} 浓度最低，全年平均值为 16.6 微克/立方米；中卫、吕梁、巴彦努尔、朔州、石嘴山、晋中和吴忠年均值超过 55 微克/立方米；舟山、丽水、泰州、安康、赣州和景德镇 6 市则不超过 20 微克/立方米。

3.3 二氧化硫 (SO₂)

二氧化硫 (SO₂) 是一种无色、有刺激性气味的气体，一般认为无毒或者毒性不大，但是 SO₂ 在大气中易被氧化形成 SO₃，再与水分子结合生成硫酸分子，经过均相或非均相成核作用，形成硫酸气溶胶，并同时发生化学反应生成硫酸盐。硫酸和硫酸盐可形成硫酸烟雾和酸性降水，造成较大的危害。SO₂ 之所以被认为是重要的大气污染物，原因就在于它参与了硫酸烟雾和酸雨的形成 [20]。大气中半数由人为源产生。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 SO₂ 的主要来源。其次，燃油、工业排放也有一定贡献。

在“十一五计划”(2006-2010 年) 期间，我国已将 SO₂ 的总量减排任务单独列出。2013 年 9 月，国务院印发的“国十条”明确提出“加快推进集中供热、‘煤改气’、‘煤改电’工程建设”、“加快重点行业脱硫、脱硝、除尘改造工程建设”。2014 年以来，我国在北方地区全面实施散煤综合治理，推进冬季清洁取暖。2015 年，我国对燃煤机组全面实施超低排放和节能改造，以降低发电煤耗和污染排放。这些均是降低大气中 SO₂ 浓度的重要举措。

中国目前 SO₂ 浓度的限值标准如表 3。美国环境保护署关于 SO₂ 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。

表 3: 我国目前 SO₂ 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	
SO ₂	年平均	20	60	微克/立方米
	24 小时平均	50	150	
	1 小时平均	150	500	

图 16-17、图 18、图 19和图 20-21分别展示了“3+130”市 SO₂ 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、一年和六年累计降幅、年度平均浓度及排名。根据上述四图一表，我们可以总结出 SO₂ 浓度有如下几个特征：

• 季度评估

根据图 16-17，研究区域城市中江淮地区春冬两季浓度差异不大，其它区域具有相似的季节效应，冬季 SO₂ 浓度最高，春秋两季次之，夏季最轻。但是截至 2023 年，绝大多数城市 SO₂ 的季节平均浓度均已达到 20 微克/立方米以下的较低水平，包括曾经污染较重的汾渭平原地区；SO₂ 浓度的季节区分度明显降低。

2017 年春季“3+130”城市 SO₂ 浓度均值（标准误差）为 22.8(0.9) 微克/立方米，2023 年下降至 9.9(0.3) 微克/立方米，年均下降 2.2 微克/立方米。与 2019 年春季浓度均值 13.8(0.5) 微克/立方米相比，下降 3.9(0.4) 微克/立方米；与 2022 年春季浓度均值 10.2(0.3) 微克/立方米相比，下降 0.3(0.2) 微克/立方米。与 2022 年春季相比，“3+130”城市中，有 61 个城市 SO₂ 浓度均值显著下降，占比 45.9%，降幅平均值为 17%；有 52 个城市显著上升，占比 39.1%，升幅平均值为 18.4%。2023 年春季，石嘴山平均浓度最高，为 21.7 微克/立方米；北京平均浓度最低，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。临汾为本季度 SO₂ 同比改善幅度最大城市，平均浓度相比 2022 年同期的 15.2 微克/立方米下降 37.2%；此外还有 20 个城市降幅超过 20%，其中包括 17 个重点城市，分别为京津冀及周边地区的 9 个城市（东营、衡水、莱芜、秦皇岛、济南、滨州、许昌、泰安和开封），汾渭平原的 4 个城市（临汾、长治、太原、阳泉），长三角地区的 4 个城市（嘉兴、宁波、蚌埠、镇江）。舟山为浓度同比升幅最大城市，平均浓度相比去年同期的 3.7 微克/立方米上升 64%。此外还有 16 个城市升幅超过 20%，其中包括 7 个重点城市，分别为京津冀及周边地区的临沂和长三角地区的 6 个城市（亳州、宿迁、连云港、泰州、宿州和舟山）。SO₂ 浓度显著上升城市主要集中于江苏、江西、浙江三省，各有 7 个城市浓度上升。

2017 年夏季“3+130”城市 SO₂ 浓度均值（标准误差）为 14.4(0.5) 微克/立方米，2023 年下降至 8.1(0.2) 微克/立方米，年均下降 1.1 微克/立方米。与 2019 年夏季浓度均值 9.9(0.4) 微克/立方米相比，下降 1.8(0.3) 微克/立方米；与 2022 年夏季浓度均值 8.4(0.2) 微克/立方米相比，下降 0.3(0.2) 微克/立方米。与 2022 年夏季相比，“3+130”城市中，有 69 个城市 SO₂ 浓度均值显著下降，占比 51.9%，降幅平均值为 18.2%；有 44 个城市显著上升，占比 33.1%，升幅平均值为 24.9%。2023 年夏季，赤峰平均浓度最高，为 17.4 微克/立方米；北京平均浓度最低，为 3.3 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。衡水为本季度 SO₂ 同比改善幅度最大城市，平均浓度相比 2022 年同期的 12 微克/立方米下降 47.6%；此外还有 27 个城市降幅超过 20%，其中包括 21 个重点城市，分别为京津冀及周边地区的 13 个城市（衡水、滨州、廊坊、濮阳、秦皇岛、许昌、德州、石家庄、聊城、菏泽、沧州、郑州和洛阳），汾渭平原的运城，和长三角地区的 7 个城市（镇江、蚌埠、扬州、淮北、宁波、湖州和六安）。舟山为浓度同比升幅最大城市，平均浓度相比去年同期的 2.8 微克/立方米上升 88.8%。此外还有 23 个城市升幅超过 20%，其中包括 14 个重点城市，分别为京津冀及周边地区的 3 个城市（商丘、日照、焦作），汾渭平原的 5 个城市（铜川、宝鸡、晋中、临汾和晋城），和长三角地区的 6 个城市（苏州、宿州、上海、连云港、宿迁和舟山）。SO₂ 浓度显著上升城市主要集中于江苏、陕西、山东三省，分别有

6、6、5 个城市浓度上升。

2017 年秋季“3+130”城市 SO₂ 浓度均值（标准误差）为 19.9(0.9) 微克/立方米，2023 年下降至 10(0.3) 微克/立方米，年均下降 1.7 微克/立方米。与 2019 年秋季浓度均值 13.2(0.5) 微克/立方米相比，下降 3.2(0.4) 微克/立方米；与 2022 年秋季浓度均值 10.2(0.3) 微克/立方米相比，下降 0.2(0.2) 微克/立方米。与 2022 年秋季相比，“3+130”城市中，有 62 个城市 SO₂ 浓度均值显著下降，占比 46.6%，降幅平均值为 18.7%；有 51 个城市显著上升，占比 38.3%，升幅平均值为 23.7%。2023 年秋季，石嘴山平均浓度最高，为 25.6 微克/立方米；北京平均浓度最低，为 3.3 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 2022 年同期的 9 微克/立方米下降 50.2%；此外还有 26 个城市降幅超过 20%，其中包括 15 个重点城市，分别为京津冀及周边地区的 9 个城市（聊城、洛阳、枣庄、廊坊、濮阳、衡水、石家庄、漯河和淄博），汾渭平原的 4 个城市（运城、铜川、渭南、咸阳），和长三角地区的 2 个城市（蚌埠、合肥）。汉中为浓度同比升幅最大城市，平均浓度相比去年同期的 5 微克/立方米上升 98.3%。此外还有 25 个城市升幅超过 20%，其中包括 18 个重点城市，分别为京津冀及周边地区的 3 个城市（焦作、三门峡、日照），汾渭平原的 3 个城市（长治、晋中、临汾），长三角地区的 12 个城市（盐城、滁州、上海、连云港、南京、常州、宿迁、南通、舟山、苏州、亳州和宿州）。SO₂ 浓度显著上升城市主要集中于江苏、安徽、山西三省，分别有 9、7、7 个城市浓度上升。

2017 年冬季“3+130”城市 SO₂ 浓度均值（标准误差）为 29.4(1.9) 微克/立方米，2023 年下降至 10.7(0.4) 微克/立方米，年均下降 3.1 微克/立方米。与 2019 年冬季浓度均值 15.3(0.8) 微克/立方米相比，下降 4.6(0.5) 微克/立方米；与 2022 年冬季浓度均值 12.5(0.5) 微克/立方米相比，下降 1.8(0.2) 微克/立方米。与 2022 年冬季相比，“3+130”城市中，有 87 个城市 SO₂ 浓度均值显著下降，占比 65.4%，降幅平均值为 23.6%；有 30 个城市显著上升，占比 22.6%，升幅平均值为 14.2%。2023 年冬季，石嘴山平均浓度最高，为 37.7 微克/立方米；北京平均浓度最低，为 3.6 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。吕梁为本季度 SO₂ 同比改善幅度最大城市，平均浓度相比 2022 年同期的 16.2 微克/立方米下降 55.4%；此外还有 45 个城市降幅超过 20%，其中包括 34 个重点城市，分别为京津冀及周边地区的 25 个城市，汾渭平原的 7 个城市（吕梁、西安、铜川、运城、渭南、咸阳和晋城），长三角地区的 2 个城市（宿迁、蚌埠）。扬州为浓度同比升幅最大城市，平均浓度相比去年同期的 6.2 微克/立方米上升 37.7%。此外还有 6 个城市升幅超过 20%，其中包括 3 个重点城市（宿州、舟山、扬州），均位于长三角地区。SO₂ 浓度显著上升城市主要集中于江苏、江西、浙江三省，分别有 6、5、5 个城市浓度上升。

• 年度评估：年度变化趋势与城市相对排名

2017 年“3+130”城市 SO₂ 浓度均值（标准误差）为 21.6(1) 微克/立方米，2023 年下降至 9.7(0.3) 微克/立方米，年均下降 2 微克/立方米。与 2019 年浓度均值 13.1(0.5) 微克/立方米相比，下降 3.4(0.3) 微克/立方米；与 2022 年浓度均值 10.4(0.3) 微克/立方米相比，下降 0.7(0.1) 微克/立方米。

2023 年，SO₂ 在较低浓度水平下，保持了继续下降的总体趋势；仅长三角地区出现浓度的小幅回

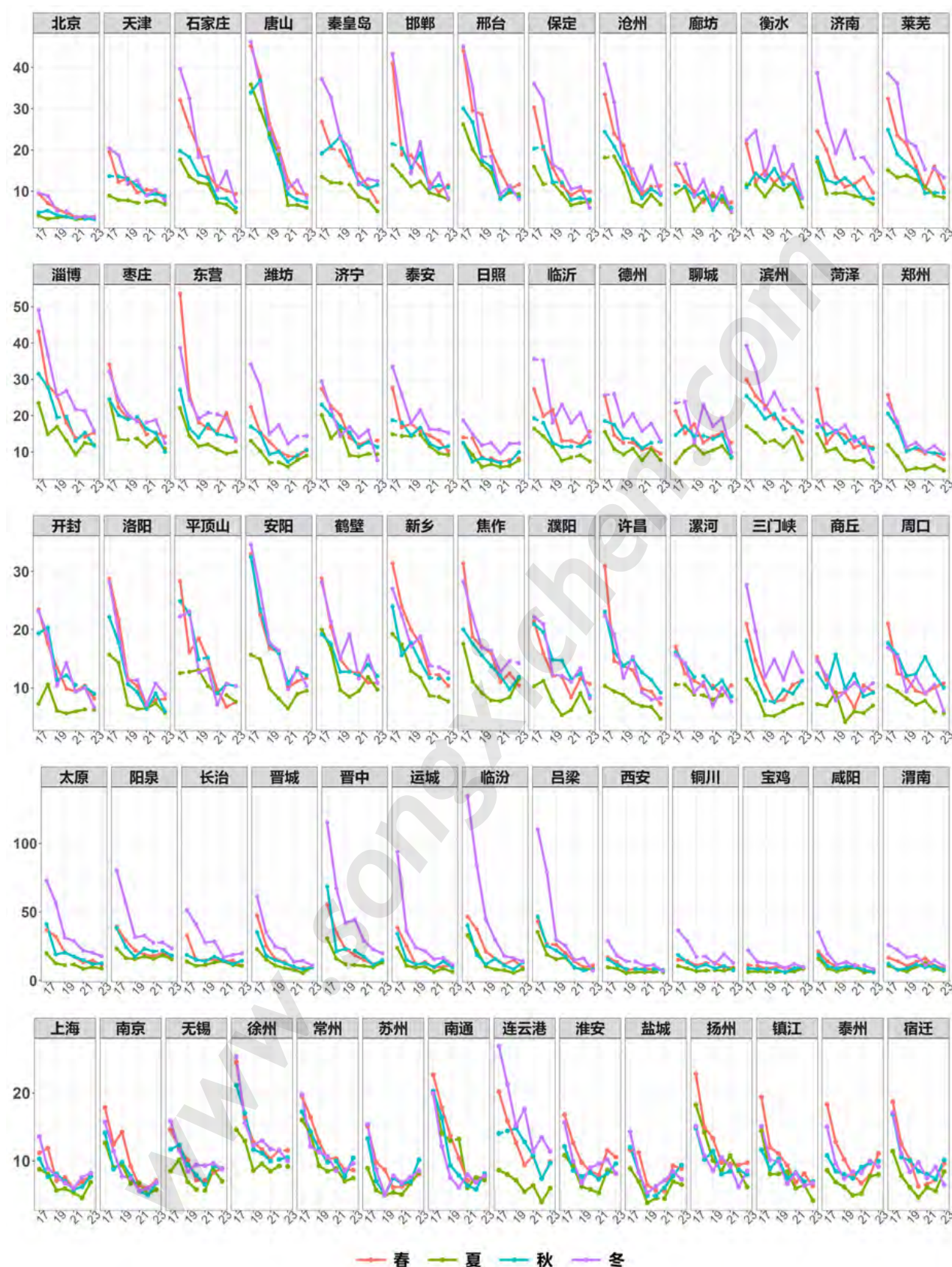


图 16: “3+130” 城市气象调整后 2017 年至 2023 年 SO_2 季节平均浓度 (微克/立方米) 变化序列图, 图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

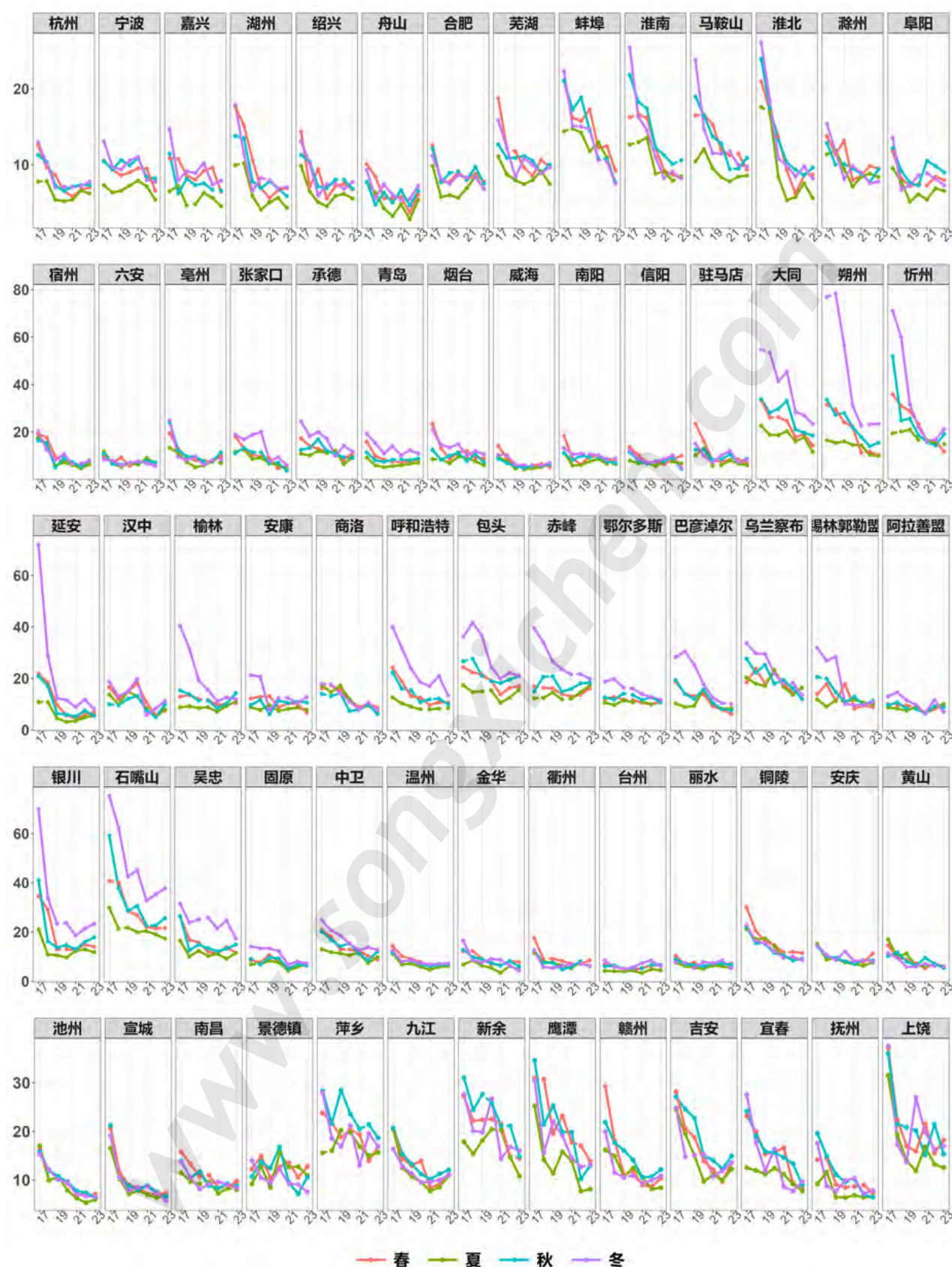


图 17: “3+130” 城市气象调整后 2017 年至 2023 年 SO_2 季节平均浓度 (微克/立方米) 变化序列图, 图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

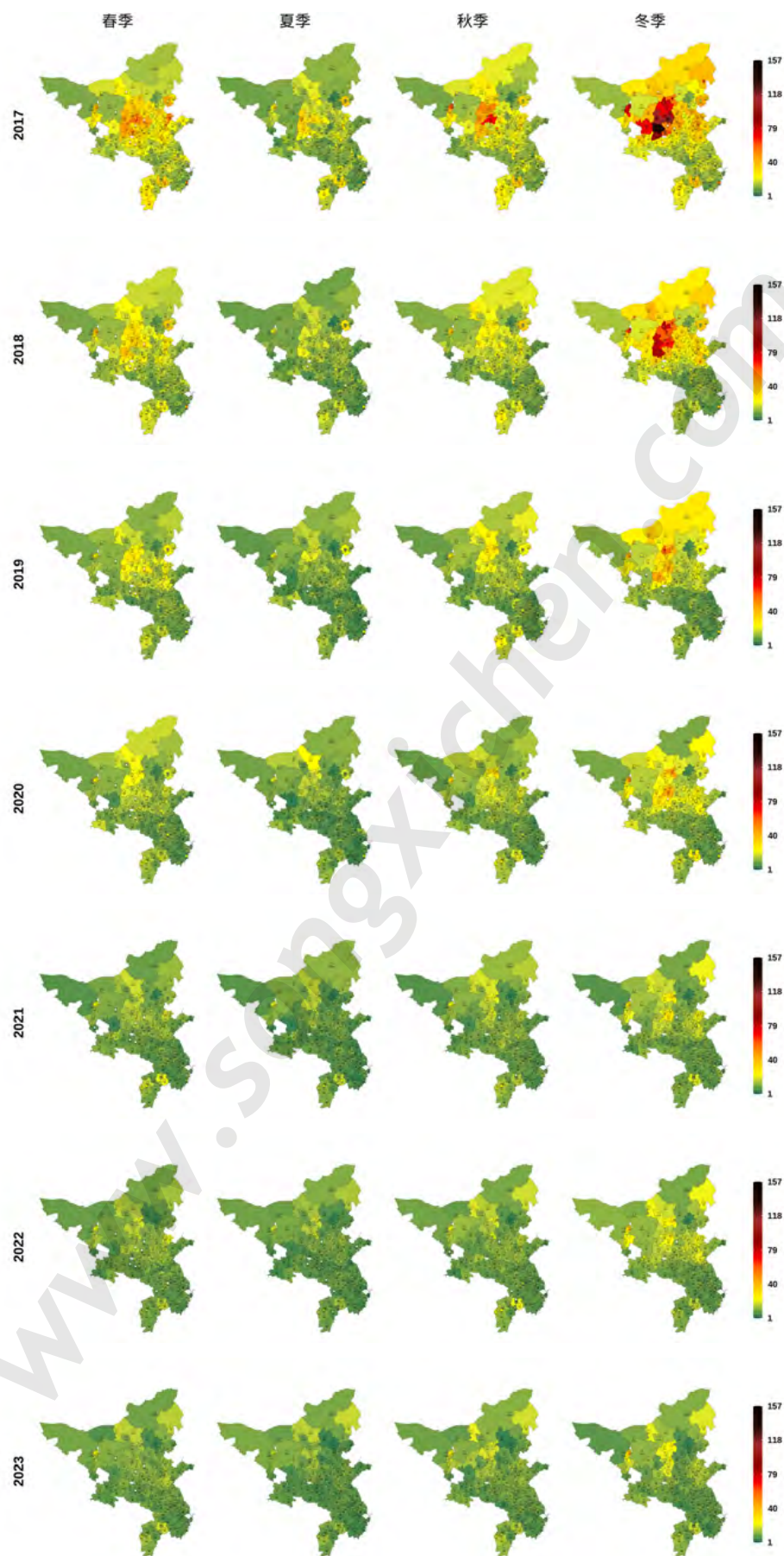


图 18: “3+130”城市气象调整后 2017 年至 2023 年 SO_2 季节平均浓度 (微克/立方米)

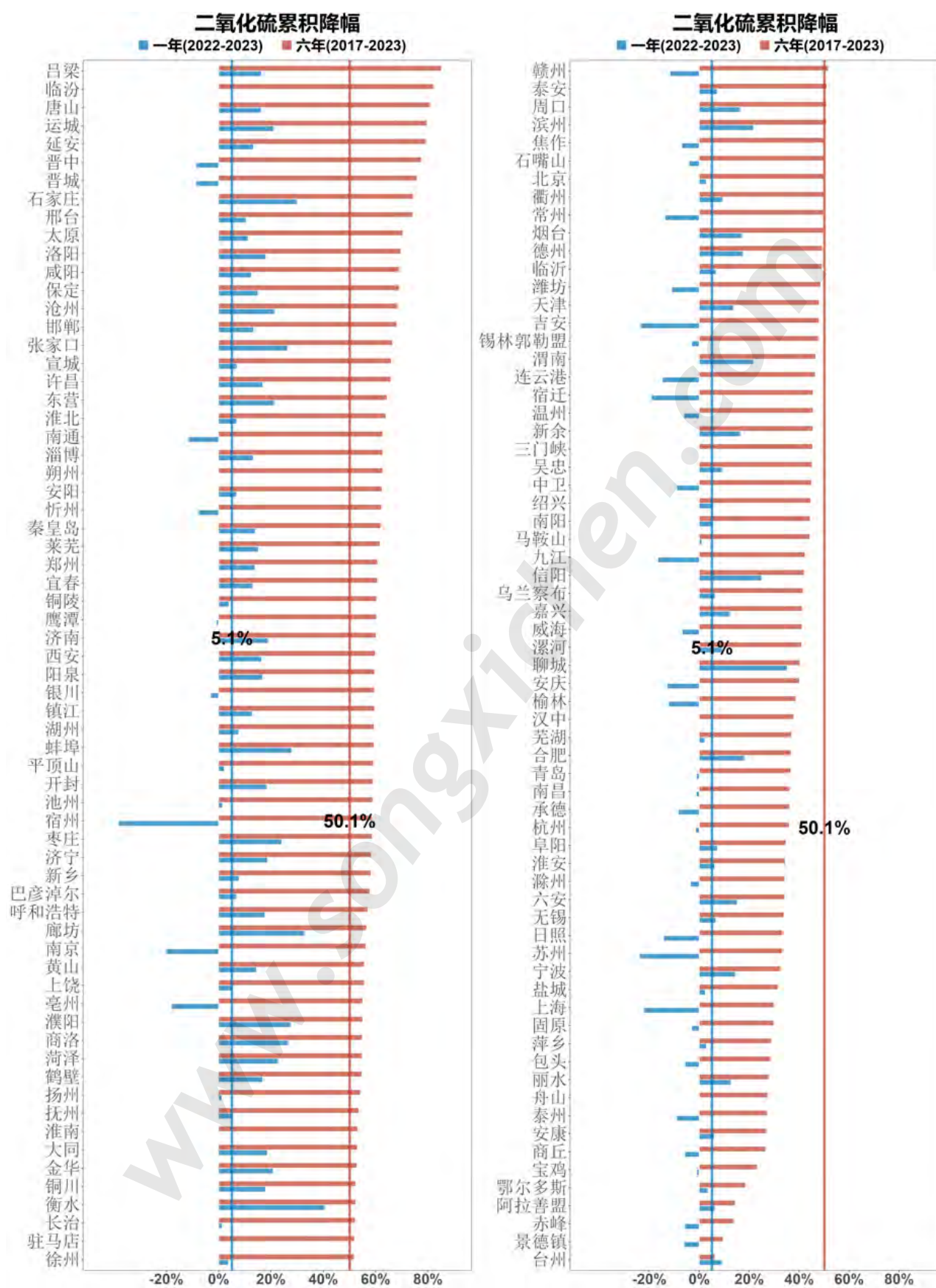


图 19: “3+130”城市气象调整后 SO₂ 浓度过去一年（蓝色）、六年（红色）的累计降幅，蓝色和红色竖线分别代表“3+130”城市的一年和六年平均降幅
(注：负数代表平均浓度相对升高)

城市	2013年	排名	2014年	排名	2015年	排名	2016年	排名	2017年	排名	2018年	排名	2019年	排名	2020年	排名	2021年	排名	2022年	排名	2023年	排名
石嘴山	NA		78.3	● 5	71.5	● 5	66.1	● 6	51.3	● 4	40.4	● 2	30.4	● 2	30.7	● 2	24.5	● 1	24.6	● 1	25.6	● 1
包头	NA		NA		36.7	● 49	32.8	● 41	26.2	● 28	26.6	● 13	23.6	● 7	19.5	● 12	15.7	● 14	17.7	● 4	18.7	● 2
阳泉	NA		75.6	● 7	59.3	● 12	57.5	● 10	45.4	● 6	31.5	● 9	21.7	● 13	23.1	● 5	20.6	● 3	22	● 2	18.3	● 3
赤峰	NA		61.3	● 19	38.6	● 42	30.8	● 45	20.9	● 55	20.9	● 26	19.5	● 18	16.1	● 27	15.7	● 13	17	● 7	18	● 4
萍乡	NA		NA		30.1	● 62	30.6	● 46	23.9	● 43	19.5	● 37	21.1	● 14	21.2	● 8	17.5	● 8	17.5	● 6	17	● 5
大同	NA		41	● 34	41.4	● 35	47.5	● 16	36.2	● 15	31.7	● 8	29.1	● 3	30.9	● 1	20.9	● 2	20.9	● 3	17	● 6
忻州	NA		NA		49.5	● 23	57.3	● 12	44.5	● 7	34	● 7	26.8	● 4	20.2	● 9	16.3	● 12	15.6	● 15	16.8	● 7
银川	75.7	● 5	75.9	● 6	58.7	● 13	55.8	● 13	41.6	● 10	22.5	● 19	15.1	● 43	15.3	● 32	14.2	● 20	16.3	● 10	16.8	● 8
上饶	NA		NA		41.2	● 36	33.4	● 35	35.6	● 16	20.1	● 32	16.4	● 31	18.7	● 17	18.4	● 5	16.7	● 9	15.8	● 9
晋中	NA		NA		72	● 4	102.7	● 2	67.5	● 1	34.8	● 6	25	● 5	24	● 3	18	● 6	14	● 21	15.2	● 10
朔州	NA		NA		72	● 3	69.4	● 5	39.7	● 12	37.7	● 3	31.3	● 1	22.5	● 6	16.6	● 10	14.8	● 18	14.8	● 11
乌兰察布	NA		NA		23.6	● 86	27.8	● 54	25	● 34	23.5	● 16	22.5	● 9	21.4	● 7	18	● 7	15.6	● 14	14.6	● 12
新余	NA		NA		33.9	● 53	33.2	● 38	25.9	● 30	20.5	● 27	22	● 10	23.9	● 4	19.4	● 4	16.9	● 8	14.1	● 13
长治	NA		NA		68.6	● 6	60.5	● 9	29.3	● 21	20.5	● 29	17	● 26	18.7	● 18	14.9	● 17	14.2	● 20	14	● 14
吴忠	NA		NA		40.6	● 39	38.6	● 25	25.2	● 33	15.9	● 60	17	● 25	15.5	● 31	14	● 21	15.2	● 17	13.8	● 15
淄博	NA		117.2	● 1	81.2	● 1	57.4	● 11	36.8	● 13	27	● 12	21.8	● 12	19.5	● 13	14.5	● 19	15.8	● 12	13.7	● 16
滨州	NA		67.5	● 11	50.2	● 21	38.2	● 27	27.9	● 25	24	● 14	19.1	● 20	19.8	● 11	17.1	● 9	17.5	● 5	13.7	● 17
吉安	NA		NA		24.4	● 82	26.1	● 62	26.1	● 29	19.9	● 35	17.9	● 23	13.5	● 48	12	● 32	11	● 45	13.6	● 18
太原	NA		80.3	● 4	64.9	● 7	73.7	● 4	42.8	● 8	30.2	● 10	20.8	● 15	18.9	● 16	14.6	● 18	14.2	● 19	12.6	● 19
东营	NA		68.7	● 10	54.4	● 16	46.1	● 18	35.4	● 17	20.2	● 31	15.7	● 37	16.8	● 24	15.4	● 15	16	● 11	12.6	● 20
临沂	NA		NA		33.3	● 54	24.8	● 65	24.6	● 37	21.9	● 22	16	● 36	13.8	● 45	12.8	● 25	13.4	● 22	12.5	● 21
焦作	NA		62.4	● 18	50.9	● 19	36.6	● 29	24.3	● 39	17.4	● 46	14.7	● 47	13.5	● 47	10.9	● 45	11.3	● 40	12.1	● 22
鹰潭	NA		NA		34.9	● 52	33	● 40	30.3	● 20	20.5	● 30	19.6	● 17	19.5	● 14	16.5	● 11	11.9	● 32	12	● 23
枣庄	NA		67.4	● 12	55.2	● 15	33.4	● 36	28.8	● 24	20.1	● 33	18	● 22	17.8	● 19	15.2	● 16	15.7	● 13	11.9	● 24
榆林	NA		NA		19.1	● 110	17.3	● 101	19.4	● 67	17.1	● 52	12.8	● 59	11.9	● 64	9.1	● 74	10.6	● 49	11.9	● 25
泰安	NA		48.2	● 30	40.9	● 38	35.5	● 31	23.7	● 44	18.8	● 41	16.2	● 33	17.2	● 22	13.7	● 23	12.5	● 29	11.6	● 26
九江	NA		NA		38.4	● 43	27.6	● 58	19.6	● 63	13.8	● 77	12.1	● 65	11.1	● 71	9	● 76	9.7	● 63	11.3	● 27
临汾	NA		94.7	● 2	45.5	● 26	117.5	● 1	63.7	● 2	40.6	● 1	21.9	● 11	17.5	● 20	12.1	● 29	11.3	● 41	11.3	● 28
潍坊	NA		55	● 23	42	● 33	33.3	● 37	21.6	● 52	17.3	● 48	11	● 73	11.2	● 68	8.6	● 86	10	● 55	11.1	● 29
鄂尔多斯	NA		NA		19.7	● 103	16.7	● 106	13.5	● 104	13.5	● 78	13.5	● 56	13	● 55	11.8	● 33	11.4	● 39	11	● 30
安阳	NA		62.5	● 17	54.1	● 17	47.3	● 17	29	● 23	21.9	● 21	15.5	● 38	14.2	● 43	9.3	● 72	11.7	● 35	10.9	● 31
鹤壁	NA		NA		44	● 31	41.1	● 22	24.1	● 41	19	● 39	13.1	● 58	13.3	● 51	11.4	● 41	13.1	● 24	10.9	● 32
中卫	NA		NA		36.2	● 50	27.7	● 57	19.8	● 60	16.9	● 55	14.3	● 49	13.5	● 46	12	● 30	10	● 56	10.9	● 33
德州	NA		54.1	● 24	39.6	● 40	31.7	● 44	21.3	● 54	17.2	● 49	13.2	● 57	14.4	● 40	11.3	● 42	13.1	● 25	10.8	● 34
三门峡	NA		50.7	● 27	45.5	● 27	29.4	● 49	19.6	● 62	13.8	● 75	8.9	● 97	8.8	● 97	8.8	● 82	10.7	● 47	10.7	● 35
呼和浩特	NA		NA		27.9	● 68	29.7	● 48	24.9	● 36	19.3	● 38	15.4	● 41	12.5	● 58	11.7	● 35	13	● 26	10.7	● 36
新乡	NA		NA		50.1	● 22	36.2	● 30	25.4	● 32	19.9	● 34	17	● 28	15.7	● 30	11.7	● 36	11.3	● 37	10.6	● 37
莱芜	NA		86.5	● 3	55.7	● 14	39.9	● 23	27.7	● 26	23	● 18	18.6	● 21	16.2	● 26	11.7	● 34	12.5	● 28	10.6	● 38
赣州	NA		NA		25.3	● 76	25.9	● 63	21.8	● 50	15.6	● 64	12.1	● 64	12.4	● 60	9.9	● 59	9.4	● 71	10.5	● 39
景德镇	NA		NA		10.7	● 129	8.8	● 132	11.6	● 119	13	● 83	10.2	● 85	14.3	● 41	11.2	● 43	9.9	● 59	10.5	● 40
济宁	NA		70.3	● 9	60.7	● 10	36.9	● 28	25	● 35	19.6	● 36	17	● 27	13.8	● 44	11.5	● 39	12.8	● 27	10.4	● 41
承德	38.4	● 16	37.8	● 36	19.6	● 104	19.5	● 88	16.3	● 84	13.9	● 74	15.5	● 39	13.1	● 54	11.1	● 44	9.6	● 67	10.4	● 42
徐州	52.8	● 12	39.7	● 35	37.9	● 45	33.5	● 32	21.4	● 53	15.5	● 65	11.3	● 70	11.4	● 66	10.2	● 55	10.7	● 48	10.3	● 43
锡林郭勒	NA		NA		19.2	● 109	15.2	● 112	19.5	● 64	18.4	● 43	16.5	● 30	12.4	● 59	10.7	● 48	9.9	● 58	10.2	● 44
晋城	NA		NA		63.7	● 9	64.5	● 7	41.7	● 9	23.3	● 17	16.6	● 29	14.5	● 38	10.1	● 57	9.3	● 72	10.1	● 45
聊城	NA		52.8	● 25	41.1	● 37	29.1	● 52	16.6	● 78	16.6	● 57	14.2	● 53	14.9	● 35	13.9	● 22	15.3	● 16	9.9	● 46
济南	NA		65	● 14	46.9	● 25	33.5	● 33	24.6	● 38	17.2	● 50	13.5	● 55	14.7	● 36	12.4	● 27	12.1	● 31	9.8	● 47
邯郸	83.4	● 4	56	● 21	45.1	● 28	49.8	● 15	30.5	● 19	20.5	● 28	15	● 44	17.3	● 21	10.8	● 46	11.2	● 42	9.7	● 48
运城	NA		NA		74.1	● 2	63.3	● 8	47.5	● 5	21.7	● 23	14.2	● 51	14.5	● 39	10.3	● 53	12.3	● 30	9.7	● 49
马鞍山	NA		28.5	● 49	21.8	● 95	19.1	● 90	17.4	● 77	15	● 69	12.5	● 60	11.1	● 69	10.1	● 58	9.8	● 62	9.7	● 50
铜川	NA		27.3	● 55	22.3	● 91	21.3	● 79	20.2	● 59	16.4	● 58	11.2	● 72	12.3	● 61	10.4	● 52	11.7	● 33	9.6	● 51
泰州	NA		34.4	● 38	24	● 84	17.3	● 99	13.2	● 108	9.5	● 114	8	● 113	7.2	● 116	7.3	● 105	8.8	● 83	9.6	● 52
日照	NA		28.3	● 51	27.8	● 69	17.3	● 98	14.4	● 98	11.3	● 94	8.7	● 102	8.8	● 98	7.4	● 103	8.4	● 94	9.6	● 53
铜陵	NA		NA		41.5	● 34	41.9	● 21	24	● 42	17.4	● 47	16.1	● 34	13.2	● 52	10.4	● 51	9.9	● 57	9.5	● 54
安康	NA		27.5	● 54	20.3	● 99	15.9	● 109	13	● 110	13.3	● 80	9.2	● 94	10	● 80	10.4	● 50	10.1	● 52	9.5	● 55
邢台	102.9	● 1	66.1	● 13	59.9	● 11	54.5	● 14	36.4	● 14	27.9	● 11	20.2	● 16	17.1	● 23	10.1	● 56	10.5	● 50	9.4	● 56
宝鸡	NA		18.3	● 67	14.8	● 123	12.7	● 124	12.1	● 115	9.9	● 109	9.1	● 95	9.1	● 93	7.6	● 99	9.2	● 78	9.3	● 57
连云港	29.5	● 23	29.2	● 46	28.4	● 67	22.8	● 69	17.4	● 76	14.9	● 71	12.5	● 62	11.3	● 67	9.9	● 60	8.1	● 99	9.3	● 58
芜湖	NA		21.8	● 62	19.9	● 102	19.8	● 86	14.6	● 97	11	● 98	9.7	● 89	9.8	● 82	9.3	● 71	9.4	● 70	9.2	● 59
亳州	NA		NA		38.1	● 44	26.7	● 60	20.5	● 57	11.6	● 92	8.6	● 103	8.2	● 105	6.9	● 115	7.8	● 105	9.2	● 60
沧州	53	● 11	47.6	● 31	37.6	● 46	38.4	● 26	29.2	● 22	23.7	● 15	17.2	● 24	11.9	● 63	8.6	● 85	11.7	● 34	9.2	● 61
秦皇岛	64.4	● 7	52.7	● 26	35.8	● 51	29.8	● 47	24.2	● 40	21.6	● 24	19.5	● 19	16.4	● 25	11.7	● 37	10.7	● 46	9.2	● 62

城市	2013年	排名	2014年	排名	2015年	排名	2016年	排名	2017年	排名	2018年	排名	2019年	排名	2020年	排名	2021年	排名	2022年	排名	2023年	排名
常州	38.3	17	34.1	40	30.5	61	20	84	18.1	73	14.2	72	11.3	71	9.8	81	9.5	67	8	100	9.1	66
平顶山	NA		64.7	15	51	18	29.3	50	22	48	18.7	42	14.8	46	13.4	49	8.8	83	9.2	75	9	67
阿拉善盟	NA		NA		10	131	12	126	10.4	126	10.8	101	9.2	92	9	94	6.5	119	9.5	68	8.9	68
淮南	NA		NA		18.6	114	18.9	92	19	69	16.1	59	15.4	40	11.1	70	9.5	68	8.9	80	8.9	69
安庆	NA		NA		20.3	100	19.9	85	14.7	96	10	108	9.1	96	9	95	7.5	102	7.8	104	8.8	70
青岛	NA		32.1	43	28.8	66	19	91	13.9	99	9.8	110	8	111	8.9	96	8	94	8.7	89	8.8	71
漯河	NA		NA		37.2	47	23.1	67	14.9	93	12.9	86	10.3	83	10.5	73	8.8	80	9.7	64	8.8	72
滁州	NA		NA		16.1	118	17.2	102	13.4	106	11.2	95	10.2	84	8.6	100	8.7	84	8.5	92	8.8	73
苏州	30.2	22	24.1	60	20.4	98	16.7	105	13.2	109	7.8	126	5.9	128	6.7	120	6.2	123	7.1	116	8.8	74
菏泽	NA		50.2	28	39.1	41	32.3	43	19.5	65	13.8	76	14.5	48	13.1	53	11.5	40	11.4	38	8.8	75
南昌	NA		NA		25.4	75	16.5	107	13.8	101	11	99	10	87	9.6	83	8.4	88	8.7	87	8.8	76
宿迁	NA		NA		21	96	17.7	97	16	86	10.5	103	8.7	101	7.3	113	7.1	109	7.3	111	8.7	77
吕梁	NA		NA		64	8	74	3	58.8	3	37.5	4	23.4	8	19.9	10	12	31	10.4	51	8.7	78
渭南	NA		28.8	47	24.9	79	21.4	78	16.3	83	13	84	10.8	76	13.4	50	12.5	26	11.1	44	8.7	79
宜春	NA		NA		23.1	88	27.8	55	21.9	49	17.2	51	13.6	54	15	34	12.8	24	9.9	60	8.6	80
无锡	38	18	28.2	52	25.3	78	16.9	104	12.7	111	11.5	93	8.8	99	7.6	111	7.2	107	9	79	8.4	81
濮阳	NA		NA		31.3	60	27.1	59	18.7	70	16.9	53	11.7	67	11	72	9.3	70	11.6	36	8.4	82
烟台	NA		26	57	20.6	97	22.2	75	16.3	82	11.1	97	9.7	90	11.8	65	9.8	63	9.9	61	8.2	83
周口	NA		25.5	59	18.8	112	20.9	80	16.5	80	13.3	79	10.4	80	10.2	77	10.3	54	9.7	65	8.1	84
扬州	35.7	19	32.8	42	24.5	81	22.6	71	17.7	74	12.6	90	10.9	75	9.2	89	9.5	66	8.2	97	8.1	85
巴彦淖尔	NA		NA		32.1	59	32.8	42	19.2	68	16.9	56	15	45	15.8	29	10.7	47	8.7	88	8.1	86
天津	63.2	8	48.7	29	26	73	21.8	76	15.6	87	13.1	82	11.4	69	10.2	78	9	77	9.4	69	8.1	87
淮北	NA		NA		32.6	56	23.6	66	22.2	47	17.5	45	11.5	68	8.7	99	7.4	104	8.6	90	8	88
盐城	24.6	27	20.7	64	19.3	107	15.6	111	11.7	118	8.7	116	5.2	131	5.3	129	5.8	126	8.2	98	8	89
蚌埠	NA		NA		26.1	72	22.2	74	19.7	61	15.8	61	16	35	14.6	37	11.7	38	11.1	43	8	90
郑州	56.8	10	43.9	32	32.5	57	29.3	51	20.4	58	15.3	66	9.3	91	10	79	8.8	81	9.3	73	8	91
衡水	61.7	9	41.7	33	37	48	27.7	56	16.6	79	15.7	63	12.5	61	15.1	33	12.3	28	13.3	23	7.9	92
保定	66.9	6	71.8	8	50.8	20	39.8	24	25.6	31	21.2	25	14.2	52	12	62	8.6	87	9.3	74	7.9	93
唐山	101.4	2	64.5	16	47.1	24	44.9	19	40.3	11	35.1	5	24.6	6	19	15	9.8	62	9.2	76	7.7	94
南通	26.2	24	28.6	48	29.1	64	22.9	68	20.7	56	15.1	68	10.9	74	9.4	86	6.9	113	6.9	119	7.7	95
阜阳	NA		NA		25.8	74	18	95	11.8	117	8	125	6.8	125	7.3	112	8	93	8.3	95	7.7	96
上海	21.9	28	17.6	68	16.8	116	13.9	118	11	123	9.1	115	7.2	121	6.8	119	5.8	127	6.3	127	7.7	97
宿州	NA		NA		22.2	92	21.8	77	18.4	71	15.3	67	7.2	120	8.5	102	6.8	116	5.5	131	7.6	98
开封	NA		33	41	32.7	55	26.4	61	18.3	72	16.9	54	10.4	81	10.5	75	8.8	79	9.2	77	7.5	99
南阳	NA		31.8	44	27.2	70	22.5	73	13.5	105	8.4	122	8.3	107	9.5	85	9.4	69	7.9	102	7.5	100
驻马店	NA		NA		44.9	29	25	64	15.4	88	13	85	7.3	119	8	107	9.7	64	7.4	108	7.4	101
商洛	NA		NA		22.3	90	19.4	89	16.4	81	15.7	62	15.3	42	10.5	74	8.2	91	10.1	53	7.4	102
许昌	NA		NA		32.2	58	28.8	53	21.7	51	14.9	70	12	66	12.7	56	9.7	65	8.9	81	7.4	103
合肥	20.6	29	21.7	63	15.7	120	14.6	115	11.4	120	7.3	128	7.5	117	8.1	106	7.8	96	8.8	82	7.2	104
洛阳	NA		55.2	22	43.7	32	33.2	39	23.7	45	18.3	44	10.2	86	9.4	87	6.7	117	8.8	85	7.2	105
西安	42.5	15	27.9	53	23.9	85	19.5	87	17.7	75	12.9	87	8.8	100	9.3	88	8.4	89	8.5	93	7.1	106
杭州	NA		NA		15.9	119	12	127	11.1	122	9.5	113	7.1	122	6.4	126	6.4	120	7	118	7.1	107
抚州	NA		NA		21.9	94	14.5	116	15.1	89	12.5	91	8.6	104	8.6	101	9	75	7.4	109	7	108
宁波	NA		NA		15.7	121	12.2	125	10.4	127	8.7	118	8.8	98	9.2	91	9.8	61	8.2	96	7	109
咸阳	NA		30.5	45	22.1	93	22.5	72	22.7	46	13.2	81	9.2	93	10.4	76	10.5	49	8	101	7	110
石家庄	96.7	3	58.8	20	44.5	30	42.4	20	27.3	27	22.5	20	16.2	32	14.3	42	9.3	73	10	54	7	111
温州	NA		NA		13.8	124	13.4	121	12.5	121	8.3	123	8.3	106	7	118	6	125	6.4	126	6.8	112
固原	NA		NA		13	126	10.5	129	9.7	129	8.7	117	10.5	77	9.2	90	5.4	131	6.6	123	6.8	113
衢州	NA		NA		19.2	108	15.6	110	13.6	102	7.6	127	7.5	118	6.5	125	6.3	121	7.5	107	6.8	114
绍兴	NA		NA		25.3	77	14.8	113	12.1	114	8.5	119	6.9	124	6.1	128	7.2	108	7.1	113	6.7	115
六安	NA		NA		13.7	125	13.3	122	10.2	128	7.1	129	6.7	126	6.7	121	7	110	7.9	103	6.7	116
南京	35.2	20	22.2	61	19.5	105	17.9	96	15.1	91	10.5	104	10.3	82	7.8	110	6.1	124	5.5	130	6.6	117
宣城	NA		NA		23.1	87	20.5	82	19.4	66	10.7	102	8.2	110	8.2	103	7.9	95	7.1	115	6.6	118
信阳	NA		28.5	50	18.7	113	14.8	114	11.4	121	8.5	120	7	123	7	117	7.5	101	8.8	86	6.6	119
池州	NA		NA		19.5	106	20.3	83	16.1	85	11	100	10.5	79	9.1	92	7	112	6.7	122	6.6	120
延安	NA		34.9	37	24.7	80	33.4	34	31.4	18	18.8	40	8.3	109	6.6	122	5.6	130	7.5	106	6.5	121
嘉兴	NA		NA		18.8	111	13.7	120	10.9	124	8	124	7.6	116	7.3	114	8.3	90	7.3	110	6.4	122
舟山	NA		NA		8.6	133	8.8	131	8.7	130	6.3	131	5.9	129	5	131	5.6	128	4.2	132	6.3	123
威海	NA		20.1	65	17.8	115	13.2	123	10.7	125	8.5	121	5.5	130	5.1	130	5.6	129	5.9	129	6.3	124
丽水	NA		NA		10.8	128	9.8	130	8.6	131	6.9	130	6.3	127	6.2	127	6.9	114	7.1	114	6.2	125
镇江	25.5	26	25.9	58	26.1	71	22.7	70	15.1	90	9.8	112	9.8	88	8	108	7.3	106	7	117	6.1	126
湖州	NA		NA		16.2	117	17	103	14.8	94	12.6	89	7.7	114	6.5	123	6.6	118	6.5	125	6	127
台州	NA		NA		8.7	132	8.5	133	6.4	133	5.6	133	4.8	132	5	132	5.3	132	6.6	124	6	128
黄山	NA		NA		10.6	130	16.3	108	13.3	107	10.2	105	8.5	105	6.5	124	7	111	6.9	120	5.9	129
廊坊	44	14	34.2	39	24	83	18.4	94	13.6	103	12.8	88	8.3	108	9.5	84	7.6	97	8.8	84	5.9	130
金华	NA		NA		20.1	101	13.9	117	12.1	116	9.8	111	8	112	7.3	115	6.3	122	7.2	112	5.7	131
张家口	50.2	13	NA		29.1	65	18.5	93	14.9	92	13.9	73	12.4	63	12.6	57	7.6	98	6.8	121	5	132
北京	25.8	25	18.5	66	11.5	127	10.7	128	7	132	6.2	132	4.7	133	4.4	133	3.5	133	3.6	133	3.5	133

