# 空气质量评估报告（十）

## “3+110”城市 2013-2022 年区域污染状况评估

为了蓝天
让我们用数据解读污染

“3+110”城市 2022 年超标污染物词云




无污染物超标　1个污染物超标　2个污染物超标　3个污染物超标　4个污染物超标

北京大学统计科学中心，北京大学光华管理学院

大数据分析与应用技术国家工程实验室

二零二三年四月

# 前言

这是本环境统计团队完成的第十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九个年头。前九份报告分别发布于 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。

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四个城市）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。

本报告在上一份报告基础上增加江西省共 11 个城市 72 个站点，统称“3+110”城市。报告将基于上述九省三市“3+110”城市近 12 年的气象和污染数据，给出其六种常规空气污染物的变化趋势和最新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。

# 目录

**1 背景介绍 3**

**2 采用数据说明 3**

**3 六种常规空气污染物评估 6**

3.1 $PM_{2.5}$ . . . . . 6

3.2 $PM_{10}$ . . . . . 16

3.3 二氧化硫 . . . . . 24

3.4 一氧化碳 . . . . . 32

3.5 二氧化氮 . . . . . 39

3.6 八小时臭氧 . . . . . 46

**4 六种常规空气污染物综合评价 56**

**5 “人努力-天帮忙指数” 66**

**6 主要结论与建议 69**

6.1 三省市 $PM_{2.5}$ 反弹 . . . . . 69

6.2 五省市 $PM_{10}$ 反弹，$PM_{10-2.5}$ 仍是首要污染物 . . . . . 71

6.3 八省市二氧化硫首次出现反弹，一氧化碳持续改善 . . . . . 71

6.4 二氧化氮持续改善，两省出现小幅反弹 . . . . . 72

6.5 八省市春夏臭氧出现反弹 . . . . . 72

6.6 臭氧和 $PM_{10-2.5}$ 仍是主要污染物 . . . . . 74

6.7 极端污染 . . . . . 75

6.8 三个重点监测区域污染差异变小 . . . . . 77

6.9 提高空气质量“良”的标准 . . . . . 78

# 1 背景介绍

2013 年 9 月，国务院发布《大气污染防治行动计划》[10]（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》[11]。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》[12]，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% [13]。

“2+26”城市包括京津冀大部分区域、山东西部、山西东部、河南北部，地处太行山与泰沂山脉之间，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），在上述“2+26”城市、汾渭平原地区 11 城市外，补全河北、山东、河南、山西、陕西五省的其余城市，并将空气质量评估范围扩展至上海和安徽、江苏全部城市。去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。今年的空气质量报告（十）在此基础上增加了江西省 11 市。

自 2013 年 1 月 1 日起，我国建立大气污染监测网络，实时监测包括 $PM_{2.5}$ 在内的六种常规污染物（$PM_{2.5}$、$PM_{10}$、二氧化硫、二氧化氮、一氧化碳和臭氧）的浓度。基于数亿条数据，本报告将空气污染物浓度的变化可视化，针对其中存在的问题加以分析，并对其气象与人为因素的比例进行量化分析与解读。

# 2 采用数据说明

本报告所使用的污染物数据来自于生态环境部的国控站，共包含九省三市（即河北、河南、山东、山西、陕西、安徽、江苏、江西全部地级市，内蒙古四市，以及北京、天津、上海三市）全部“3+110”城市 770 个监测站点（不包含 71 个县级市国控站点和 24 个背景站点），具体可细分为“2+26”城市（用红色标记）、汾渭平原 11 市（用黄色标记）、苏皖鲁豫交界地区（用蓝色标记）、长三角地区（不含上述区域已有城市，用绿色标记）以及区域内其他城市（用灰色标记），研究区域涵盖全国超过 40% 的人口。按照省市口径统计如下：

- 北京市：11 个国控空气质量监测站（不包括定陵背景站）
- 天津市：位于中心城区的 15 个国控空气质量监测站
- 上海市：位于中心城区的 9 个国控空气质量监测站

北京大学统计科学中心

- 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、南阳、商丘、信阳、周口、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、三门峡风景区背景站）
- 山东省：17 个城市（济南、淄博、济宁、德州、聊城、滨州、菏泽、青岛、枣庄、东营、潍坊、泰安、日照、临沂、莱芜、烟台、威海）共 117 个国控空气质量监测站（莱芜 2018 年并入济南市，不包括青岛仰口背景站点，以及章丘、即墨、平度、黄岛、胶州、莱西、胶南、招远、莱州、蓬莱、寿光、乳山、文登和荣成的 39 个站点）
- 山西省：11 个城市（太原、阳泉、长治、晋城、晋中、运城、临汾、吕梁、大同、朔州、忻州）共 79 个国控空气质量监测站（不包含太原上兰、晋城白马寺背景站）
- 陕西省：10 个城市（西安、铜川、宝鸡、咸阳、渭南、延安、榆林、汉中、安康、商洛）共 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背景站）
- 安徽省：16 个城市（合肥、蚌埠、淮南、滁州、六安、马鞍山、芜湖、宣城、铜陵、池州、安庆、黄山、淮北、亳州、宿州、阜阳）共 93 个监测站（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对照站）
- 江苏省：13 个城市（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、海门和句容共 26 个站点）
- 江西省：11 个城市（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
- 内蒙古：4 个城市（呼和浩特、包头、鄂尔多斯、乌兰察布）共 28 个监测站

本报告选取的数据时段为 2013 年 3 月到 2023 年 2 月，其中河南、山东、山西、陕西、安徽、江苏和江西部分城市在 2013 年并未开始监测，这些城市从开始监测的时刻算起。本报告使用的“年”并非自然年，而是一年的 3 月份到下一年 2 月份的“季节年”，涵盖一个完整的四季，这同我们之前发布的第三至第九份报告一致。我们的空气质量评估以季节为基本时间单元，其中春季是 3 月到 5 月，夏季是 6 月到 8 月，秋季是 9 月到 11 月，冬季是 12 月到次年 2 月。本报告将分析六种空气常规污染物：$PM_{2.5}$、$PM_{10}$、二氧化硫（$SO_2$）、一氧化碳（CO）、二氧化氮（$NO_2$）和臭氧（$O_3$）。

由于气象条件对观测污染物浓度的影响很大，本报告沿用前九份报告的统计学方法，对污染物浓度进行气象调整，剔除气象因素的影响，得到可比的污染指标 [14–18]。具体来说，我们基于 2011 年 3 月到