图 21: “3+130”城市气象调整后 2013 年至 2023 年 SO₂ 年平均浓度 (微克/立方米) 年际

升。分区域来看,2023 年京津冀及周边“2+36”城市 SO_2 浓度均值为 9.5(0.3) 微克/立方米,比 2022 年的 11.2(0.4) 微克/立方米下降 1.7(0.2) 微克/立方米,比 2019 年的 14.1(0.7) 微克/立方米下降 4.6(0.6) 微克/立方米。汾渭平原 2023 年浓度均值为 10.9(0.9) 微克/立方米,比 2022 年的 12(1) 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 5.2(1.2) 微克/立方米。长三角地区 2023 年浓度均值为 8(0.2) 微克/立方米,比 2022 年的 7.9(0.3) 微克/立方米上升 0.1(0.2) 微克/立方米;比 2019 年的 9.2(0.5) 微克/立方米下降 1.2(0.4) 微克/立方米。“其他城市”2023 年浓度均值为 10.5(0.6) 微克/立方米,比 2022 年的 10.8(0.6) 微克/立方米下降 0.3(0.2) 微克/立方米;比 2019 年的 13.9(0.9) 微克/立方米下降 3.4(0.5) 微克/立方米。

根据图 20 和图 21,2023 年,“3+130”城市中年均 SO_2 浓度最高的三个城市分别是石嘴山 (25.6 微克/立方米)、包头 (18.7 微克/立方米) 和阳泉 (18.3 微克/立方米)。2023 年排名前十八的城市中,有 6 个位于山西,4 个位于江西,3 个位于宁夏回族自治区,3 个位于内蒙古自治区,2 个位于山东。另外,相比其他省份,宁夏各城市的平均 SO_2 浓度最高,年平均值达到 14.8 微克/立方米,其次为山西和内蒙古,年平均值分别为 13.5 微克/立方米和 12.5 微克/立方米,这些地区应对治理 SO_2 给予更多重视。2023 年,仅石嘴山 SO_2 年均浓度超过 20 微克/立方米,比 2022 年减少 2 个。年均浓度低于 10 微克/立方米的的城市有 88 个,比 2022 年增加 11 个。其中京津冀及周边“2+36”城市有 24 个,比 2022 年增加 10 个;汾渭平原有 7 个,比 2022 年增加 3 个;长三角地区有 30 个,比 2022 年增加 1 个;“其他城市”有 27 个,比 2022 年减少 3 个。**北京是“3+130”城市中仅有的年均 SO_2 浓度低于 5 微克/立方米的的城市,仅为 3.5 微克/立方米。**2023 年,

从图 19 中展示的累计降幅来看,相比 2017 年,2023 年“3+130”城市中,所有城市年均 SO_2 浓度均呈现不同程度下降。 SO_2 六年累计降幅的城市均值为 50.1% (1.3%)。有 10 个城市累计降幅超过 70%,分别为吕梁、临汾、唐山、运城、延安、晋中、晋城、石家庄、邢台、太原;累计降幅超过 50% 的城市有 73 个,约占总城市数量的一半。累计降幅最大的 20 个城市主要位于河北、山西。相比 2022 年,“3+130”城市中,有 91 个城市年均 SO_2 浓度下降,有 42 个城市年均 SO_2 浓度上升。 SO_2 浓度降幅的城市均值为 5.2% (1.3%),降幅最小的 20 个城市主要位于江苏、安徽、江西。晋中六年累计降幅排名靠前,但本年度升幅排名靠前,应当加强污染治理,避免浓度反弹。

3.4 一氧化碳 (CO)

一氧化碳 (CO) 是一种无色、无味、无臭的气体,是主要并且排放量最大的大气污染物之一 [20],这也是其往往以毫克/立方米而非微克/立方米计量的原因。一氧化碳的人为源主要是矿物燃料燃烧过程中的不完全燃烧,其中大部分来自交通工具,即由内燃机炉壁的冷却作用造成的。此外,森林砍伐、草原和废弃物的焚烧也是来源之一。一氧化碳对人体的危害主要是阻碍体内氧气输送,使人体缺氧窒息。作为大气污染物的一氧化碳,其主要危害在于能参与光化学烟雾的形成,造成全球性的环境问题。一氧化碳在大气中的“存活”时间为一到两个月,所以它可以在区域内长距离的传输。我国目前一氧化碳平均浓度标准如表 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	24 小时平均	4	4	毫克/立方米
	1 小时平均	10	10	

图 22-23、图 24、图 25和图 26-27分别展示了“3+130”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，六年累计降幅和一年降幅，年度平均浓度及排名。根据上述四图一表，我们可以总结出一氧化碳浓度如下几个特征：

• 季度评估

根据图 22-23，安徽江苏上海两省一市 CO 四季浓度较低，无显著季节差异。其他地区一般以冬季浓度最高，春秋季节次之，夏季浓度最低。

2017 年春季“3+130”城市 CO 浓度均值（标准误差）为 0.97(0.02) 毫克/立方米，2023 年下降至 0.63(0.01) 毫克/立方米，年均下降 0.06 毫克/立方米。与 2019 年春季浓度均值 0.81(0.02) 毫克/立方米相比，下降 0.18(0.01) 毫克/立方米；与 2022 年春季浓度均值 0.66(0.01) 毫克/立方米相比，下降 0.03(0.01) 毫克/立方米。与 2022 年春季相比，“3+130”城市中，有 69 个城市 CO 浓度均值显著下降，占比 51.9%，降幅平均值为 11.3%；有 34 个城市显著上升，占比 25.6%，升幅平均值为 10.4%。2023 年春季，赣州平均浓度最高，为 1.02 毫克/立方米；锡林郭勒平均浓度最低，为 0.26 毫克/立方米。锡林郭勒为本季度 CO 同比改善幅度最大城市，平均浓度相比 2022 年同期的 0.58 毫克/立方米下降 55.7%；此外还有 7 个城市降幅超过 20%，其中包括 5 个重点城市，分别为京津冀及周边地区的保定、滨州、临沂，和汾渭平原的西安、长治。吉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 25.6%。此外还有 1 个城市升幅超过 20%，为保定。CO 浓度显著上升城市主要集中于安徽、浙江、江西三省，分别有 8、5、4 个城市浓度上升。

2017 年夏季“3+130”城市 CO 浓度均值（标准误差）为 0.88(0.02) 毫克/立方米，2023 年下降至 0.62(0.01) 毫克/立方米，年均下降 0.04 毫克/立方米。与 2019 年夏季浓度均值 0.74(0.02) 毫克/立方米相比，下降 0.12(0.01) 毫克/立方米；与 2022 年夏季浓度均值 0.61(0.01) 毫克/立方米相比，上升 0.01(0.01) 毫克/立方米。与 2022 年夏季相比，“3+130”城市中，有 48 个城市 CO 浓度均值显著下降，占比 36.1%，降幅平均值为 12%；有 60 个城市显著上升，占比 45.1%，升幅平均值为 14.5%。2023 年夏季，临汾平均浓度最高，为 1.08 毫克/立方米；锡林郭勒平均浓度最低，为 0.27 毫克/立方米。聊城为本季度 CO 同比改善幅度最大城市，平均浓度相比 2022 年同期的 0.83 毫克/立方米下降 37.2%；此外还有 4 个城市降幅超过 20%，分别为锡林郭勒、鹤壁、泰安、新余。吉安为浓度同比升幅最大城市，平均浓度相比去年同期的 0.52 毫克/立方米上升 48.9%。此外还有 12 个城市升幅超过 20%，其中包括 5 个重点城市，分别为京津冀及周边地区的洛阳，汾渭平原的吕梁、临汾、晋城，和长三角地区的淮南。CO 浓度显著上升城市主要集中于安徽、河南、浙江三省，分别有 10、9、7 个城市浓度上升。

2017 年秋季“3+130”城市 CO 浓度均值（标准误差）为 1.04(0.03) 毫克/立方米，2023 年下降至 0.73(0.01) 毫克/立方米，年均下降 0.05 毫克/立方米。与 2019 年秋季浓度均值 0.88(0.02) 毫克/立方米相比，下降 0.15(0.01) 毫克/立方米；与 2022 年秋季浓度均值 0.71(0.01) 毫克/立方米相比，上升 0.02(0.01) 毫克/立方米。与 2022 年秋季相比，“3+130”城市中，有 42 个城市 CO 浓度均值显著下降，占比 31.6%，降幅平均值为 10.3%；有 59 个城市显著上升，占比 44.4%，升幅平均值为 16.3%。2023 年秋季，晋城平均浓度最高，为 1.25 毫克/立方米；锡林郭勒盟平均浓度最低，为 0.28 毫克/立方米。张家口为本季度 CO 同比改善幅度最大城市，平均浓度相比 2022 年同期的 0.57 毫克/立方米下降 33.2%；此外还有 2 个城市降幅超过 20%，分别为周口、西安。黄山为浓度同比升幅最大城市，平均浓度相比去年同期的 0.35 毫克/立方米上升 53.7%。此外还有 18 个城市升幅超过 20%，其中包括 10 个重点城市，分别为京津冀及周边地区的日照、安阳，汾渭平原的吕梁、晋城、晋中，和长三角地区的 5 个城市（蚌埠、常州、南通、连云港和嘉兴）。CO 浓度显著上升城市主要集中于江苏、安徽、浙江三省，分别有 12、11、8 个城市浓度上升。

2017 年冬季“3+130”城市 CO 浓度均值（标准误差）为 1.41(0.04) 毫克/立方米，2023 年下降至 0.93(0.02) 毫克/立方米，年均下降 0.08 毫克/立方米。与 2019 年冬季浓度均值 1.09(0.03) 毫克/立方米相比，下降 0.16(0.02) 毫克/立方米；与 2022 年冬季浓度均值 0.91(0.02) 毫克/立方米相比，上升 0.02(0.01) 毫克/立方米。与 2022 年冬季相比，“3+130”城市中，有 45 个城市 CO 浓度均值显著下降，占比 33.8%，降幅平均值为 10.3%；有 70 个城市显著上升，占比 52.6%，升幅平均值为 16.2%。2023 年冬季，包头平均浓度最高，为 1.45 毫克/立方米；锡林郭勒平均浓度最低，为 0.35 毫克/立方米。临汾为本季度 CO 同比改善幅度最大城市，平均浓度相比 2022 年同期的 1.63 毫克/立方米下降 24.7%；此外还有 1 个城市降幅超过 20%，为运城。六安为浓度同比升幅最大城市，平均浓度相比去年同期的 0.58 毫克/立方米上升 37.6%。此外还有 24 个城市升幅超过 20%，其中包括 14 个重点城市，均位于长三角地区（淮南、苏州、盐城、滁州、杭州、宁波、蚌埠、舟山、嘉兴、湖州、常州、扬州、南通和六安）。CO 浓度显著上升城市主要集中于安徽、江苏、浙江三省，分别有 15、11、11 个城市浓度上升。

• 年度评估：年度变化趋势与城市相对排名

2017 年“3+130”城市 CO 浓度均值（标准误差）为 1.07(0.03) 毫克/立方米，2023 年下降至 0.73(0.01) 毫克/立方米，年均下降 0.06 毫克/立方米。与 2019 年浓度均值 0.88(0.02) 毫克/立方米相比，下降 0.15(0.01) 毫克/立方米；与 2022 年浓度均值 0.72(0.01) 毫克/立方米相比，上升 0.01(0.01) 毫克/立方米，浓度回升发生在夏秋冬三季。

2023 年京津冀及周边“2+36”城市 CO 浓度均值为 0.75(0.02) 毫克/立方米，比 2022 年的 0.79(0.02) 毫克/立方米下降 0.04(0.01) 毫克/立方米，比 2019 年的 0.97(0.03) 毫克/立方米下降 0.22(0.02) 毫克/立方米。汾渭平原 2023 年浓度均值为 0.85(0.04) 毫克/立方米，比 2022 年的 0.87(0.04) 毫克/立方米下降 0.02(0.02) 毫克/立方米；比 2019 年的 1.05(0.06) 毫克/立方米下降 0.20(0.02) 毫克/立方米。长三角地区 2023 年浓度均值为 0.71(0.02) 毫克/立方米，比 2022 年的 0.66(0.02) 毫克/立方米上升 0.05(0.01) 毫克/立方米；比 2019 年的 0.79(0.02) 毫克/立方米下降 0.08(0.02) 毫克/立方米。“其他城市”2023 年浓度均值为 0.69(0.02) 毫克/立方米，比 2022 年的 0.69(0.02) 毫克/立方米持平；比 2019 年的 0.82(0.03) 毫

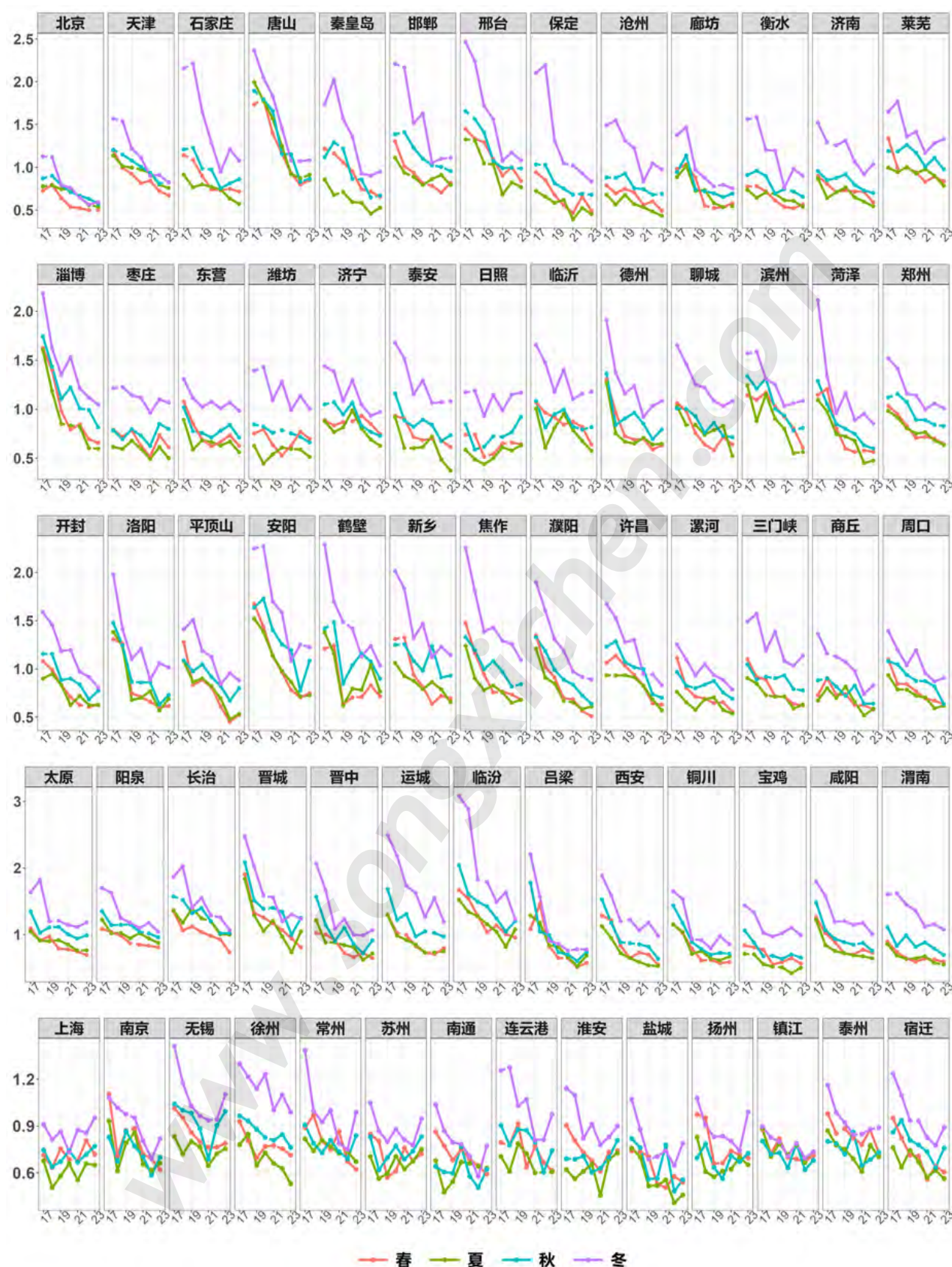


图 22: “3+130” 城市气象调整后 2017 年至 2023 年 CO 季节平均浓度 (毫克/立方米) 变化序列图, 图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

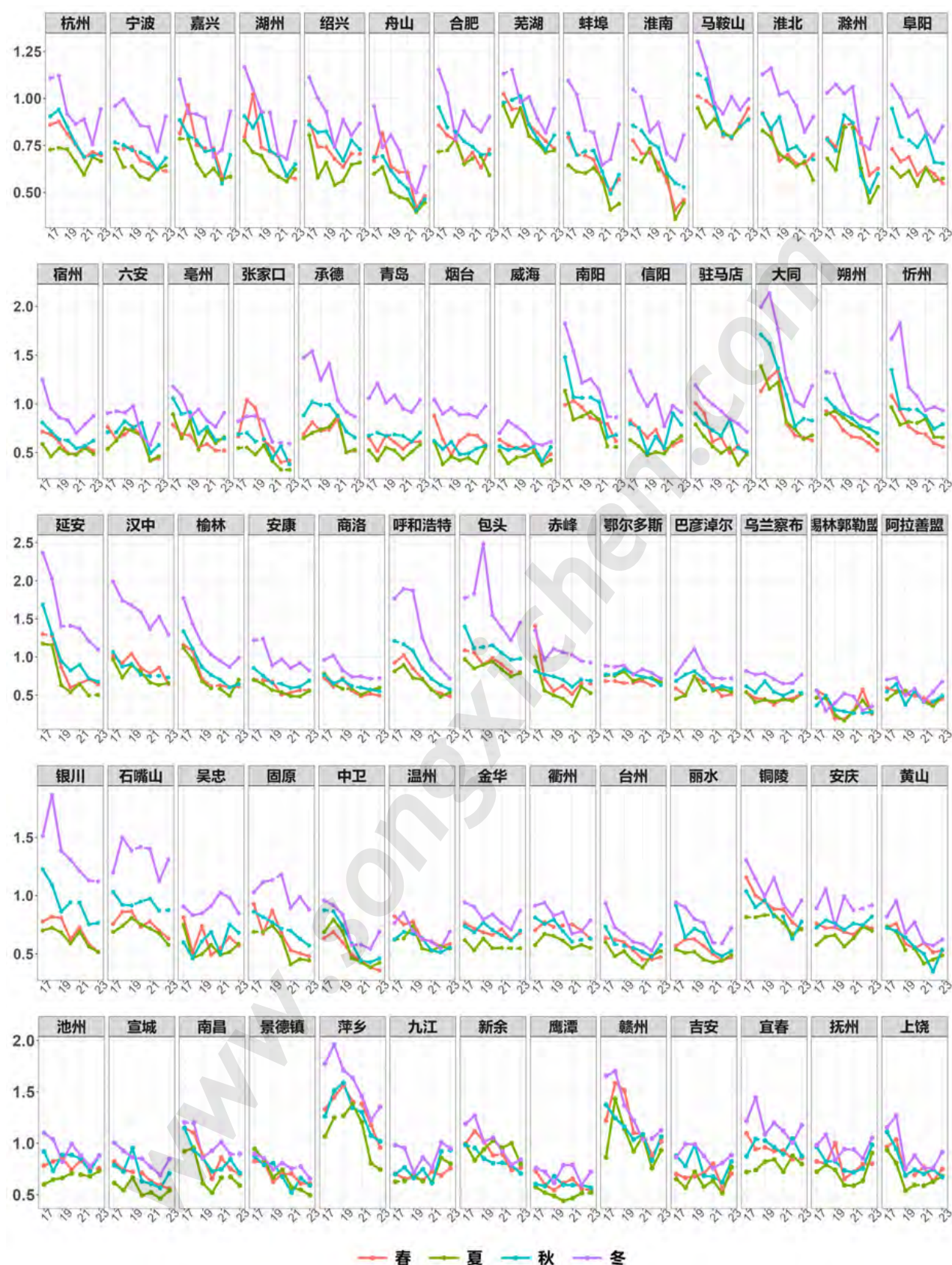


图 23: “3+130”城市气象调整后 2017 年至 2023 年 CO 季节平均浓度 (毫克/立方米) 变化序列图, 图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

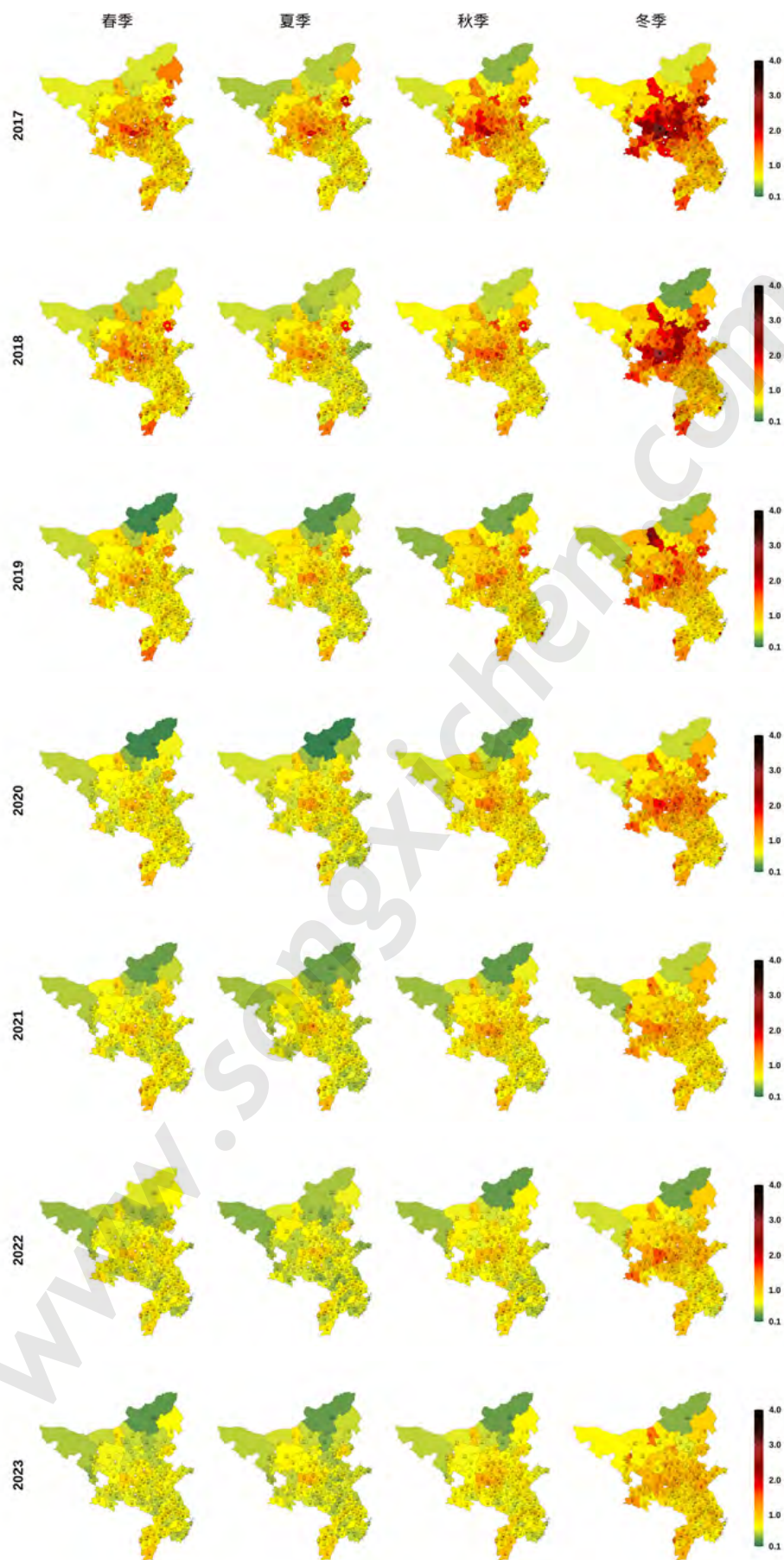


图 24: “3+130” 城市气象调整后 2017 年至 2023 年 CO 季节平均浓度 (毫克/立方米)

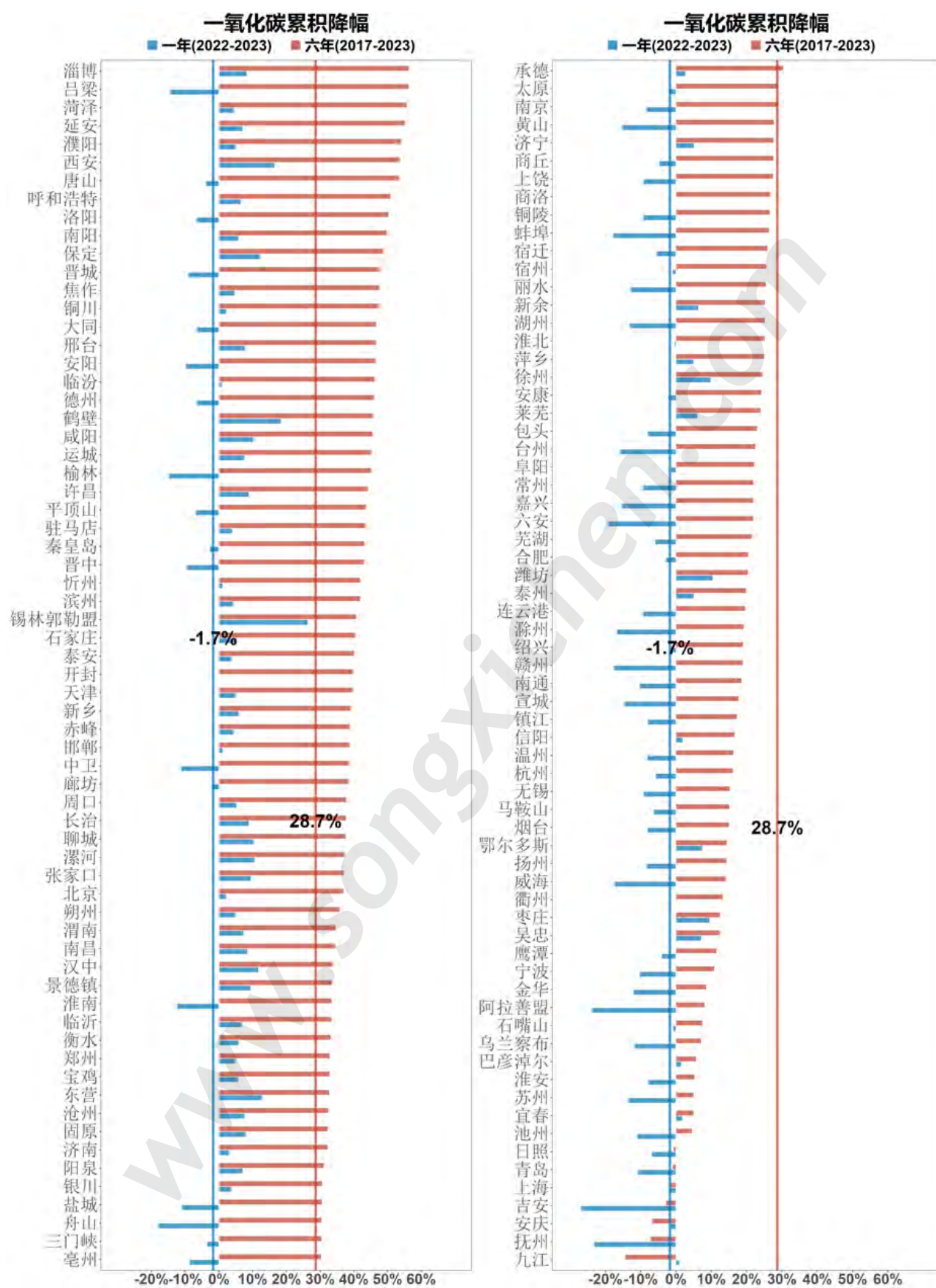


图 25: “3+130”城市气象调整后 CO 浓度过去一年（蓝色）的降幅、六年（红色）的累计降幅，蓝色和红色竖线分别代表“3+130”城市的一年和六年平均降幅（注：负数代表平均浓度相对升高）

城市	2013年	排名	2014年	排名	2015年	排名	2016年	排名	2017年	排名	2018年	排名	2019年	排名	2020年	排名	2021年	排名	2022年	排名	2023年	排名
临汾	NA		2.6	● 1	2.5	● 2	2.5	● 1	2.1	● 1	1.8	● 2	1.5	● 3	1.4	● 2	1.2	● 2	1.1	● 1	1.1	● 1
晋城	NA		NA		2	● 11	2.1	● 4	2.1	● 2	1.5	● 7	1.3	● 8	1.3	● 3	1.1	● 4	1	● 8	1.1	● 2
赣州	NA		NA		1.3	● 53	1.4	● 39	1.3	● 33	1.5	● 8	1.3	● 10	1.1	● 12	1.1	● 5	0.9	● 17	1	● 3
萍乡	NA		NA		1.2	● 61	1.5	● 21	1.4	● 23	1.5	● 6	1.5	● 2	1.4	● 1	1.3	● 1	1.1	● 2	1	● 4
包头	NA		NA		1.3	● 50	1.4	● 37	1.3	● 30	1.2	● 25	1.4	● 6	1.2	● 8	1	● 6	0.9	● 12	1	● 5
莱芜	NA		1.6	● 21	1.7	● 26	1.4	● 41	1.3	● 31	1.2	● 23	1.2	● 13	1.1	● 9	1	● 9	1	● 5	1	● 6
长治	NA		NA		2.1	● 6	2	● 5	1.5	● 13	1.4	● 9	1.3	● 9	1.3	● 4	1.2	● 3	1.1	● 3	1	● 7
安阳	NA		1.9	● 10	2.4	● 3	2.2	● 2	1.8	● 5	1.7	● 3	1.3	● 7	1.2	● 6	1	● 10	0.9	● 23	0.9	● 8
抚州	NA		NA		1.2	● 63	1.2	● 57	0.9	● 92	0.9	● 74	0.9	● 64	0.7	● 89	0.7	● 70	0.8	● 50	0.9	● 9
马鞍山	NA		1.4	● 30	1.5	● 36	1.2	● 61	1.1	● 52	1	● 50	0.9	● 39	0.8	● 59	0.8	● 34	0.9	● 18	0.9	● 10
宜春	NA		NA		1	● 86	1	● 76	1	● 71	1	● 49	1	● 30	1	● 26	0.9	● 21	0.9	● 11	0.9	● 11
唐山	2.6	● 1	2.3	● 4	2.2	● 5	2.2	● 3	2	● 3	1.9	● 1	1.6	● 1	1.3	● 5	1	● 7	0.9	● 15	0.9	● 12
运城	NA		NA		2.2	● 4	1.9	● 8	1.7	● 7	1.4	● 14	1.2	● 11	1.1	● 13	0.9	● 18	1	● 6	0.9	● 13
阳泉	NA		1.4	● 31	1.2	● 59	1.4	● 30	1.3	● 28	1.2	● 26	1.1	● 18	1	● 18	1	● 8	1	● 9	0.9	● 14
邢台	1.8	● 8	1.8	● 15	1.9	● 14	1.9	● 9	1.7	● 6	1.6	● 4	1.4	● 5	1.2	● 7	0.9	● 22	1	● 7	0.9	● 15
邯郸	2	● 4	1.7	● 20	1.8	● 17	1.9	● 10	1.5	● 15	1.4	● 13	1.1	● 14	1.1	● 11	0.9	● 19	0.9	● 13	0.9	● 16
无锡	1.4	● 13	1.1	● 45	1.1	● 73	1.1	● 70	1.1	● 54	1	● 64	0.9	● 48	0.9	● 53	0.8	● 61	0.8	● 27	0.9	● 17
太原	NA		1.8	● 14	1.6	● 30	1.5	● 24	1.3	● 32	1.2	● 33	1	● 24	1	● 22	0.9	● 17	0.9	● 16	0.9	● 18
九江	NA		NA		0.9	● 109	0.9	● 83	0.8	● 117	0.8	● 108	0.7	● 114	0.7	● 96	0.7	● 94	0.9	● 20	0.9	● 19
新乡	NA		NA		1.6	● 29	1.4	● 31	1.4	● 22	1.3	● 15	1.1	● 22	1	● 21	1	● 9	0.9	● 14	0.9	● 20
鹤壁	NA		NA		1.7	● 23	1.9	● 6	1.6	● 11	1.4	● 12	0.9	● 54	1	● 25	0.9	● 16	1	● 4	0.9	● 21
石嘴山	NA		0.9	● 61	0.8	● 120	1	● 73	0.9	● 79	1	● 55	1	● 29	1	● 30	1	● 12	0.8	● 26	0.8	● 22
日照	NA		0.9	● 58	1.2	● 65	0.9	● 80	0.8	● 104	0.8	● 109	0.6	● 124	0.7	● 91	0.7	● 69	0.8	● 41	0.8	● 23
晋中	NA		NA		1.5	● 35	1.4	● 40	1.5	● 16	1.2	● 32	0.9	● 36	1	● 29	0.8	● 39	0.8	● 46	0.8	● 24
汉中	NA		NA		1.5	● 38	1.3	● 43	1.3	● 36	1.1	● 44	1.1	● 17	1	● 23	0.9	● 30	0.9	● 10	0.8	● 25
大同	NA		1.7	● 17	1.4	● 48	1.5	● 23	1.6	● 12	1.5	● 5	1.4	● 4	1	● 24	0.8	● 49	0.8	● 44	0.8	● 26
焦作	NA		1.7	● 18	2	● 10	1.8	● 12	1.6	● 10	1.3	● 20	1	● 26	1	● 19	0.9	● 15	0.9	● 21	0.8	● 27
苏州	0.9	● 24	0.9	● 55	0.9	● 94	0.9	● 87	0.9	● 95	0.7	● 118	0.7	● 118	0.7	● 85	0.7	● 76	0.7	● 69	0.8	● 28
池州	NA		NA		0.8	● 112	0.9	● 92	0.9	● 97	0.8	● 91	0.8	● 81	0.8	● 60	0.8	● 44	0.7	● 60	0.8	● 29
石家庄	1.9	● 6	1.5	● 26	1.3	● 49	1.6	● 16	1.4	● 25	1.3	● 16	1.1	● 19	0.9	● 31	0.8	● 52	0.9	● 25	0.8	● 30
临沂	NA		NA		1.4	● 45	1.2	● 59	1.2	● 40	1	● 62	1	● 33	1	● 15	0.9	● 27	0.9	● 22	0.8	● 31
芜湖	NA		1.2	● 44	1	● 85	1	● 75	1	● 64	1	● 57	1	● 31	0.9	● 43	0.8	● 43	0.8	● 52	0.8	● 32
吉安	NA		NA		0.9	● 103	0.9	● 97	0.8	● 112	0.8	● 110	0.8	● 68	0.7	● 99	0.7	● 79	0.6	● 102	0.8	● 33
淮安	1	● 22	1.1	● 49	1.1	● 75	0.9	● 78	0.8	● 101	0.8	● 98	0.7	● 109	0.7	● 98	0.6	● 116	0.7	● 58	0.8	● 34
三门峡	NA		1.4	● 32	1.7	● 24	1.4	● 29	1.1	● 48	1.1	● 45	0.9	● 43	0.9	● 35	0.9	● 32	0.8	● 48	0.8	● 35
铜陵	NA		NA		1.2	● 57	1.2	● 53	1.1	● 53	1	● 63	0.9	● 42	0.9	● 36	0.8	● 33	0.7	● 63	0.8	● 36
安庆	NA		NA		0.8	● 111	0.7	● 120	0.7	● 121	0.8	● 93	0.7	● 105	0.7	● 86	0.7	● 71	0.8	● 45	0.8	● 37
德州	NA		1.8	● 16	1.9	● 13	1.6	● 17	1.5	● 17	1	● 58	0.9	● 61	0.9	● 41	0.8	● 50	0.7	● 56	0.8	● 38
咸阳	NA		1.2	● 41	1.4	● 42	1.4	● 38	1.4	● 20	1.1	● 38	0.9	● 38	0.9	● 44	0.8	● 35	0.9	● 19	0.8	● 39
常州	1.1	● 18	1.1	● 47	1.1	● 70	0.9	● 88	1	● 66	0.9	● 75	0.8	● 80	0.8	● 61	0.8	● 56	0.7	● 72	0.8	● 40
郑州	2.5	● 3	1.8	● 13	1.6	● 28	1.4	● 27	1.2	● 46	1.1	● 42	1	● 32	0.9	● 46	0.8	● 36	0.8	● 33	0.8	● 41
淄博	NA		2.1	● 7	2.1	● 7	1.9	● 7	1.8	● 4	1.4	● 11	1.1	● 21	1.1	● 10	1	● 11	0.9	● 24	0.8	● 42
新余	NA		NA		1.4	● 40	1.3	● 46	1	● 62	1	● 48	1	● 35	0.9	● 33	0.9	● 28	0.8	● 29	0.8	● 43
上海	0.9	● 26	0.8	● 63	0.9	● 104	0.8	● 116	0.8	● 116	0.6	● 125	0.7	● 107	0.7	● 103	0.7	● 85	0.8	● 49	0.8	● 44
天津	1.9	● 7	1.7	● 19	1.4	● 46	1.4	● 32	1.3	● 34	1.2	● 31	1.1	● 23	1	● 27	0.9	● 25	0.8	● 35	0.8	● 45
济宁	NA		1.3	● 34	1.4	● 47	1.2	● 60	1.1	● 56	1	● 53	0.9	● 45	1.1	● 14	0.9	● 24	0.8	● 34	0.8	● 46
滨州	NA		2.1	● 6	2.1	● 8	1.7	● 14	1.3	● 29	1.2	● 27	1.2	● 12	1	● 16	0.9	● 20	0.8	● 39	0.8	● 47
扬州	0.9	● 27	0.9	● 60	0.9	● 92	0.9	● 86	0.9	● 88	0.8	● 90	0.7	● 115	0.7	● 115	0.7	● 78	0.7	● 78	0.8	● 48
泰州	NA		1.1	● 46	1	● 78	0.9	● 82	1	● 74	0.9	● 81	0.8	● 79	0.8	● 67	0.7	● 75	0.8	● 37	0.8	● 49
洛阳	NA		1.9	● 9	2	● 9	1.9	● 11	1.5	● 14	1.3	● 19	0.8	● 66	0.9	● 48	0.8	● 51	0.7	● 71	0.8	● 50
上饶	NA		NA		0.6	● 132	0.9	● 91	1	● 61	1	● 52	0.7	● 117	0.7	● 90	0.7	● 83	0.7	● 83	0.8	● 51
杭州	NA		NA		0.9	● 97	0.8	● 104	0.9	● 85	0.9	● 69	0.8	● 74	0.8	● 78	0.7	● 80	0.7	● 73	0.8	● 52
徐州	1.4	● 12	1.3	● 37	1.4	● 43	1.3	● 42	1	● 68	1	● 65	0.8	● 70	0.9	● 40	0.8	● 45	0.8	● 28	0.7	● 53
信阳	NA		0.8	● 64	0.9	● 98	0.8	● 113	0.9	● 86	0.8	● 95	0.6	● 122	0.7	● 81	0.6	● 120	0.8	● 47	0.7	● 54
枣庄	NA		1	● 53	1	● 79	0.8	● 111	0.9	● 96	0.8	● 92	0.9	● 65	0.8	● 75	0.7	● 101	0.8	● 32	0.7	● 55
聊城	NA		2	● 8	1.8	● 19	1.5	● 25	1.2	● 42	1.1	● 43	0.9	● 37	0.8	● 57	0.8	● 40	0.8	● 31	0.7	● 56
绍兴	NA		NA		0.8	● 116	0.8	● 108	0.9	● 81	0.8	● 99	0.8	● 88	0.7	● 113	0.7	● 90	0.7	● 59	0.7	● 57
榆林	NA		NA		1.7	● 21	1.2	● 52	1.3	● 27	1.1	● 35	0.9	● 62	0.8	● 80	0.7	● 81	0.6	● 98	0.7	● 58
连云港	1.1	● 19	1	● 54	1	● 87	0.8	● 101	0.9	● 80	0.9	● 79	0.9	● 52	0.8	● 62	0.7	● 66	0.7	● 85	0.7	● 59
忻州	NA		NA		1.6	● 27	1.5	● 19	1.3	● 35	1.1	● 40	0.9	● 46	0.9	● 45	0.8	● 37	0.7	● 54	0.7	● 60
青岛	NA		0.9	● 59	1	● 89	0.8	● 115	0.7	● 125	0.7	● 119	0.7	● 102	0.7	● 93	0.6	● 102	0.7	● 88	0.7	● 61
合肥	1	● 23	1.1	● 50	1.1	● 71	1	● 74	0.9	● 78	0.9	● 82	0.8	● 86	0.8	● 79	0.7	● 65	0.7	● 74	0.7	● 62
银川	1.2	● 17	1.2	● 40	1.1	● 69	1.2	● 51	1.1	● 58	1.1	● 39	0.9	● 40	0.9	● 50	0.9	● 29	0.8	● 51	0.7	● 63
延安	NA		2.5	● 2	1.6	● 32	1.7	● 13	1.6	● 8	1.4	● 10	1	● 34	0.8	● 56	0.9	● 31	0.8	● 43	0.7	● 64
渭南	NA		0.9	● 56	1.4	● 44	1.2	● 54	1.1	● 50	1	● 61	0.9	● 44	0.9	●						