北京大学统计科学中心

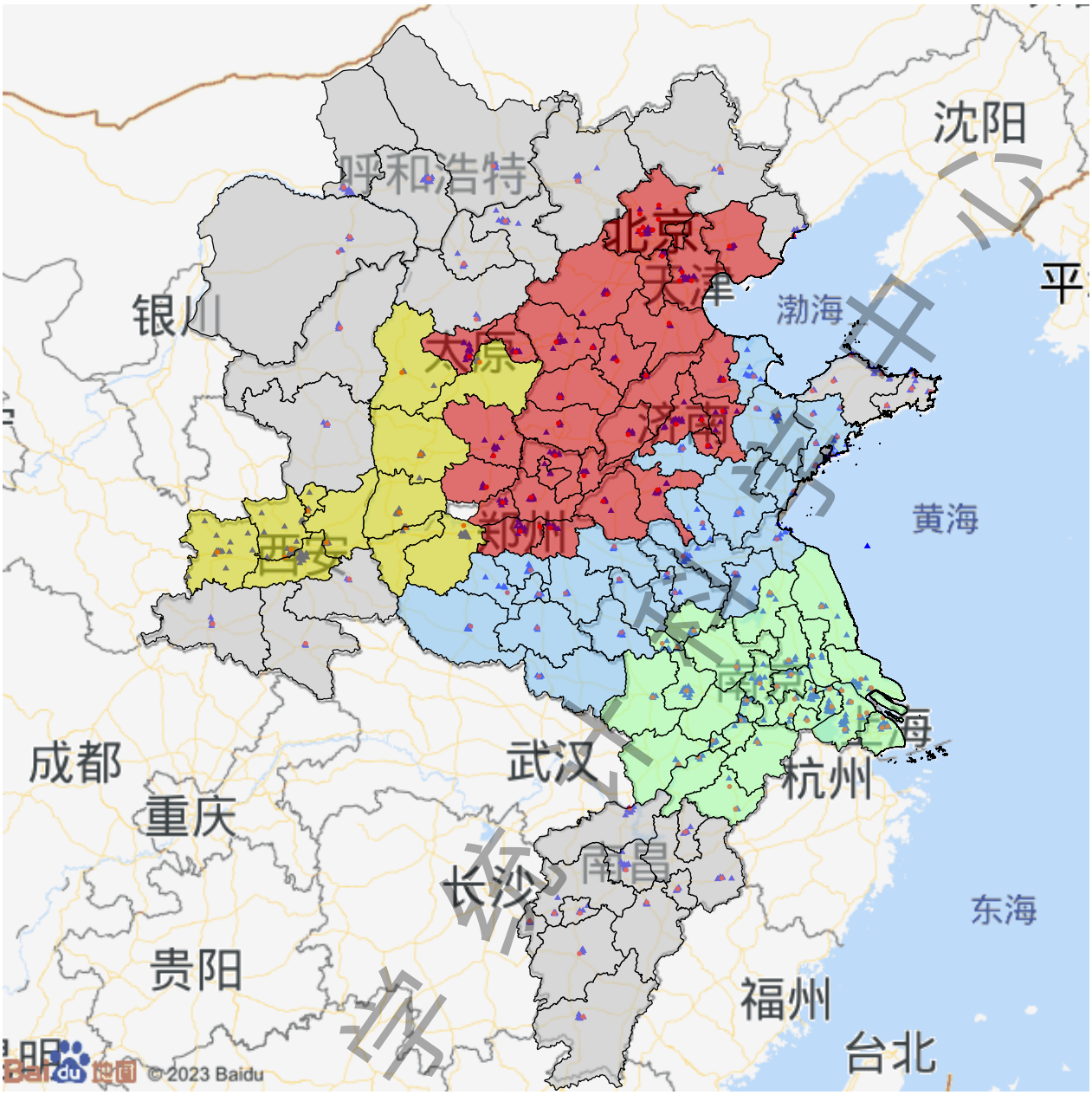



图 1: “3+110”城市区划及其站点分布（△代表空气质量监测站点，●代表气象站点）（图中红色区域为京津冀周边地“2+26”城市，黄色区域为汾渭平原 11 市，蓝色区域为苏皖鲁豫交界地区，绿色区域为长三角地区，灰色区域为其他城市）

2021 年 2 月累计十年的小时气象数据，对“3+110”城市分别构造基准气象条件。我们之所以采用这十年的气象数据，是为了构造更稳定的基准气象条件，同时确保不同年间相似气象条件占比不会过少。我们在此基准气象条件下计算各季度污染物的浓度，其中河北、河南、山东、山西、陕西、安徽、江苏、江西、内蒙古九省 110 个地级市的气象数据主要来源于对应城市的气象站点，县级市和对照站匹配至距离最近的站点；北京市的气象数据来源于朝阳、海淀、丰台、昌平、顺义、怀柔和石景山共 7 个气象站点；天津市中心城区的气象数据来源于西青、北辰和东丽共 3 个气象站点；上海市的气象数据来源于上海、浦

东和宝山共 3 个气象站点。

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。本报告使用了一种沙尘过程检测和追踪程序，基于“3+110”城市及外围的甘肃、宁夏、辽宁和内蒙其余城市地面站点的 $PM_{10}$ 浓度小时数据，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。具体可见 [19]。

图 1给出上述 865 个污染物监测站点（包括地级市站点 770 个、县级市站点 71 个和背景站 24 个，红色圆点）和 140 个气象站点（蓝色三角形）的位置。总体可以看出，污染物监测站点与气象站点地理位置比较相近，空间匹配度高。

# 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，这就需要提高气象因素在不同年的可比程度。本报告沿用前九份报告所使用的统计学气象调整方法，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 2011-2020 年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。在此基础上，我们将计算各个城市在其可比气象条件下各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，感兴趣的读者可以参看本团队发表的论文 [14–16, 20]。

## 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 微米的粒子可以直接到达肺泡内，并进入血液通往全身。大量流行病学研究发现颗粒物浓度和发病率及死亡率有明显联系，尤其是细粒子与心肺疾病的相关性更为明显。我国目前的 $PM_{2.5}$ 平均浓度标准如下表 1所示。