城市	2013年	排名	2014年	排名	2015年	排名	2016年	排名	2017年	排名	2018年	排名	2019年	排名	2020年	排名	2021年	排名	2022年	排名	2023年	排名
南昌	NA		NA		1	88	1	72	1.1	51	1	46	0.8	83	0.7	102	0.8	42	0.8	40	0.7	66
东营	NA		1.3	35	1.2	62	1.2	50	1.1	55	0.8	85	0.8	89	0.8	74	0.8	59	0.8	30	0.7	67
潍坊	NA		1	52	1	77	0.9	77	0.9	84	0.9	76	0.8	95	0.8	70	0.7	67	0.8	38	0.7	68
济南	NA		1.2	39	1.4	41	1.2	56	1.1	57	0.9	73	0.9	57	0.9	34	0.8	48	0.7	55	0.7	69
镇江	1.2	16	1.2	42	1	90	0.9	94	0.9	94	0.7	112	0.8	90	0.7	107	0.8	60	0.7	87	0.7	70
淮北	NA		NA		1.3	51	1	71	0.9	76	0.9	71	0.8	76	0.8	72	0.7	63	0.7	77	0.7	71
宁波	NA		NA		0.9	101	0.8	119	0.8	109	0.8	101	0.8	93	0.7	104	0.7	89	0.6	96	0.7	72
开封	NA		1.5	25	1.7	25	1.5	20	1.2	43	1.1	37	0.9	41	0.9	52	0.8	54	0.7	75	0.7	73
铜川	NA		1.5	28	1.1	76	1.1	66	1.3	26	1.2	28	0.8	72	0.8	76	0.7	91	0.7	65	0.7	74
宿迁	NA		NA		1.3	52	1.1	64	1	75	0.9	77	0.8	84	0.8	73	0.7	95	0.7	86	0.7	75
泰安	NA		1.6	23	1.6	31	1.1	65	1.2	45	1	59	0.8	75	0.9	47	0.8	38	0.7	62	0.7	76
南京	1.1	20	0.9	57	1	80	1.1	68	1	69	0.8	107	0.9	60	0.9	49	0.7	74	0.6	94	0.7	77
秦皇岛	1.5	10	1.5	24	1.5	37	1.5	26	1.2	37	1.3	18	1.1	15	0.9	32	0.8	57	0.7	84	0.7	78
嘉兴	NA		NA		0.9	107	0.8	107	0.9	87	0.9	78	0.8	91	0.7	87	0.7	86	0.6	108	0.7	79
周口	NA		NA		1.9	12	1.4	34	1.1	49	1	60	0.9	53	0.9	39	0.8	47	0.7	57	0.7	80
金华	NA		NA		0.9	105	0.8	112	0.8	115	0.7	120	0.7	106	0.7	108	0.7	96	0.6	104	0.7	81
赤峰	NA		1	51	0.9	96	1.3	44	1.1	47	0.8	111	0.7	101	0.7	101	0.6	112	0.7	61	0.7	82
吕梁	NA		NA		2.5	1	1.4	28	1.6	9	1.3	17	0.9	55	0.8	77	0.7	88	0.6	109	0.7	83
平顶山	NA		1.2	43	1.2	58	1.2	47	1.2	39	1	47	1	28	0.9	37	0.7	68	0.6	99	0.7	84
许昌	NA		NA		1.5	34	1.6	18	1.2	38	1.2	24	1.1	20	1	17	0.9	26	0.8	53	0.7	85
亳州	NA		NA		1.1	72	1.1	69	1	70	0.8	86	0.8	78	0.7	111	0.7	72	0.6	103	0.7	86
湖州	NA		NA		0.8	110	0.8	109	0.9	83	0.9	70	0.8	77	0.7	82	0.7	97	0.6	110	0.7	87
南阳	NA		1.4	33	1.2	60	1.2	63	1.4	24	1.1	41	1	25	1	20	1	14	0.7	66	0.7	88
宝鸡	NA		1.8	12	1.3	54	1.1	67	1	65	0.9	67	0.8	94	0.7	112	0.7	92	0.7	67	0.7	89
朔州	NA		NA		1.3	55	1.2	55	1	59	1	54	0.9	56	0.8	69	0.8	62	0.7	76	0.7	90
西安	2	5	1.8	11	1.8	18	1.6	15	1.5	18	1.2	22	0.9	51	0.8	55	0.8	46	0.8	36	0.7	91
吴忠	NA		NA		0.9	108	0.9	93	0.8	114	0.6	131	0.7	116	0.7	117	0.6	106	0.7	64	0.7	92
烟台	NA		0.8	62	0.9	106	0.9	95	0.8	111	0.6	127	0.6	125	0.6	125	0.6	111	0.6	107	0.7	93
衡水	1.4	14	1.4	29	1.5	33	1.2	48	1	67	1	56	0.9	58	0.8	71	0.7	99	0.7	79	0.7	94
宣城	NA		NA		0.8	117	0.8	118	0.8	107	0.7	113	0.8	82	0.7	114	0.6	110	0.6	114	0.7	95
濮阳	NA		NA		1.7	20	1.4	33	1.4	19	1.2	30	1	27	0.9	51	0.8	55	0.7	82	0.7	96
滁州	NA		NA		1	82	0.8	100	0.8	105	0.8	97	0.9	50	0.9	38	0.7	87	0.6	116	0.7	97
鄂尔多斯	NA		NA		0.7	125	0.7	124	0.8	113	0.8	103	0.8	85	0.7	94	0.7	64	0.7	70	0.7	98
商丘	NA		NA		0.9	99	0.9	98	0.9	82	0.9	66	0.8	69	0.8	58	0.8	58	0.6	100	0.7	99
安康	NA		2.2	5	1.1	68	0.9	81	0.9	93	0.8	84	0.7	113	0.7	118	0.6	117	0.6	97	0.7	100
阜阳	NA		NA		0.9	102	0.9	89	0.8	99	0.8	105	0.7	98	0.7	105	0.7	73	0.6	93	0.7	101
南通	0.8	28	0.8	65	0.8	113	0.7	123	0.8	108	0.7	122	0.7	121	0.7	84	0.7	100	0.6	112	0.7	102
衢州	NA		NA		0.9	95	0.8	105	0.8	119	0.8	100	0.8	97	0.7	92	0.6	104	0.6	91	0.6	103
沧州	1.8	9	1.3	36	1.3	56	1.3	45	1	73	0.9	68	0.9	49	0.8	65	0.7	98	0.7	80	0.6	104
承德	1	21	1.1	48	1	84	0.9	84	0.9	77	1	51	0.9	47	1	28	0.9	23	0.7	89	0.6	105
廊坊	1.5	11	1.5	27	1.5	39	1.4	36	1	60	1.2	34	0.8	73	0.7	97	0.6	105	0.6	101	0.6	106
漯河	NA		NA		1.1	66	1.2	62	1	63	0.8	83	0.8	96	0.8	64	0.8	53	0.7	68	0.6	107
宿州	NA		NA		1.1	74	0.9	90	0.8	102	0.7	121	0.7	120	0.6	122	0.6	124	0.6	106	0.6	108
菏泽	NA		1.6	22	1.7	22	1.4	35	1.4	21	1.1	36	0.8	71	0.8	63	0.7	77	0.7	90	0.6	109
蚌埠	NA		NA		1	81	0.8	103	0.8	103	0.8	106	0.7	111	0.7	100	0.6	119	0.5	121	0.6	110
保定	2.5	2	2.4	3	1.9	16	1.5	22	1.2	41	1.2	29	0.8	67	0.7	83	0.6	107	0.7	81	0.6	111
固原	NA		NA		0.8	121	0.8	102	0.9	90	0.8	88	0.9	59	0.8	66	0.6	109	0.6	95	0.6	112
温州	NA		NA		0.9	100	0.9	99	0.7	126	0.7	114	0.7	104	0.6	123	0.6	122	0.5	119	0.6	113
商洛	NA		NA		1.9	15	0.9	96	0.8	106	0.7	115	0.7	112	0.6	119	0.6	121	0.6	113	0.6	114
鹰潭	NA		NA		0.8	122	0.7	125	0.7	128	0.6	128	0.6	130	0.6	121	0.6	113	0.6	117	0.6	115
巴彦淖尔	NA		NA		0.6	130	0.8	106	0.6	130	0.7	123	0.9	63	0.7	106	0.6	114	0.6	111	0.6	116
景德镇	NA		NA		0.7	124	0.7	122	0.9	89	0.8	87	0.7	110	0.7	88	0.6	108	0.6	92	0.6	117
盐城	0.7	29	0.8	66	0.8	118	0.7	121	0.8	98	0.8	104	0.6	126	0.6	127	0.6	103	0.5	120	0.6	118
乌兰察布	NA		NA		0.7	129	0.7	126	0.6	129	0.5	132	0.6	129	0.5	132	0.5	128	0.5	122	0.6	119
呼和浩特	NA		NA		1.1	67	1.2	49	1.2	44	1.2	21	1.1	16	0.9	42	0.7	82	0.6	105	0.6	120
六安	NA		NA		0.8	114	0.8	114	0.7	122	0.7	116	0.8	87	0.8	68	0.7	84	0.5	126	0.6	121
台州	NA		NA		0.8	115	0.8	117	0.7	124	0.6	129	0.6	128	0.5	130	0.5	130	0.5	125	0.6	122
淮南	NA		NA		1	83	0.9	85	0.8	100	0.8	94	0.8	92	0.7	95	0.6	118	0.5	123	0.6	123
丽水	NA		NA		0.7	128	0.6	129	0.7	120	0.7	124	0.7	119	0.6	120	0.5	127	0.5	124	0.6	124
北京	1.3	15	1.3	38	1.2	64	1.2	58	0.9	91	0.9	72	0.7	99	0.7	110	0.6	115	0.6	118	0.6	125
驻马店	NA		NA		0.9	93	0.9	79	1	72	0.9	80	0.7	103	0.7	109	0.7	93	0.6	115	0.5	126
黄山	NA		NA		0.2	133	0.6	133	0.8	118	0.8	102	0.6	127	0.6	124	0.5	126	0.5	128	0.5	127
阿拉善盟	NA		NA		0.8	119	0.6	132	0.6	132	0.6	126	0.5	132	0.5	129	0.4	132	0.4	132	0.5	128
威海	NA		0.6	67	0.6	131	0.6	131	0.6	131	0.6	130	0.6	131	0.6	128	0.6	123	0.4	129	0.5	129
舟山	NA		NA		0.7	127	0.6	127	0.7	123	0.7	117	0.6	123	0.6	126	0.5	125	0.4	131	0.5	130
中卫	NA		NA		0.9	91	0.8	110	0.8	110	0.8	89	0.7	108	0.5	131	0.5	131	0.4	130	0.5	131
张家口	0.9	25	NA		0.7	123	0.6	128	0.7	127	0.8	96	0.7	100	0.7	116	0.5	129	0.5	127	0.4	132
锡林郭勒	NA		NA		0.7	126	0.6	130	0.5	133	0.4	133	0.3	133	0.3	133	0.3	133	0.4	133	0.3	133

图 27: “3+130”城市气象调整后 2013 年至 2023 年 CO 年平均浓度(毫克/立方米) 年际变化表(浓度列底纹从红到绿表示年平均浓度由大到小;排名列前/中/后 1/3 分别用红/黄/绿圆点标记)

克/立方米下降 0.13(0.02) 毫克/立方米。

根据图 26和图 27, 2023 年, “3+130” 城市中年均 CO 浓度最高的三个城市分别是临汾 (1.1 毫克/立方米)、晋城 (1.1 毫克/立方米) 与赣州 (1 毫克/立方米), 其中临汾与去年相比浓度与排名均无变化, 依然处于所有城市中最高的位置。2019-2023 年, 临汾的排名始终位于前三位, 萍乡、晋城、长治已连续 5 年排名前 10, 莱芜已连续 4 年排名前 10。2023 年, CO 年均浓度大于等于 1 毫克/立方米的城市共 7 个, 比 2022 年减少 2 个。其中, 只有 1 个城市属于京津冀及周边 “2+36” 城市 (莱芜), 比 2022 年减少 2 个; 有 3 个城市属于汾渭平原, 比 2022 年减少 2 个; 有 3 个城市属于 “其他城市”, 比 2022 年增加 2 个。年均 CO 浓度最低的城市分别是锡林郭勒 (0.3 毫克/立方米)、张家口 (0.4 毫克/立方米) 与中卫 (0.5 毫克/立方米)。

从累计降幅来看, 根据图 25, 相比 2017 年, 2023 年 “3+130” 城市中, 有 126 个城市年均 CO 浓度呈现不同程度下降, 有 7 个城市年均 CO 浓度上升, 分别为日照、青岛、上海、吉安、安庆、抚州和九江。CO 六年累计降幅的城市均值为 28.7% (1.3%)。有 9 个城市累计降幅超过 50%, 分别为淄博、吕梁、菏泽、延安、濮阳、西安、唐山、呼和浩特和洛阳。降幅最大的 20 个城市主要位于河南、山西、山东、河北和陕西。相比 2022 年, “3+130” 城市中, 有 63 个城市年均 CO 浓度下降, 有 70 个城市年均 CO 浓度上升。CO 浓度升幅的城市均值为 1.7% (0.8%), 升幅最大的 20 个城市主要位于安徽、浙江、江西。吕梁六年累计降幅排名靠前, 但本年度升幅排名靠前, 应当加强污染治理, 避免浓度反弹。

3.5 二氧化氮 (NO₂)

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。NO₂ 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。NO₂ 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”。NO₂ 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 SO₂ 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 NO₂ 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 28-29、图 30、图 31 和图 32-33 分别展示了“3+130”市 NO₂ 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, 六年累计降幅和一年降幅, 年度平均浓度及排名。根据上述四图一表, 我们可以总结出 NO₂ 浓度如下几个特征:

• 季度评估

根据图 28-29 可见, 研究区域城市的 NO₂ 也具有明显的季节特征, 主要以冬季最高, 夏季最低。山西季节效应较其余区域不明显, 主要体现在中部和北部城市全年差异较小。

2017 年春季“3+130”城市 NO₂ 浓度均值 (标准误差) 为 37.6(0.9) 微克/立方米, 2023 年下降至 27.3(0.6) 微克/立方米, 年均下降 1.7 微克/立方米。与 2019 年春季浓度均值 35(0.8) 微克/立方米相比, 下降 7.7(0.5) 微克/立方米; 与 2022 年春季浓度均值 26.3(0.6) 微克/立方米相比, 上升 1.0(0.3) 微克/立方米。相比于 2022 年春季, “3+130”城市中, 有 37 个城市 NO₂ 浓度均值显著下降, 占比 27.8%, 降幅平均值为 10.6%; 有 59 个城市显著上升, 占比 44.4%, 升幅平均值为 18.6%。2023 年春季, 阳泉平均浓度最高, 为 41 微克/立方米; 阿拉善平均浓度最低, 为 9.1 微克/立方米。有 21 个城市平均浓度超过国家年平均浓度二级标准。长治为本季度 NO₂ 同比改善幅度最大城市, 平均浓度相比 2022 年同期的 30.8 微克/立方米下降 21.9%; 此外还有 1 个城市降幅超过 20%, 为赣州。黄山为浓度同比升幅最大城市, 平均浓度相比去年同期的 10 微克/立方米上升 50.4%。此外还有 19 个城市升幅超过 20%, 其中包括 11 个重点城市, 分别为京津冀及周边地区的 6 个城市 (廊坊、济南、唐山、滨州、邯郸和沧州), 长三角地区的 5 个城市 (扬州、宿迁、上海、淮南和宿州)。NO₂ 浓度显著上升城市主要集中于山东、江苏、安徽三省, 分别有 11、9、8 个城市浓度上升。

2017 年夏季“3+130”城市 NO₂ 浓度均值 (标准误差) 为 27.1(0.7) 微克/立方米, 2023 年下降至 18.4(0.5) 微克/立方米, 年均下降 1.5 微克/立方米。与 2019 年夏季浓度均值 24.3(0.6) 微克/立方米相比, 下降 5.9(0.4) 微克/立方米; 与 2022 年夏季浓度均值 18.3(0.5) 微克/立方米相比, 上升 0.1(0.2) 微克/立方米。相比于 2022 年夏季, “3+130”城市中, 有 47 个城市 NO₂ 浓度均值显著下降, 占比 35.3%, 降幅平均值为 13.6%; 有 53 个城市显著上升, 占比 39.8%, 升幅平均值为 17%。2023 年夏季, 阳泉平均浓度最高, 为 34.7 微克/立方米; 抚州平均浓度最低, 为 7.4 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。西安为本季度 NO₂ 同比改善幅度最大城市, 平均浓度相比 2022 年同期的 26.3 微克/立方米下降 31.6%; 此外还有 9 个城市降幅超过 20%, 其中包括 4 个重点城市, 分别为京津冀及周边地区的安阳、临沂, 汾渭平原的西安, 和长三角地区的盐城。宿州为浓度同比升幅最大城市, 平均浓度相比去年同期的 10.2 微克/立方米上升 47.4%。此外还有 18 个城市升幅超过 20%, 其中包括 11 个重点城市, 分别为京津冀及周边地区的 7 个城市 (秦皇岛、德州、日照、潍坊、开封、莱芜和焦作), 长三角地区的 4 个城市 (阜阳、淮北、淮南和宿州)。NO₂ 浓度显著上升城市主要集中于山东、河南、安徽三省, 分别有 11、9、8 个城市浓度上升。

2017 年秋季“3+130”城市 NO₂ 浓度均值 (标准误差) 为 41.9(1) 微克/立方米, 2023 年下降至 34.6(0.8) 微克/立方米, 年均下降 1.2 微克/立方米。与 2019 年秋季浓度均值 41.1(0.9) 微克/立方米相比, 下降 6.5(0.5) 微克/立方米; 与 2022 年秋季浓度均值 31.9(0.7) 微克/立方米相比, 上升 2.7(0.3) 微克/立方米。相比于 2022 年秋季, “3+130”城市中, 有 14 个城市 NO₂ 浓度均值显著下降,

占比 10.5%，降幅平均值为 13.4%；有 87 个城市显著上升，占比 65.4%，升幅平均值为 15.9%。2023 年秋季，莱芜平均浓度最高，为 53.8 微克/立方米；阿拉善平均浓度最低，为 11.6 微克/立方米。有 68 个城市平均浓度超过国家年平均浓度二级标准。呼和浩特为本季度 NO₂ 同比改善幅度最大城市，平均浓度相比 2022 年同期的 42.3 微克/立方米下降 28.6%；此外还有 2 个城市降幅超过 20%，分别为乌兰察布、黄山。安庆为浓度同比升幅最大城市，平均浓度相比去年同期的 21.8 微克/立方米上升 59.1%。此外还有 20 个城市升幅超过 20%，其中包括 17 个重点城市，分别为京津冀及周边地区的 6 个城市（秦皇岛、德州、郑州、枣庄、焦作和济宁），汾渭平原的 2 个城市（宝鸡、运城），长三角地区的 9 个城市（镇江、淮北、淮安、泰州、亳州、宿迁、南通、扬州、无锡）。NO₂ 浓度显著上升城市主要集中于山东、江苏、安徽三省，分别有 13、13、12 个城市浓度上升。

2017 年冬季“3+130”城市 NO₂ 浓度均值（标准误差）为 48.5(1) 微克/立方米，2023 年下降至 38.2(0.7) 微克/立方米，年均下降 1.7 微克/立方米。与 2019 年冬季浓度均值 38.4(0.8) 微克/立方米相比，下降 0.2(0.5) 微克/立方米；与 2022 年冬季浓度均值 39.1(0.8) 微克/立方米相比，下降 0.9(0.4) 微克/立方米。相比于 2022 年冬季，“3+130”城市中，有 55 个城市 NO₂ 浓度均值显著下降，占比 41.4%，降幅平均值为 11.7%；有 43 个城市显著上升，占比 32.3%，升幅平均值为 12.6%。2023 年冬季，莱芜平均浓度最高，为 55.6 微克/立方米；锡林郭勒平均浓度最低，为 13.3 微克/立方米。有 93 个城市平均浓度超过国家年平均浓度二级标准。西安为本季度 NO₂ 同比改善幅度最大城市，平均浓度相比 2022 年同期的 58.6 微克/立方米下降 33.6%；湖州为浓度同比升幅最大城市，平均浓度相比去年同期的 39.8 微克/立方米上升 36.3%。此外还有 6 个城市升幅超过 20%，其中包括 3 个重点城市（南通、舟山、湖州），均位于长三角地区。NO₂ 浓度显著上升城市主要集中于浙江、江苏、江西三省，分别有 10、8、8 个城市浓度上升。

• 年度评估：年度变化趋势与城市相对排名

2017 年“3+130”城市 NO₂ 浓度均值（标准误差）为 38.8(0.9) 微克/立方米，2023 年下降至 29.6(0.6) 微克/立方米，年均下降 1.5 微克/立方米。与 2019 年浓度均值 34.7(0.7) 微克/立方米相比，下降 5.1(0.4) 微克/立方米；与 2022 年浓度均值 28.9(0.6) 微克/立方米相比，上升 0.7(0.2) 微克/立方米，浓度上升发生在春夏秋三季。

2023 年，NO₂ 出现小幅回升的总体趋势，仅汾渭平原维持浓度下降态势。分区域来看，2023 年京津冀及周边“2+36”城市 NO₂ 浓度均值 32.9(0.7) 微克/立方米，比 2022 年的 32.4(0.6) 微克/立方米上升 0.5(0.3) 微克/立方米，比 2019 年的 39.7(0.9) 微克/立方米下降 6.8(0.7) 微克/立方米。汾渭平原 2023 年浓度均值为 35.2(1.6) 微克/立方米，比 2022 年的 37.1(2) 微克/立方米下降 1.9(0.9) 微克/立方米；比 2019 年的 41.5(2) 微克/立方米下降 6.3(1.2) 微克/立方米。长三角地区 2023 年浓度均值为 29.9(0.9) 微克/立方米，比 2022 年的 27.6(0.8) 微克/立方米上升 2.3(0.4) 微克/立方米；比 2019 年的 35(1.2) 微克/立方米下降 5.1(0.7) 微克/立方米。“其他城市”2023 年浓度均值为 25.5(1) 微克/立方米，比 2022 年的 24.8(1) 微克/立方米上升 0.7(0.3) 微克/立方米；比 2019 年的 28.9(1.2) 微克/立方米下降 3.4(0.5) 微克/立方米。

根据图 32 和图 33，2023 年，“3+130”城市中，NO₂ 年均浓度最高的三个城市分别是阳泉（43.9 微克/立方米）、太原（43.7 微克/立方米）和莱芜（43.4 微克/立方米）。排名前 5 的城市中，吕梁、太原、

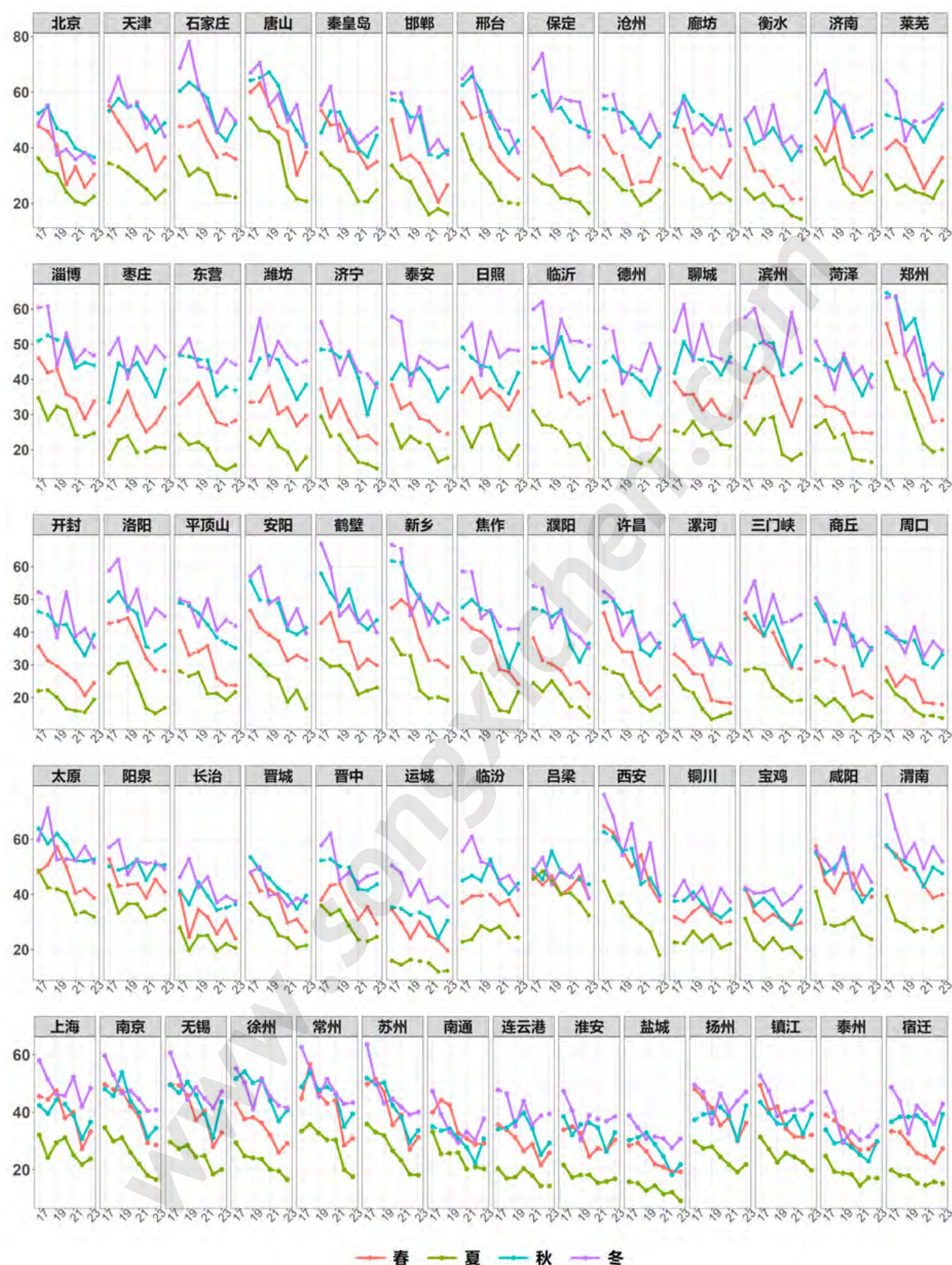


图 28: “3+130” 城市气象调整后 2017 年至 2023 年 NO_2 季节平均浓度 (微克/立方米) 变化序列图, 图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

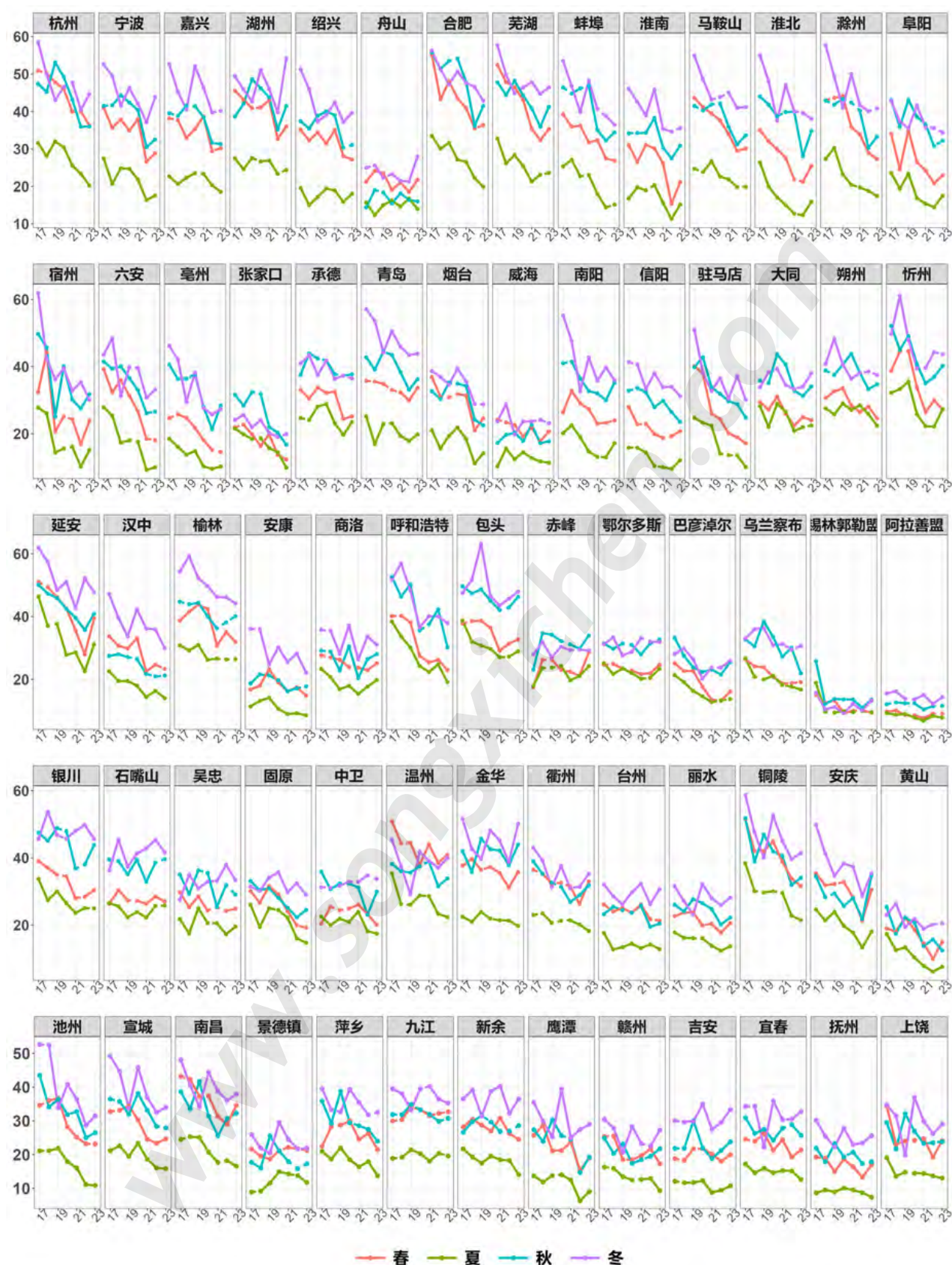


图 29: “3+130” 城市气象调整后 2017 年至 2023 年 NO_2 季节平均浓度 (微克/立方米) 变化序列图, 图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

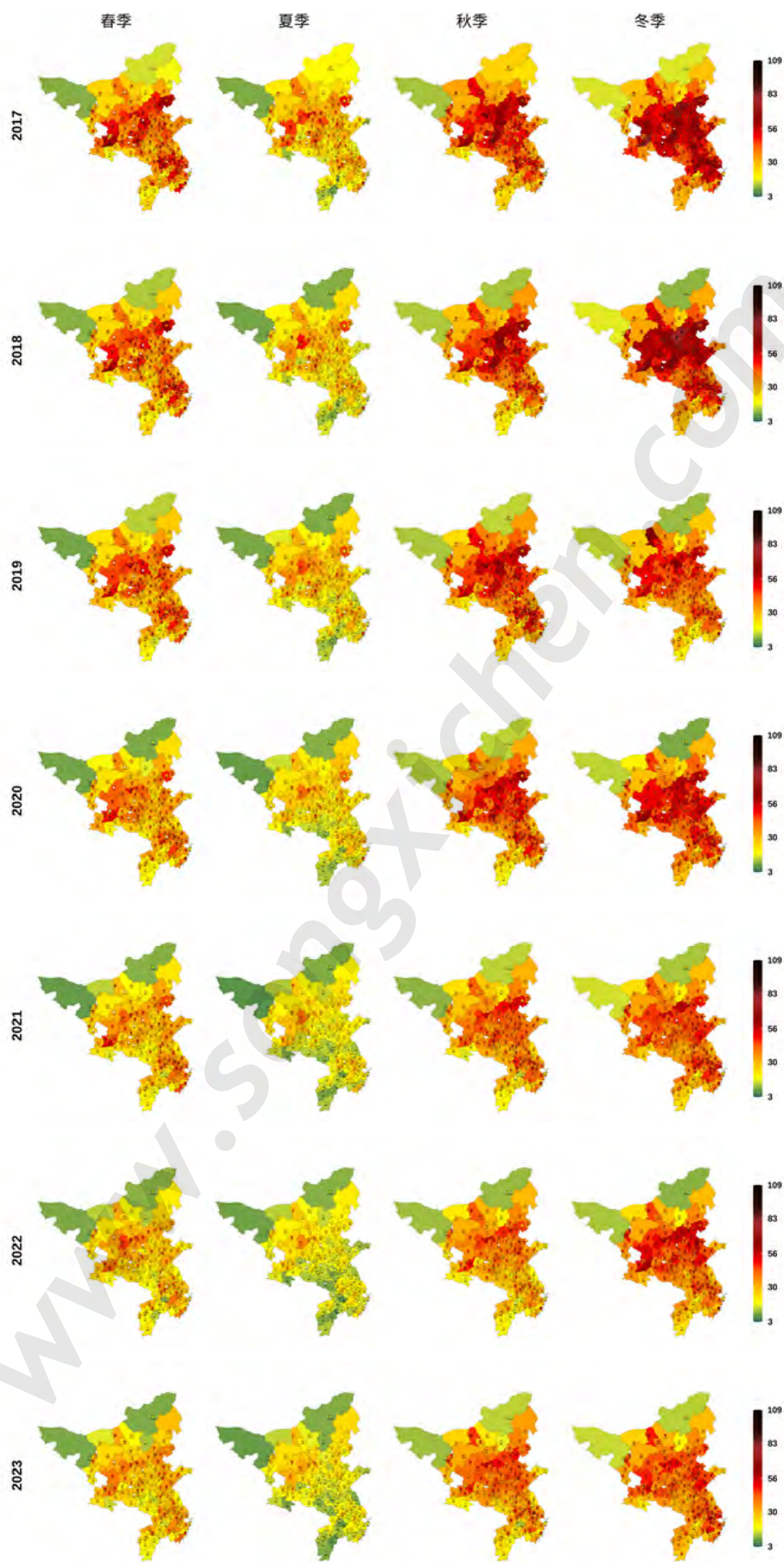


图 30: “3+130”城市气象调整后 2017 年至 2023 年 NO₂ 季节平均浓度 (微克/立方米)

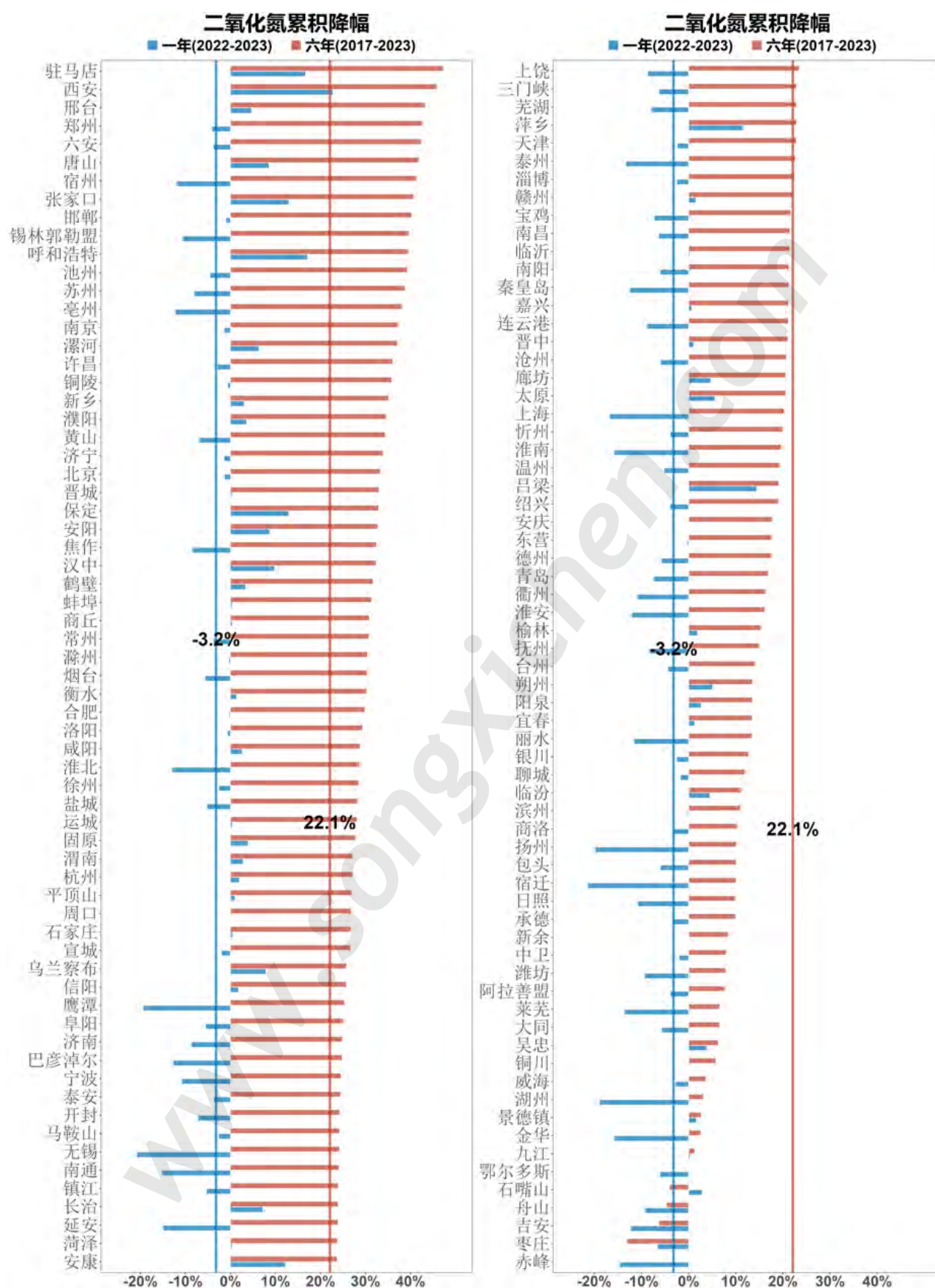


图 31: “3+130”城市气象调整后 NO₂ 浓度过去一年（蓝色）的降幅、六年（红色）的累计降幅, 蓝色和红色竖线分别代表“3+130”城市的一年和六年平均降幅
(注: 负数代表平均浓度相对升高)

城市	2013年	排名	2014年	排名	2015年	排名	2016年	排名	2017年	排名	2018年	排名	2019年	排名	2020年	排名	2021年	排名	2022年	排名	2023年	排名
阳泉	NA		42.6	●36	40.4	●55	46.2	●27	50.8	●12	46.3	●21	44.3	●16	46.4	●5	41.8	●6	45.1	●2	43.9	●1
太原	NA		38.1	●46	38.8	●59	49.2	●20	55.1	●6	55.7	●3	53.5	●2	50.4	●3	44.4	●1	46.3	●1	43.7	●2
莱芜	NA		53.7	●11	51.6	●14	43	●36	46.5	●31	44.6	●29	39.6	●45	38.5	●43	35.1	●37	38.2	●10	43.4	●3
渭南	NA		36	●52	44.4	●32	51	●15	57.7	●3	50.6	●10	45.8	●10	45.9	●7	40.7	●10	43.2	●5	42	●4
延安	NA		52	●13	48	●22	51.8	●10	52.3	●10	47.8	●15	44.6	●15	41	●24	36.6	●26	34.6	●28	39.8	●5
石家庄	71	●1	53.2	●12	51.7	●13	55.9	●7	53.4	●8	54.8	●5	51.3	●3	46.3	●6	37.9	●17	39.3	●7	39.1	●6
湖州	NA		NA		36.2	●70	38	●71	40.3	●62	38.9	●56	39.9	●41	41.3	●21	39.9	●12	32.8	●38	39	●7
包头	NA		NA		40.6	●53	41.4	●44	43.4	●43	42.4	●43	45.3	●11	39.5	●38	35.4	●35	36.8	●14	39	●8
天津	54.9	●9	57.3	●6	44.1	●34	50.6	●16	49.9	●17	51.4	●8	46.2	●8	44.6	●8	41.1	●8	37.6	●12	38.5	●9
吕梁	NA		NA		25.3	●109	28.6	●108	47.5	●25	47.7	●17	47.7	●6	44.3	●10	43.9	●2	44.9	●3	38.4	●10
秦皇岛	47.8	●16	50.6	●15	47.1	●23	51.2	●14	48	●22	49.2	●13	43.9	●19	39.5	●37	35	●38	33.6	●33	37.8	●11
济南	NA		55.9	●7	52.1	●11	48	●24	49.9	●19	50.2	●12	47.4	●7	42	●20	35.6	●33	34.5	●30	37.5	●12
沧州	37.7	●21	43.1	●34	41.8	●46	49.1	●21	47.2	●28	45	●28	40	●39	36.9	●56	34	●49	35.3	●23	37.4	●13
金华	NA		NA		38.6	●61	33.8	●86	38.4	●75	34.8	●84	36.4	●60	37.5	●47	36.1	●30	32.3	●40	37.4	●14
咸阳	NA		40.1	●40	44.5	●31	52	●9	52.4	●9	43.6	●36	41.6	●32	47.1	●4	41.1	●7	38.3	●9	37.3	●15
淄博	NA		67.4	●1	62.6	●2	53.3	●8	48.1	●20	45.9	●24	42.6	●25	42.8	●15	36.8	●23	36.4	●16	37.3	●16
日照	NA		37.4	●49	41.4	●47	39.3	●57	41	●58	40.8	●49	36.5	●58	40.3	●31	34.9	●41	33.3	●36	36.9	●17
扬州	36.2	●23	32.3	●59	31.8	●91	34.1	●85	41.1	●55	39.7	●52	36.4	●62	37.1	●53	34.7	●42	30.8	●55	36.9	●18
芜湖	NA		26	●62	38.8	●60	43.7	●32	47.6	●24	42.1	●44	42	●29	39.8	●34	36.4	●27	34	●31	36.7	●19
晋中	NA		NA		33.1	●86	38.1	●69	46	●34	47.7	●16	43.4	●20	40.9	●25	35.2	●36	36.7	●15	36.3	●20
滨州	NA		46.6	●25	40.5	●54	39.3	●58	40.8	●60	43.9	●35	43.2	●21	42.2	●19	34.2	●45	36.2	●19	36.3	●21
银川	44.9	●19	43.2	●33	37.9	●62	39.4	●56	41.5	●52	40.8	●48	40.2	●38	38.7	●42	34.1	●46	35.3	●22	36.2	●22
临沂	NA		NA		45.8	●28	39.6	●53	46.1	●33	45.7	●25	40.5	●36	42.3	●18	37.8	●18	36.3	●18	36.2	●23
廊坊	50.7	●13	49	●18	51.1	●16	51.7	●11	45.4	●37	48.6	●14	40.9	●35	39.6	●35	37	●22	37.8	●11	36	●24
无锡	48.5	●14	43.7	●32	43.6	●35	46.4	●26	47.4	●27	44.1	●33	42.3	●28	39.1	●40	37.4	●21	29.7	●63	35.9	●25
榆林	NA		NA		35.6	●75	36.1	●79	42.2	●49	43.5	●37	42.8	●37	39.6	●36	35	●39	36.4	●17	35.7	●26
临汾	NA		37.8	●48	34.3	●82	38.1	●68	40.1	●65	42.7	●42	41.2	●33	42.6	●16	38.6	●15	37.3	●13	35.6	●27
上海	48	●15	49	●17	46.1	●26	42.5	●39	44.5	●40	39.9	●50	41.9	●30	39.4	●39	39	●14	30.4	●57	35.5	●28
枣庄	NA		42.6	●35	35.6	●77	28.9	●107	31.3	●104	37.5	●66	35.8	●65	35.7	●64	32.3	●60	33.2	●37	35.4	●29
聊城	NA		47.2	●23	43	●39	42.2	●40	40	●67	43.1	●40	38.7	●47	39.1	●41	37.6	●20	34.6	●27	35.2	●30
合肥	35.9	●24	34.3	●56	41	●50	48.8	●23	50.2	●14	44	●34	45.1	●12	43.9	●11	40.8	●9	35.1	●25	35.2	●31
唐山	67.1	●2	62.5	●2	60.8	●4	59.2	●2	60.4	●2	61.3	●1	55.9	●1	52.9	●1	43.4	●3	38.4	●8	35.1	●32
新乡	NA		NA		53.7	●7	49.9	●18	53.5	●7	52.4	●7	45	●13	40.5	●28	34.9	●40	35.8	●20	34.7	●33
忻州	NA		NA		32.7	●87	42.7	●38	43.2	●44	46	●23	44.3	●17	34.9	●69	30.8	●70	33.3	●35	34.6	●34
温州	NA		NA		42	●45	41.7	●43	42.5	●48	36	●74	33.8	●77	36.5	●60	37.7	●19	32.6	●39	34.3	●35
杭州	NA		NA		49.8	●18	45.5	●28	47.1	●29	43.4	●38	44	●18	43.1	●13	39.1	●13	35	●26	34.3	●36
保定	61.3	●4	57.8	●3	59.4	●5	58.3	●4	51	●11	51.1	●9	42.4	●26	41.2	●23	40	●11	39.3	●6	34.2	●37
鹤壁	NA		NA		52.6	●10	50.3	●17	49.9	●18	46.8	●20	40	●40	41.3	●22	34	●47	35.3	●24	34.1	●38
镇江	41.3	●20	46	●26	41.4	●48	38.6	●63	44.2	●41	38.8	●58	34.8	●71	34	●73	33.9	●51	31.9	●42	33.6	●39
西安	60.1	●5	45.2	●30	49.7	●20	58.9	●3	62.1	●1	57.2	●2	50.8	●4	51.1	●2	43.3	●4	43.5	●4	33.6	●40
石嘴山	NA		32.3	●58	27.5	●102	31.1	●101	32.2	●101	35.1	●83	30.6	●90	33	●80	31.1	●67	34.5	●29	33.5	●41
青岛	NA		42.5	●37	35.9	●73	35.1	●82	40.2	●64	36.3	●71	36.6	●56	37.6	●46	34	●48	31.1	●52	33.4	●42
德州	NA		49	●16	42.3	●44	38.4	●65	40.3	●63	37.8	●64	33.1	●79	31.5	●87	30.2	●73	31.4	●47	33.2	●43
潍坊	NA		39.7	●42	37	●66	36.3	●77	35.6	●87	39.5	●54	38.6	●48	36.9	●57	34.4	●43	30	●62	32.8	●44
常州	50.9	●12	45.7	●28	46.1	●25	40.8	●47	47.4	●26	50.4	●11	43.1	●22	43.5	●12	41.9	●5	31.6	●44	32.8	●45
郑州	53.7	●11	55.1	●8	61	●3	58	●5	57.2	●4	53	●6	46.1	●9	44.4	●9	36.2	●29	31.5	●45	32.8	●46
邢台	65	●3	57.5	●5	63.7	●1	63.4	●1	57.1	●5	55.2	●4	48.7	●5	42.9	●14	36.7	●25	34	●32	32.4	●47
三门峡	NA		40.2	●39	43.1	●38	40.4	●50	41.9	●50	42.8	●41	37	●55	39.8	●33	33.7	●53	30.4	●58	32.3	●48
安阳	NA		54.8	●9	51.7	●12	51.7	●12	48	●21	45.4	●26	41.1	●34	40.5	●27	33.1	●55	35.4	●21	32.3	●49
铜陵	NA		NA		37.1	●65	44.6	●30	50.2	●15	39.7	●51	39.7	●43	42.4	●17	38.6	●16	32	●41	32.2	●50
徐州	46.8	●18	38.5	●45	40.9	●51	41.9	●42	44.8	●38	41.7	●45	38.4	●49	40.8	●26	35.4	●34	31.2	●50	32	●51
洛阳	NA		45.4	●29	45.3	●29	45.3	●29	44.6	●39	47.1	●18	42.4	●27	40.4	●30	31.6	●62	31.3	●49	31.5	●52
东营	NA		46.9	●24	44.4	●33	41.3	●45	38	●78	38.8	●57	37.6	●52	35.4	●67	30.2	●74	31.2	●51	31.3	●53
马鞍山	NA		36.2	●51	35.2	●78	34.2	●84	41.2	●54	38.5	●60	37.8	●51	36.6	●59	34.2	●44	30.4	●59	31.2	●54
晋城	NA		NA		42.7	●41	38.4	●64	46.6	●30	43.2	●39	39.6	●44	36.8	●58	32.3	●59	31.3	●48	31.2	●55
宿迁	NA		NA		37	●67	31.7	●97	34.7	●91	33.3	●90	29.5	●99	30.5	●93	28.6	●86	25.7	●91	31.2	●56
铜川	NA		37.2	●50	34.9	●79	33.5	●89	32.9	●97	33.8	●87	34.9	●70	34.6	●71	31.3	●66	31	●53	31	●57
宝鸡	NA		35.5	●53	38.9	●58	40.6	●49	39.6	●68	33.4	●89	32.5	●81	33.5	●77	29.4	●78	28.9	●71	31	●58
北京	56.4	●8	57.5	●4	49.8	●19	51.4	●13	46.3	●32	46.9	●19	38.9	●46	33.9	●74	32.4	●58	30.5	●56	30.9	●59
泰安	NA		44.3	●31	43.5	●36	38.9	●61	40.8	●59	38.3	●62	34.2	●75	35.2	●68	33.5	●54	29.7	●67	30.8	●60
焦作	NA		48.5	●21	53.3	●8	48.9	●22	45.6	●36	44.3	●30	39.7	●42	37.9	●45	30.9	●69	28.4	●74	30.8	●61
苏州	54.8	●10	54.6	●10	54.4	●6	49.6	●19	50.3	●13	46.2	●22	43.1	●23	37.3	●50	35.6	●31	28.5	●72	30.8	●62
承德	36.8	●22	39.5	●43	34.7	●81	36.2	●78	34.1	●95	35.5	●81	35.4	●67	36.2	●62	32.4	●57	29.7	●66	30.7	●63
宁波	NA		NA		42.6	●43	39.3	●59	40.7	●61	36.9	●69	37.1	●54	37.1	●52	35.6	●32	27.7	●81	30.7	●64
平顶山	NA		48.5	●20	45.8	●27																