表 1: 我国目前 $PM_{2.5}$ 平均浓度标准

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

图 2-3、图 4、图 5和图 6分别展示了“3+110”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、一年和七年累计降幅、年度平均浓度及排名。图 7-8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**

北京大学统计科学中心

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。

**2015 年春季“3+110”城市 $PM_{2.5}$ 浓度均值（标准误差）为 58.9（1.6）微克/立方米，2021 年已下降至 38.5（0.7）微克/立方米，2022 年无明显的持续下降，为 38.3（0.7）微克/立方米。相比 2021 年，2022 年春季“3+110”城市中有 56 个城市的 $PM_{2.5}$ 浓度下降，但有 57 个城市浓度上升。**2022 年春季太原平均浓度最高，为 54.8 微克/立方米；赣州最低，为 21.5 微克/立方米。与 2021 年相比，2022 年春季“3+110”城市整体浓度下降不显著，年际变化均值为 0.3%，其中晋中增幅最大，为 24.0%；张家口降幅最高达 23.6%，仅有两个城市降幅超过 20%，18 个城市降幅超过 10%。57 个反弹城市在河南、安徽、江苏分布最多，分别有 12、10、7 个，此外，山东、山西、陕西、河北、江西、内蒙古分别有 6、6、5、5、4、2 个。

**2015 年夏季“3+110”城市 $PM_{2.5}$ 浓度均值（标准误差）为 47.8（1.4）微克/立方米，2021 年下降至 25.6（0.6）微克/立方米，2022 年继续下降至 22.5（0.5）微克/立方米。相比 2021 年，2022 年夏季“3+110”城市中有 98 个城市的 $PM_{2.5}$ 浓度下降，有 15 个城市浓度上升。**2022 年夏季晋中平均浓度最高，达 33.7 微克/立方米；黄山最低，为 8.5 微克/立方米。相比 2021 年，2022 年夏季“3+110”城市一年降幅的平均值为 11.4%，其中 4 个城市（鄂尔多斯、淮南、临汾、张家口）降幅超过 30%，24 个城市降幅超过 20%。

**2015 年秋季“3+110”城市 $PM_{2.5}$ 浓度均值（标准误差）为 59.6（1.7）微克/立方米，2021 年下降至 43.5（1.3）微克/立方米，2022 年继续下降至 38.4（1.1）微克/立方米。相比 2021 年，2022 年秋季“3+110”城市中有 89 个城市的 $PM_{2.5}$ 浓度下降，有 24 个城市浓度上升。**2022 年秋季渭南平均浓度最高，达 71.1 微克/立方米，黄山最低，为 16.8 微克/立方米，仅有渭南、濮阳这两个城市平均浓度超过 60 微克/立方米。相比 2021 年，2022 年秋季“3+110”城市的一年降幅平均值为 10.5%，共有 28 个城市降幅超过 20%，其中连云港改善最大，降幅达 39.9%；6 个城市降幅超过 30%，其中 4 个城市（青岛、济宁、日照、泰安）位于山东，其余两个是连云港和淮北。此外，有 3 个城市增幅超过 20%，其中安康增幅最高，为 28.8%。

**2015 年冬季“3+110”城市 $PM_{2.5}$ 浓度均值（标准误差）为 99.6（3.3）微克/立方米，2021 年为 59.5（1.5）微克/立方米，2022 年反弹至 63.8（1.9）微克/立方米。相比 2021 年，2022 年冬季“3+110”城市中仅有 39 个城市的 $PM_{2.5}$ 浓度下降，有 74 个城市浓度上升。**2022 年冬季渭南平均浓度最高，达 112.5 微克/立方米，鄂尔多斯最低，为 25.9 微克/立方米，7 个城市冬季 $PM_{2.5}$ 浓度均值低于 35 微克/立方米，仍有 28 个城市平均浓度超过 80 微克/立方米。相比 2021 年，2022 年冬季“3+110”城市一年增幅的平均值达 6.4%，有 6 个城市增幅超过 30%，其中滨州的增幅最高，为 34.4%，有 21 个城市增幅超过 20%，其中河南最多有 8 个城市，山西、陕西、山东、河北分别有 5、3、2、2 个以及北京市。此外，鄂尔多斯的降幅达到 29.1%，是唯一降幅超过 20% 的城市。