城市	2013年	排名	2014年	排名	2015年	排名	2016年	排名	2017年	排名	2018年	排名	2019年	排名	2020年	排名	2021年	排名	2022年	排名	2023年	排名
南昌	NA		NA		32.3	89	33.6	88	38.6	74	35.4	82	34.5	72	33.5	79	28.3	89	28.5	73	30.3	66
南京	59.1	6	51.4	14	51.2	15	43.6	33	48	23	44.1	32	44.8	14	39.9	32	36.2	28	29.7	64	30.1	67
菏泽	NA		42	38	39.6	57	36.4	75	39.5	69	37.5	65	33.8	78	37	54	30.9	68	30.2	61	30.1	68
嘉兴	NA		NA		43	40	36.5	73	38.2	76	35.6	77	34.4	73	38.1	44	36.7	24	30.3	60	30.1	69
邯郸	58.3	7	48.1	22	52.6	9	57.2	6	50.1	16	45.3	27	40.4	37	40.4	29	30.1	75	29.6	69	29.9	70
朔州	NA		NA		33.8	84	33.8	87	34.5	92	36.1	73	35.9	64	33.9	75	32.8	56	31.4	46	29.8	71
滁州	NA		NA		34.8	80	40.2	51	42.7	47	41.3	47	37.9	50	37.2	51	33.9	50	29.6	68	29.7	72
安庆	NA		NA		31.3	93	36.6	72	36.1	83	30.7	98	30.1	95	29.2	104	27.9	93	21.3	114	29.7	73
大同	NA		28.5	60	25	111	29.4	106	31.8	103	30.7	99	35.7	66	31.9	85	27.3	96	28.1	76	29.7	74
淮安	23.3	29	23.3	66	24	113	25.7	115	35.3	89	31.2	96	29.2	102	29.5	100	28.8	84	26.4	87	29.6	75
长治	NA		NA		40.7	52	42.1	41	38.9	71	33.4	88	36.6	57	35.7	65	29.3	79	31.9	43	29.6	76
开封	NA		38	47	42.7	42	39.6	55	39.1	70	37.4	67	32.5	80	34.6	70	29.2	81	27.6	82	29.6	77
衢州	NA		NA		32.1	90	33.4	90	35.4	88	33.3	91	29.2	101	30.7	92	27.7	94	26.7	84	29.6	78
九江	NA		NA		30.4	97	29.4	104	30	106	29.9	102	30.9	86	31.6	86	30.5	72	29.7	65	29.6	79
南通	35.8	25	39.8	41	36.8	68	34.4	83	38.9	73	35.6	76	33.9	76	29.7	97	28	92	25.6	92	29.5	80
赤峰	NA		26.5	61	23.3	117	19	128	21.6	124	29.1	106	27.8	107	27.5	109	25.6	105	25.3	94	29	81
绍兴	NA		NA		44.5	30	39.2	60	35.8	85	32.2	93	31.9	84	32.5	82	33.9	52	27.9	77	29	82
衡水	47.5	17	45.9	27	46.8	24	44.2	31	41.3	53	37.3	68	35.4	68	37	55	32	61	29.2	70	28.8	83
淮北	NA		NA		40.2	56	39.7	52	40.1	66	35.5	80	30.8	88	32.4	83	28.7	85	25.3	95	28.6	84
济宁	NA		48.9	19	48.5	21	41.1	46	42.8	46	37.9	63	36.5	59	35.8	63	30.7	71	27.9	78	28.3	85
许昌	NA		NA		50.1	17	47.4	25	44.1	42	41.3	46	36.4	61	36.4	61	28.6	87	27.4	83	28.2	86
蚌埠	NA		NA		34.3	83	40.8	48	41.1	56	38.7	59	36.2	63	37.5	48	31.5	64	28.3	75	28.2	87
鄂尔多斯	NA		NA		23.4	116	24.7	118	28.1	115	27.4	112	26.5	111	26.1	114	25.7	104	26.5	86	28.1	88
南阳	NA		22.7	67	30.7	95	29.4	105	35.7	86	36.1	72	29.3	100	29.4	101	26	102	26.5	85	28.1	89
泰州	NA		24	65	33.4	85	32	94	36.2	82	31.4	95	28.1	106	27.1	111	24.3	109	24.7	102	28	90
呼和浩特	NA		NA		35.7	74	42.9	37	45.7	35	44.3	31	41.7	31	31	90	31.3	65	33.3	34	27.6	91
连云港	34.7	26	34.9	55	28.9	101	31.8	96	34.5	93	33	92	30.2	94	32.6	81	29.2	80	25	99	27.2	92
濮阳	NA		NA		43.3	37	43	35	41	57	38.3	61	35.3	69	35.7	66	29.5	77	27.8	80	26.8	93
阜阳	NA		NA		37.3	64	38.8	62	35.8	84	29.3	105	34.3	74	30.9	91	28	91	25.4	93	26.8	94
吴忠	NA		NA		22.8	121	30.3	102	28.5	112	26.8	115	30.2	93	28.4	106	26.1	101	27.8	79	26.7	95
商洛	NA		NA		27	103	26.1	112	29	111	28	109	23.5	116	27.4	110	21.5	119	25.2	97	26	96
商丘	NA		NA		35.6	76	31.8	95	37.6	81	34.5	85	32.3	82	33.5	78	27.1	98	26.1	88	26	97
新余	NA		NA		23.1	119	27.5	111	28.3	114	29.7	103	27.3	110	28.8	105	29.1	83	25.9	89	25.9	98
淮南	NA		NA		30.6	96	35.2	81	32	102	30.8	97	30.8	87	33.7	76	26.9	99	22.2	111	25.7	99
宣城	NA		NA		35.9	72	36.4	74	34.9	90	34	86	29.9	97	34.4	72	28.3	90	25.1	98	25.6	100
中卫	NA		NA		21	126	22.6	122	27.5	116	26.8	114	27.6	108	27.8	108	28.5	88	24.8	100	25.3	101
宿州	NA		NA		29.5	100	39.6	54	43	45	39.6	53	24.1	115	30.1	95	25.9	103	22.5	109	25.2	102
周口	NA		35.3	54	25.4	108	29.5	103	33.9	96	30.3	100	29.1	103	30.1	94	24	110	24.8	101	24.8	103
运城	NA		NA		36.1	71	35.7	80	34.1	94	31.7	94	28.2	105	31.1	89	27.3	97	24.6	104	24.5	104
漯河	NA		NA		36.5	69	38.2	67	37.7	80	35.5	79	30.6	89	29.7	98	23.9	111	25.3	96	23.7	105
宜春	NA		NA		23.8	114	24.9	117	26.7	118	24.8	118	23	119	24	119	24.5	107	23.4	107	23.1	106
池州	NA		NA		23.4	115	32.6	93	37.9	79	35.9	75	32.2	83	29.7	99	27.6	95	22	112	23	107
萍乡	NA		NA		20.6	127	23.4	119	29.7	108	27.4	113	30.5	91	29.3	103	26.2	100	25.9	90	22.9	108
烟台	NA		39.2	44	32.4	88	36.3	76	32.3	100	28.5	107	30	96	32	84	29.9	76	21.3	113	22.5	109
上饶	NA		NA		29.6	99	31.6	99	29.4	110	22.5	123	22.7	120	25.6	115	23.1	116	20.7	116	22.5	110
汉中	NA		NA		31.3	92	31.7	98	32.7	98	29.4	104	27.5	109	30	96	23.7	113	24.5	105	22.1	111
乌兰察布	NA		NA		30.7	94	31.5	100	29.8	107	27.9	110	29.6	98	26.6	113	23.9	112	24	106	22.1	112
吉安	NA		NA		21.1	125	22.7	121	20.7	127	20.4	127	23.4	117	22.7	122	18.8	126	19.6	118	22	113
六安	NA		NA		22.2	122	38.2	66	38	77	36.4	70	31.1	85	31.5	88	29.2	82	21.1	115	21.9	114
信阳	NA		32.4	57	29.7	98	28.4	110	29.5	109	28.2	108	25.8	113	24.1	118	23.1	115	22.3	110	21.9	115
周原	NA		NA		25.2	110	28.5	109	30.2	105	26.7	116	30.4	92	29.4	102	25.3	106	22.7	108	21.8	116
台州	NA		NA		22.8	120	21.4	125	24.8	121	22.7	122	22.3	124	22.9	121	24.3	108	20.4	117	21.3	117
丽水	NA		NA		26	106	23.3	120	24.5	122	22.8	121	22.7	121	25.7	120	21.8	118	19	121	21.2	118
驻马店	NA		NA		37.6	63	38	70	38.9	72	35.5	78	28.8	104	26.7	112	23.5	114	24.6	103	20.5	119
巴彦淖尔	NA		NA		25.6	107	33	91	27	117	24.8	117	22.3	123	18.7	129	18.3	128	18	125	20.3	120
盐城	26.8	28	25.2	64	26.7	104	26.1	113	28.3	113	27.6	111	25.7	114	24.2	117	22	117	19.3	119	20.3	121
亳州	NA		NA		41.1	49	33	92	32.5	99	30.1	101	26.1	112	28.1	107	21	121	17.9	126	20.1	122
舟山	NA		NA		22.2	123	17.9	129	19.1	129	20.3	128	19.8	126	18.5	130	18.8	125	18.3	122	20	123
鹰潭	NA		NA		23.2	118	25	116	25.6	119	23.6	120	22.6	122	25.1	116	21.4	120	16	129	19.1	124
赣州	NA		NA		20.1	128	21.9	124	24.3	123	22.4	124	19	129	19.2	126	18.5	127	19.2	120	18.9	125
威海	NA		25.5	63	24.4	112	19.8	126	18.9	130	21.9	126	18.8	130	18.8	128	20.2	122	17.7	127	18.2	126
景德镇	NA		NA		19.4	129	16.4	131	18.5	132	16.7	131	19.1	128	21.7	124	19.7	123	18.3	123	18	127
抚州	NA		NA		21.2	124	19.7	127	20	128	17.9	130	17.4	131	19	127	17.4	129	15.7	130	17	128
安康	NA		16.4	68	17	130	17.4	130	20.7	126	22.2	125	20.8	125	19.9	125	16.7	130	18	124	15.8	129
张家口	32.3	27	NA		26.2	105	26	114	24.8	120	24.1	119	23.1	118	22.7	123	19.5	124	16.9	128	14.7	130
黄山	NA		NA		15.4	131	22.3	123	21.2	125	18.6	129	19.3	127	17.9	131	13.8	131	13	131	13.9	131
锡林郭勒	NA		NA		10.2	133	12.4	132	18.9	131	11.2	133	11.9	132	10.5	133	11.3	132	10.3	132	11.4	132
阿拉善盟	NA		NA		12.6																	

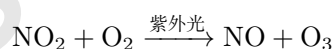
渭南已连续 5 年排名前 10，阳泉已连续 4 年排名前 10，且近三年排名连续上升；太原近三年排名一直处于前三。这两个城市的 NO₂ 治理有待加强。2023 年，NO₂ 年均浓度超过 40 微克/立方米的城市有 4 个，比 2022 年减少 1 个。其中京津冀及周边“2+36”城市有 1 个，比 2022 年增加 1 个；汾渭平原原有 3 个，比 2022 年减少 2 个。年均浓度低于 30 微克/立方米的城市有 64 个，比 2022 年减少 7 个。其中京津冀及周边“2+36”城市有 9 个，比 2022 年减少 2 个；汾渭平原原有 2 个，与 2022 年持平；长三角地区有 15 个，比 2022 年减少 5 个；“其他城市”有 38 个，与 2022 年持平。此外，2017-2023 年间，除 2023 年江苏南京市 NO₂ 浓度略低于省内其他城市均值外，各省的省会城市 NO₂ 浓度均明显高于非省会城市，这与 NO₂ 排放大量来源于移动源（车辆）的特点是吻合的。

从累计降幅来看，根据图 31，相比 2017 年，2023 年“3+130”城市中，有 127 个城市年均 NO₂ 浓度呈现不同程度下降，但仍有 6 个城市年均 NO₂ 浓度上升，分别为鄂尔多斯、石嘴山、舟山、吉安、枣庄和赤峰，其中枣庄市为重点城市。NO₂ 六年累计降幅的城市均值为 22.1%（1.1%）。有 9 个城市累计降幅超过 40%，分别为驻马店、西安、邢台、郑州、六安、唐山、宿州、张家口和邯郸，降幅最大的 20 个城市主要位于河南、安徽、河北。相比 2022 年，“3+130”城市年均 NO₂ 浓度的城市均值上升 3.2%（0.7%），有 85 个城市年均 NO₂ 浓度上升，有 48 个城市年均 NO₂ 浓度下降，升幅最大的 20 个城市主要位于江苏、安徽。亳州六年累计降幅排名靠前，但本年度升幅排名靠前，应当加强污染治理，避免浓度反弹。

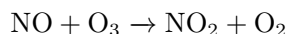
3.6 8 小时臭氧（O₃）

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 [20]。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 O₃ 污染问题日益突出，O₃ 和 PM_{2.5} 已成为大气污染的两个首要污染物。低空 O₃ 的生成主要来自大气光化学反应。已知的低空 O₃ 生成的一个重要途径是：



这一反应说明 NO₂ 在白天光照下会促进 O₃ 生成，同时也意味着在光照强度最高的中午和下午时段 O₃ 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 O₃ 的重要前体物。

我国关于 O₃ 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 O_3 的生成受到光照强度的影响，一天中 O_3 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 34-35、图 36 图 37 和图 38-39 分别展示了“3+130”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，六年累计增幅和一年增幅（春夏），年度平均浓度及排名。图 40-41 还展示了 8 小时 O_3 经气象调整的季节 90% 分位数浓度时间序列图。根据上述六图一表，我们可以总结出 8 小时 O_3 浓度如下几个特征：

• 季度评估

根据图 34-35， O_3 具有与前五种污染物不同的季节效应，在夏季浓度最高，冬季最低。这是由于夏天光照强， O_3 的产生与光照强度高度相关而造成的。北方地区臭氧浓度的在四季区分明显，春季浓度明显高于秋季，而南方地区春夏秋季节 O_3 浓度相对接近。

2017 年春季“3+130”城市 O_3 浓度均值（标准误差）为 116(1.1) 微克/立方米，2023 年上升至 121.5(1.1) 微克/立方米，年均上升 0.9 微克/立方米。与 2019 年春季浓度均值 123.2(1.3) 微克/立方米相比，下降 1.7(0.7) 微克/立方米；与 2022 年春季浓度均值 122.6(1) 微克/立方米相比，下降 1.1(0.5) 微克/立方米。与 2022 年春季相比，“3+130”城市中，有 27 个城市 O_3 浓度均值显著下降，占比 20.3%，降幅平均值为 7.8%；有 18 个城市显著上升，占比 13.5%，升幅平均值为 5.9%。2023 年春季，德州平均浓度最高，为 149.1 微克/立方米；萍乡平均浓度最低，为 87.3 微克/立方米。榆林为本季度 O_3 同比改善幅度最大城市，平均浓度相比 2022 年同期的 123.9 微克/立方米下降 13.8%；汉中为浓度同比升幅最大城市，平均浓度相比去年同期的 106 微克/立方米上升 10.6%。 O_3 浓度显著上升城市主要集中于山东、内蒙古、安徽三省，分别有 5、2、2 个城市浓度上升。

2017 年夏季“3+130”城市 O_3 浓度均值（标准误差）为 135.6(2.4) 微克/立方米，2023 年上升至 140.6(2.1) 微克/立方米，年均上升 0.8 微克/立方米。与 2019 年夏季浓度均值 143.1(2.2) 微克/立方米相比，下降 2.5(0.9) 微克/立方米；与 2022 年夏季浓度均值 135.9(2) 微克/立方米相比，上升 4.7(0.6) 微克/立方米。与 2022 年夏季相比，“3+130”城市中，有 5 个城市 O_3 浓度均值显著下降，占比 3.8%，降幅平均值为 7.4%；有 53 个城市显著上升，占比 39.8%，升幅平均值为 9.1%。2023 年夏季，晋中平均浓度最高，为 184 微克/立方米；绍兴平均浓度最低，为 73.7 微克/立方米。绍兴为本季度 O_3 同比改善幅度最大城市，平均浓度相比 2022 年同期的 81.6 微克/立方米下降 9.7%；太原为浓度同比升幅最大城市，平均浓度相比去年同期的 118.6 微克/立方米上升 18.8%。 O_3 浓度显著上升城市主要集中于河南、内蒙古、山西三省，分别有 9、8、8 个城市浓度上升。

2017 年秋季“3+130”城市 O_3 浓度均值（标准误差）为 89.4(1.3) 微克/立方米，2023 年上升至 98.2(1.2) 微克/立方米，年均上升 1.5 微克/立方米。与 2019 年秋季浓度均值 97.1(1.4) 微克/立方米相比，上升 1.1(0.8) 微克/立方米；与 2022 年秋季浓度均值 100.8(1.1) 微克/立方米相比，下降 2.6(0.7) 微克/立方米。与 2022 年秋季相比，“3+130”城市中，有 46 个城市 O_3 浓度均值显著下降，占比 34.6%，降幅平均值为 10.9%；有 14 个城市显著上升，占比 10.5%，升幅平均值为 9.5%。2023 年秋

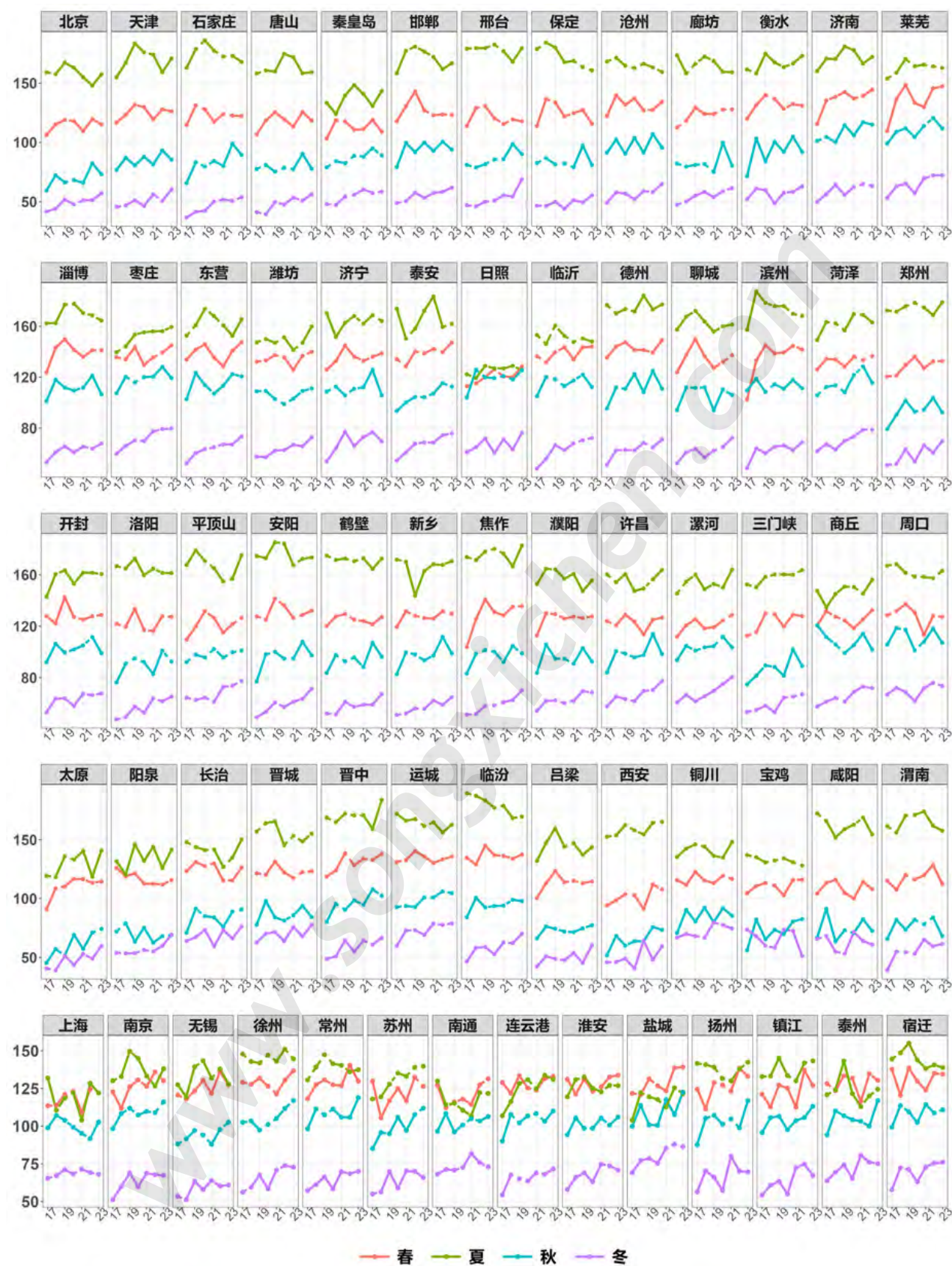


图 34: “3+130”城市气象调整后 2017 年至 2023 年 8 小时 O_3 季节平均浓度 (微克/立方米) 变化序列图, 图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

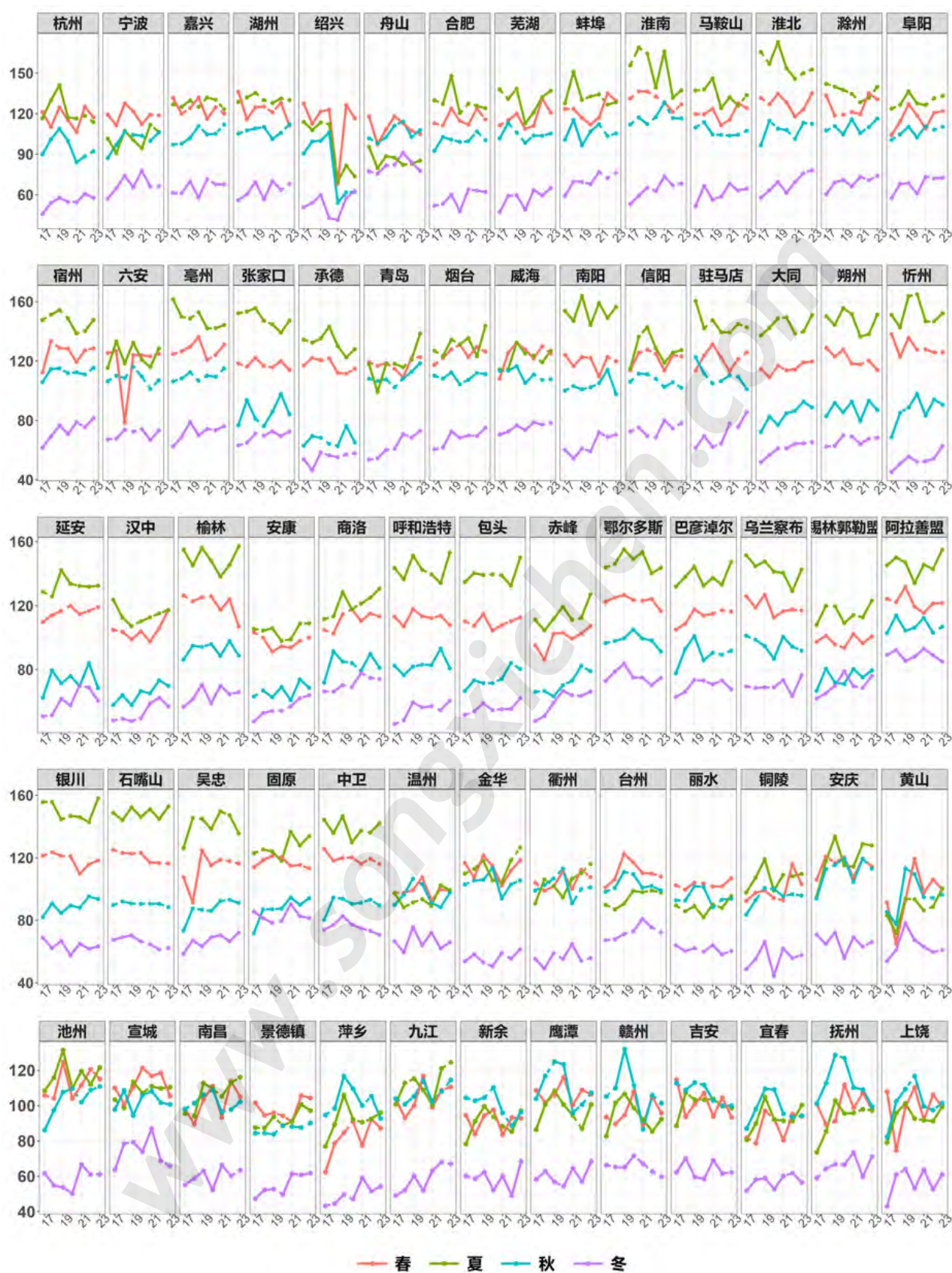


图 35: “3+130”城市气象调整后 2017 年至 2023 年 8 小时 O_3 季节平均浓度 (微克/立方米) 变化序列图, 图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

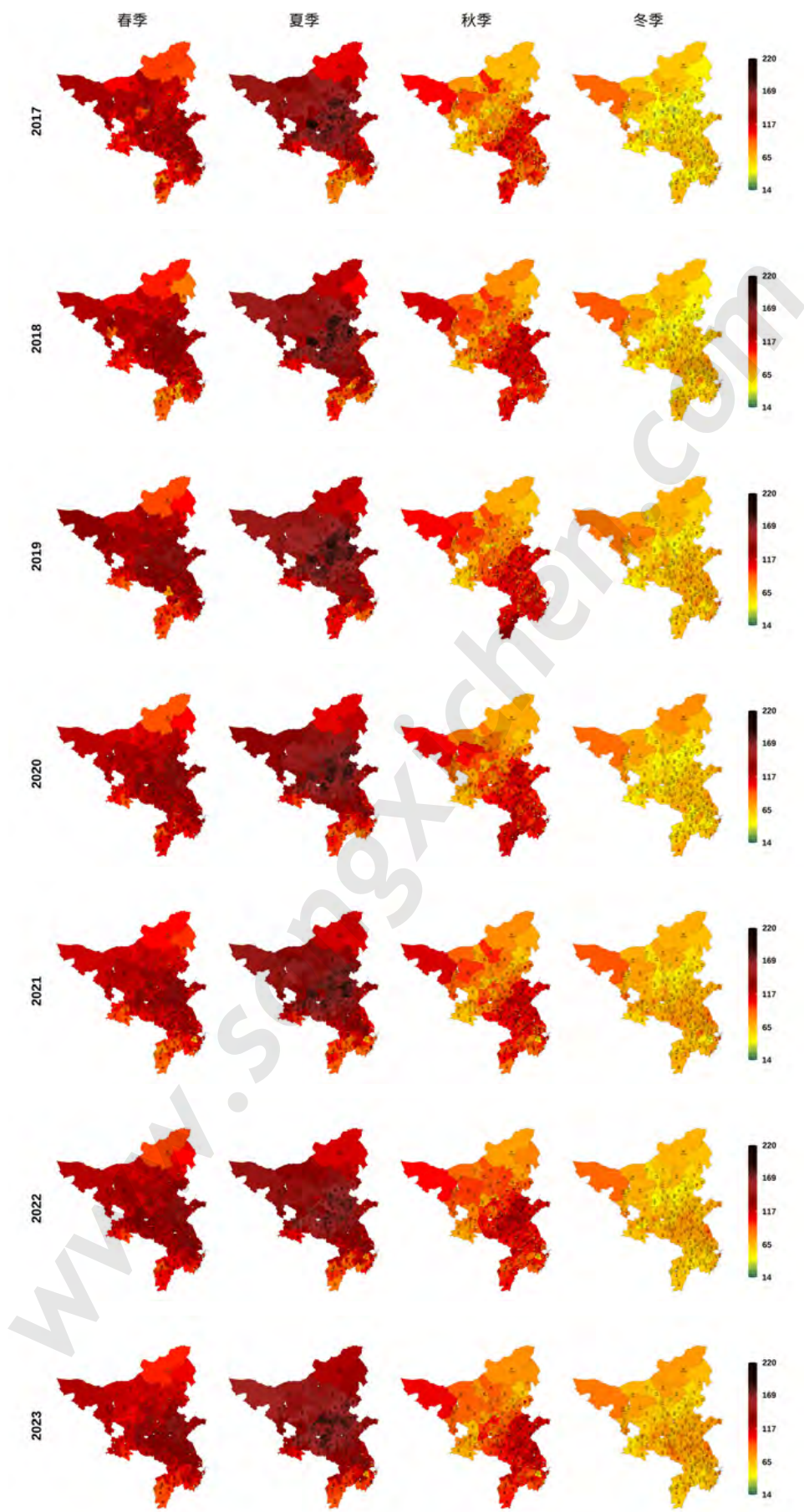


图 36: “3+130” 城市气象调整后 2017 年至 2023 年 8 小时 O₃ 季节平均浓度 (微克/立方米)

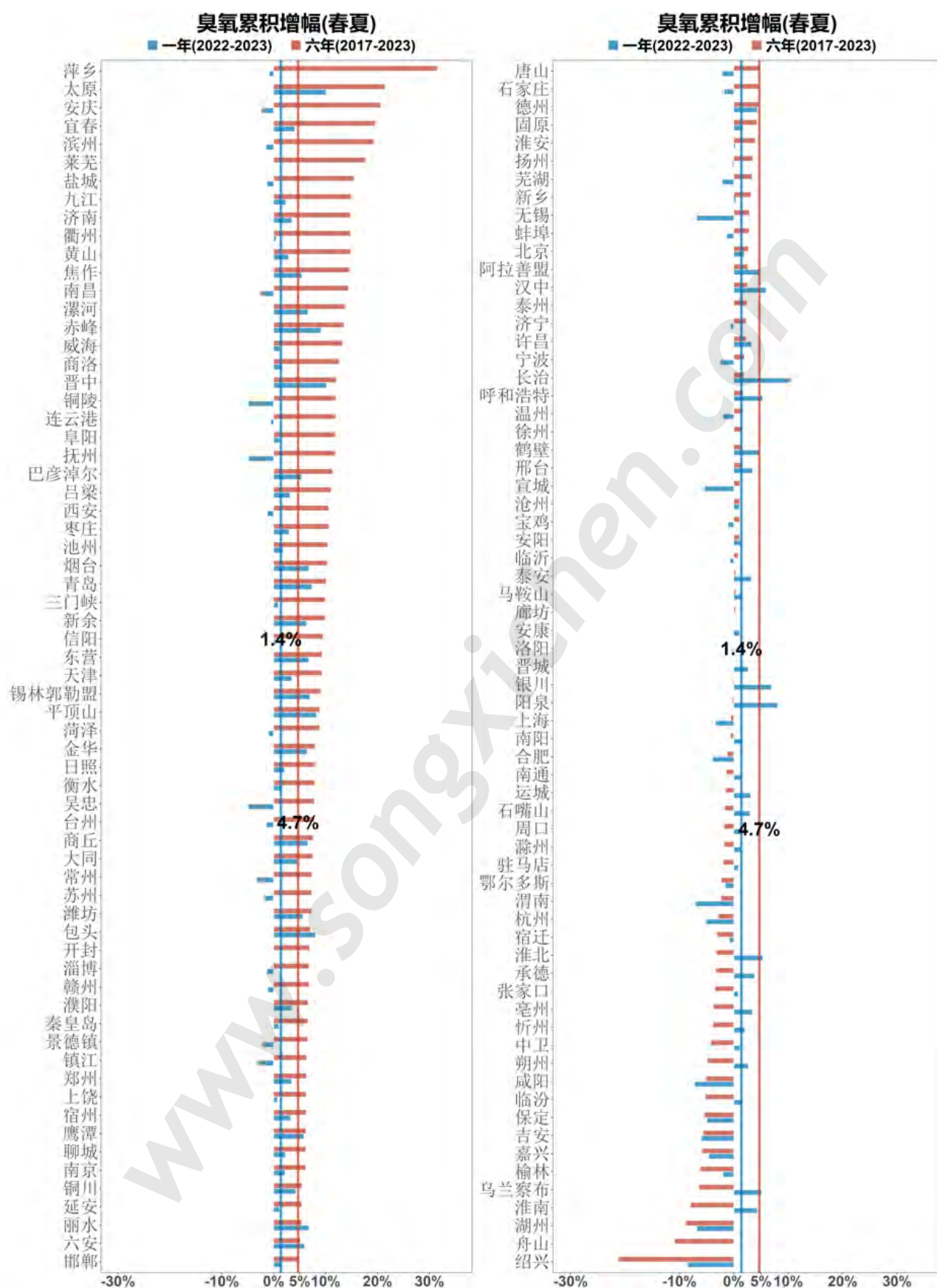


图 37: “3+130”城市气象调整后 8 小时春夏 O_3 浓度过去一年（蓝色）的增幅、六年（红色）的累计增幅, 蓝色和红色竖线分别代表 “3+130” 城市的一年和六年平均增幅
(注: 与其他污染物不同, 8 小时春夏 O_3 正数代表平均浓度相对增加)

城市	2013年	排名	2014年	排名	2015年	排名	2016年	排名	2017年	排名	2018年	排名	2019年	排名	2020年	排名	2021年	排名	2022年	排名	2023年	排名
德州	NA		82.7	●38	108.6	●6	112.5	●3	114.7	●3	122.1	●3	123.7	●5	124.4	●1	125.5	●1	125.6	●5	127	●1
东营	NA		116.8	●2	111.5	●2	111.7	●5	110.3	●19	121.6	●4	124.2	●3	118.8	●7	117.4	●13	120.7	●11	126.7	●2
枣庄	NA		113.5	●3	108.3	●8	107.9	●6	110.5	●18	116.1	●16	120.8	●12	118.7	●8	122.3	●6	125.7	●4	125.8	●3
泰安	NA		75.9	●46	95.9	●44	116.1	●1	113.9	●6	110	●40	117.6	●22	121	●5	125.3	●2	122.2	●8	124.3	●4
济南	NA		104.9	●7	100.4	●26	101.9	●19	106.8	●33	116.8	●14	118.4	●19	123.5	●3	120.8	●8	122	●9	123.8	●5
莱芜	NA		86.3	●35	78.2	●92	99.2	●30	104	●49	116.8	●13	124.1	●4	114.9	●19	119.8	●10	125.7	●3	123.6	●6
菏泽	NA		107.3	●4	107.9	●9	113	●2	110.7	●17	119.3	●9	118.2	●21	115.7	●15	125.2	●3	127.4	●1	123.5	●7
晋中	NA		NA		60.1	●123	85.8	●95	104.1	●48	108.9	●47	116.4	●27	113.1	●26	115.9	●16	115.2	●26	122.7	●8
滨州	NA		70.4	●53	79.2	●89	82.6	●107	104.5	●46	125.8	●1	123	●6	123.6	●2	123.1	●5	123.7	●6	122.5	●9
焦作	NA		89.3	●29	83.7	●80	91.5	●67	103.1	●55	111.9	●35	119.6	●14	117.5	●11	114.6	●19	117.3	●16	121.9	●10
潍坊	NA		118.7	●1	113.4	●1	104.7	●13	111.5	●14	112.3	●32	112.3	●41	112	●30	109.3	●45	114.7	●30	120.9	●11
运城	NA		NA		85.3	●76	75.1	●125	113.9	●7	116.4	●15	118.5	●18	116.9	●13	118.7	●11	118.3	●13	120.5	●12
平顶山	NA		92.4	●24	93.8	●50	95	●55	108.4	●25	114.9	●21	115.7	●29	113.8	●22	109.6	●42	113.1	●38	120.1	●13
淄博	NA		95.9	●16	97.3	●36	98.3	●37	110	●20	121.2	●5	126	●1	122.4	●4	120.9	●7	123.6	●7	120	●14
淮北	NA		NA		101.1	●21	101	●26	112.9	●11	115.5	●18	121.5	●9	112.9	●28	108.7	●50	115.6	●24	119.6	●15
济宁	NA		106.7	●5	100.8	●24	101.2	●24	114.6	●4	115.2	●19	122.6	●7	120.3	●6	119.9	●9	126.8	●2	119.5	●16
漯河	NA		NA		105.9	●15	101	●25	103	●56	111.7	●38	112.1	●43	109.1	●44	111.7	●27	115.4	●25	119.2	●17
聊城	NA		72.3	●50	95.3	●48	99.5	●29	106.9	●31	119.4	●8	124.3	●2	117.3	●12	109.8	●40	116.8	●18	119.2	●18
临沂	NA		NA		106.4	●12	97.4	●42	110.7	●16	113.4	●26	121.2	●11	117.9	●10	116.8	●14	121.5	●10	119.1	●19
临汾	NA		62	●63	68.6	●115	80.3	●115	113.7	●9	118.8	●10	120	●13	115.2	●17	118	●12	115.9	●22	118.8	●20
安阳	NA		79.8	●42	73	●105	85.3	●97	107.2	●29	112.4	●31	121.9	●8	118.1	●9	112.6	●23	118.2	●14	118.6	●21
郑州	59	●28	67	●56	89.8	●63	99.8	●27	105.8	●40	108.7	●48	117.5	●23	115.3	●16	115.7	●17	116.4	●20	118.4	●22
宿州	NA		NA		59.4	●124	83.3	●104	106.9	●32	117.1	●12	118.8	●16	115	●18	112.4	●25	113.6	●36	118.3	●23
徐州	94.6	●2	87.8	●32	96	●43	94.9	●57	108.9	●24	108.4	●53	109.7	●59	108.3	●47	110.2	●37	116.8	●19	117.8	●24
周口	NA		88	●30	78.9	●90	102.2	●16	117.1	●1	122.7	●2	121.3	●10	113.2	●25	112.8	●21	120	●12	117.8	●25
盐城	88.2	●6	99.4	●10	109.5	●5	98	●38	98.7	●77	108.5	●50	107.6	●73	105.1	●68	109.8	●41	115	●28	117.5	●26
阿拉善盟	NA		NA		105.4	●17	112.3	●4	115.4	●2	119.6	●7	117.1	●26	111.9	●31	116.6	●15	114.1	●32	117.1	●27
亳州	NA		NA		70.3	●111	95.7	●48	113.8	●8	113.4	●27	117.5	●24	116.5	●14	111.9	●26	112.4	●42	116.7	●28
许昌	NA		NA		93.2	●54	95.1	●53	106.5	●35	110.3	●39	112.9	●38	107.1	●56	107.6	●56	116.4	●21	116.6	●29
新乡	NA		NA		81.6	●85	95.4	●51	106.3	●36	113.4	●28	106.5	●77	109.6	●40	113.4	●20	117.5	●15	116.1	●30
鹤壁	NA		NA		84.5	●78	95.4	●50	107.8	●27	112.1	●34	114	●35	112.2	●29	111.1	●30	113.1	●37	115.9	●31
商丘	NA		NA		95.3	●47	97.5	●41	111.7	●13	109.9	●42	110.7	●52	109	●45	110.8	●32	114.5	●31	115.6	●32
扬州	85.3	●9	87.6	●33	106.9	●10	95.8	●46	102.6	●59	107	●58	110.3	●56	104.4	●72	109.5	●44	111.3	●47	115.5	●33
滁州	NA		NA		42.5	●133	101.5	●21	110.8	●15	109.6	●44	108.1	●67	109.5	●41	106.7	●61	111.9	●44	115.2	●34
宿迁	NA		NA		90.6	●59	93.9	●62	109.9	●21	113.8	●23	118.6	●17	109.8	●38	112.4	●24	115	●27	115.1	●35
衡水	102.5	●1	102.6	●9	103.5	●19	107.1	●7	101.3	●66	113.5	●25	114.7	●31	113.3	●23	110.4	●34	115.5	●23	114.8	●36
邢台	72.7	●23	72.3	●51	73.3	●104	87.6	●90	105.3	●43	108.4	●52	110.5	●55	109.9	●37	108.5	●51	110.1	●50	114.2	●37
烟台	NA		89.6	●28	92.5	●55	88	●87	103.8	●52	103.9	●72	111.8	●45	108.9	●46	108.9	●48	108.5	●56	114.1	●38
开封	NA		72	●52	76.2	●95	95.2	●52	103.9	●51	113.2	●29	117.4	●25	110.1	●35	114.9	●18	116.8	●17	114.1	●39
常州	83.9	●11	96.3	●15	89.9	●62	95.1	●54	101.1	●67	109.9	●41	113	●37	109.7	●39	110.8	●33	112.7	●41	114	●40
驻马店	NA		NA		97	●38	99.1	●31	114.6	●5	111.8	●37	111.5	●46	108.3	●48	110.2	●36	112.9	●40	113.9	●41
日照	NA		94.4	●21	100.4	●27	94.1	●60	100	●74	106.3	●62	110.1	●57	108.2	●49	109.8	●39	107.5	●68	113.9	●42
沧州	83.2	●13	93.3	●22	93.5	●53	101.8	●20	107.8	●26	117.8	●11	111	●50	114	●21	111	●31	114	●34	113.6	●43
青岛	NA		98.2	●12	90.4	●61	89.8	●80	99.8	●75	94.3	●100	101.2	●94	99.1	●96	101	●87	106.2	●78	113.2	●44
南京	75.4	●20	95.5	●17	98.8	●31	101.3	●22	100.6	●73	103.3	●76	114.2	●34	110.7	●33	109.6	●43	109.9	●51	113	●45
镇江	69.5	●25	86.9	●34	106.3	●13	95.5	●49	101	●69	103.1	●77	110.6	●53	102.9	●78	104.7	●74	114.9	●29	112.7	●46
淮南	NA		NA		71.8	●107	86.3	●93	113	●10	120.5	●6	119.5	●15	113.1	●27	124	●4	109.2	●54	112.2	●47
三门峡	NA		81	●40	86.9	●70	95.7	●47	98.3	●80	100.6	●83	109	●64	107.8	●52	106.5	●63	114.1	●33	111.9	●48
泰州	NA		73.2	●49	101.9	●20	98.4	●35	101.8	●63	106.8	●59	114.5	●33	105.8	●63	103.3	●80	107.7	●67	111.8	●49
洛阳	NA		75.1	●48	79.7	●87	101.9	●18	103.2	●54	106.2	●63	114.8	●30	105.5	●66	107	●60	113	●39	111.6	●50
邯郸	84.8	●10	77.7	●44	74.4	●100	88.2	●86	101.1	●68	114.5	●22	118.3	●20	114.3	●20	111.4	●29	111.1	●49	111.5	●51
连云港	90.5	●4	93	●23	100.2	●28	101.2	●23	95.1	●93	103.4	●74	107.3	●75	106.7	●58	106.5	●62	109.2	●55	111.4	●52
南阳	NA		64.8	●59	92.3	●57	104.9	●12	109.7	●22	105.3	●68	112.2	●42	107.1	●57	111.5	●28	113.7	●35	111.1	●53
濮阳	NA		NA		89.2	●65	99.7	●28	100.9	●70	115.6	●17	112.7	●40	109.5	●42	110.3	●35	111.5	●45	111.1	●54
苏州	87.9	●7	95.5	●18	97.8	●33	94.9	●56	97	●84	94.3	●101	102.4	●92	106.2	●62	104.3	●75	112.3	●43	111	●55
长治	NA		NA		98.7	●32	88.3	●85	101.6	●65	108.4	●51	106.9	●76	103.8	●74	97.8	●97	101.4	●93	110.9	●56
天津	79.3	●16	80.3	●41	74.2	●101	87.9	●89	98.6	●78	106.1	●64	111.8	●44	110	●36	107.8	●54	107.8	●65	110.8	●57
晋城	31.8	●30	29.2	●68	69.2	●113	75.8	●123	104.7	●44	113.1	●30	113.2	●36	103.3	●76	108.2	●52	108.2	●60	110.1	●58
蚌埠	NA		NA		83.7	●81	91.3	●70	102.7	●57	114.9	●20	103.3	●88	104.9	●69	110	●38	109.4	●53	109.9	●59
威海	NA		106.3	●6	92.2	●58	91.4	●68	101.7	●64	106.6	●60	114.6	●32	108	●51	108.8	●49	108.4	●59	109.6	●60
阜阳	NA		NA		70.5	●110	80.6	●113	96.5	●86	103.3	●75	110.6	●54	102.4	●82	104.8	●72	108.1	●63	109.4	●61
淮安	78.3	●17	104.1	●8	106.6	●11	98.7	●33	100.7	●72	105.9	●66	107.8	●71	102.5	●81	107.3	●57	108.5	●57	109.4	

城市	2013年	排名	2014年	排名	2015年	排名	2016年	排名	2017年	排名	2018年	排名	2019年	排名	2020年	排名	2021年	排名	2022年	排名	2023年	排名
南通	93.1	●3	97.3	●14	100.9	●23	98.4	●36	105.4	●42	101.5	●80	99.6	●100	100.5	●90	102.1	●84	107.2	●71	108.1	●66
忻州	NA		NA		86.2	●72	83	●105	100.9	●71	100.4	●84	111	●49	110.7	●34	102.6	●81	105.3	●81	107.9	●67
信阳	NA		97.8	●13	92.4	●56	92	●66	101.9	●62	112.2	●33	112.8	●39	107.6	●53	103.8	●77	107.5	●69	107.7	●68
马鞍山	NA		65.4	●58	82.6	●83	89.7	●82	104.5	●45	109.4	●46	107.7	●72	99.7	●93	104.9	●71	105.3	●82	107.4	●69
廊坊	72.8	●22	82.1	●39	87.8	●68	96	●45	104	●50	101.6	●79	108	●70	109.1	●43	105.4	●68	111.5	●46	107.3	●70
芜湖	NA		46.1	●67	45.3	●131	74.8	●126	99.5	●76	104.6	●69	106	●79	92.3	●120	99.8	●93	106.6	●75	107	●71
乌兰察布	NA		NA		101	●22	96.4	●44	112	●12	107.7	●55	109.5	●62	102.4	●84	107.7	●55	101.1	●95	106.9	●72
鄂尔多斯	NA		NA		108.6	●7	107	●8	109	●23	111.9	●36	116.3	●28	113.2	●24	112.7	●22	108.2	●61	106.6	●73
铜川	NA		85.7	●36	86.7	●71	102	●17	97.2	●83	103.6	●73	104.4	●83	104.6	●70	102.3	●82	105.9	●79	106.2	●74
大同	NA		77.7	●43	89.5	●64	90.1	●77	94	●97	97.8	●92	101	●96	102.4	●83	101	●88	104.1	●85	106.2	●75
巴彦淖尔	NA		NA		95.8	●45	93.4	●63	94.4	●96	101.4	●81	109.1	●63	101.3	●88	103.4	●79	103.2	●90	105.8	●76
嘉兴	NA		NA		109.6	●4	102.6	●15	104.2	●47	101	●82	106.4	●78	106.4	●61	106.1	●64	107	●73	105.8	●77
固原	NA		NA		78.2	●91	79.2	●118	98.6	●79	103.1	●78	102.7	●89	101.3	●87	109.1	●47	104	●86	105.7	●78
安庆	NA		NA		43.2	●132	75.8	●124	91.4	●103	104.1	●70	109.6	●61	102.7	●79	98.9	●95	107.8	●66	105.4	●79
湖州	NA		NA		106.2	●14	105.3	●10	106.5	●34	103.9	●71	109.6	●60	105.5	●65	105.1	●69	107.1	●72	105.4	●80
朔州	NA		NA		110.7	●3	105.9	●9	106.1	●37	105.6	●67	109.7	●58	108	●50	99.6	●94	104.8	●84	105.3	●81
石嘴山	NA		94.9	●20	104.3	●18	104.9	●11	107.7	●28	107.1	●56	109	●66	106.6	●59	105.8	●66	103.4	●89	105	●82
无锡	76.1	●19	99.3	●11	97	●37	99	●32	97.4	●82	95.1	●98	105.8	●80	106.4	●60	101.4	●85	108.1	●62	104.7	●83
中卫	NA		NA		93.6	●52	89.7	●81	106	●39	106.4	●61	110.8	●51	104.5	●71	105	●70	105.5	●80	104.6	●84
榆林	NA		NA		96.1	●42	102.7	●14	106.1	●38	106.1	●65	111.5	●47	107.1	●55	103.5	●78	108	●64	104.6	●85
张家口	73.3	●21	NA		98.9	●30	97.8	●39	102.7	●58	107.1	●57	107.6	●74	102.5	●80	104.8	●73	106.7	●74	104.5	●86
九江	NA		NA		77.7	●94	84.4	●100	89.5	●109	89.8	●116	95.2	●115	98	●100	91.2	●113	101.5	●92	104.2	●87
吴忠	NA		NA		64.6	●117	84.5	●99	91.4	●104	97.9	●91	105	●81	102.2	●85	107.8	●53	106.2	●77	103.8	●88
上海	83.5	●12	95.4	●19	105.5	●16	97.7	●40	102.5	●60	99.7	●87	103.7	●87	103.2	●77	95	●105	103.5	●88	103.7	●89
保定	70.3	●24	90.2	●26	94.5	●49	91.1	●72	105.5	●41	113.5	●24	111.3	●48	104	●73	106	●65	109.5	●52	103.3	●90
唐山	89	●5	88	●31	90.6	●60	91	●73	95.9	●89	99.9	●86	102.6	●91	105.1	●67	104.1	●76	106.4	●76	103	●91
金华	NA		NA		97	●39	86.2	●94	95.8	●90	96	●96	99.6	●98	96.1	●108	89.9	●118	97.1	●106	103	●92
池州	NA		NA		58.8	●126	72.3	●128	90.6	●108	93.1	●106	104.3	●85	93.4	●117	100	●92	100.6	●96	102.2	●93
西安	63.6	●27	64	●60	74.7	●99	81.7	●110	86.1	●119	91.7	●111	93.9	●119	91.3	●122	93.4	●109	100.1	●100	101.4	●94
包头	NA		NA		89.1	●66	91.3	●71	90.8	●107	93.7	●102	96.1	●112	92.5	●119	94	●107	95.6	●109	101.2	●95
北京	87.7	●8	92.1	●25	95.6	●46	92.3	●65	91.6	●102	97.3	●93	101.1	●95	99.3	●95	95.5	●103	100.3	●99	100.8	●96
呼和浩特	NA		NA		86.2	●73	90.4	●75	96.2	●87	92.1	●110	102.6	●90	98.8	●97	97.9	●96	98.9	●104	100.6	●97
合肥	58	●29	60.8	●66	71.7	●108	90.4	●76	96.8	●85	98.7	●90	108.1	●68	95.5	●110	100.7	●89	104.9	●83	100.6	●98
秦皇岛	82.8	●14	63.9	●61	59.3	●125	82.2	●108	90.9	●106	93.6	●103	98.5	●105	100.9	●89	100.1	●91	100.6	●97	100	●99
渭南	NA		60.9	●65	73.9	●102	98.5	●34	95.4	●92	100.2	●85	104.6	●82	105.6	●64	109.3	●46	108.5	●58	100	●100
商洛	NA		NA		93.8	●51	94.6	●58	88.6	●112	93.4	●105	99.6	●99	97.2	●104	97.2	●99	101.2	●94	99.8	●101
宁波	NA		NA		97.6	●34	89.8	●79	91.3	●105	91	●114	103.9	●86	98.1	●99	97	●100	99.3	●103	99.4	●102
吕梁	NA		NA		57.5	●127	62.9	●133	85.2	●120	97	●94	101.5	●93	94.4	●113	96.9	●101	92.7	●114	99	●103
咸阳	NA		68.1	●55	74.9	●98	88	●88	102.4	●61	109.7	●43	96.6	●108	97.6	●101	101.4	●86	107.4	●70	99	●104
阳泉	NA		62.2	●62	72	●106	82.2	●109	96	●88	93	●107	96.1	●111	94.1	●114	93.5	●108	91.5	●116	98.9	●105
太原	NA		69	●54	70.6	●109	63.8	●132	74	●132	80.8	●129	87.3	●129	90.7	●123	91.8	●111	88	●125	97.4	●106
南昌	NA		NA		77.9	●93	83.9	●103	86.6	●118	86	●121	96.4	●109	95.5	●111	90.4	●116	96.2	●108	96.6	●107
鹰潭	NA		NA		87.3	●69	90	●78	89.3	●110	95.6	●97	99	●102	98.6	●98	88.9	●120	88.4	●122	95.7	●108
宣城	NA		NA		70.1	●112	67.8	●131	93.7	●98	96.7	●95	99.4	●101	102.1	●86	105.7	●67	99.7	●102	95.6	●109
杭州	NA		NA		96.3	●41	94.3	●59	93.4	●99	98.8	●89	108.1	●69	96.8	●105	90.4	●115	98.2	●105	95.2	●110
衢州	NA		NA		99.9	●29	86.7	●92	87.3	●115	89.2	●117	92.4	●123	93.6	●116	90.6	●114	94.1	●112	95.2	●111
延安	NA		82.9	●37	84.4	●79	88.6	●83	87.9	●113	92.7	●108	98	●106	96.8	●106	96.7	●102	100.4	●98	95.1	●112
赤峰	NA		61.1	●64	60.2	●122	79.3	●117	80.1	●127	77.1	●132	84.2	●130	89.8	●124	86.9	●121	90.2	●118	94.9	●113
锡林郭勒	NA		NA		61.9	●120	81.1	●111	83.5	●124	91.7	●112	89.3	●126	88.2	●126	91.6	●112	88.2	●123	94.9	●114
宝鸡	NA		66.3	●57	75	●97	86.9	●91	92.8	●100	99	●88	92.4	●124	93.8	●115	95.1	●104	100	●101	94.5	●115
台州	NA		NA		97.5	●35	90.9	●74	89.1	●111	90.4	●115	98.9	●103	99.6	●94	97.5	●98	96.6	●107	94.3	●116
舟山	NA		NA		96.9	●40	91.4	●69	98.1	●81	87.7	●120	95.3	●114	99.7	●92	100.1	●90	94.3	●110	94	●117
铜陵	NA		NA		62.3	●119	80.3	●114	80.6	●125	88.2	●118	96.2	●110	84.4	●130	89.8	●119	94.2	●111	91.6	●118
承德	78.1	●18	90.1	●27	100.7	●25	96.7	●43	92.1	●101	92.6	●109	95.7	●113	96.5	●107	90.1	●117	91.9	●115	91.5	●119
抚州	NA		NA		83.4	●82	78.8	●119	83.7	●122	88	●119	97.4	●107	100.2	●91	94.6	●106	93.5	●113	91.5	●120
温州	NA		NA		88.9	●67	84.3	●101	87.9	●114	85.4	●122	93.3	●121	92.1	●121	86.4	●123	88.2	●124	90.5	●121
汉中	NA		NA		79.6	●88	80.2	●116	83.6	●123	82.4	●126	77.9	●133	82.6	●131	83.6	●127	89.2	●120	90.3	●122
上饶	NA		NA		79.7	●86	88.6	●84	78	●130	83.4	●125	93.5	●120	93.2	●118	86.8	●122	86.9	●127	90.3	●123
黄山	NA		NA		46.1	●130	68.1	●129	78.5	●129	68.9	●133	94.5	●117	97.5	●103	85.5	●125	87.2	●126	89.4	●124
丽水	NA		NA		85.2	●77	82.9	●106	87.2	●116	84.6	●123	89.3	●127	86.7	●127	86	●124	85.3	●131	89.2	●125
新余	NA		NA		51.7	●129	72.9	●127	84.3	●121	84.1	●124	90.2	●125	88.4	●125	81.9	●129	79.1	●133	88.6	●126
吉安	NA		NA		69.1	●114	84.1	●102	94.6	●95	95	●99	94.3	●118	95.2	●112	92.4	●110	91.5	●117	88.6	●127
景德镇	NA		NA		67.2	●116	80.8	●112	80.2	●126	79.6	●130	81.5	●131								

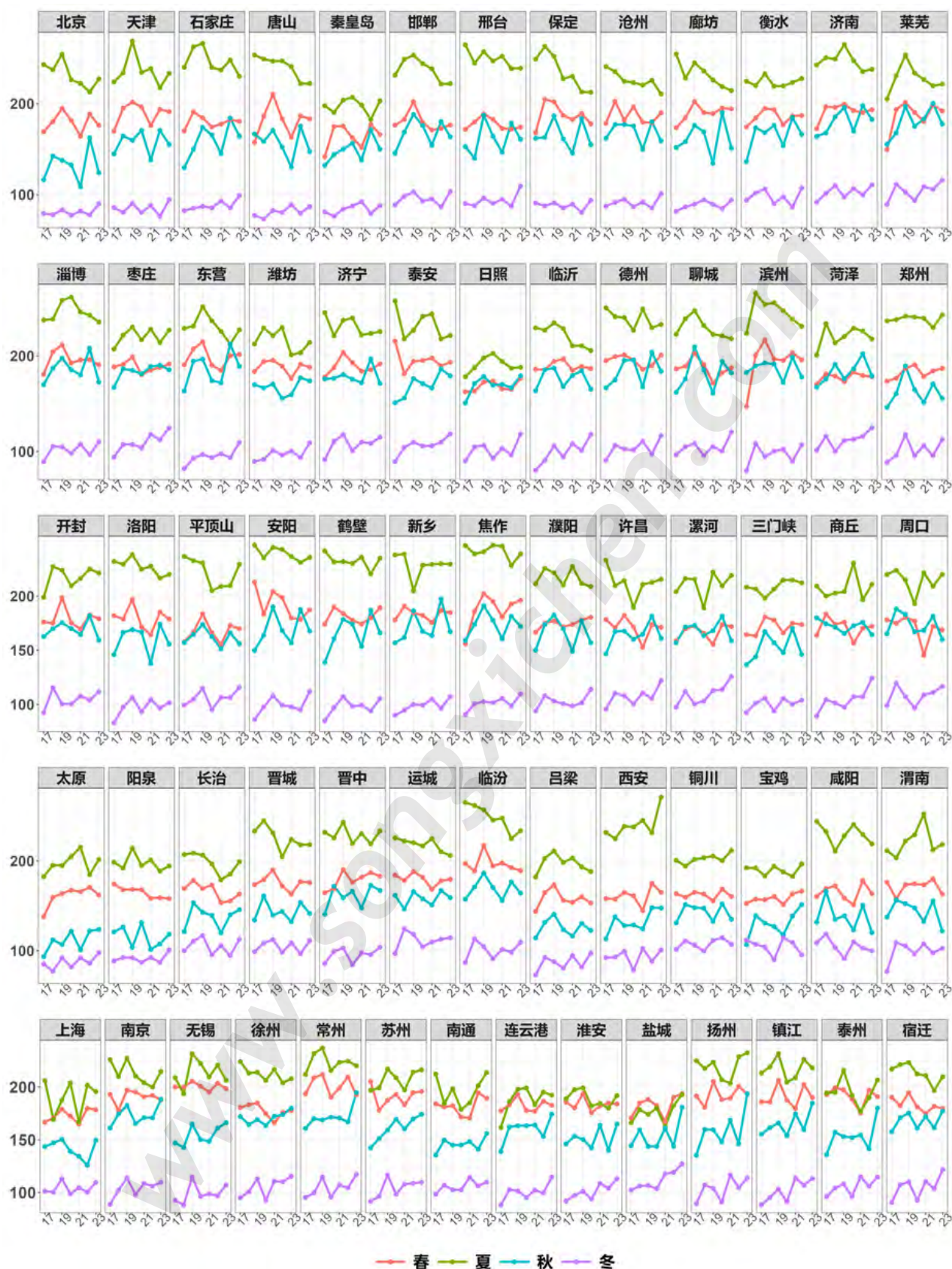


图 40: “3+130”城市气象调整后 2017 年至 2023 年 8 小时 O_3 季节 90% 分位数浓度（微克/立方米）变化序列图

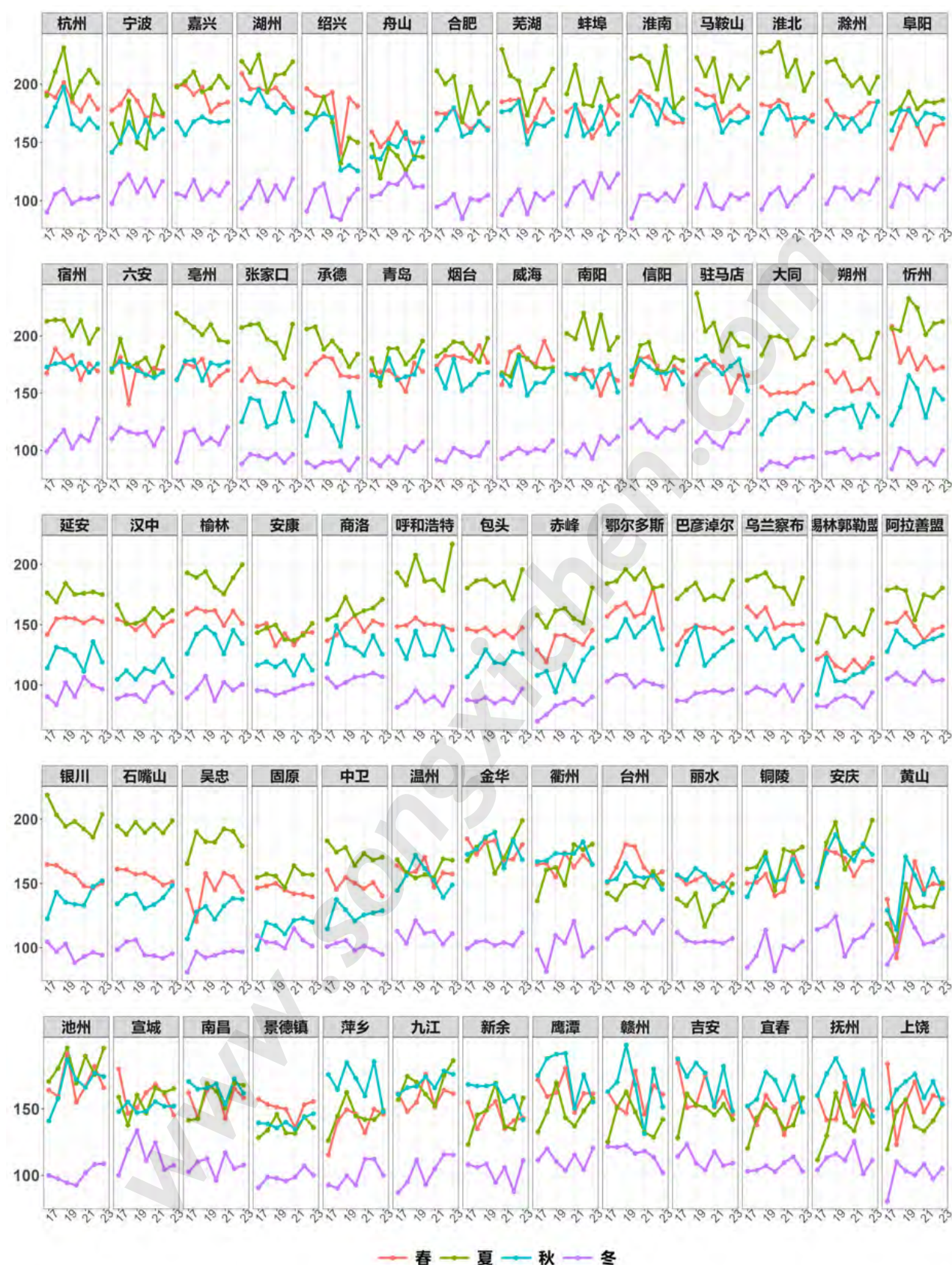


图 41: “3+130” 城市气象调整后 2017 年至 2023 年 8 小时 O_3 季节 90% 分位数浓度 (微克/立方米) 变化序列图

季，日照平均浓度最高，为 125.3 微克/立方米；绍兴平均浓度最低，为 62.2 微克/立方米。廊坊为本季度 O_3 同比改善幅度最大城市，平均浓度相比 2022 年同期的 99.7 微克/立方米下降 19.3%；扬州为浓度同比升幅最大城市，平均浓度相比去年同期的 98.9 微克/立方米上升 18.2%。 O_3 浓度显著上升城市主要集中于江苏、浙江、上海三省，分别有 6、3、1 个城市浓度上升。

2017 年冬季“3+130”城市 O_3 浓度均值（标准误差）为 56.6(0.8) 微克/立方米，2023 年上升至 68.2(0.6) 微克/立方米，年均上升 1.9 微克/立方米。与 2019 年冬季浓度均值 64.3(0.7) 微克/立方米相比，上升 3.9(0.6) 微克/立方米；与 2022 年冬季浓度均值 65.5(0.7) 微克/立方米相比，上升 2.7(0.5) 微克/立方米。与 2022 年冬季相比，“3+130”城市中，有 13 个城市 O_3 浓度均值显著下降，占比 9.8%，降幅平均值为 8.6%；有 54 个城市显著上升，占比 40.6%，升幅平均值为 12.7%。2023 年冬季，盐城平均浓度最高，为 86.5 微克/立方米；宝鸡平均浓度最低，为 51.2 微克/立方米。宝鸡为本季度 O_3 同比改善幅度最大城市，平均浓度相比 2022 年同期的 72.5 微克/立方米下降 29.3%；新余为浓度同比升幅最大城市，平均浓度相比去年同期的 49.1 微克/立方米上升 39.1%。此外还有 7 个城市升幅超过 20%，其中包括 5 个重点城市，分别为京津冀及周边地区的日照、邢台，和汾渭平原的太原、西安、吕梁。 O_3 浓度显著上升城市主要集中于山东、河南、山西三省，分别有 9、9、8 个城市浓度上升。

• 年度评估：年度变化趋势与城市相对排名

2017 年“3+130”城市 O_3 浓度均值（标准误差）为 99.4(0.9) 微克/立方米，2023 年上升至 107.1(0.9) 微克/立方米，年均上升 1.3 微克/立方米。与 2019 年浓度均值 106.9(0.9) 微克/立方米相比，上升 0.2(0.5) 微克/立方米；与 2022 年浓度均值 106.2(0.9) 微克/立方米相比，上升 0.9(0.3) 微克/立方米，浓度回升发生在夏季和冬季。

2023 年京津冀及周边“2+36”城市 O_3 浓度均值 116.1(1.1) 微克/立方米，比 2022 年的 115.9(1.1) 微克/立方米上升 0.2(0.5) 微克/立方米，比 2019 年的 115.1(1.1) 微克/立方米上升 1(0.7) 微克/立方米。汾渭平原 2023 年浓度均值为 106.1(2.7) 微克/立方米，比 2022 年的 104.1(2.7) 微克/立方米上升 2(1.7) 微克/立方米；比 2019 年的 104(2.9) 微克/立方米上升 2.1(1.2) 微克/立方米。长三角地区 2023 年浓度均值为 108.7(1.5) 微克/立方米，比 2022 年的 107.7(1.3) 微克/立方米上升 1(0.5) 微克/立方米；比 2019 年的 108.5(1.2) 微克/立方米上升 0.2(1.2) 微克/立方米。“其他城市”2023 年浓度均值为 99.4(1.2) 微克/立方米，比 2022 年的 98.3(1.3) 微克/立方米上升 1.1(0.5) 微克/立方米；比 2019 年的 100.3(1.4) 微克/立方米下降 0.9(0.8) 微克/立方米。

根据图 38 和 39，2023 年，“3+130”城市中年均 O_3 浓度最高的三个城市分别是德州（127 微克/立方米）、东营（126.7 微克/立方米）、枣庄（125.8 微克/立方米），均位于山东且相比上一年浓度上升。德州自 2019 年至 2023 年 O_3 浓度始终位于“3+130”城市前五位。2023 年 O_3 年均浓度前 10 名的城市中有 8 个城市为山东城市；滨州、德州已连续 5 年排名前 10，济南、泰安、枣庄已连续 4 年排名前 10，菏泽、莱芜已连续 3 年排名前 10。可见臭氧污染应成为山东省大气治理的重要任务。2023 年， O_3 年均浓度超过 120 微克/立方米的的城市有 13 个，比 2022 年增加 2 个。其中京津冀及周边“2+36”城市有 11 个，与 2022 年持平；汾渭平原 2 个，比 2022 年增加 2 个；年均浓度低于 100 微克/立方米的的城市有 33 个，比 2022 年增加 1 个。汾渭平原 5 个，比 2022 年增加 2 个；长三角地区 4 个，与 2022 年持

平。

根据图 37, 相比 2017 年, 2023 年“3+130”城市春夏 O_3 六年累计升幅的均值为 4.7% (0.6%), 有 98 个城市春夏 O_3 浓度呈现不同程度上升, 萍乡、太原、安庆六年累计升幅超过 20%; 升幅最大的 20 个城市主要位于江西、山东、安徽。只有 35 个城市春夏 O_3 浓度下降。相比 2022 年, “3+130”城市中, 有 50 个城市春夏 O_3 浓度下降, 有 83 个城市春夏 O_3 浓度上升。春夏 O_3 浓度升幅的城市均值为 1.4% (0.3%), 升幅最大的 20 个城市主要位于山西、内蒙古、山东、河南。**2017-2023 年, 臭氧是六种常规空气污染物中唯一浓度不降反增的污染物, 春夏臭氧污染治理仍有较大改善的空间。**

• O_3 极端污染 (90% 分位数)

图 40-41 展示了研究区域城市 2017 年以来经气象调整的 8 小时 O_3 浓度 90% 分位数给定季节的时间序列, 从中并未观察到 O_3 浓度 90% 分位数存在下降趋势。我们以按季度计算的臭氧 90% 分位数浓度的全年最大值 (以下简称“90% 分位数浓度”) 作为极端污染的衡量指标。这在数值上与 O_3 原始日最大 8h 浓度年第 93-99 分位值水平相当, 可作为判断城市 O_3 日最大 8h 浓度值达标情况的评估指标。我们在附录中给出各城市臭氧季节 90% 分位数浓度最大值折算的年百分位数浓度结果供读者参考。按照国家标准, 臭氧年 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 O_3 浓度最高的季节 90% 分位数统计, 较国家标准略微严格, 但对绝大多数城市而言, 仍较 WHO 提出的年 99% 分位数达标的要求宽松。2023 年, 有 121 个城市的臭氧 90% 分位数浓度最大值产生在夏季, 有 10 个城市的臭氧 90% 分位数浓度最大值产生在春季, 包括 2 个长三角地区城市 (盐城、绍兴), 8 个非重点城市 (威海、上饶、抚州、景德镇、赣州、鹰潭、丽水、台州); 此外, 舟山、吉安、的臭氧 90% 分位数浓度最大值产生在秋季。

2017 年“3+130”城市臭氧 90% 分位数浓度值 (标准误差) 为 201.7(2.6) 微克/立方米, 2023 年下降至 200.1(2.2) 微克/立方米, 年均下降 0.3 微克/立方米。与 2019 年 90% 分位数浓度值 207.7(2.4) 微克/立方米相比, 下降 7.6(1.3) 微克/立方米; 与 2022 年 90% 分位数浓度值 196.1(2.1) 微克/立方米相比, 上升 4(1.1) 微克/立方米。总体来看, 2023 年臭氧极端污染情况出现反弹, 除上海、江西和浙江省外, 其他省份均有半数以上城市臭氧的 90% 分位数浓度较 2022 年上升。

在区域和城市尺度, 2023 年, 臭氧 90% 分位数浓度最高的城市为西安 (271.3 微克/立方米)、郑州 (242.9 微克/立方米)、邢台 (239.1 微克/立方米)。污染排名前 30 位的城市中, 安阳、济南、淄博、西安、邢台和郑州已连续两年排名前 10 位; 临汾、安阳、德州、济南、淄博、滨州、焦作、石家庄、西安、邢台和郑州已连续三年排名前 20 位。山东、河南、河北为本年度臭氧极端污染较严重省份, 分别有 9、9、5 个城市浓度排名后 30 位。**总体来看, 京津冀及周边“2+36”城市的臭氧极端污染情况较长三角地区更为严峻。**臭氧 90% 分位数浓度最低的城市为吉安 (148.5 微克/立方米)、萍乡 (148.8 微克/立方米)、抚州 (149 微克/立方米)。污染排名后 30 位的城市中, 舟山、宁波为重点城市, 极端污染状况控制得相对较好。江西、浙江、陕西为本年度臭氧极端污染相对较轻省份, 分别有 10、6、4 个城市浓度排名后 30 位。

相比 2022 年, “3+130”城市有 55 个城市降幅超过 1%, 占比 41.4%, 降幅平均值为 3.6%; 萍乡为极端污染改善幅度最大城市, 90% 分位数浓度下降 19.9%。有 78 个城市升幅超过 1%, 占比 58.6%, 升幅平均值为 6.3%; 呼和浩特为升幅最大城市, 90% 分位数浓度上升 21.6%。安徽和山东为臭氧浓度上升

较明显的省份，分别有 14、11 个城市浓度上升。平均升幅为 5.6%、3.2%。重点城市中，京津冀及周边“2+36”城市的秦皇岛，汾渭平原的西安，长三角地区的六安升幅超过 10%，需重点关注。

2023 年，“3+130”城市中臭氧 90% 分位数浓度低于 160 微克/立方米的城市有 13 个，占比 10%。包括浙江的台州、丽水、舟山，江西的宜春、新余、上饶、景德镇、抚州、萍乡和吉安，宁夏固原，陕西安康和安徽黄山；其中舟山为重点城市。以上达标城市中，丽水、安康、新余、景德镇和舟山已连续三年达标。对其余绝大多数城市，臭氧极端污染的控制仍需加强。

4 六种常规空气污染物综合评价

本节将首先给出 $\text{PM}_{2.5}$ 和臭氧的整体情况，然后汇总六个污染物三年和一年的总体变化，以及 2023 年的总体状况。

图 42 给出“3+130”城市 2023 年和 2022 年 $\text{PM}_{2.5}$ 秋冬和 8 小时臭氧春夏平均浓度的联合分布。

图 42(a) 中的联合分布呈现出三个峰值，它们将“3+130”城市明显地分成三个群体。第一个是主要由“2+36”城市、5 个汾渭平原城市组成的高 $\text{PM}_{2.5}$ 和高臭氧群（双高群），分布在图中的右上部分；第二个是主要由长三角和北方六省边缘地区城市构成的中等浓度 $\text{PM}_{2.5}$ 和臭氧群（中间群），位于图中的中央位置；第三个是主要由江西及部分浙江城市构成的集群，其春夏臭氧平均浓度显著低于前二者，位于图中的左下部分（双低群）。其中，“2+36”城市中只有北京、日照、廊坊、唐山与秦皇岛处于中间群当中，显得格外亮眼；南阳、信阳和驻马店作为非重点城市一直位于中间群与双高群的过渡地带，应当重视 $\text{PM}_{2.5}$ 和臭氧污染的协同治理。对于内蒙古的城市而言，其 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度属于低值区，而臭氧浓度位于中值区，需要加强臭氧管控。

相比 2022 年，2023 年 $\text{PM}_{2.5}$ 秋冬浓度整体分布得更加集中（参考横向频率密度曲线），处于低值区和高值区的城市数量相对减少。2022 年浓度最高的渭南、漯河、运城、濮阳等城市秋冬 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均降至 75 微克/立方米以下；而浓度较低的南方城市，诸如舟山、泰州和景德镇，浓度较上年明显上升。其中，相较 2022 年污染改善最显著的城市为渭南；而包头则为污染上升最严重的城市，一度从 2022 年的“双低群”上升至 2023 年的“中间群”当中。春夏臭氧浓度分布则出现高值增加的特征（参考纵向频率密度曲线）：2022 年的高臭氧群，多数城市臭氧浓度在 150 微克/立方米上下，而 2023 年浓度超过 150 微克/立方米的城市数量和臭氧浓度均明显上升；大部分长三角地区及北方六省边远地区城市 $\text{PM}_{2.5}$ 污染浓度也较上年上升，即 2022 年的中间群在 2023 年出现了整体右移的情况。此外，北京、汉中与长治等城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度有着较大的改善，但臭氧的浓度却均有所升高，应当重视两种污染物的协同治理。

图 43 给出了“3+130”城市 2023 和 2022 年 $\text{PM}_{2.5}$ 秋冬和 8 小时臭氧春夏年平均 90% 分位数浓度的分布。这一 $\text{PM}_{2.5}$ 和臭氧的极端污染的联合分布呈现出类似于图 42 的三个峰值及相应的围绕它们的三个群体。双高群仍主要由“2+36”城市及部分汾渭平原城市组成，但在与中间群交界的地方存在较多的长三角地区城市。极端污染的中间群主要由长三角地区城市与大部分汾渭平原城市组成，而双低群仍主要由江西，浙江，内蒙古等地的非重点城市构成。

对于极端污染我们也可以得到同均值相似的结论，根据图 43，2023 年秋冬 $\text{PM}_{2.5}$ 的 90% 分位数的整体分布在横向上也更加集中，原本位于低值群的长三角地区城市浓度明显上升，但高值群的极值明显

降低, 2022 年浓度超过 175 微克/立方米的 3 个城市(渭南、濮阳、漯河)浓度均降至 150 微克/立方米以下。8 小时臭氧(春夏)的 90% 分位数分布同样出现集中趋势, 频率分布由双峰变为单峰, 表现为 2022 年江苏的高浓度城市浓度下降, 而安徽和汾渭平原等地的城市浓度上升。

图 42 和图 43 说明我国仍然面临着 $PM_{2.5}$ 和臭氧的复合型污染问题。从分布图可以看出, 其整体呈现为“从左下向右上”的斜状图形, 也就是说“3+130”城市中 $PM_{2.5}$ 浓度高的城市往往臭氧浓度也高, 如“2+36”城市与汾渭平原城市的交界地区; 而 $PM_{2.5}$ 浓度低的城市臭氧浓度往往也低, 如长三角的边缘城市。臭氧与 $PM_{2.5}$ 污染高发的季节不同, 但排放源相关, 生成过程存在交互影响。整体来看, 城市秋冬 $PM_{2.5}$ 和春夏臭氧浓度正相关, 但对具体城市而言, $PM_{2.5}$ 浓度下降和臭氧浓度上升可能同时发生, 也说明我们不能仅关注于一类污染物的治理, 而应该通过协同控制措施, 加强对 $PM_{2.5}$ 与臭氧两种污染物的联合管控。总体而言, 大部分 2022 年污染水平较高的双高群城市, 其污染水平在 2023 年得到了改善; 而 2022 年污染水平不高的中间群, 大部分城市在 2023 年的污染水平出现了反弹。从实际浓度来看, 目前我国属于双低群的城市春夏臭氧与秋冬 $PM_{2.5}$ 浓度也只达到 WHO 第一阶段指导值水平, 中间群城市浓度并未达标, 从保护人群健康的角度, 浓度相对较低的城市同样应当重视污染控制, 避免浓度反弹。

图 44 给出六种污染物各季节逐年变化率的情况。2017-2022 年, $PM_{2.5}$ 各季节污染情况总体上逐年降低。但相比 2022 年, 2023 年出现一定程度的反弹, 每个季度都有超过 50% 的城市的浓度呈现上升趋势, 且春、秋季的增幅更为明显。2017-2022 年, PM_{10} 夏、秋季的逐年降幅变化趋缓。2022-2023 年春、秋季超过 50% 的城市出现浓度上升, 且增幅集中在 15% 附近, 夏季浓度变化不明显, 冬季有超过 70% 的城市浓度降低。2017-2022 年, SO_2 各季节浓度总体上逐年降低, 但降幅逐渐减少, 且呈现出反弹态势。2022-2023 年, SO_2 总体呈下降趋势, 其中冬季降幅显著, 但仍然有接近一半的城市在春、秋季浓度上升。 CO 各季节降幅总体平稳。2022-2023 年春季存在一定程度的改善(降幅集中在 5% 附近), 但夏、秋、冬季有超过一半的城市浓度上升。2017-2022 年, NO_2 浓度总体降低, 且下降幅度总体增加, 但相比 2022 年, 2023 年春、夏、秋三季存在超过一半的城市浓度上升, 秋季增幅尤为明显, 增幅排名在 25%-75% 的城市集中在 10% 附近, 冬季浓度变化不明显。 O_3 各季节浓度总体呈上升趋势, 22-23 年秋季 8 小时 O_3 浓度略有改善, 但有超过 75% 的城市夏季和冬季浓度上升(涨幅集中在 10% 附近), 春季变化幅度不明显。

表 6 给出每个城市过去四年(相比于 2019)或一年(相比于 2022)气象调整后的综合改善情况。由于 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 有重合部分, 所以尽管我们使用六种污染物等权重平均, $PM_{2.5}$ 所占比例仍高于其他污染物。我们的方法去除了气象因素的干扰, 所以表 6 给出的是各城市污染物受人为影响的下降比例。为了体现 2023 年污染物浓度与 2019 年的变化情况, 与上一份报告相比, 我们将六年综合改善情况改为四年综合。根据表 6, 133 个城市的四年平均改善率是 10.4%。部分城市的一年累计平均降幅为负, 这说明相比 2022 年, 这些城市 2023 年的空气质量有所降低。改善排名前三分之一的 44 个城市中有 3/4 是重点城市, 本年度取得了较好的污染治理效果, 其中京津冀及周边“2+36”城市改善尤为显著, 有 23 个城市进入前 1/3 排名, 而长三角地区仅南京、淮南、蚌埠三市排名靠前; 此外还有 11 个非重点城市进入前 1/3 排名(张家口、呼和浩特、朔州、汉中、大同、铜陵、承德、巴彦淖尔、包头、萍乡、忻州), 在较轻的污染状态下仍保持了良好的改善趋势。改善排名后三分之一的城市中包含 20 个重点城市, 其中有 15 个长三角地区城市, 多数位于江苏省; 此外还有 2 个汾渭平原城市和 3 个“2+36”城市。总体来看, 长

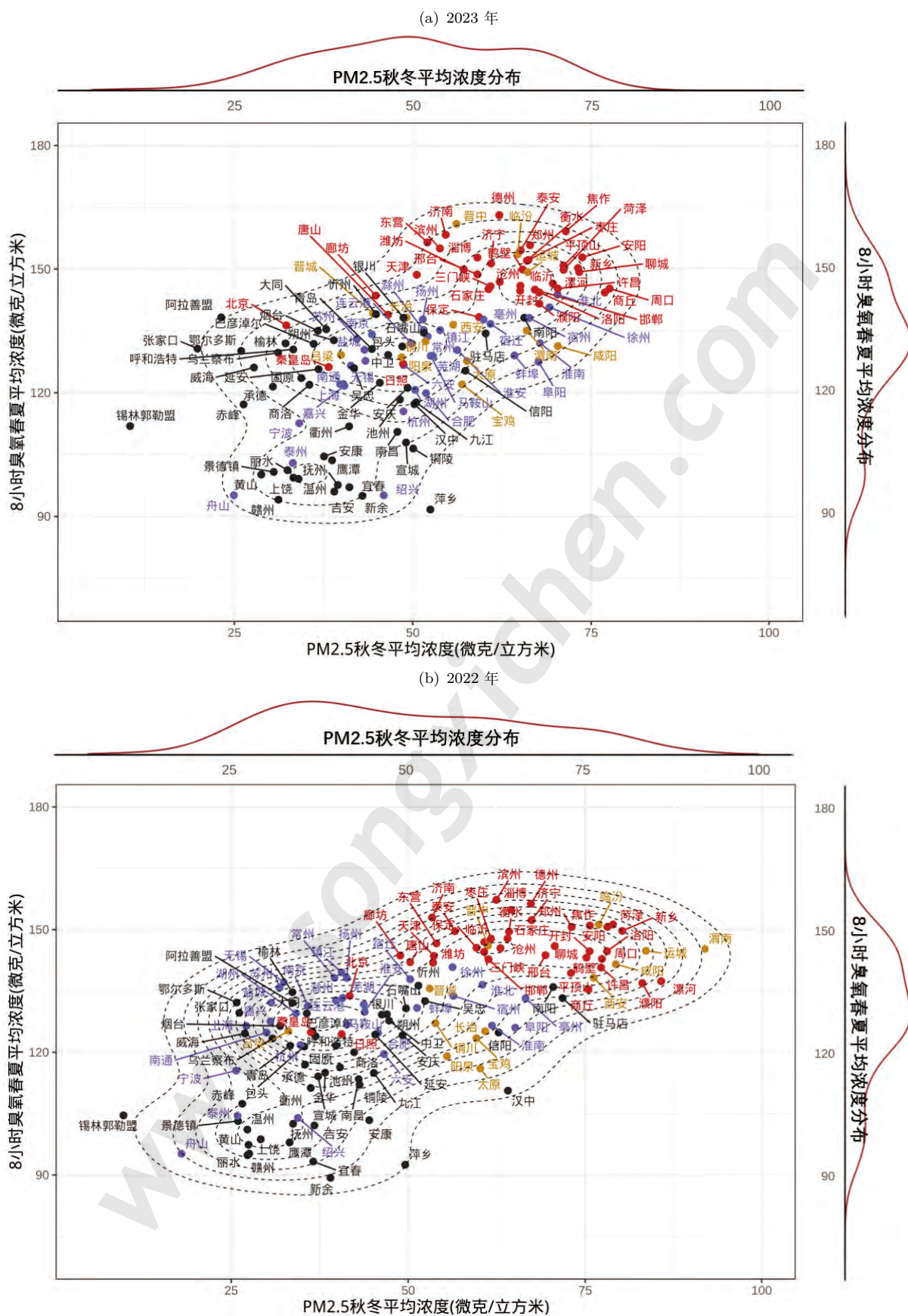


图 42: “3+130”城市 $PM_{2.5}$ 秋冬和 8 小时臭氧春夏 (微克/立方米) 平均浓度散点图, 其中红色点代表“2+36”城市, 棕色点代表汾渭平原城市, 紫色点代表长三角地区城市, 黑色点代表其他城市

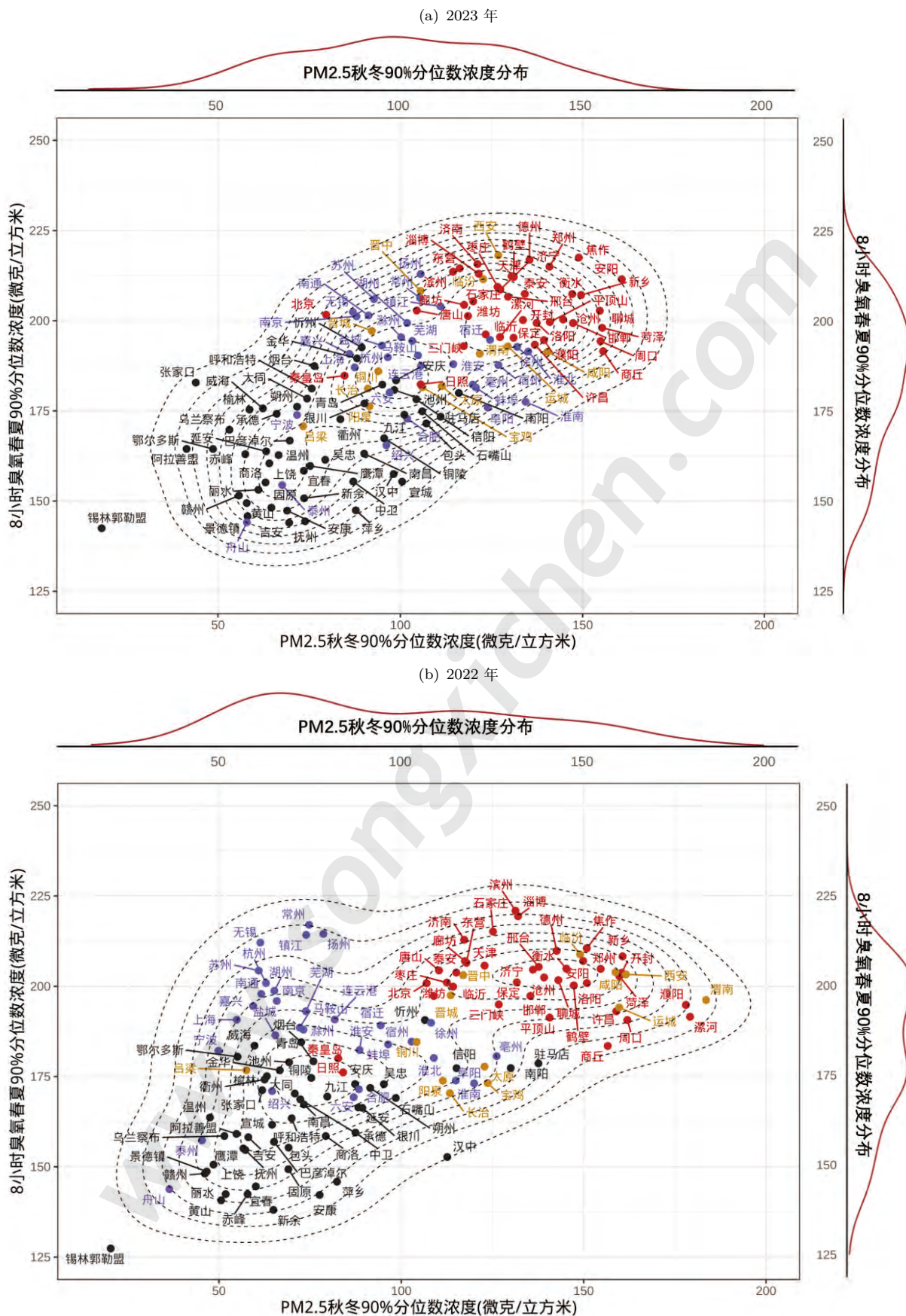


图 43: “3+130” 城市 PM_{2.5} 秋冬和 8 小时臭氧春夏 (微克/立方米) 年 90% 分位数浓度散点图, 其中红色点代表 “2+36” 城市, 棕色点代表汾渭平原城市, 紫色点代表长三角地区城市, 黑色点代表其他城市

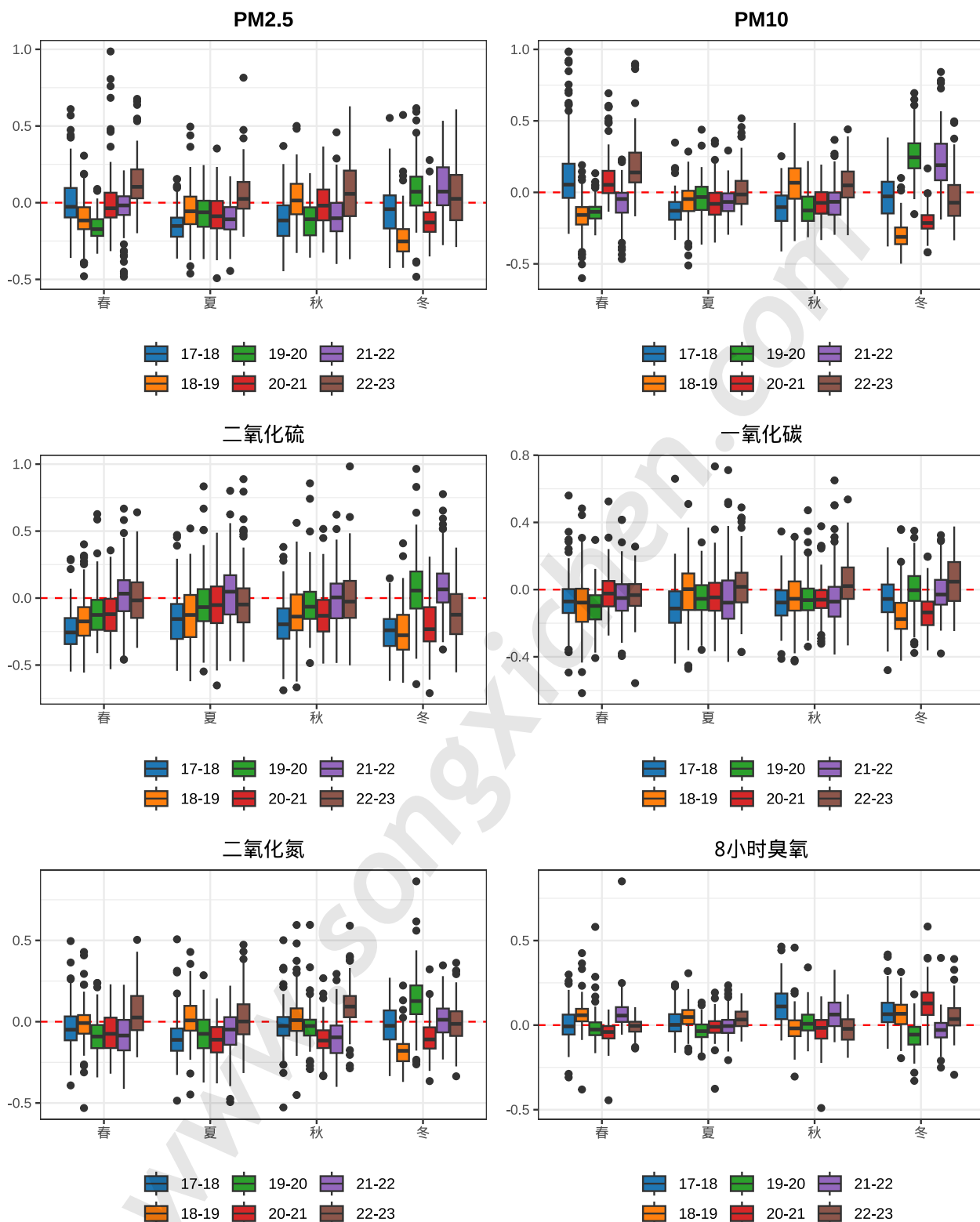


图 44: “3+130”城市六种污染物 2017-2023 年各季节平均浓度逐年变化幅度箱线图, 其中“22-23”表示 2023 年浓度减去 2022 年浓度, 其他图例类似