- **$PM_{2.5}$ 年度评估：年度变化趋势与城市相对排名**

**根据图 6，2015 年“3+110”城市的 $PM_{2.5}$ 浓度均值（标准误差）为 66.5（1.8）微克/立方米，2021 年下降至 41.8（0.9）微克/立方米，2022 年进一步下降至 40.7（1.0）微克/立方米。2022 年，**

北京大学统计科学中心

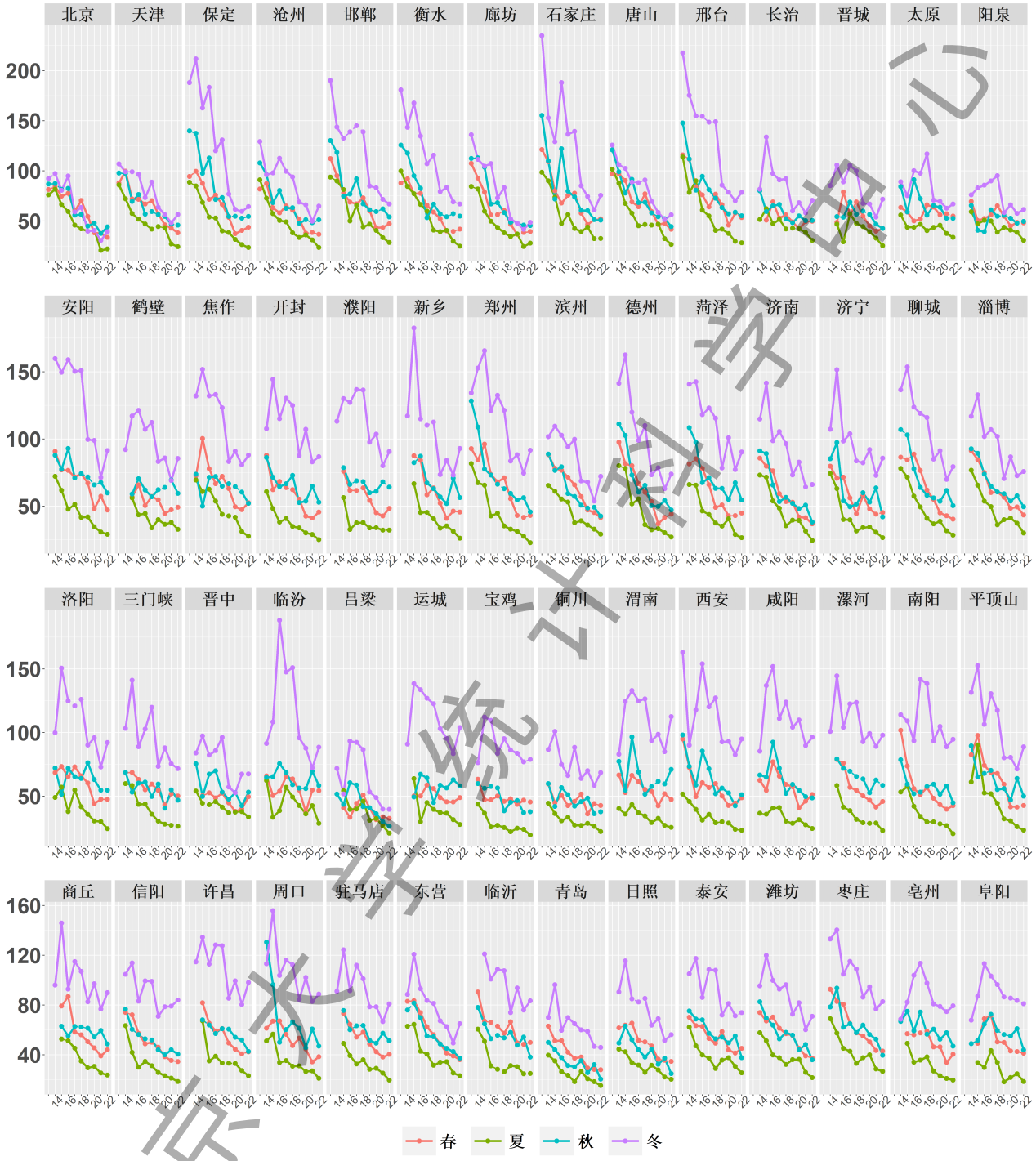



图 2: “3+110”城市气象调整后 2013 年至 2022 年 $PM_{2.5}$ 季节平均浓度（微克/立方米）变化序列图，图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