排名	城市	降幅百分比	排名	城市	降幅百分比	排名	城市	降幅百分比
1	唐山	32.4(2.6)	46	平顶山	13.3(-0.3)	91	铜川	7(4)
2	张家口	29.7(6.5)	47	固原	13.2(2.7)	92	连云港	6.9(-10.9)
3	邢台	26.5(5.8)	48	枣庄	13.1(3.6)	93	阜阳	6.7(-0.6)
4	呼和浩特	25.6(1.9)	49	南阳	12.7(2.7)	94	威海	6.6(-7.5)
5	石家庄	24.3(8.3)	50	聊城	12.6(6.2)	95	徐州	6.6(-2)
6	晋城	23.3(-1)	51	渭南	12.4(11.9)	96	温州	6.5(-8.4)
7	邯郸	22.1(1.5)	52	常州	12.3(-9.3)	97	乌兰察布	6(-3.1)
8	秦皇岛	21.2(-4.2)	53	莱芜	12.2(-0.5)	98	德州	5.8(1.1)
9	朔州	20.6(2.4)	54	东营	12.1(4.1)	99	芜湖	5.5(-5.9)
10	保定	20.2(6.8)	55	周口	12.1(4)	100	合肥	4.8(-1)
11	吕梁	20.2(-0.1)	56	廊坊	12(4.7)	101	宝鸡	4.6(1.2)
12	濮阳	19.6(9.2)	57	烟台	12(-4.3)	102	鄂尔多斯	4.5(-4.2)
13	西安	19.3(17.3)	58	泰安	11.8(-1.4)	103	三门峡	4.4(-0.2)
14	南京	19.2(-8.6)	59	漯河	11.6(8)	104	南昌	4.3(-2.6)
15	淮南	19.1(-8.6)	60	鹰潭	11.6(-11.5)	105	信阳	3.8(5.5)
16	淄博	18.9(5.3)	61	驻马店	11.5(6.5)	106	丽水	3.7(-7.7)
17	安阳	18.7(1.5)	62	池州	11.3(-7.8)	107	中卫	3.4(-6)
18	汉中	18.2(0.3)	63	延安	11.2(1.6)	108	湖州	3.4(-12.5)
19	洛阳	18(4.8)	64	榆林	11.2(-4.5)	109	石嘴山	3.2(-2.1)
20	许昌	17.4(6.2)	65	新乡	11(4.4)	110	吴忠	3(6.3)
21	大同	17.3(-1.3)	66	咸阳	10.9(8.9)	111	锡林郭勒盟	2.8(-10.2)
22	衡水	17.3(9.5)	67	宣城	10.9(-6.5)	112	抚州	2.7(-10.1)
23	铜陵	17.2(-3.3)	68	黄山	10.9(-9)	113	金华	2.7(-8.6)
24	滨州	16.9(6.1)	69	镇江	10.6(-6.1)	114	赤峰	1.9(-9.1)
25	济宁	16.7(5.1)	70	淮北	10.4(-5.4)	115	扬州	1.7(-10.1)
26	北京	16.6(0.7)	71	六安	10.2(-3.6)	116	舟山	1.6(-22.8)
27	济南	16.6(0.9)	72	商丘	10.2(-1.3)	117	台州	1.5(-5.8)
28	临汾	16(0.7)	73	亳州	10.1(-5.9)	118	景德镇	1.5(-2.3)
29	天津	15.9(0.4)	74	吉安	9.7(-12.7)	119	青岛	1.3(-12.5)
30	菏泽	15.6(7.8)	75	杭州	9.5(-5.4)	120	宿迁	1.2(-13.1)
31	蚌埠	15.4(-2.9)	76	鹤壁	9.5(9.7)	121	泰州	1(-8.2)
32	承德	15.2(-3.5)	77	宁波	9.4(-9.7)	122	上饶	0.9(-7.1)
33	沧州	15.2(3.3)	78	南通	9.2(-12)	123	安庆	0.7(-10.7)
34	巴彦淖尔	15.1(-2.8)	79	赣州	9.2(-8.9)	124	上海	-0.5(-15.5)
35	太原	14.9(1.1)	80	晋中	8.8(-2.4)	125	银川	-0.5(-3.4)
36	包头	14.4(-13.3)	81	无锡	8.7(-8.4)	126	宿州	-1.2(-14.3)
37	萍乡	14.4(0.4)	82	潍坊	8.6(-5)	127	九江	-1.4(-5.8)
38	运城	14.4(8.4)	83	商洛	8.5(4.1)	128	日照	-2(-9.2)
39	郑州	14.4(4)	84	马鞍山	8.5(-6.9)	129	衢州	-2.1(-7.2)
40	忻州	14.2(-0.8)	85	新余	8.3(-3.1)	130	阿拉善盟	-2.8(-2.3)
41	焦作	14.2(-0.4)	86	安康	8.1(6.6)	131	盐城	-4.2(-9.7)
42	临沂	13.9(1.2)	87	阳泉	7.7(5.3)	132	淮安	-5.2(-7.4)
43	开封	13.8(5.3)	88	嘉兴	7.5(-7.4)	133	苏州	-6.8(-15)
44	长治	13.8(4.4)	89	宜春	7.3(-0.9)	平均降幅		10.4(-2)
45	滁州	13.4(-7.7)	90	绍兴	7(-5.8)			

表 6: “3+130” 城市 2019（2022）-2023 年六种污染物气象调整后浓度综合改善情况排名表。括号外为六种污染物 2019 年到 2023 年经气象调整后的 4 年累计降幅的平均值，括号内为 2022 年到 2023 年经气象调整后的一年降幅的平均值。红色表示排名前三分之一的非重点城市及排名后三分之一的重点城市



图 45: “3+130”城市 2023 年 $PM_{10-2.5}$ 和 $PM_{2.5}$ 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 2017 年) $PM_{2.5}$ ($PM_{10-2.5}$) 降幅至少 20%, 横向 (纵向) 红色箭头表示该城市过去六年 (相比 2017 年) $PM_{2.5}$ ($PM_{10-2.5}$) 增幅至少 20%。

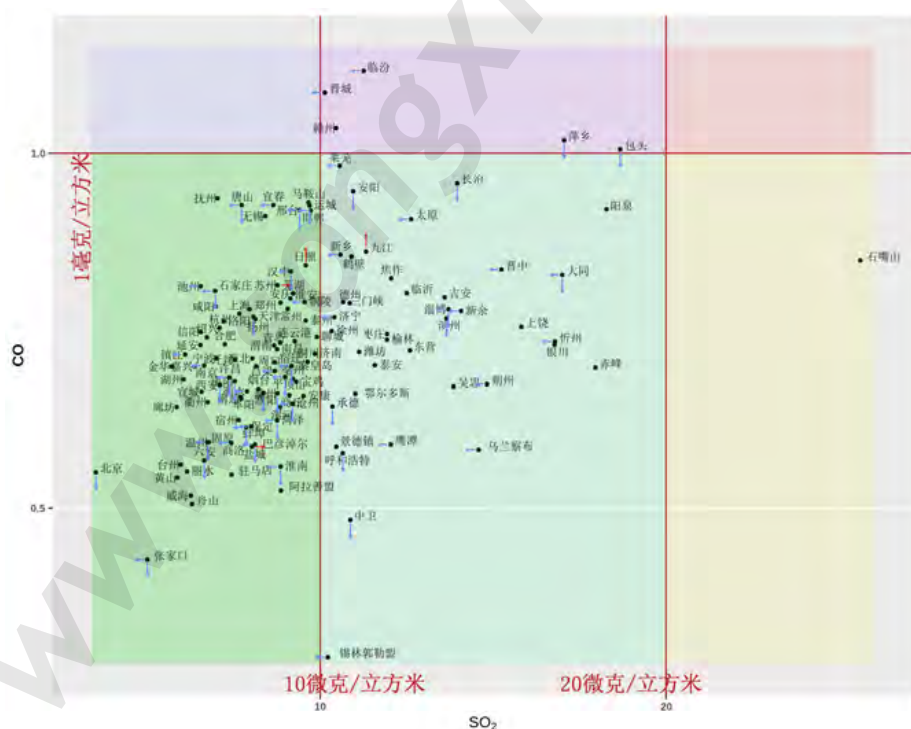


图 46: “3+130”城市 2023 年 CO 和 SO_2 的监视坐标图, 其中横向 (纵向) 蓝色箭头表示该城市过去六年 (相比 2017 年) SO_2 (CO) 降幅至少 35% (25%), 横向 (纵向) 红色箭头表示该城市过去六年 (相比 2017 年) SO_2 (CO) 增幅至少 35% (25%)。

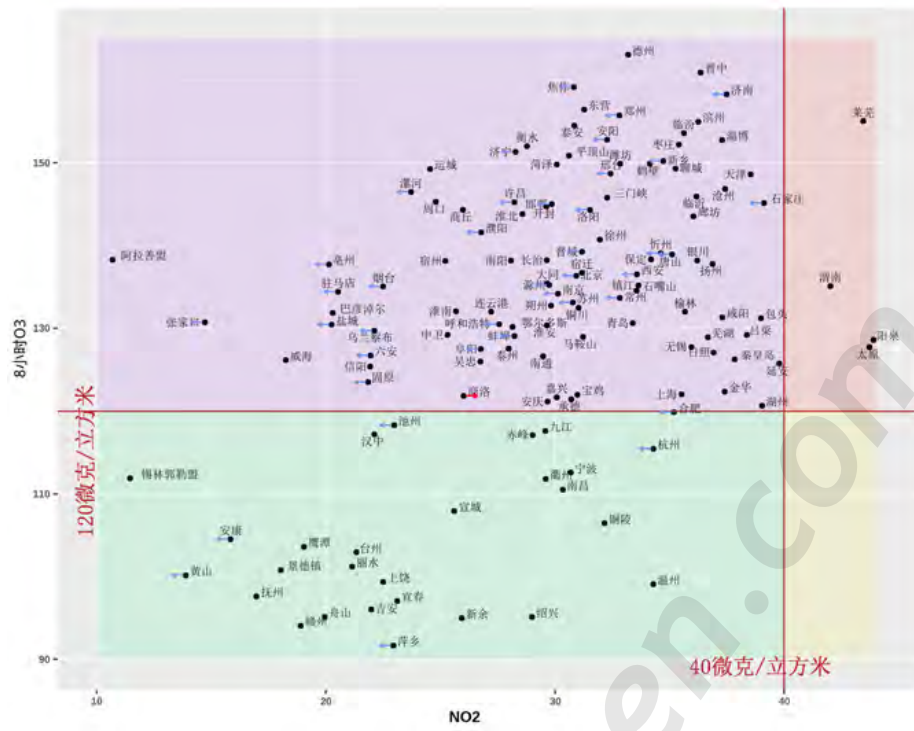


图 47: “3+130”城市 2023 年 NO_2 和春夏 8 小时 O_3 的监视坐标图, 其中横向蓝色箭头表示该城市过去六年 (相比 2017 年) NO_2 降幅至少 20%, 横向红色箭头表示该城市过去六年 (相比 2017 年) NO_2 增幅至少 20%, 春夏 8 小时 O_3 未用箭头标记降幅。



图 48: “3+130”城市 2023 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 ($\text{PM}_{2.5}$)、35 微克/立方米 ($\text{PM}_{10-2.5}$)、20 微克/立方米 (SO_2)、1 毫克/立方米 (CO)、120 微克/立方米 (春夏两季 8 小时 O_3)、40 微克/立方米 (NO_2)

三角地区重点城市本年度污染综合治理情况不甚理想。对于“3+130”城市的数值变化及综合改善情况，可具体查看表 6。

为了方便各级部门了解 2023 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 45、46和 47）。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，图 45中标出 PM_{2.5} 的 35 微克/立方米分界线，这是我国的二级标准限值；图 46中标出 SO₂ 的 10 微克/立方米分界线，这表示其内的城市 SO₂ 浓度已达个位数。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，图中箭头代表过去三年某污染物已有显著下降或上升。

我们同时给出了“3+130”城市 2023 年超标污染物情况的汇总词云图（图 48）和城市汇总表（表 7）。对于这六种污染物，我们今年将超标标准调整为：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）。这份标准以国家现行污染物年均浓度标准（CO 和 8 小时 O₃ 为日均浓度标准）为基线，参考 WHO 制定的阶段性空气质量目标值、近年大气污染的总体改善情况、以及研究给出的污染物年均浓度与年百分位数浓度之间的折算关系进行下调，主要用于判别在当前的发展阶段，各市有哪些空气污染物浓度处于偏高状态。

由表 7 可知，莱芜、晋城、临汾、太原、阳泉、渭南和包头 7 市四种污染物浓度过高；其中包头市为非重点城市，空气污染问题应当引起重视。三种污染物超标的有 50 个城市，均为 O₃ 和颗粒物超标；其中包括 42 个重点城市，有 32 个属于京津冀及周边“2+36”城市。两种污染物超标的有 35 个城市，均为 O₃ 超标城市；其中山西、宁夏、内蒙古和陕西宝鸡为 PM_{10-2.5} 超标，其余均为 PM_{2.5} 超标。两种污染物超标的有 26 个城市；其中北方城市和江苏省城市多为 O₃ 超标，其余南方城市多为 PM_{2.5} 超标，江西赣州市为 CO 浓度偏高城市，需要重点关注。此外，内蒙古自治区赤峰市、锡林郭勒盟，河南省安康市，浙江省丽水市、宁波市、台州市、温州市、舟山市，安徽省黄山市，以及江西省抚州市、吉安市、景德镇、上饶市、宜春市和鹰潭市 15 个城市无超标污染物，其中浙江宁波和舟山市为长三角地区重点城市。超标城市数最多的污染物是 8 小时臭氧（春夏），有 105 个城市超标，较上年度增加 4 个；其次是 PM_{2.5}（95 个），较上年度增加 16 个；PM_{10-2.5}（65 个），较上年度增加 1 个；CO（5 个）、NO₂（4 个），均较上年减少 1 个。2022-2023 年的超标统计结果显示，臭氧已成为“3+130”城市超标现象最严重的常规大气污染物，臭氧和颗粒物的超标情况在 2023 年度加剧，其他污染物得到改善；PM_{2.5} 超标形势在本年度明显加剧。

我们希望图 45、46，48，47 和表 7对各城市在下一步的大气污染治理中选定重点治理方向有所帮助。

序号	城市	PM _{2.5}	PM _{10-2.5}	SO ₂	CO	NO ₂	8 小时 O ₃ （春夏）
1	莱芜	X(X)	X(X)		(X)	X	X(X)
2	晋城	X(X)	X(X)		X		X(X)
3	临汾	X(X)	X(X)		X(X)		X(X)
4	太原	X(X)	X(X)			X(X)	X

序号	城市	PM _{2.5}	PM _{10-2.5}	SO ₂	CO	NO ₂	8 小时 O ₃ (春夏)
5	阳泉	X(X)	X(X)			X(X)	X
6	渭南	X(X)	X(X)			X(X)	X(X)
7	包头	X	X(X)		X		X(X)
8	天津	X(X)	X				X(X)
9	保定	X(X)	X(X)				X(X)
10	邯郸	X(X)	X(X)				X(X)
11	衡水	X(X)	X(X)				X(X)
12	廊坊	X(X)	X(X)				X(X)
13	石家庄	X(X)	X(X)				X(X)
14	唐山	X(X)	X(X)				X(X)
15	邢台	X(X)	X(X)				X(X)
16	滨州	X(X)	X(X)				X(X)
17	德州	X(X)	X(X)				X(X)
18	东营	X(X)	X				X(X)
19	菏泽	X(X)	X(X)				X(X)
20	济南	X(X)	X(X)				X(X)
21	济宁	X(X)	X				X(X)
22	聊城	X(X)	X(X)				X(X)
23	临沂	X(X)	X(X)				X(X)
24	泰安	X(X)	X(X)				X(X)
25	潍坊	X(X)	X				X(X)
26	枣庄	X(X)	X(X)				X(X)
27	淄博	X(X)	X(X)				X(X)
28	晋中	X(X)	X(X)				X(X)
29	朔州	X(X)	X(X)				X(X)
30	忻州	X(X)	X(X)				X(X)
31	运城	X(X)	X(X)		(X)		X(X)
32	长治	X(X)	X(X)		(X)		X(X)
33	铜川	X(X)	X(X)				X(X)
34	西安	X(X)	X(X)			(X)	X(X)
35	咸阳	X(X)	X(X)				X(X)
36	安阳	X(X)	X(X)				X(X)
37	鹤壁	X(X)	X(X)		(X)		X(X)
38	焦作	X(X)	X(X)				X(X)
39	开封	X(X)	X(X)				X(X)
40	洛阳	X(X)	X(X)				X(X)
41	漯河	X(X)	X(X)				X(X)
42	平顶山	X(X)	X(X)				X(X)
43	三门峡	X(X)	X(X)				X(X)
44	新乡	X(X)	X(X)				X(X)
45	许昌	X(X)	X(X)				X(X)
46	郑州	X(X)	X(X)				X(X)
47	周口	X(X)	X(X)				X(X)
48	驻马店	X(X)	X(X)				X(X)
49	巴彦淖尔	X	X(X)				X(X)
50	石嘴山	X(X)	X(X)				X(X)
51	吴忠	X(X)	X(X)				X(X)

序号	城市	PM _{2.5}	PM _{10-2.5}	SO ₂	CO	NO ₂	8 小时 O ₃ (春夏)
52	银川	X(X)	X(X)				X(X)
53	中卫	X(X)	X(X)				X(X)
54	徐州	X(X)	X(X)				X(X)
55	亳州	X(X)	X				X(X)
56	淮北	X(X)	X				X(X)
57	宿州	X(X)	X(X)				X(X)
58	沧州	X(X)	(X)				X(X)
59	青岛	X					X(X)
60	日照	X					X(X)
61	大同		X(X)				X(X)
62	吕梁		X(X)			(X)	X(X)
63	宝鸡	X(X)	(X)				X(X)
64	延安	(X)	X(X)				X(X)
65	榆林		X(X)				X(X)
66	南阳	X(X)	(X)				X(X)
67	濮阳	X(X)					X(X)
68	商丘	X(X)	(X)				X(X)
69	信阳	X(X)					X(X)
70	阿拉善盟		X(X)				X(X)
71	鄂尔多斯		X(X)				X(X)
72	呼和浩特		X(X)				X(X)
73	固原		X(X)				X(X)
74	常州	X					X(X)
75	淮安	X(X)					X(X)
76	连云港	X					X(X)
77	苏州	X					X(X)
78	宿迁	X(X)					X(X)
79	泰州	X(X)					X(X)
80	扬州	X(X)					X(X)
81	镇江	X(X)					X(X)
82	湖州	X					X(X)
83	金华	X					X
84	安庆	X(X)					X(X)
85	蚌埠	X(X)					X(X)
86	滁州	X					X(X)
87	阜阳	X(X)					X(X)
88	淮南	X(X)					X(X)
89	六安	X(X)					X
90	马鞍山	X(X)					X(X)
91	芜湖	X(X)					X(X)
92	萍乡	X(X)			X(X)		

汉中 (PM_{2.5})、杭州、衢州、绍兴、池州、
合肥 (PM_{2.5}/PM_{10-2.5}/O₃)、铜陵 (PM_{2.5})、宣城、PM_{2.5} 超标
九江 (PM_{2.5})、南昌、新余

序号	城市	PM _{2.5}	PM _{10-2.5}	SO ₂	CO	NO ₂	8 小时 O ₃ (春夏)
	北京 (O ₃)、承德、秦皇岛 (O ₃)、张家口 (O ₃)、 威海 (O ₃)、烟台 (O ₃)、商洛、乌兰察布 (O ₃) 上海 (O ₃)、南京 (O ₃)、南通 (O ₃) 无锡 (O ₃)、盐城 (O ₃)、嘉兴 (O ₃)						8 小时 O ₃ (春夏) 超标
	赣州						CO 超标
	安康、赤峰、锡林郭勒盟、丽水、宁波、台州、温州、 舟山、黄山、抚州、吉安、景德镇、上饶、宜春、鹰潭						无超标

表 7: “3+130” 城市 2023 年超标污染物情况汇总

“×” 代表污染物过高 (超过报告拟定标准)。文字颜色代表经气象调整后的浓度下城市超标污染物个数: 棕色代表 4 个污染物超标, 蓝色代表 3 个污染物超标, 绿色代表 2 个污染物超标, 灰色代表 1 个污染物超标, 黑色代表无污染物超标。括号内 (×) 和 (污染物) 代表 2022 年浓度超标

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、上一年度调整后浓度、本年同一季节原始浓度、本年同一季节调整后浓度, 对 PM_{2.5} 浓度该季节原始浓度年际变化率 $\frac{x_2-x_1}{x_1}$ 做如下分解:

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

其中, $\frac{x_2-\tilde{x}_2}{x_1}$ 反映本年该季节气象因素对原始浓度变化比率的影响, $\frac{\tilde{x}_1-x_1}{x_1}$ 反映上一年该季节气象因素影响, 而 $\frac{\tilde{x}_2-\tilde{x}_1}{x_1}$ 则衡量了两年间人为排放水平变化的贡献。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”。

图 49和图 50分别展示了“3+130”城市 2023 年和 2022 年各季节 PM_{2.5} “人努力”和“天帮忙”指数地图。从“人努力”指数地图可以看出, 2023 年减排情况不容乐观, 全年“人努力”城市数量整体较少, 大量城市出现了排放量增加的情况, 仅冬季“人努力”城市数量高于 2022 年同期水平。2023 年全年排放量的增加很可能要归因于 2022 年底新冠疫情的全面放开, 经济生产活动增加, 导致了 2023 年排放的增加。从“天帮忙”指数地图可以看到, 2023 年夏季的气象条件较好, 而春季与冬季的气象条件较差, 不利于大气污染物的扩散。这与 2022 年的情况刚好相反, 也进一步印证了我们分别讨论气象影响和人为影响的重要性。

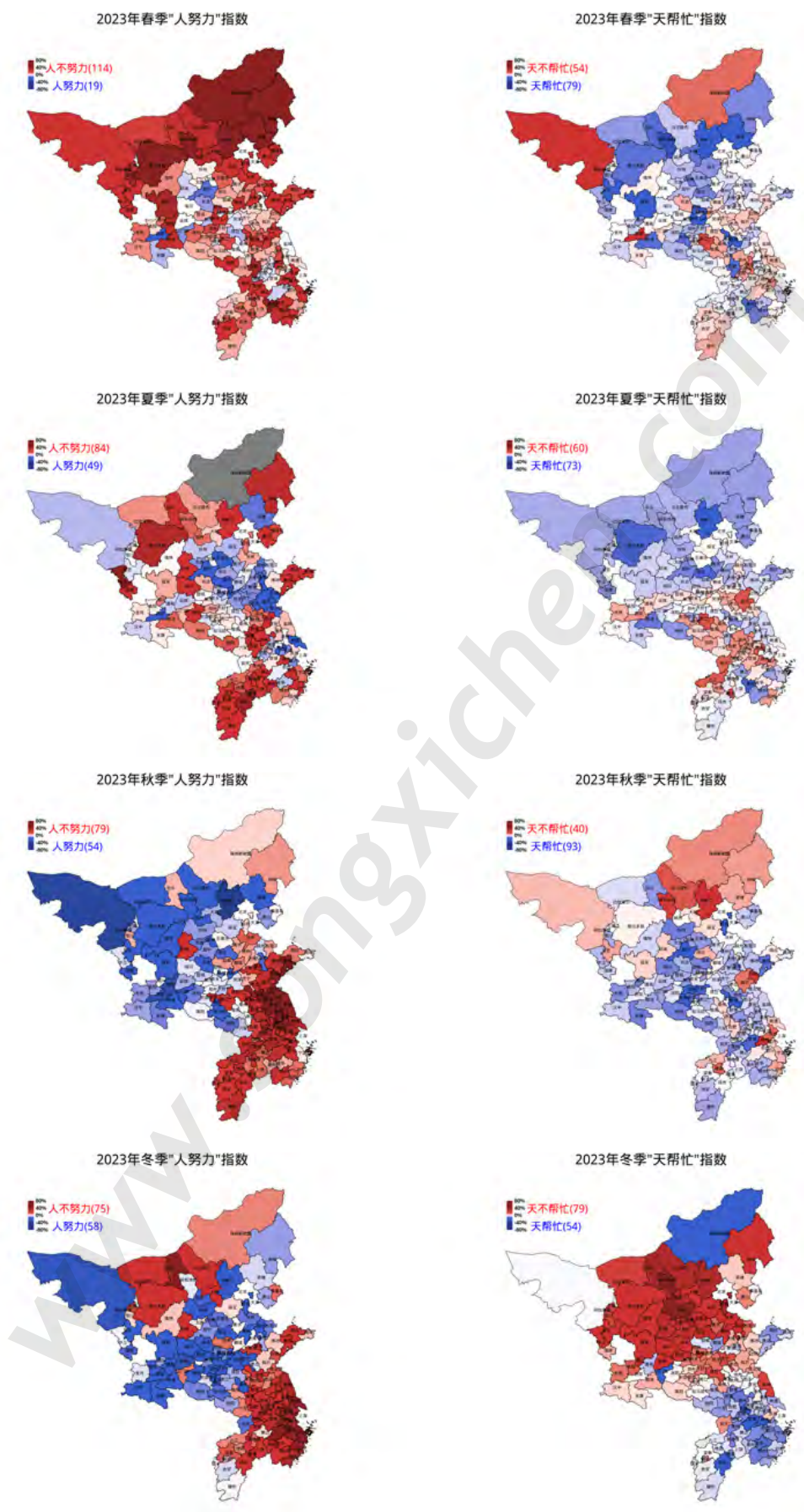


图 49: “3+130”城市 2023 年各季节 PM_{2.5} “人努力”和“天帮忙”指数地图, 左(右)侧蓝色表示“人努力(天帮忙)”, 左(右)侧红色表示“人不努力(天不帮忙)”

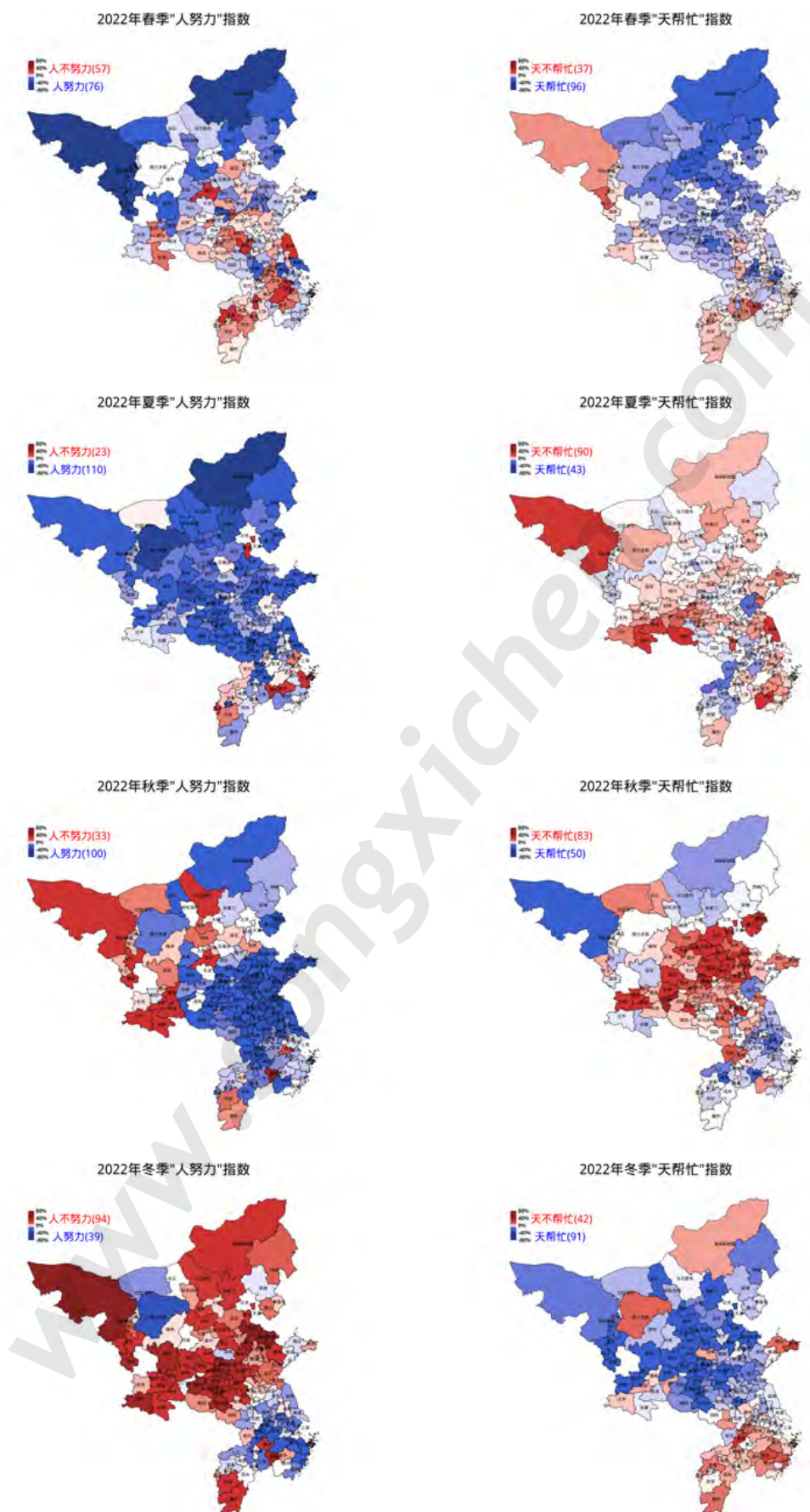


图 50: “3+130”城市 2022 年各季节 PM_{2.5} “人努力”和“天帮忙”指数地图, 左(右)侧蓝色表示“人努力(天帮忙)”, 左(右)侧红色表示“人不努力(天不帮忙)”

5.1 PM_{2.5} 的“人努力-天帮忙”情况

5.1.1 2023 年 PM_{2.5} 的“人努力”情况

图 49和图 50左侧四图反映了 2023 年和 2022 年“3+130”城市 PM_{2.5} 各季节“人努力”的情况。2023 年全年“人努力”城市数量并不理想 (19/133、49/133、54/133、58/133), “3+130”城市各季节排放水平对 PM_{2.5} 的贡献率均值分别为 13.33%、5.49%、6.63% 和 4.53%。相较于 2022 年的“人努力”城市数量 (76/133、110/133、100/133、39/133) 和 PM_{2.5} 平均排放水平贡献率 (-3.14%、-10.52%、-9.04% 和 9.91%), 春、夏、秋三季的“人努力”城市数量大幅减少, 仅冬季 PM_{2.5} 排放情况略有好转。这反映了 2022 年底全面放开后, 经济活动恢复, 污染排放增加。

具体来看, 2023 年春季“人努力”城市仅有 19 个, 主要集中在河南 (5/17)、山西 (4/11) 和安徽 (4/16), 分布与 2022 年几乎相反。2022 年春季“人努力”的 76 个城市中, 仅有 4 个城市在 2023 年实现了持续减排, 分别是山西的阳泉、长治和吕梁, 以及河南的三门峡。2022 年春季“人不努力”的 57 个城市中, 有 15 个城市在 2023 年有所改善, 其中河南与安徽各占 4 个城市。

2023 年夏季“人努力”城市数量只有 49 个, 相较 2022 年夏季减少了 61 个, 主要分布在山东 (12/17)、河南 (7/17)、江苏 (7/13) 和河北 (6/11)。在 2022 年夏季 110 个“人努力”城市中, 仅有 41 个城市保持了连续两年的改善, 主要分布在山东 (11/17)、河南 (7/17)、江苏 (6/13)、河北 (5/11) 和山西 (5/11); 有 69 个城市出现了反弹, 主要分布在天津、安徽 (12/16)、河南 (10/17)、陕西 (7/10)、江西 (6/11) 和山西 (6/11)。

2023 年秋季“人努力”城市数量较 2022 年秋季减少了 46 个, 只有 54 个, 主要分布在北京、河南 (14/17)、山西 (10/11) 和陕西 (9/10)。在 2022 年“人努力”城市中, 仅有 30 个城市保持了连续两年的改善, 其中河南有 13 个城市; 有 70 个城市出现了反弹, 主要分布在天津、上海、山东 (14/17)、安徽 (13/16) 和江苏 (12/13)。

2023 年冬季“人努力”城市数量较 2022 年冬季增加了 19 个, 共有 58 个, 减排情况有所改善, 主要分布在北京、天津、河南 (16/17)、陕西 (9/10)、山西 (8/11)、河北 (7/11) 和山东 (7/17)。与春季相似, 2023 年冬季的“人努力”城市分布与 2022 年冬季几乎相反, 2022 年冬季的 94 个“人不努力”城市, 在 2023 年冬季有 57 个实现了改善, 成为“人努力”城市, 主要分布在华北和西北地区; 2022 年冬季的 39 个“人努力”城市, 在 2023 年冬季仅有河北承德保持了减排。

5.1.2 2023 年 PM_{2.5} 的“天帮忙”情况

图 49和图 50右侧四图反映了 2023 年相对 2022 年“3+130”城市 PM_{2.5} 各季节“天帮忙”的情况。2023 年全年“天帮忙”城市数量季度变化较大 (79/133、73/133、93/133、54/133), “3+130”城市各季节气象条件对污染物的贡献率均值分别为-1.94%、-0.89%、-2.58% 和 5.63%。相较于 2022 年的“天帮忙”城市数量 (96/133、43/133、50/133、91/133) 和平均排放水平贡献率 (-4.20%、1.85%、4.21% 和-5.52%), 夏秋两季绝大部分城市的气象条件促进了观测到的 PM_{2.5} 浓度的下降, 春冬两季的表现恰好相反, 气象条件不利于大气污染物的扩散。

具体来看, 2023 年春季“天帮忙”城市有 79 个, 主要分布在北京、天津、河南 (12/17) 和山西

(10/11)。在 2022 年春季“天帮忙”的 96 个城市中，55 个城市在 2023 年春季的气象条件继续有利于大气污染物的扩散；41 个城市转为不利，集中在上海、山东 (9/17)、安徽 (8/16) 和江苏 (7/13)。在 2022 年春季“天不帮忙”的城市中，有 24 个城市的气象条件由不利转为有利，在 2023 年春季实现了“天帮忙”，其中安徽有 7 个城市；有 13 个城市的气象条件仍旧不利于污染物扩散，仅江西就有 6 个城市。

2023 年夏季“天帮忙”城市有 73 个，主要分布在北京、天津、河北 (9/11)、河南 (9/17)、内蒙古 (8/8)、山西 (8/11) 和山东 (8/17)。2022 年夏季“天帮忙”城市中，有 13 个城市在 2023 年夏季的气象条件有利于扩散，主要集中在宁夏 (4/5)、内蒙古 (3/8) 和山西 (3/11)；另外 30 个城市气象条件由有利转为不利，主要集中在安徽 (8/16) 和江西 (7/11)。2022 年夏季“天不帮忙”城市中，有 60 个城市在 2023 年夏季的气象条件由不利转为有利，30 个城市的气象条件仍然不利于扩散，山东和浙江各占其中 6 个。

2023 年秋季“天帮忙”城市达到了 93 个，主要分布在天津、河南 (15/17)、安徽 (12/16)、山东 (12/17) 和江苏 (10/13)，较 2022 年增加了 43 个城市，为全年气象条件最好的季度。2022 年秋季“天帮忙”城市中，有 24 个城市在 2023 年秋季的气象条件保持有利。2022 年秋季“天不帮忙”城市中，有 69 个城市在 2023 年秋季的气象条件由不利转为有利，14 个城市的气象条件持续不利于排放，最严重的是北京、浙江台州和河北邢台。

2023 年冬季气象条件再次转为不利，“天帮忙”城市仅有 54 个，集中分布在上海、安徽 (13/16)、浙江 (11/11)、江苏 (9/13) 和江西 (9/11)。2022 年冬季“天帮忙”城市中，有 18 个城市在 2023 年冬季的气象条件保持有利，主要是江苏 (7/13) 和安徽 (6/16)；有 73 个城市的气象条件转为不利，最严重的是山西忻州、内蒙古呼和浩特和北京。2022 年冬季“天不帮忙”城市中，有 36 个城市气象条件转好，只有内蒙古鄂尔多斯、江西新余和萍乡、陕西汉中和西安以及江西宜春 6 个城市的气象条件仍然不利，其中内蒙古鄂尔多斯的气象条件贡献了 26% 的污染物增幅。

5.2 O₃ 的“人努力-天帮忙”情况

5.2.1 2023 年 O₃ 的“人努力”情况

图 51 和图 52 左侧四图反映了 2023 年和 2022 年“3+130”城市 8 小时 O₃ 各季节“人努力”的情况。2023 年全年“人努力”城市数量并不理想 (67/133、38/133、78/133、34/133)，“3+130”城市各季节排放水平对污染物的贡献率均值分别为 -0.89%、3.52%、-2.53% 和 4.55%。相较于 2022 年的“人努力”城市数量 (24/133、75/133、37/133、95/133) 和平均排放水平贡献率 (7.49%、-0.07%、7.30% 和 -2.87%)，春、秋两季的“人努力”城市数量显著增长，夏、冬两季的“人努力”城市数量则大幅减少。

具体来看，2023 年春季“人努力”城市有 67 个，主要集中在安徽 (10/16) 和江西 (10/11)。2022 年春季“人努力”的 24 个城市中，仅有 4 个城市在 2023 年实现了持续减排，分别是浙江舟山和台州、宁夏吴忠和石嘴山。2022 年春季“人不努力”的 109 个城市中，有 63 个城市在 2023 年有所改善，实现了“人努力”，主要分布在安徽、江西和江苏等地区。

2023 年夏季“人努力”城市数量仅有 38 个，相较 2022 年夏季减少了 37 个，主要分布在山东 (7/16)、江苏 (7/13) 和浙江 (7/11)。在 2022 年夏季 75 个“人努力”城市中，仅有 15 个城市保持了连续两年

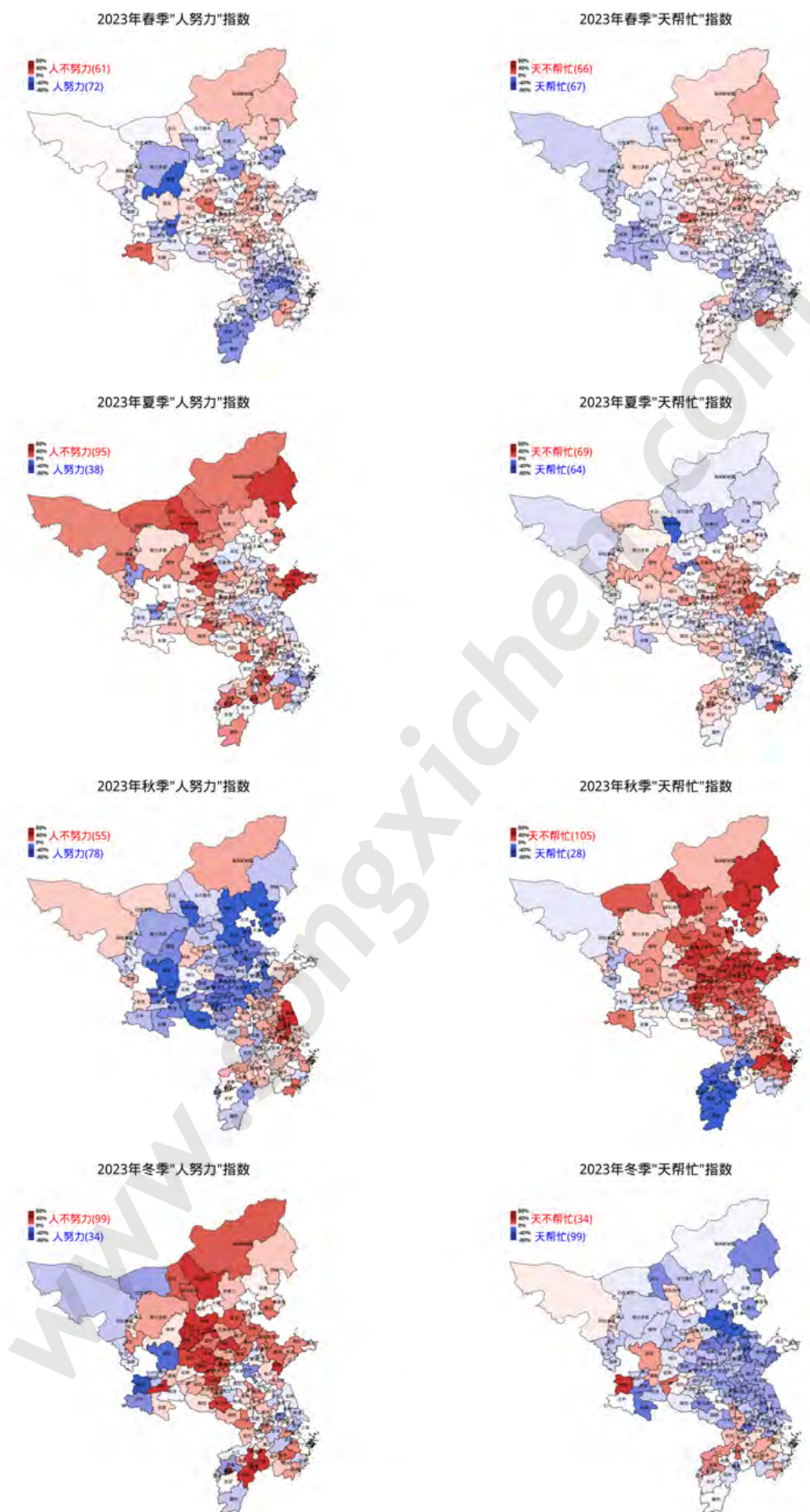


图 51: “3+130”城市 2023 年各季节 O₃ “人努力”和“天帮忙”指数地图, 左(右)侧蓝色表示“人努力(天帮忙)”, 左(右)侧红色表示“人不努力(天不帮忙)”

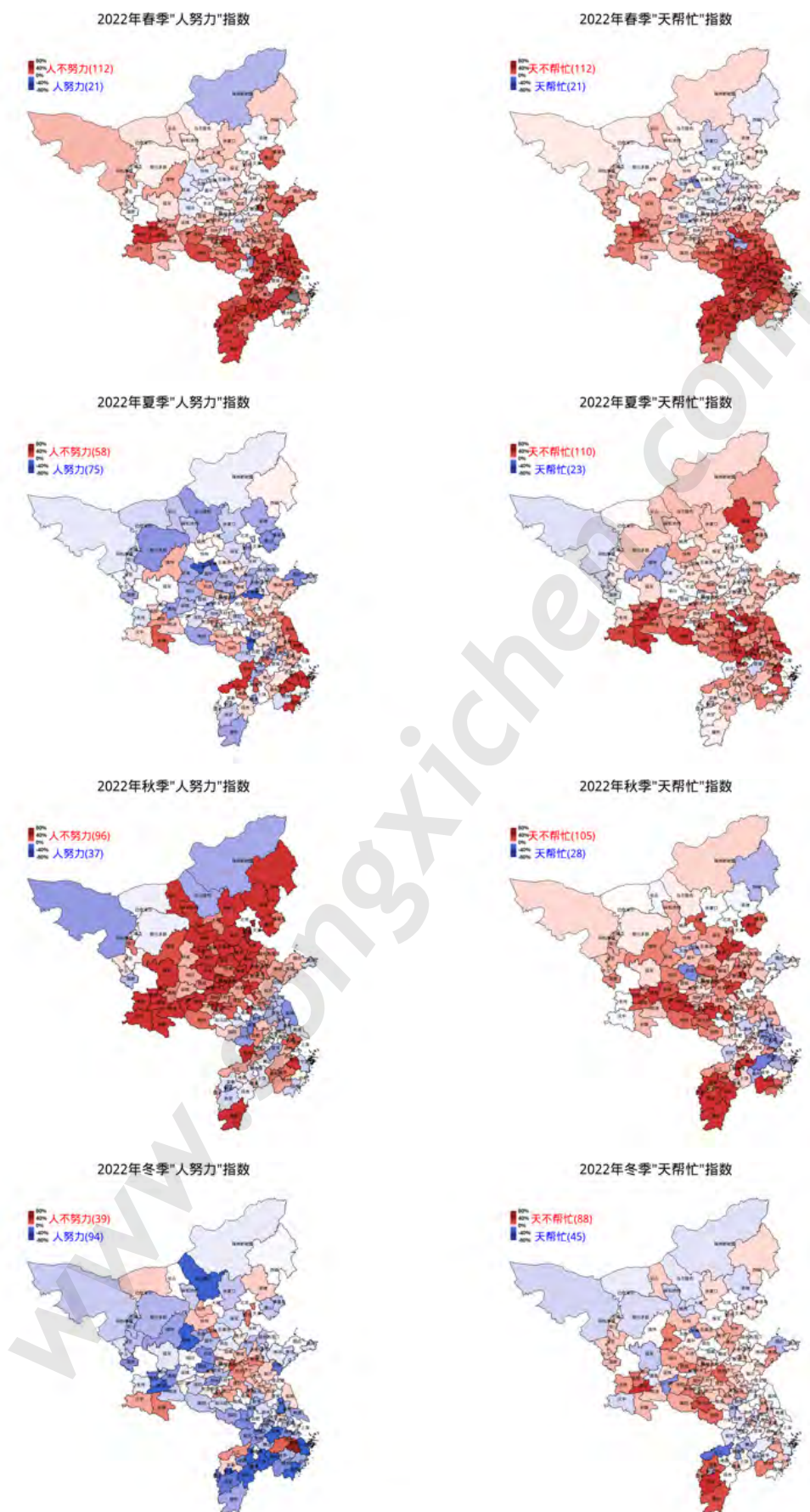


图 52: “3+130”城市 2022 年各季节 O₃ “人努力”和“天帮忙”指数地图, 左(右)侧蓝色表示“人努力(天帮忙)”, 左(右)侧红色表示“人不努力(天不帮忙)”

的改善，主要分布在华北、华东地区。2022 年夏季“人不努力”的 58 个城市中，有 23 个城市在 2023 年有所改善，同样集中分布在华东地区，其中江苏省有 7 个城市改善，浙江省有 6 个城市改善。

2023 年秋季“人努力”城市数量较 2022 年秋季增加了 41 个，达到了 78 个，主要分布在北京、天津、河南（16/17）、山东（13/17）和河北（11/11）。在 2022 年“人努力”的 37 个城市中，有 7 个城市保持了连续两年的改善，分别是江西抚州、河南驻马店、内蒙古鄂尔多斯、乌兰察布、安徽宣城、淮南和江西吉安；有 30 个城市出现了反弹，主要分布在江苏（9/13）和安徽（7/16）。

2023 年冬季“人努力”城市数量较 2022 年冬季减少了 61 个，仅有 34 个，减排情况再度反弹，其分布与夏季相似。2022 年冬季 95 个“人努力”城市，在 2023 年冬季仅有 22 个城市保持了减排，主要分布在上海、江苏（6/13）和陕西（5/10）。2022 年冬季的 38 个“人不努力”城市，在 2023 年冬季有 12 个实现了改善，成为“人努力”城市，主要分布在华东地区。

5.2.2 2023 年 O₃ 的“天帮忙”情况

图 51 和图 52 右侧四图反映了 2023 年相对 2022 年“3+130”城市 8 小时 O₃ 各季节“天帮忙”的情况。2023 年全年“天帮忙”城市数量季度变化较大（69/133、64/133、28/133、98/133），“3+130”城市各季节气象条件对 O₃ 的贡献率均值分别为-0.18%、0.36%、5.53% 和-3.06%。相较于 2022 年的“天帮忙”城市数量（22/133、23/133、29/133、49/133）和 O₃ 平均排放水平贡献率（6.77%、5.32%、4.99% 和 1.93%），2023 年春、夏、冬三季绝大部分城市的气象条件有利于 O₃ 的扩散，秋季的气象条件则与 2022 年相似。整体来说，2023 年气象条件对于 O₃ 的扩散较为有利。

具体来看，2023 年春季“天帮忙”城市仅有 69 个，主要分布在上海、安徽（14/16）、江苏（11/13）和陕西（10/10）。在 2022 年春季“天帮忙”的 22 个城市中，仅有内蒙古赤峰和安徽宿州 2 个城市在 2023 年春季的气象条件继续有利于 O₃ 的扩散。在 2022 年春季“天不帮忙”的 111 个城市中，有 67 个城市的气象条件由不利转为有利；有 44 个城市的气象条件仍旧不利于 O₃ 的扩散，仅河南就有 11 个城市。

2023 年夏季“天帮忙”城市增加到了 64 个，主要集中在江苏（11/13）、安徽（9/16）和河南（8/17）。2022 年夏季 23 个“天帮忙”城市中，有 6 个城市在 2023 年夏季的气象条件依然有利于 O₃ 的扩散，分别是安徽宿州、河南平顶山、内蒙古阿拉善盟、山西长治、山西朔州和宁夏中卫。2022 年夏季“天不帮忙”的 110 个城市中，有 58 个城市在 2023 年夏季的气象条件由不利转为有利，52 个城市的气象条件仍然不利于扩散，山东占其中 12 个。

2023 年秋季“天帮忙”城市仅有 28 个，江西占了 11 个，安徽占 5 个。2023 年秋季“天不帮忙”城市中，气象条件最为不利的城市是山西晋中和河北承德，分别贡献了 25.4% 和 21.9% 的 O₃ 增幅。2022 年秋季 29 个“天帮忙”城市的气象条件全部转为“天不帮忙”。

2023 年冬季为全年气象条件对 O₃ 排放最有利的季度，“天帮忙”城市增长到 98 个，集中分布在北京、天津、上海、山东（17/17）、江苏（13/13）、河南（13/17）和河北（10/11）。2022 年冬季 49 个“天帮忙”城市中，有 26 个城市在 2023 年冬季的气象条件保持有利，江苏占其中 7 个城市；有 23 个城市的气象条件转为不利，安徽和浙江各占 6 个城市。2022 年冬季“天不帮忙”城市中，有 72 个城市气象条件转为有利，有 12 个城市的气象条件仍然不利，其中宝鸡的气象条件贡献了 13.3% 的 O₃ 增幅。

6 主要结论与建议

2017-2021 年,六种污染物浓度整体呈下降趋势,期间浓度回升仅在少数孤立的省市和污染物中发生。然而,自 2022 年开始,污染物浓度反弹成为主要特征,涉及污染物种类多、覆盖城市范围广。2023 年,随着新冠疫情后社会经济活动的进一步恢复,同 2022 年相比,空气污染出现大范围反弹。“3+130”城市中有 89 个城市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度显著上升,91 个城市 PM_{10} 年均浓度上升,83 个城市春夏 8 小时 O_3 年均浓度上升,85 个城市 NO_2 年均浓度上升,70 个城市 CO 年均浓度上升, SO_2 年均浓度反弹形势稍弱,也有 42 个城市年均浓度显著上升。从极端污染(90% 分位数浓度)情况看,“3+130”城市中,有 86 个城市 $\text{PM}_{2.5}$ 的年均 90% 分位数浓度上升,有 85 个城市春夏 8 小时 O_3 的平均 90% 分位数浓度上升。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,空气污染的反弹增加一方面表明疫情后社会经济活动的恢复所产生的污染排放的提高,也表明维持大气污染治理的成绩所面临的挑战。

虽然相较于疫情前的 2019 年,2023 年“3+130”城市六种污染物浓度综合降幅为 10.4%,但仅有 46 个城市(36 个重点城市)全部六种污染物浓度均低于 2019 年水平;对其余 87 个城市而言,至少有一种污染物反弹至疫情前水平。其中仅有 69 个城市(含 46 个重点城市)秋冬 $\text{PM}_{2.5}$ 和春夏 8 小时 O_3 均低于 2019 年水平;这说明在 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 污染高发季节,有近一半的城市面临着与疫情前相似甚至更严重 $\text{PM}_{2.5}$ 或 O_3 污染。考虑到近两年的规模性反弹趋势,如果 2024 年持续 2022 年、2023 年的反弹力度,会有更多城市的大气污染状况超过 2019 年疫情前的水平。

对于京津冀及周边地区“2+36”城市、汾渭平原和长三角地区三个重点监测区域,相较 2022 年,汾渭平原的改善最为显著,除春夏 8 小时 O_3 外,其余五种污染物年均浓度均下降;而长三角地区反弹最为严重,除春夏 8 小时 O_3 下降与 SO_2 年均浓度变化不显著外,其余四种污染物均反弹。

6.1 颗粒物和春夏 8 小时 O_3 污染形势反复,长三角地区反弹突出

近两年报告中给出的空气污染物浓度的年际变化情况显示,自 2022 年起,我国重点区域的空气质量不再延续早期的持续下降趋势,多项污染物浓度在部分省市波动回升,其中污染较重的颗粒物与春夏 8 小时 O_3 出现规模性反弹。随着生产活动恢复与经济的持续复苏,截至 2023 年,我国重点城市 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和春夏 8 小时 O_3 平均浓度较 2021 年已分别上升 3.4%、3.6% 和 3.9%,非重点城市上升 5.3%、6.4% 和 5.3%。2021-2023 年,“3+130”城市中, $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和春夏 8 小时 O_3 平均浓度仅有 11、8、9 个城市连续两年保持下降趋势,占比不足 10%;2022 年 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和春夏 8 小时 O_3 浓度小幅下降(降幅小于 5%)的 26、30、26 个城市,均有 60% 以上在 2023 年反弹至降前水平。从 2023 年的情况来看, $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和春夏 8 小时 O_3 平均浓度降幅小于 5% 或回升的城市分别有 107、106、124 个,占比 80% 以上。若 2023 年的污染反弹形势不能得到有效控制,2024 年将将有较大概率出现半数以上城市浓度继续回升的局面。

分区域来看,2021-2023 年,三大重点区域的颗粒物浓度交替反弹,春夏 8 小时 O_3 浓度持续反弹,长三角地区累计增幅最大。如图 53,2021-2022 年, $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度在长三角地区下降,在汾渭平原和“2+36”城市上升;汾渭平原 PM_{10} 浓度大幅上升 10.8%。2022-2023 年则呈现相反的变化趋势:汾渭平原 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降 8.7% 后达到历史新低水平, PM_{10} 浓度下降 6.8%;“2+36”城市 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10}

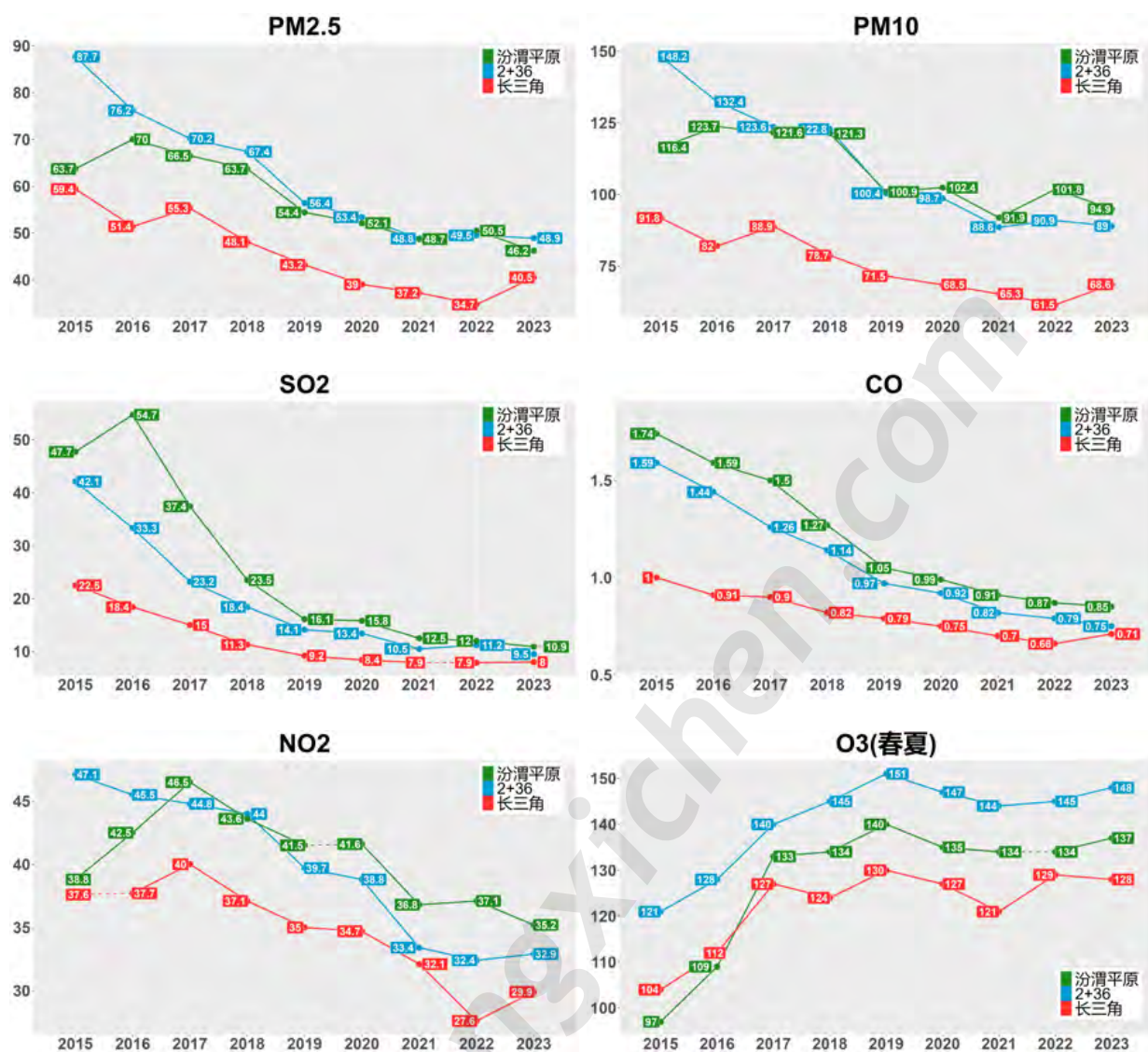


图 53: “2+36”城市、汾渭平原和长三角地区六种污染物年平均浓度时间序列图
(CO 的单位为毫克/立方米, 其余污染物的单位为微克/立方米)

浓度小幅回落, 较 2021 年增幅降至 0.5% 以内; 而长三角地区颗粒物浓度严重反弹, 较 2022 年增幅超过 10%。虽然目前长三角地区 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 平均浓度仍显著低于汾渭平原和“2+36”城市, 但从年均浓度的实际数值来看, PM_{2.5} 浓度的城市均值仍在国家标准之上, PM₁₀ 浓度也仅比标准低 1 微克/立方米, 并非真正意义上的低浓度地区。要实现《行动计划》提出的“2025 年 PM_{2.5} 浓度总体达标”的目标要求, 长三角地区城市应当及时采取措施, 遏制颗粒物反弹趋势。对于春夏 8 小时 O₃, “2+36”城市平均浓度连续 2 年上升, 长三角地区 2022 年浓度大幅上升 6.5% 后小幅回落, 汾渭平原 2022 年浓度小幅下降后反弹。与 2021 年相比, 2023 年长三角地区、“2+36”城市和汾渭平原春夏 8 小时 O₃ 平均浓度分别上升 4.2%、3.1%、2.8%。2017-2023 年, 臭氧是六种常规空气污染物中唯一浓度不降反增的污染物, 控制春夏臭氧污染是现阶段重点区域城市面临的共同任务。

此外,“天帮忙”指数可能令真实的污染状况得到低估。我们关注到 2023 年的春夏秋三个季节,“2+36”城市和汾渭平原均有半数以上城市 $PM_{2.5}$ 的“天帮忙”指数为负,即气象条件有利于 $PM_{2.5}$ 污染改善;在秋季和冬季,长三角地区有半数以上城市的气象条件有利于 $PM_{2.5}$ 污染改善。对于春夏 8 小时 O_3 而言,汾渭平原和长三角地区有半数以上城市的气象条件有利于 O_3 污染改善。气象形势利好可能令真实的污染状况被低估,例如 2023 年,春夏季节分别有 12 个和 14 个“人不努力”城市观测到的 8 小时 O_3 浓度同比下降;秋冬季节分别有 11 个和 5 个“人不努力”城市观测到的 $PM_{2.5}$ 浓度同比下降。一旦气象形势转为不利,“人不努力”会表现为更严重的污染反弹。

6.2 九省市 $PM_{2.5}$ 反弹、八省市 PM_{10} 反弹

在报告所涵盖的十四个省市,2023 年上海、浙江、江苏、江西、内蒙古、安徽、宁夏、山东和河北共九个省市的 $PM_{2.5}$ 年均浓度出现反弹,较 2022 年分别上升了 7.3(27.8%)、6(22.8%)、6.4(18.8%)、3.7(12.5%)、3.1(11.7%)、4.3(11.3%)、2.1(5.3%)、1.2(2.8%) 和 0.8(1.9%) 微克/立方米。这些省市在 2022 年较 2021 年下降或基本持平,2023 年出现反弹;天津、北京的年均浓度与 2022 年相比升降不显著;河南、山西、陕西的年均浓度较 2022 年分别下降了 2.7(5%)、2.8(6.1%)、3.9(8.8%) 微克/立方米。

2023 年上海、浙江、内蒙古、江苏、江西、安徽、天津和山东八个省市的 PM_{10} 年均浓度也出现了反弹,较 2022 年分别上升了 11.4(25.7%)、7.6(16.3%)、8.3(12.6%)、7.6(12.5%)、5.6(11%)、5.9(8.9%)、5.9(7.6%)、2.4(3%) 微克/立方米,这些省市在 2022 年较 2021 年下降或基本持平,而 2023 年出现反弹;北京、河北的年均浓度与 2022 年相比升降不显著;宁夏、山西、河南和陕西的年均浓度较 2022 年分别下降了 2(2%)、2.1(2.2%)、6.8(7%) 和 8.4(9.5%) 微克/立方米。

可以看出, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 年均浓度反弹的省份和浓度升幅大小具有高度一致性。在反弹较明显的上海、浙江、江苏、江西、安徽, PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的浓度升幅非常接近, PM_{10} 浓度回升的主要原因是其中的 $PM_{2.5}$ 污染加剧。

6.3 九省市春夏 8 小时 O_3 反弹、七省市 NO_2 反弹

2023 年内蒙古、山西、天津、河南、山东、宁夏、北京、安徽和河北春夏 8 小时 O_3 平均浓度出现了反弹的情况,较 2022 年分别上升了 7(5.8%)、6(4.5%)、5(3.5%)、4(2.8%)、4(2.8%)、2(1.6%)、2(1.5%)、1(0.8%) 和 1(0.7%) 微克/立方米,其中河南、山东、北京、安徽在 2022 年较 2021 年已分别反弹 2(1.4%)、1(0.7%)、2(1.5%)、4(3.3%) 微克/立方米,而 2023 年继续反弹。江西、上海的春夏平均浓度与 2022 年相比升降不显著;江苏、陕西、浙江的春夏平均浓度较 2022 年分别下降了 1(0.7%)、1(0.8%)、2(1.8%) 微克/立方米。

2023 年上海、江苏、浙江、安徽、山东、江西和内蒙古 NO_2 年均浓度出现了反弹的情况,较 2022 年分别上升了 5.1(16.8%)、2.9(10.5%)、2.2(8%)、1.8(7.1%)、1.5(4.8%)、0.6(2.7%) 和 0.4(1.7%) 微克/立方米;其中内蒙古在 2022 年较 2021 年已反弹 0.3(1.3%) 微克/立方米,而 2023 年继续反弹;天津、北京、宁夏的年均浓度与 2022 年相比升降不显著;河南、河北、陕西、山西的年均浓度较 2022 年分别下降了 0.2(0.7%)、0.6(1.8%)、1(3.1%)、1.2(3.4%) 微克/立方米。

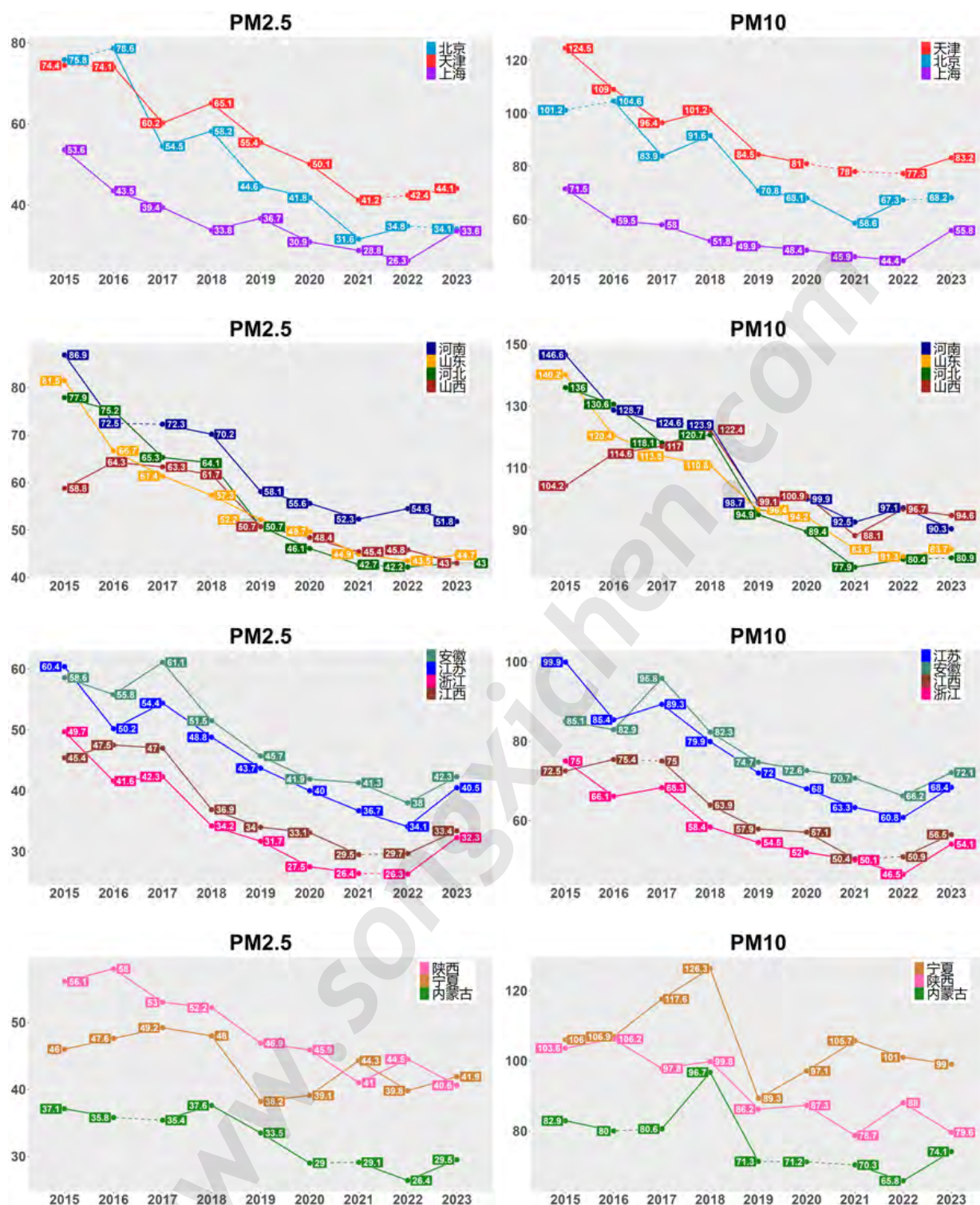


图 54: 十一省三市去除气象因素影响后 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 年平均浓度时间序列 (微克/立方米), 实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上年有 (无) 显著增加或减少

NO_2 是 O_3 和 $PM_{2.5}$ 共同的前体物, 虽然目前污染程度不及二者严重, 在不利气象形势下仍有加剧二次污染的风险。分季节来看, 2023 年 NO_2 浓度在春夏秋三季出现回升, 与 O_3 高污染季节重合, 从

O₃ 超标控制的角度, 需要关注并遏制 NO₂ 的反弹形势。

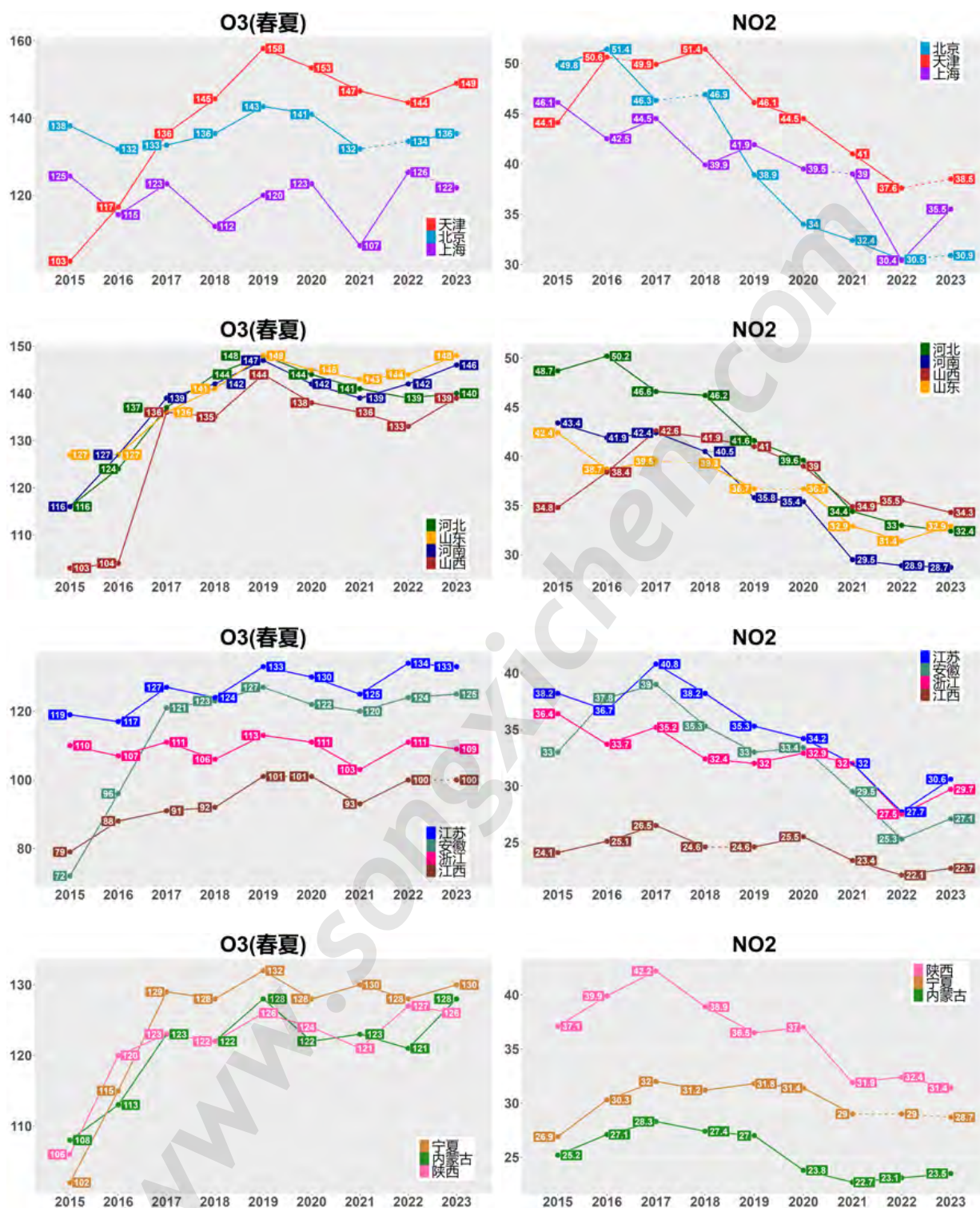


图 55: 十一省三市去除气象因素影响 8 小时 O₃ (春夏) 和 NO₂ 平均浓度时间序列 (微克/立方米), 实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上年有 (无) 显著增加或减少

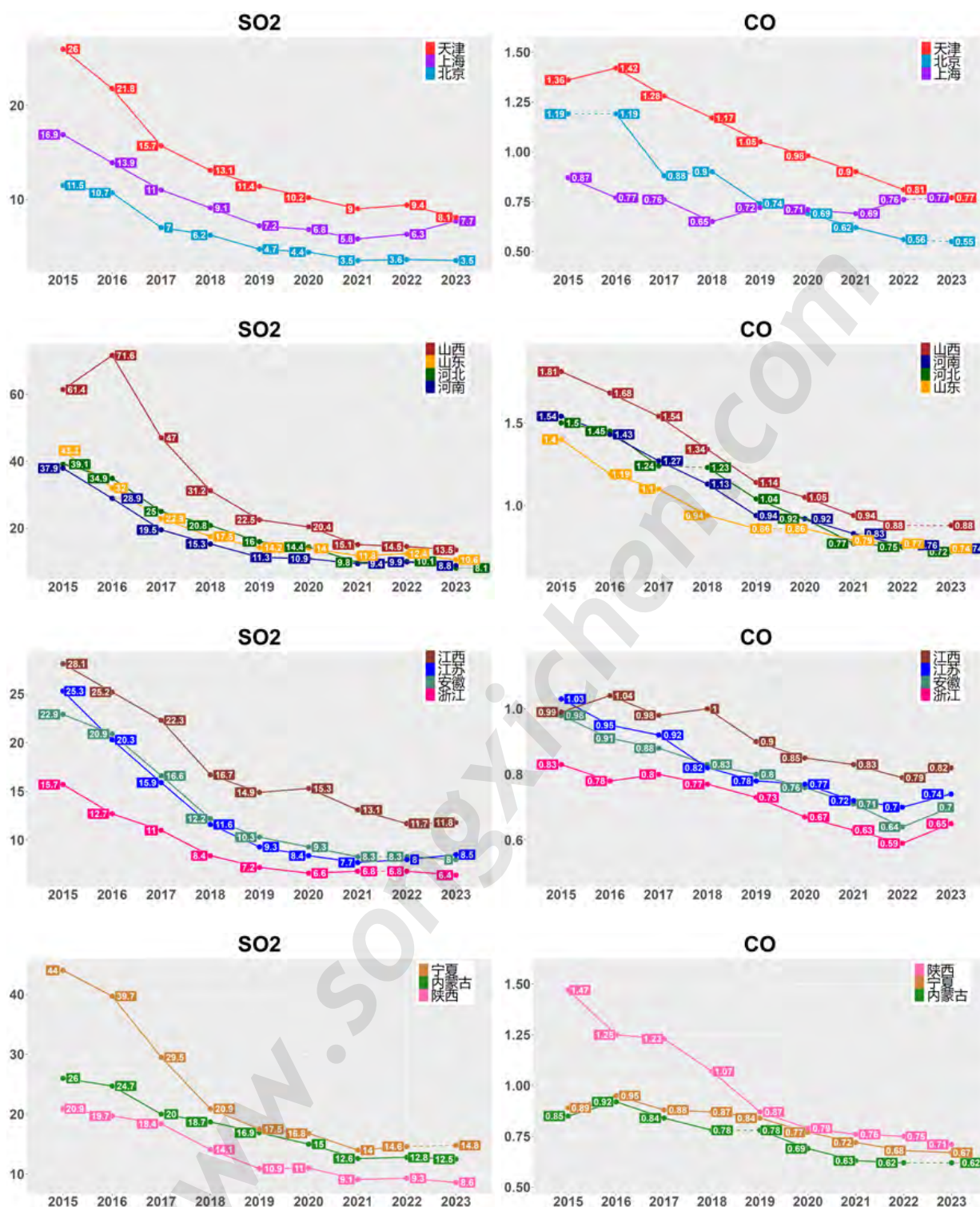


图 56: 十一省三市去除气象因素影响后 SO_2 (微克/立方米) 和 CO (毫克/立方米) 年平均浓度时间序列, 实线(虚线)代表在 5% 统计学显著水平比上年有(无)显著增加或减少

6.4 除少量省市外 SO_2 、 CO 年均浓度下降

2023 年上海、江苏 SO_2 年均浓度出现了反弹的情况, 较 2022 年分别上升了 1.4(22.2%)、0.5(6.2%) 微克/立方米, 这二省市在 2022 年较 2021 年已分别反弹 0.5(8.6%)、0.3(3.9%) 微克/立方米, 而 2023 年

继续反弹。宁夏、江西的年均浓度与 2022 年相对变化不显著；内蒙古、北京、安徽、浙江、山西、陕西、河南、天津、山东和河北的年均浓度较 2022 年分别下降了 0.3(2.3%)、0.1(2.8%)、0.3(3.6%)、0.4(5.9%)、1(6.9%)、0.7(7.5%)、1.1(11.1%)、1.3(13.8%)、1.8(14.5%) 和 2(19.8%) 微克/立方米。

在 CO 方面，2023 年浙江、安徽、江苏、江西 CO 年均浓度出现反弹，较 2022 年分别上升了 0.06(10.2%)、0.06(9.4%)、0.04(5.7%)、0.03(3.8%) 毫克/立方米，这些省市在 2022 年较 2021 年下降，而 2023 年出现反弹。上海、山西、内蒙古、北京的年均浓度与 2022 年相比升降不显著；宁夏、河南、山东、河北、天津和陕西的年均浓度较 2022 年分别下降了 0.01(1.5%)、0.02(2.6%)、0.03(3.9%)、0.03(4%)、0.04(4.9%) 和 0.04(5.3%) 毫克/立方米。

目前我国 SO₂ 和 CO 浓度已达到较低水平，但在多数省市仍然维持着稳定的改善趋势，说明我国当前的空气污染防治策略在 SO₂ 和 CO 污染控制方面卓有成效。

6.5 春、夏、秋三季多污染物浓度回升，夏季 O₃ 污染加剧

相较 2022 年，六类污染物在四个季节呈现不同的变化趋势。春季主要表现为颗粒物浓度普遍上升，CO 浓度普遍下降，NO₂ 在除汾渭平原之外的地区普遍上升。夏季主要表现为 O₃ 普遍上升，PM_{2.5} 和 CO 在除京津冀及周边“2+36”城市之外的地区普遍上升，汾渭平原 SO₂ 明显上升。秋季主要表现为长三角地区六类污染物反弹，NO₂ 浓度普遍上升，汾渭平原颗粒物明显下降。冬季主要表现为 O₃ 浓度普遍上升，长三角地区除 SO₂ 外所有污染物反弹，汾渭平原和京津冀及周边“2+36”城市除 O₃ 外所有污染物有所改善。

与 2022 年春夏秋三季除 O₃ 外其他污染物浓度普遍下降，浓度大面积反弹集中发生在冬季的季节性趋势不同，2023 年是多季节反弹带来了年均浓度的整体回升，我们建议相关地区城市优先关注春季颗粒物污染与夏季 O₃ 和 NO₂ 浓度回升问题，避免浓度继续反弹增加超标风险。

6.6 极端污染

极端污染是衡量空气质量的另一重要标准，如美国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，O₃ 每年第四高日最大 8h 滑动平均浓度（三年平均）不超过 137 微克/立方米 [22]。报告第 3 章给出了 2023 年各市 PM_{2.5} 和 8 小时 O₃ 的季节 90% 分位数浓度最大值，用以衡量全年的极端污染情况。与我国现行空气质量标准相比，“3+130”城市中仅 6% 最高季节 90% 分位数浓度低于 PM_{2.5} 日均浓度标准（75 微克/立方米），仅 10% 的城市低于 O₃ 日均浓度标准（160 微克/立方米）。

我们也对四个季节各城市 PM_{2.5} 和 O₃ 的 90% 分位数浓度进行了统计，用以衡量每个季节的极端污染情况。对于 PM_{2.5}，我们重点关注秋冬季节的污染情况。2023 年，秋季和冬季 PM_{2.5} 90% 分位数浓度超过 75 微克/立方米的城市数均比 2022 年增加，秋季共 61 个城市超标，增加 8 个；冬季共 125 个城市超标，增加 19 个。重点城市中，“2+36”城市、汾渭平原和长三角地区秋季超标城市比例分别为 97.4%、69.2% 和 38.7%，冬季全部重点城市 PM_{2.5} 90% 分位数浓度均超过国家标准。对于 O₃，我们重点关注春夏季节的污染情况。2023 年，春季 O₃ 90% 分位数浓度超过 160 微克/立方米的城市数为 95 个，较 2022

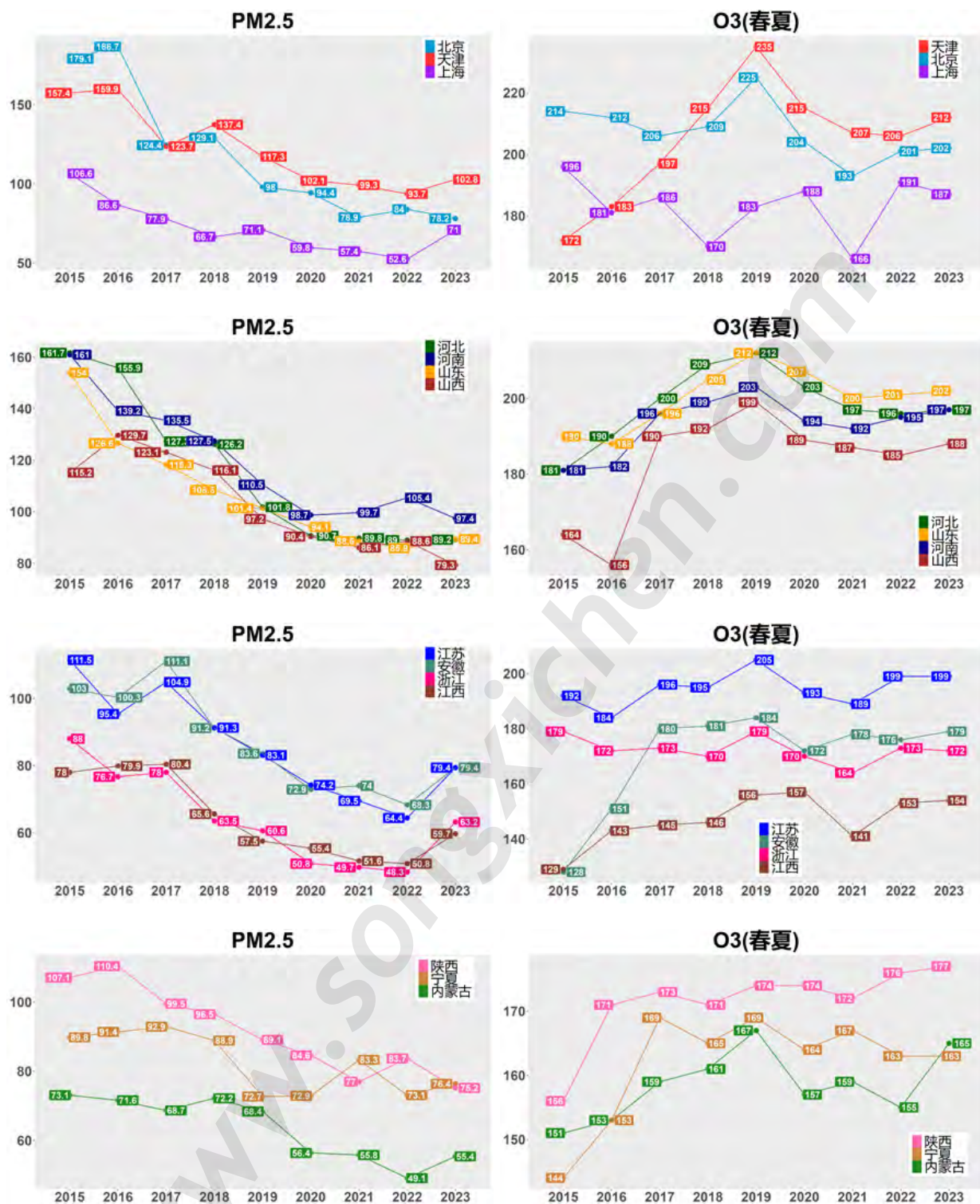


图 57: 十一省三市去除气象因素影响 $PM_{2.5}$ 和 8 小时 O_3 (春夏) 平均 90% 分位数浓度时间序列 (微克/立方米)

年减少 9 个; 夏季超标城市 117 个, 增加 3 个。重点城市中, 春夏季节“2+36”城市 O_3 90% 分位数浓度均全部超过国家标准; 汾渭平原春季超标城市比例为 84.6%, 夏季全部城市超标; 长三角地区春夏季

节超标城市比例分别为 96.8%、93.5%。就目前的污染形势来看，在 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 日均浓度达标方面，我国还有很长的路要走。

图 57 给出十一省三市 2015 至 2023 年 $\text{PM}_{2.5}$ 和 8 小时 O_3 年平均 90% 分位数浓度的变化趋势。由于 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 污染有较强季节性，全年平均后数值显得较为乐观。但截至 2023 年，“3+130”城市 $\text{PM}_{2.5}$ 和春夏 O_3 90% 分位数浓度的年均值仍然超过国家标准，同时较 2022 年浓度出现反弹。 $\text{PM}_{2.5}$ 年平均 90% 分位数浓度为 79.1 微克/立方米，相比于 2022 年 75.6 微克/立方米上升 3.5(4.6%) 微克/立方米，有 86 个城市年均 90% 分位数上升，其中包括 49 个重点城市，有 30 个位于长三角地区。春夏 8 小时 O_3 平均 90% 分位数浓度为 184.8 微克/立方米，相比于 2022 年 182.8 微克/立方米上升 2(1.1%) 微克/立方米；有 85 个城市年均 90% 分位数上升，其中包括 52 个重点城市，“2+36”城市、汾渭平原和长三角各有 24、8、20 个城市上升，占比均超过 60%。

在省级水平，与 2022 年相比，2023 年 $\text{PM}_{2.5}$ 的 90% 分位数浓度均值上升的省份包括上海、浙江、江苏、江西、安徽、内蒙古、天津、宁夏、山东和河北十个省级单元，分别上升了 18.4(35%)、14.9(30.8%)、15(23.3%)、8.9(17.5%)、11.1(16.3%)、6.3(12.8%)、9.1(9.7%)、3.3(4.5%)、3.5(4.1%) 和 0.2(0.2%) 微克/立方米；仅四省份下降，其中陕西省下降最为显著，为 3.9(8.8%) 微克/立方米。春夏 8 小时 O_3 90% 分位数浓度上升的省份共 10 个，包括内蒙古、天津、安徽、山西、河南、江西、陕西、北京、河北和山东，分别上升了 10(6.5%)、6(2.9%)、3(1.7%)、3(1.6%)、2(1%)、1(0.7%)、1(0.6%)、1(0.5%)、1(0.5%) 和 1(0.5%) 微克/立方米；其他 4 个省下降，上海市下降最为显著，为 4(3.2%) 微克/立方米。日均浓度标准是对空气污染急性健康风险的控制指标，日均浓度也代表着公众对空气污染最直观的感受，即使是短时间的高污染状态也会对易感人群造成重大健康风险。在污染物年均浓度普遍改善的情况下，应当增加对日均浓度标准，即分位数浓度的重视和考核力度，与国际上的考核指标接轨，同时能进一步减轻污染对人体健康造成的危害。

6.7 整体污染水平仍低于疫情前，但部分城市已反超疫情前水平

我们将 2019 年的污染物浓度作为衡量疫情前空气污染水平的基准指标，报告第 4 章表 6 给出，2023 年，“3+130”城市六种污染物气象调整后浓度较 2019 年综合降幅的均值为 10.4%，有 73 个城市综合降幅超过 10%，其中包括 52 个重点城市。目前来看，经济活动的持续恢复并未改变空气质量总体改善的趋势。但是，也有 34 个城市综合降幅小于 5% 或污染物浓度综合回升，若延续 2022-2023 年的反弹趋势很可能在 2024 年继续回升至疫情前水平。在区域水平上，“2+36”城市、汾渭平原和长三角地区六种污染物气象调整后浓度较 2019 年综合降幅分别为 16.5%、15.1% 和 8.2%，但长三角地区冬季颗粒物浓度较疫情前明显上升， NO_2 和 O_3 浓度小幅上升。

关于污染物浓度降幅的统计结果图 58 显示，约 1/3 的城市春夏 O_3 和 PM_{10} 浓度较疫情前上升，约 1/6 的城市 $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_2 浓度上升，也有少数城市 NO_2 和 CO 浓度上升。重点区域中，长三角地区约 1/3 的城市春夏 O_3 、 PM_{10} 和 SO_2 浓度较疫情前上升；“2+36”城市中约 1/3 的城市春夏 O_3 浓度较疫情前上升；汾渭平原近 40% 的城市春夏 O_3 和 PM_{10} 浓度较疫情前上升。从不同降幅城市的频率分布来看，对于颗粒物、 NO_2 和 CO ，重点城市改善情况相对好于非重点城市；对于春夏 O_3 和 SO_2 ，重点城

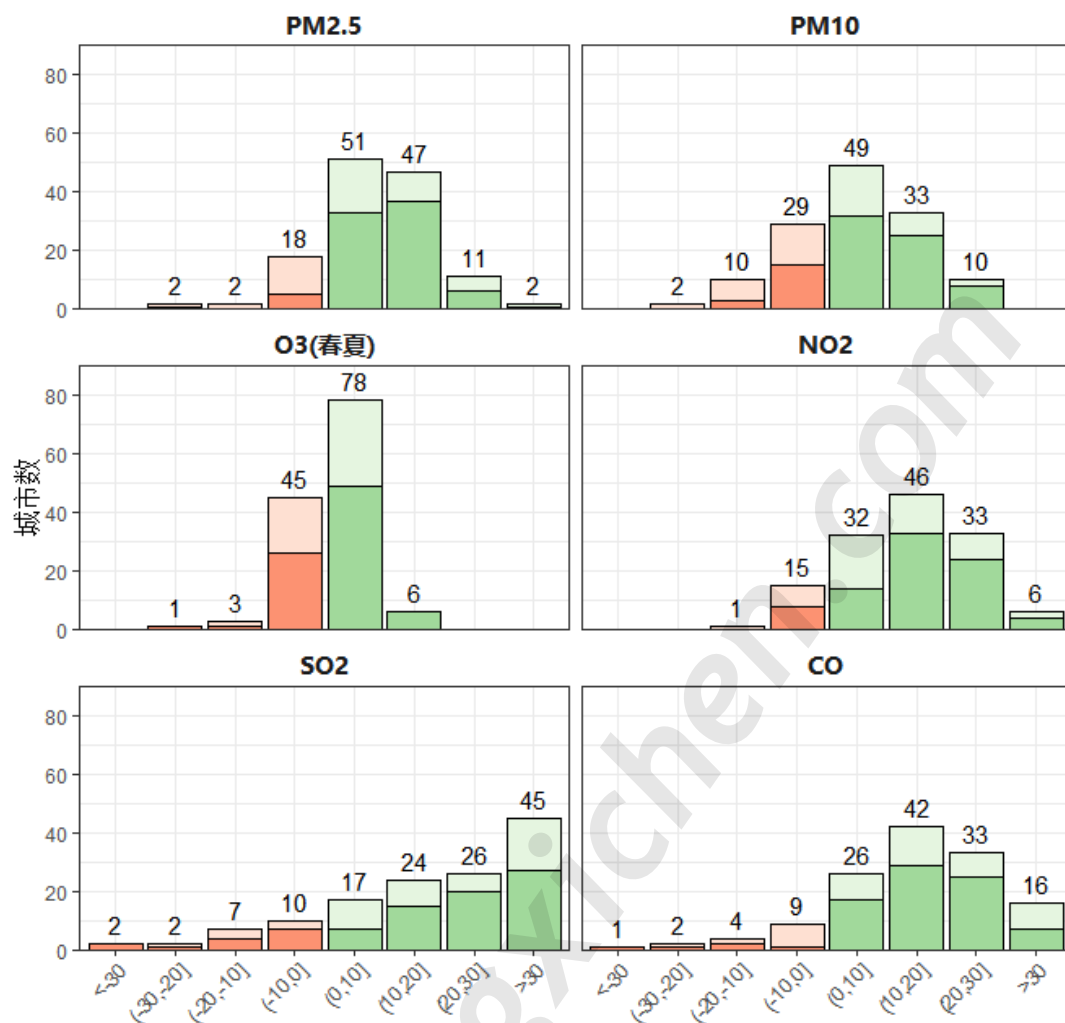


图 58: 2023 年“3+130”城市六类污染物浓度较 2019 年降幅分组统计频率直方图

横坐标为 2023 年较 2019 年污染物浓度降幅 (%) 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, 深色区域为重点城市数量

市与非重点城市的频率密度曲线基本重合。

虽然对大多数城市而言, 2023 年颗粒物和春夏 O_3 浓度较疫情前水平下降, 但近两年的反弹趋势意味着疫情以来取得的空气污染治理成果并不稳固, 不能排除经济活动减少对空气质量改善的正向作用。目前, 超过 1/3 的城市颗粒物降幅在 10% 以内, 近 60% 的城市春夏 8 小时 O_3 降幅在 10% 以内。现阶段, 管理者应当关注到空气污染随经济复苏而加剧的可能性, 以更加环境友好的方式推动经济与产业发展。

6.8 O_3 和 $PM_{2.5}$ 仍是主要污染物, 提高空气质量“良”的标准

2013 年起, 通过实施大气国十条所推动的煤改气、散煤治理、燃煤超低排放等防治策略, SO_2 、CO 的浓度大幅度降低, 但 $PM_{2.5}$ 超标现象始终未得到有效遏制。近年来, 春夏 8 小时 O_3 污染又逐渐进入

公众视野，成为继秋冬雾霾之后的第二个大气污染治理重难点问题。我国国家标准与 WHO 第一阶段目标值基本相同，按照此标准目前仅 SO₂ 和 CO 实现稳定达标。我们参考国家标准与 WHO 第二阶段目标值制定了两套污染物年均浓度标准，用于对提标前后各城市浓度水平较高的污染物进行识别。

关于国家标准，我们将未制定年均浓度标准的污染物 CO 和春夏 8 小时 O₃，结合 WHO 第一阶段指导值和污染物实际浓度分布确定标准为 1 毫克/立方米和 120 微克/立方米；对目前已处于低浓度状态的 SO₂，将标准下调为 20 微克/立方米。关于 WHO 第二阶段指导值标准，由于我国春夏 O₃ 的平均浓度相对于 WHO 的第二阶段目标值明显偏高，因此采用第一阶段目标值（100 微克/立方米）作为超标标准。对于污染物 CO 和 SO₂，WHO 仅对 24h 浓度给出目标参考值（对应年第 99 百分位值），同时提出基于多国多城市（MCC）联合研究，两种污染物年均值与第 99 百分位值的比例通常为 1:3 和 1:4，我们结合这一比例确定浓度标准为 1 毫克/立方米和 13 微克/立方米。

图 59 展示了基于国家标准和 WHO 第二阶段目标值计算的“3+130”城市中六类污染物超标城市数量。注意到 8 小时春夏 O₃ 和 PM_{2.5} 是超标最严重的污染物，在国家标准下，2023 年分别有 105 个和 95 个城市超标，相比 2022 年超标城市数量（101 和 79 个）均出现增长；其次是 PM_{10-2.5}，有 65 个城市超标。若进一步提高标准到 WHO 第二阶段指导值水平，除了 CO，其他污染物超标城市个数将明显增加。例如，若采用 WHO 第二阶段指导值水平，2023 年 8 小时春夏 O₃、PM_{2.5}、PM_{10-2.5}、NO₂ 和 SO₂ 超标城市数量将分别增加 18、34、36、65 和 17 个。

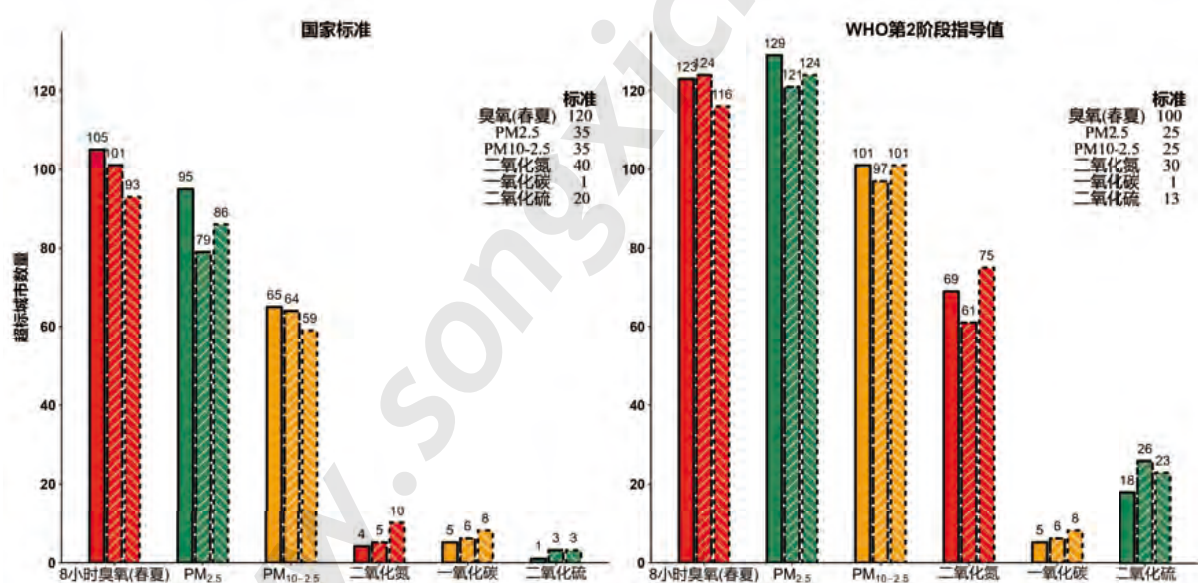


图 59: “3+130”城市各污染物超标情况，同一污染物从左至右依次为 2023/2022/2021 年超标城市数。左右图标准分别基于国家标准和 WHO 第二阶段指导值制定，标准限值见图例（单位：CO 为毫克/立方米，其他污染物为微克/立方米）。

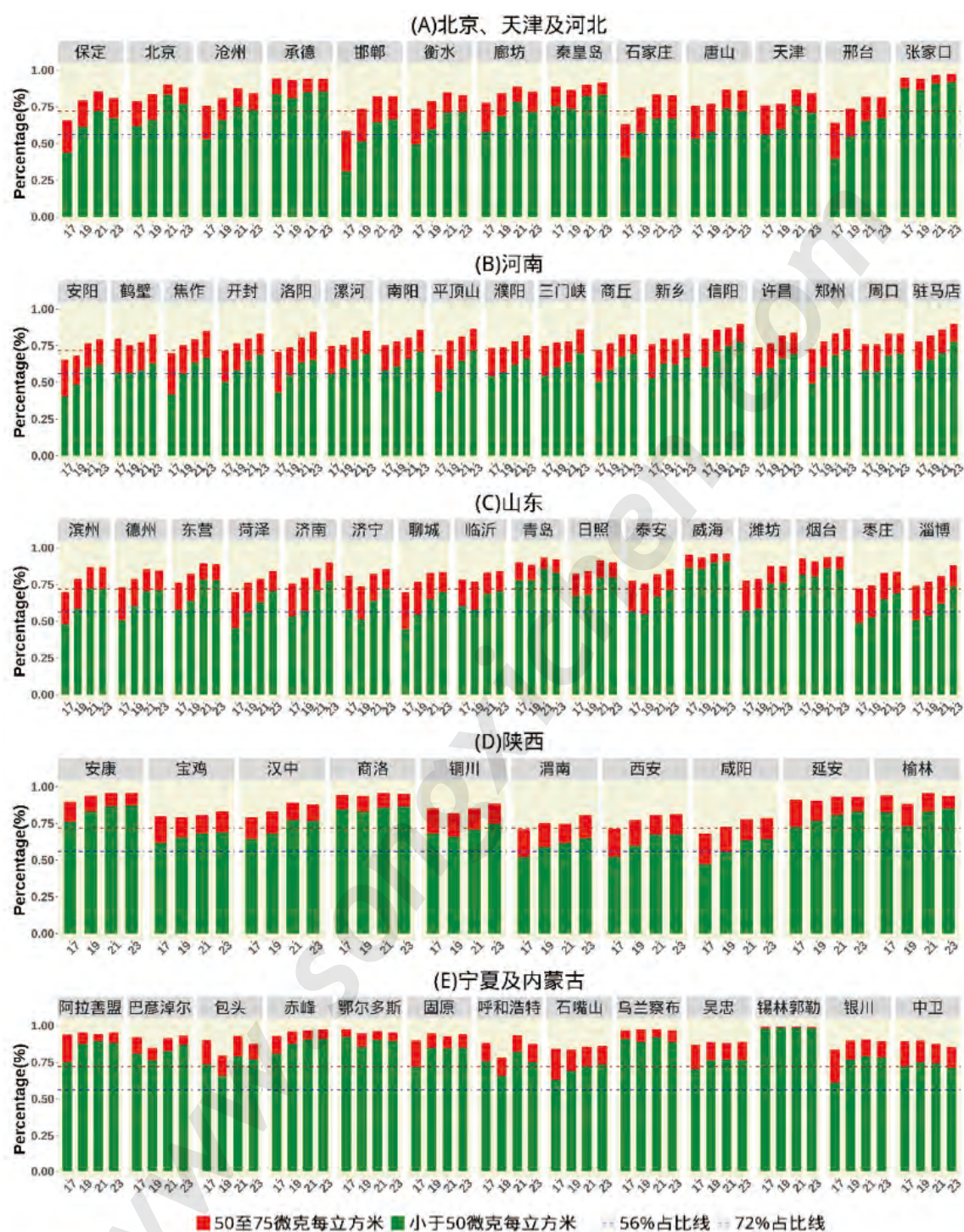
“3+130”城市涵盖中国污染最严重的区域，近年空气污染物浓度连续反弹，尤其是低浓度地区反弹加剧的现象，反映出当前国家标准对低浓度城市的约束力不足。在空气质量显著改善的大背景下，我们认为目前以 PM_{2.5} 为 75 微克/立方米作为日尺度空气质量“良”的上限过于宽松，建议使用 50 微克/立

方米作为空气质量“良”的上限。

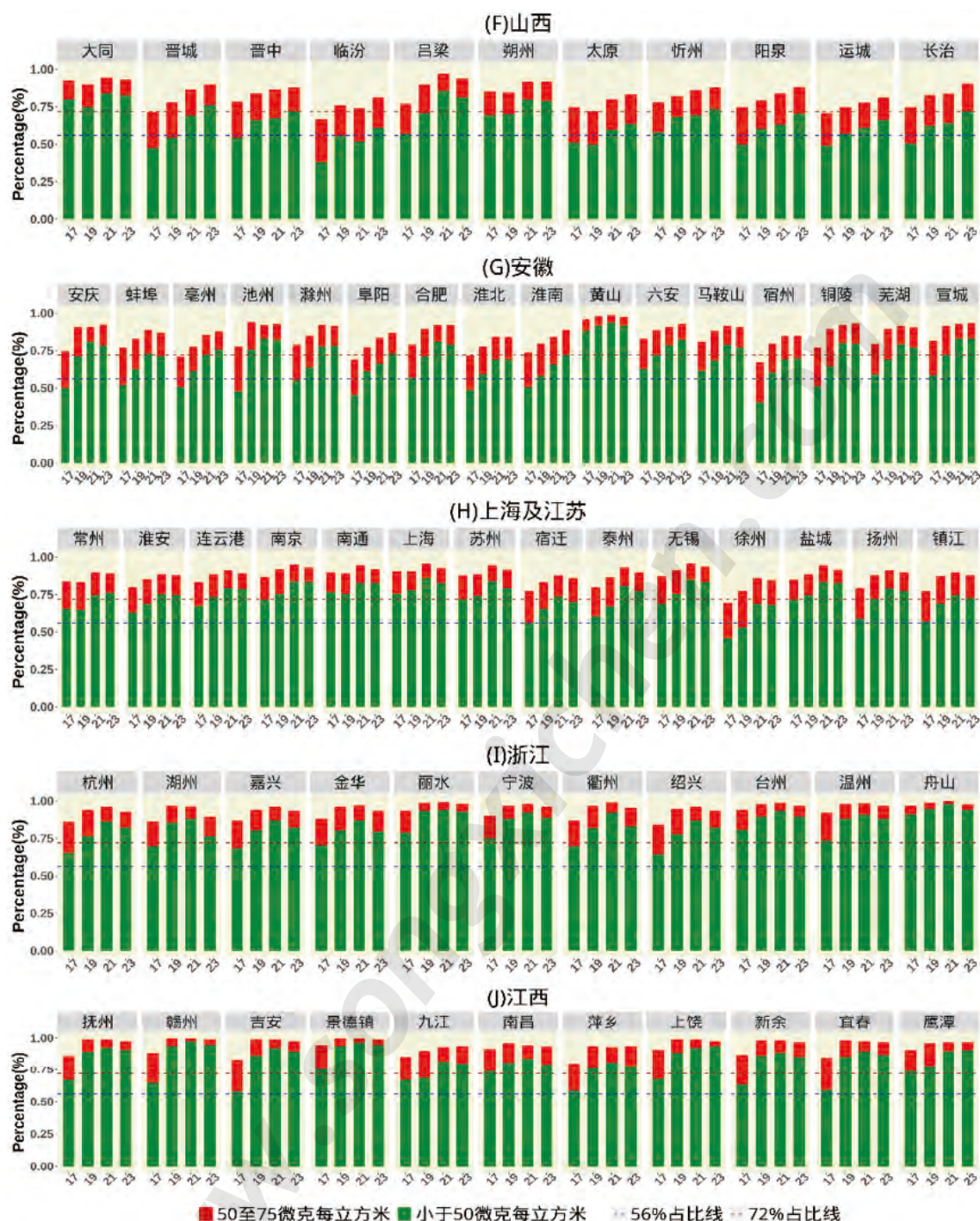
我们注意到印度和孟加拉国相应的 $\text{PM}_{2.5}$ “良”的上限标准分别为 60 和 65 微克/立方米，均比中国目前使用的 75 微克/立方米标准更严格。我们建议使用 WHO 第二阶段目标值给定的 50 微克/立方米作为“良”的上限。这样将提高大气污染预警提示的范围，以减少中国公民的长期污染暴露水平。大量科学研究发现长期暴露在 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度 35 至 75 微克/立方米的空气中会对人体健康造成伤害。随着我国 $\text{PM}_{2.5}$ 的持续下降，提高“良”的标准变得更加迫切。我们自 2018 年的报告五就开始这一呼吁，希望能得到管理层的重视。

如附图 60 和附图 61 所示，在 50 微克/立方米为“良”的标准下，虽然各城市优良空气占比会平均下降 11.4%，但所有城市“优良空气”占比仍都超过 55.9%，其中 103 个城市优良空气占比在 70% 以上。使用 50 微克/立方米作为“良”的上界，一方面可以提高我国污染等级提示的标准，促使我国居民采取更加健全、有效的保护措施，减轻我国居民的污染暴露水平，降低未来个人及国家的医疗健康开支；另一方面，提高“良”的标准也会激励已达标城市的环境管理者重视空气污染的继续治理，巩固大气污染治理成果，为下一步大气污染防治行动计划提供更高的目标和新的动能。

附录

图 60: “3+130”城市分省份 PM_{2.5} 优良天数百分比

(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 71.8% 和 55.9% 分别代表在 75 和 50 微克/立方米“良”的标准下 2023 年“3+130”城市优良天数比例的最低值, 为方便展示起见, 图中仅展示 2017、2019、2021、2023 四年的数据)

图 61: “3+130”城市分省份 PM_{2.5} 优良天数百分比

(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 71.8% 和 55.9% 分别代表在 75 和 50 微克/立方米“良”的标准下 2023 年“3+130”城市优良天数比例的最低值, 为方便展示起见, 图中仅展示 2017、2019、2021、2023 四年的数据)

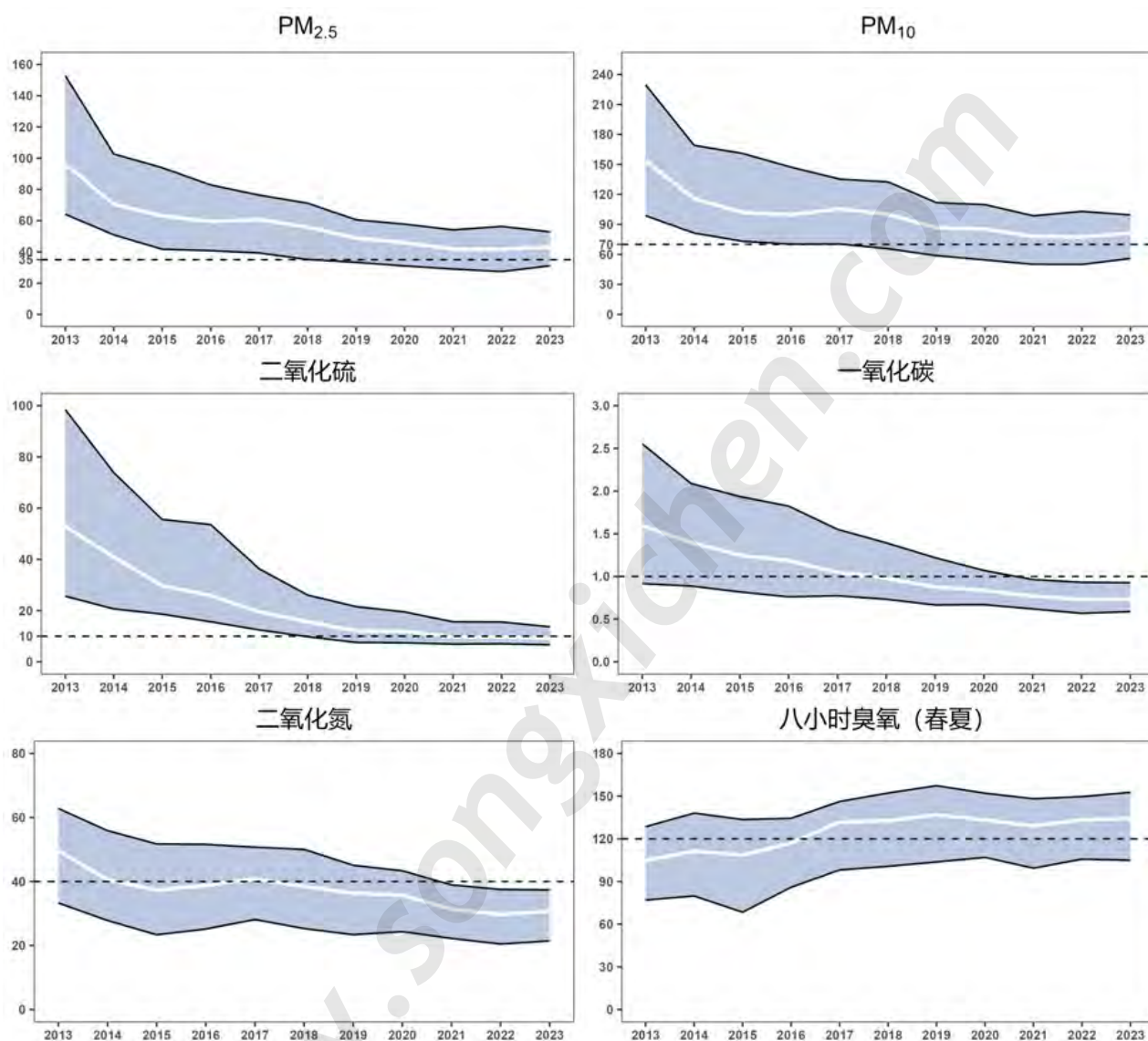


图 62: “3+130”城市 2013-2023 年平均浓度 (白色折线) 和 10%(下黑实线)-90%(上黑实线) 分位数区间变化趋势 (蓝色区间为 “3+130” 城市年均浓度 10%-90% 分位数区间, 白色折线为 “3+130” 城市逐年平均浓度。一氧化碳浓度单位为毫克/立方米, 其余污染物为微克/立方米。黑色虚线为第四章设定参考标准, 其中 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 使用国家二级标准)

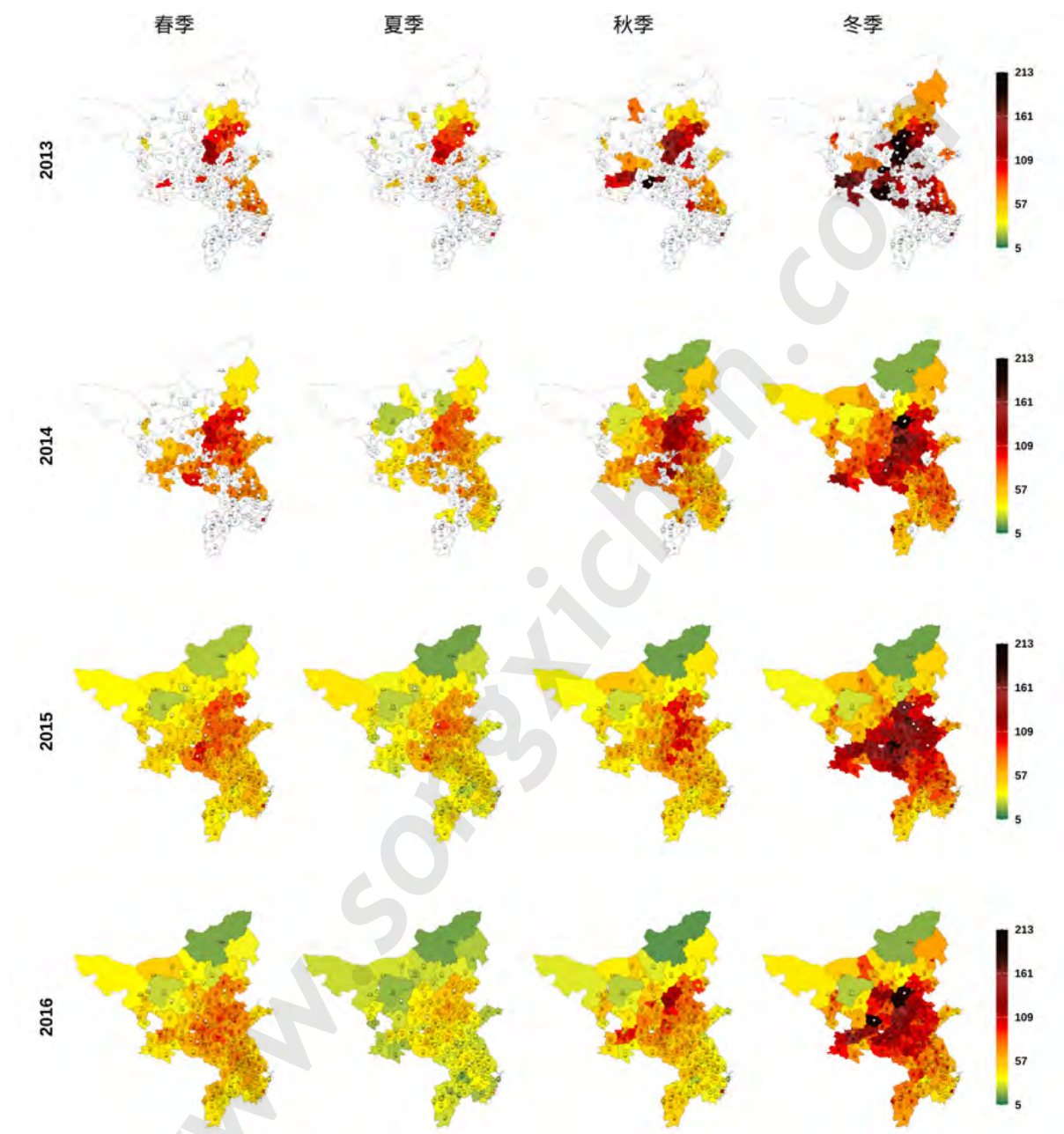


图 63: “3+130” 城市气象调整后 2013 年至 2016 年 $PM_{2.5}$ 季节平均浓度 (微克/立方米)

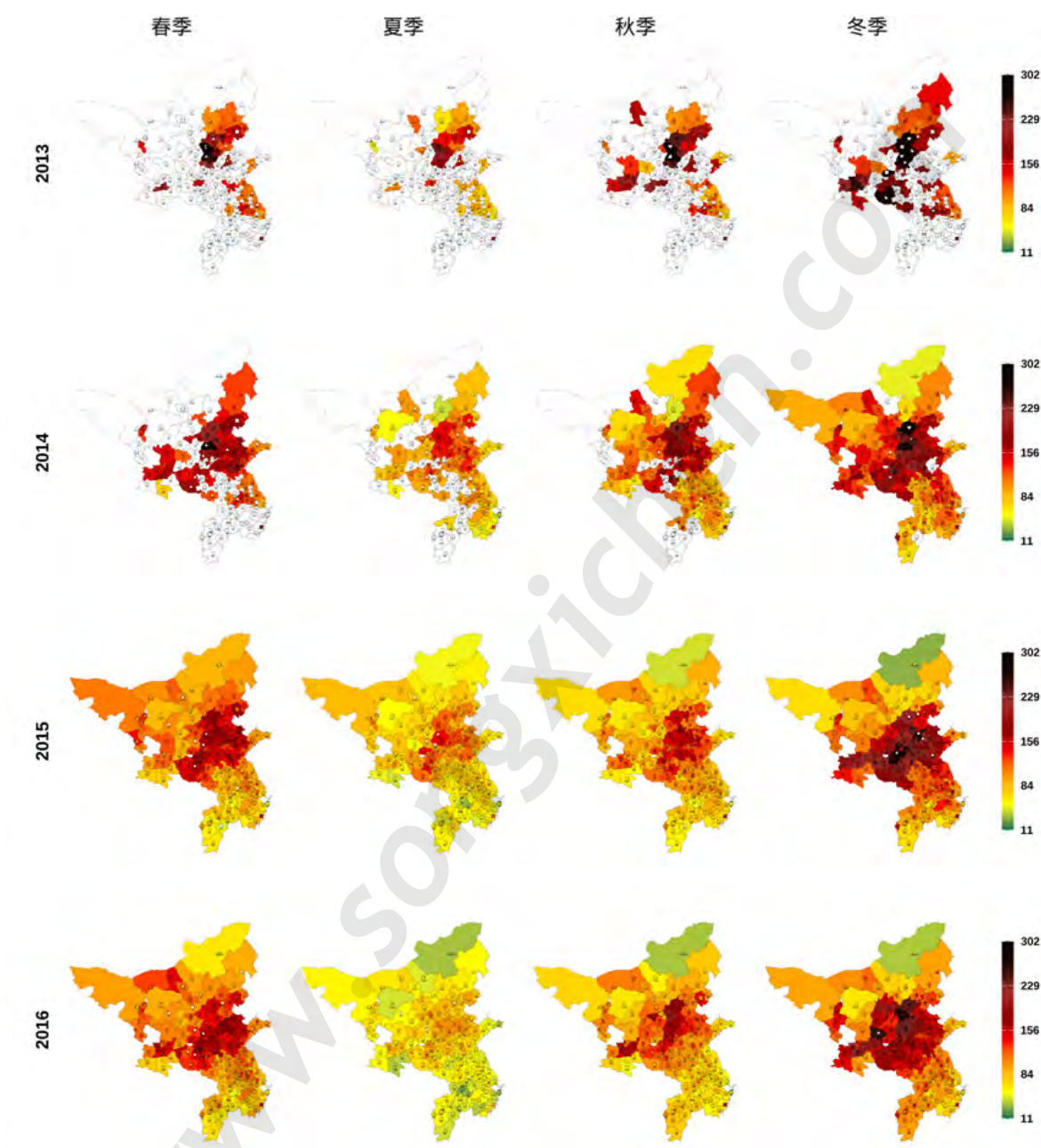


图 64: “3+130” 城市气象调整后 2013 年至 2016 年 PM₁₀ 季节平均浓度 (微克/立方米)

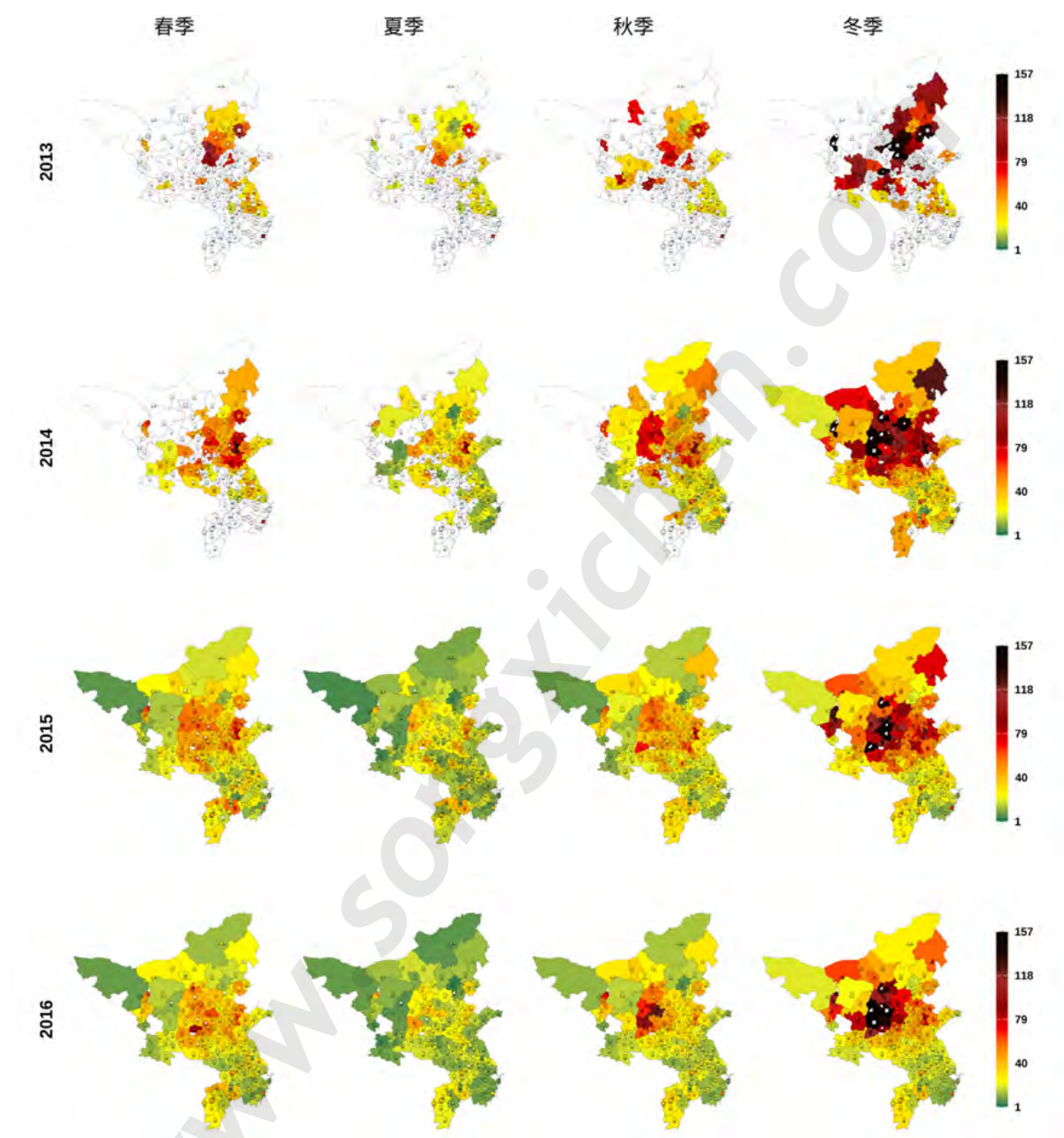


图 65: “3+130”城市气象调整后 2013 年至 2016 年 SO_2 季节平均浓度 (微克/立方米)

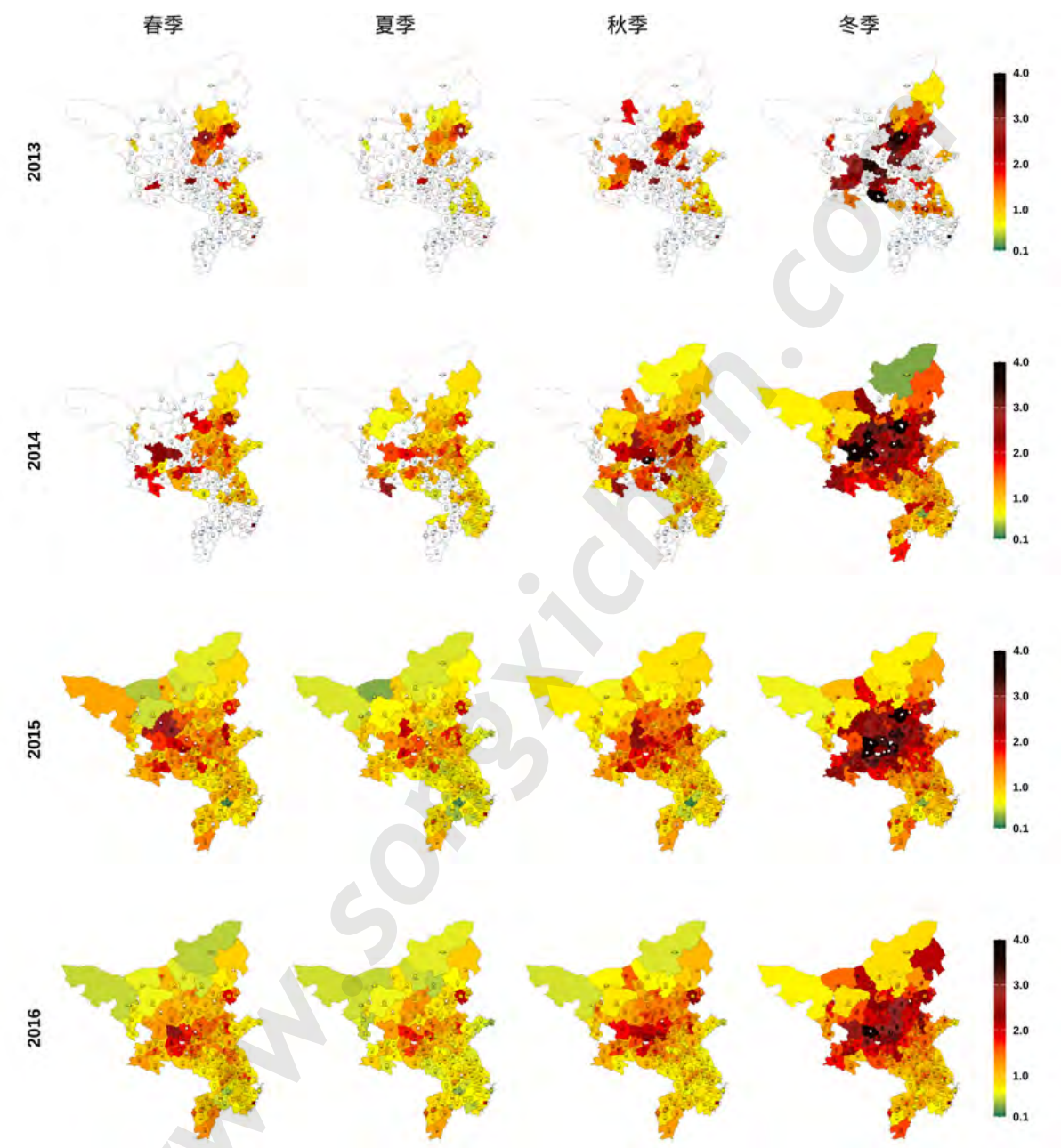


图 66: “3+130” 城市气象调整后 2013 年至 2016 年 CO 季节平均浓度 (毫克/立方米)

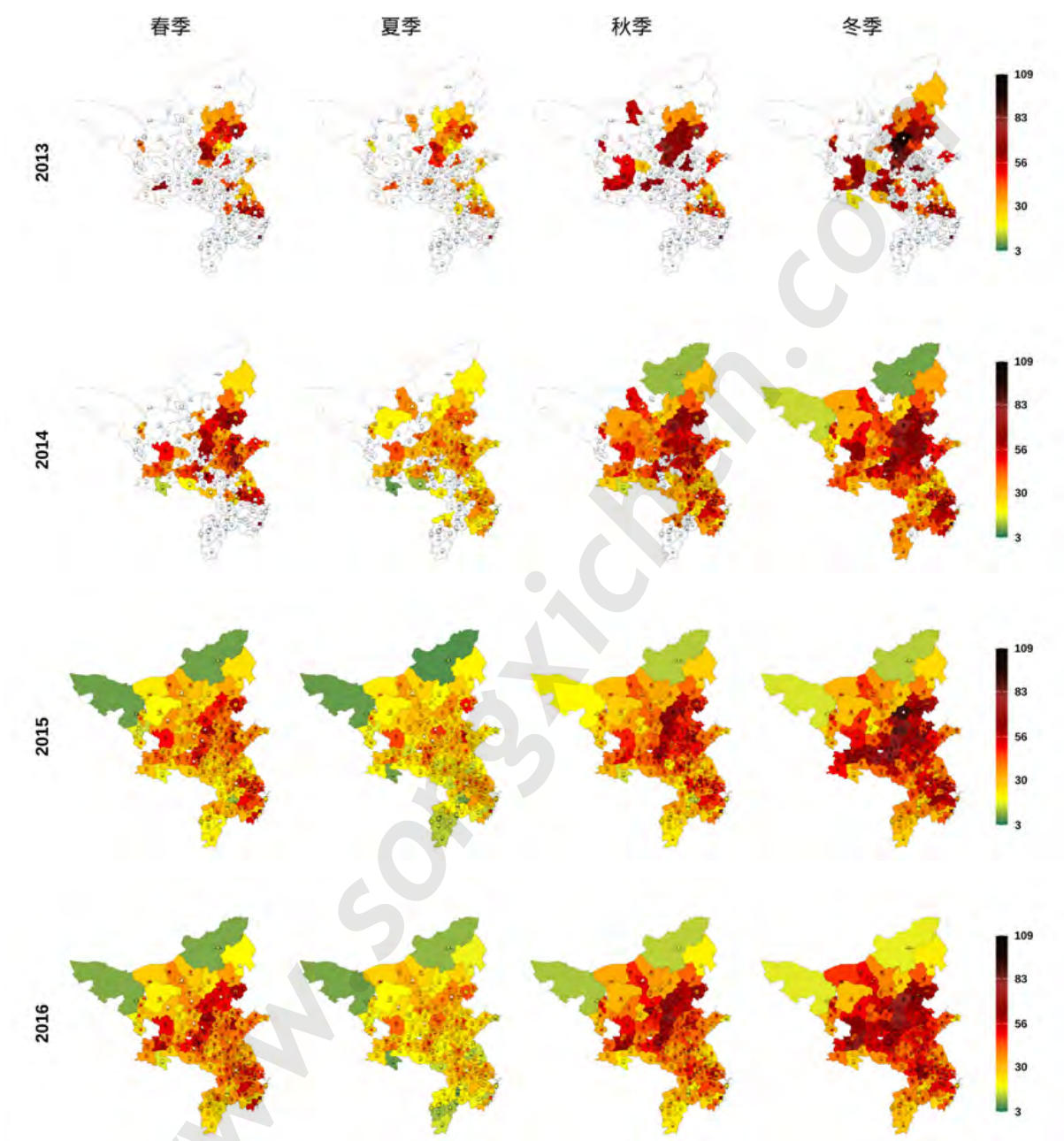


图 67: “3+130” 城市气象调整后 2013 年至 2016 年 NO_2 季节平均浓度 (微克/立方米)

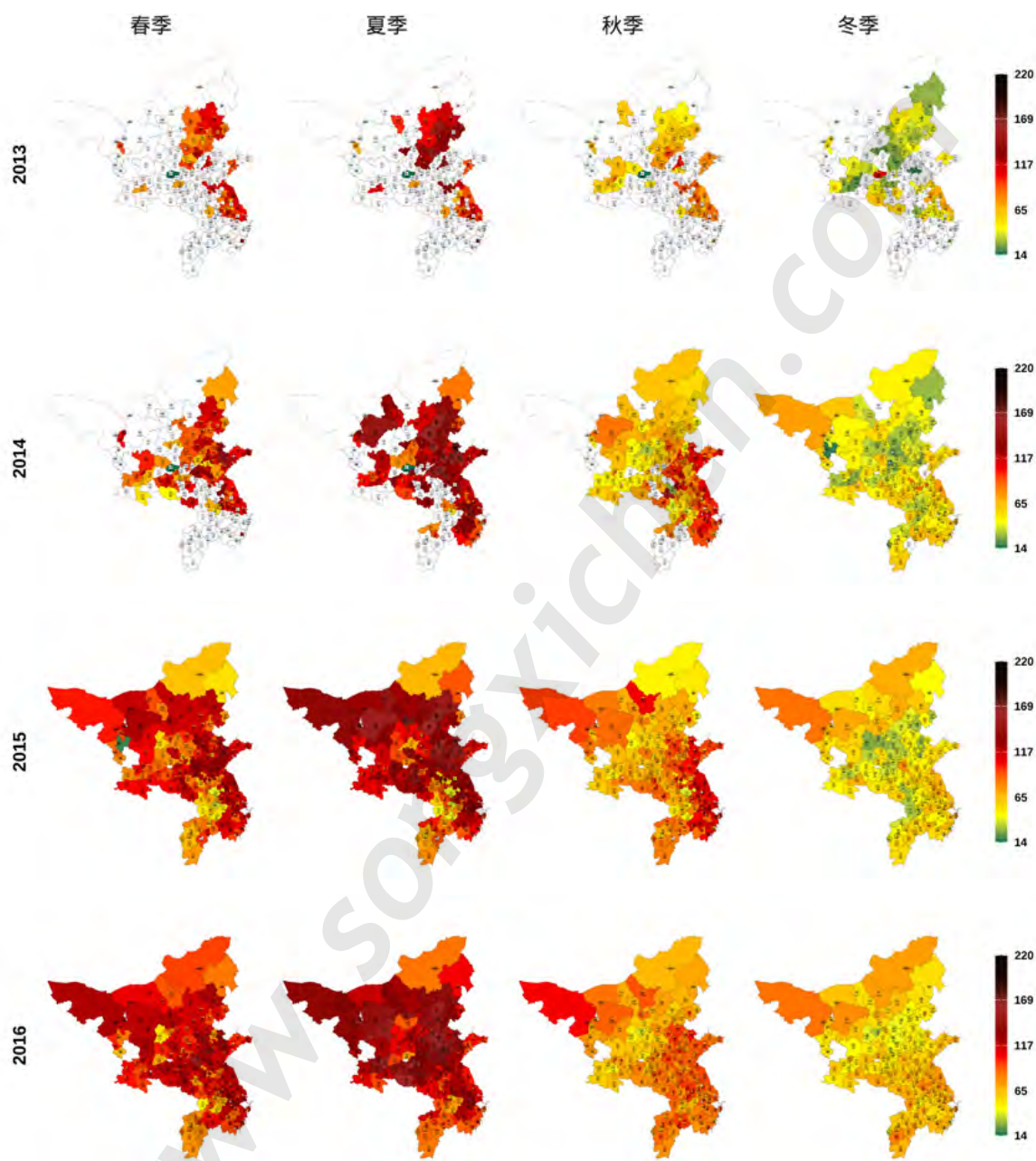


图 68: “3+130”城市气象调整后 2013 年至 2016 年八小时 O_3 季节平均浓度 (微克/立方米)

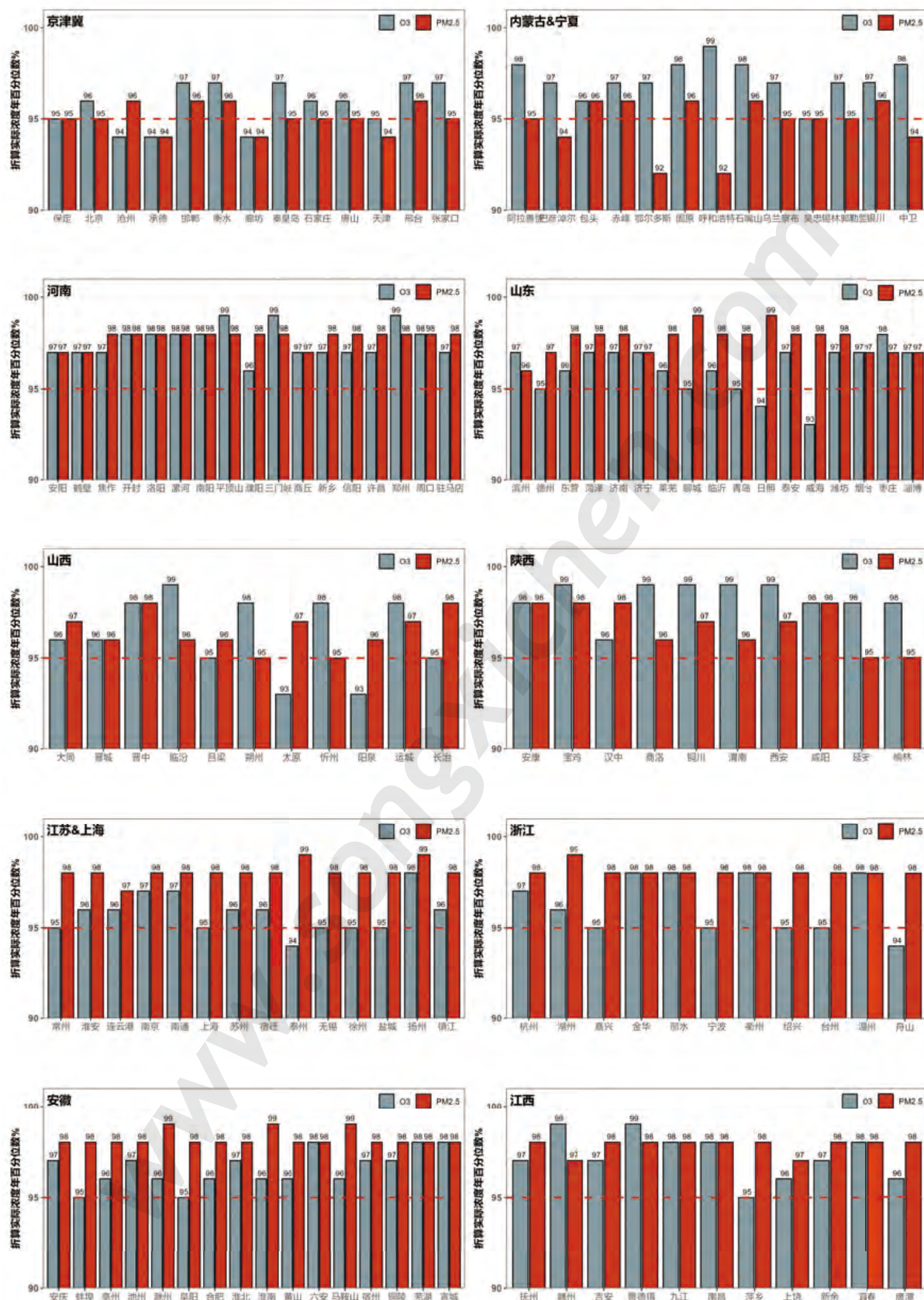


图 69: “3+130” 城市 2023 年 $PM_{2.5}$ 和 O_3 季节 90% 分位数浓度最大值对应实际浓度年百分位数 (条形图上方数字), 红色虚线标记 $PM_{2.5}$ 国家日均浓度标准限值评价所用 95% 百分位数

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] 中国国务院 (2013). 大气污染防治行动计划. 国发〔2013〕37号, 2013.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Xuan Liang, Tao Zou, Bin Guo, Shuo Li, Haozhe Zhang, Shuyi Zhang, Hui Huang, and Song Xi Chen. Assessing Beijing's pm2.5 pollution: severity, weather impact, apec and winter heating. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 471(2182):20150257, 2015.
- [17] Xuan Liang, Shuo Li, Shuyi Zhang, Hui Huang, and Song Xi Chen. Pm2.5 data reliability, consistency, and air quality assessment in five Chinese cities. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(17):10–220, 2016.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 张澍一, 陈松蹊, 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.
- [21] 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.
- [22] EPA, OAR, and US. Naaqs table | us epa. (<https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>). 2021.

课题组成员



李虹霖，北京大学数学科学学院博士后



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



陈涵玥，北京大学数学科学学院博士研究生



边明远，北京大学数学科学学院博士研究生



冯宇宁，北京大学前沿交叉学科研究院硕士研究生



杨巧诗，北京大学光华管理学院本科生



闫夏，北京大学前沿交叉学科研究院硕士研究生



彭阿晓，北京大学前沿交叉学科研究院硕士研究生



孙浩轩，北京大学前沿交叉学科研究院博士研究生



郭斌，西南财经大学统计研究中心、统计学院教授



陈松蹊，北京大学数学科学学院、光华管理学院、统计科学中心讲席教授，
课题负责人

致谢：本报告得到国家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。感谢中国环境监测总站，青悦开放环境数据中心和中国气象局气象数据中心为本次报告提供部分数据。感谢北京大学统计与经济计量同仁的长期鼓励和支持，感谢王文庆在数据库方面一如既往地协助，感谢陈力建立并维护空气质量平台，感谢牟修瑞在报告写作过程中提供的中文编辑服务。感谢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，光华管理学院对外关系团队王奂然、晏琴的协助。

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

Song Xi Chen Lab

www.songxichen.com

空气质量评估平台

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