北京大学统计科学中心

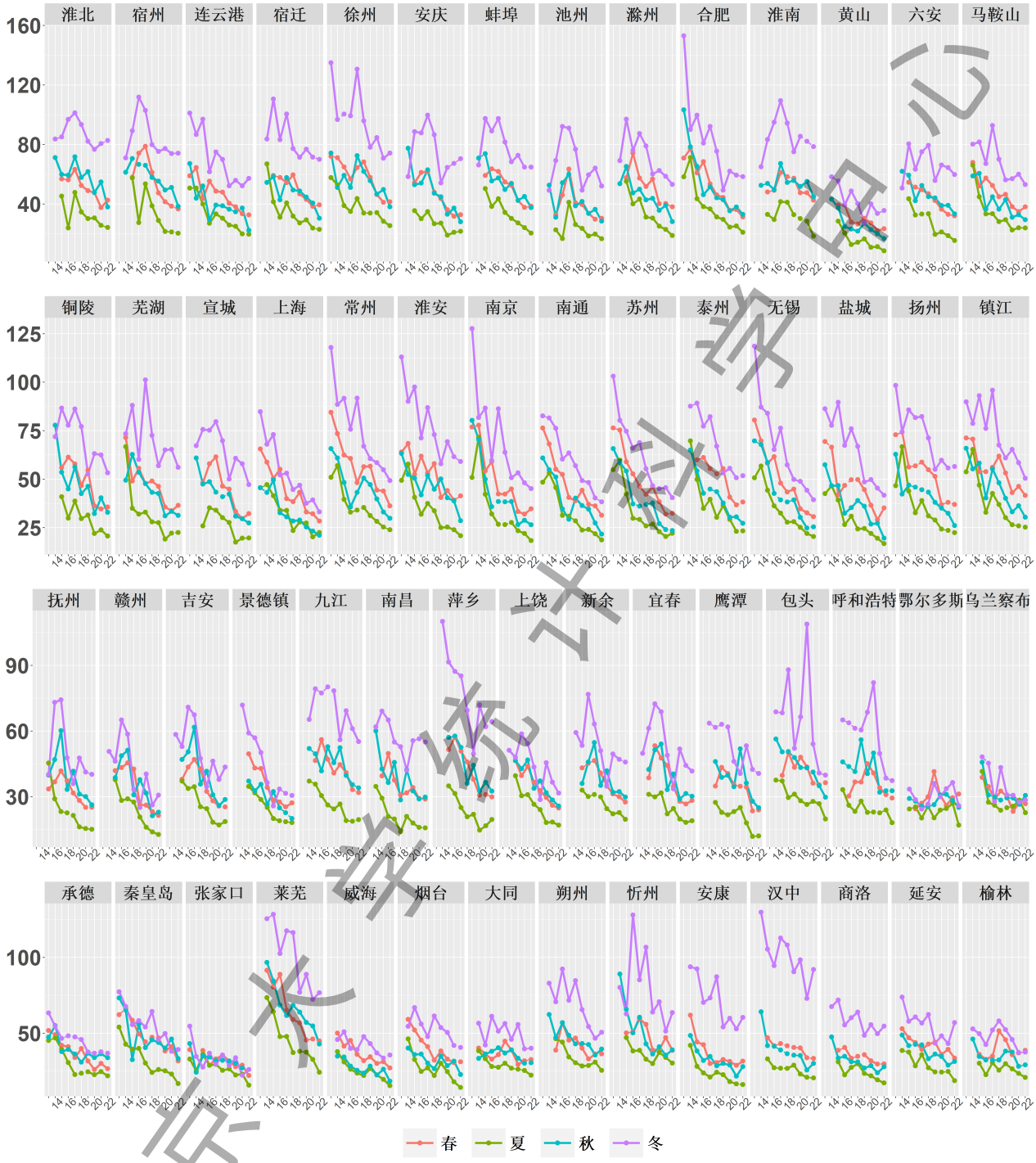
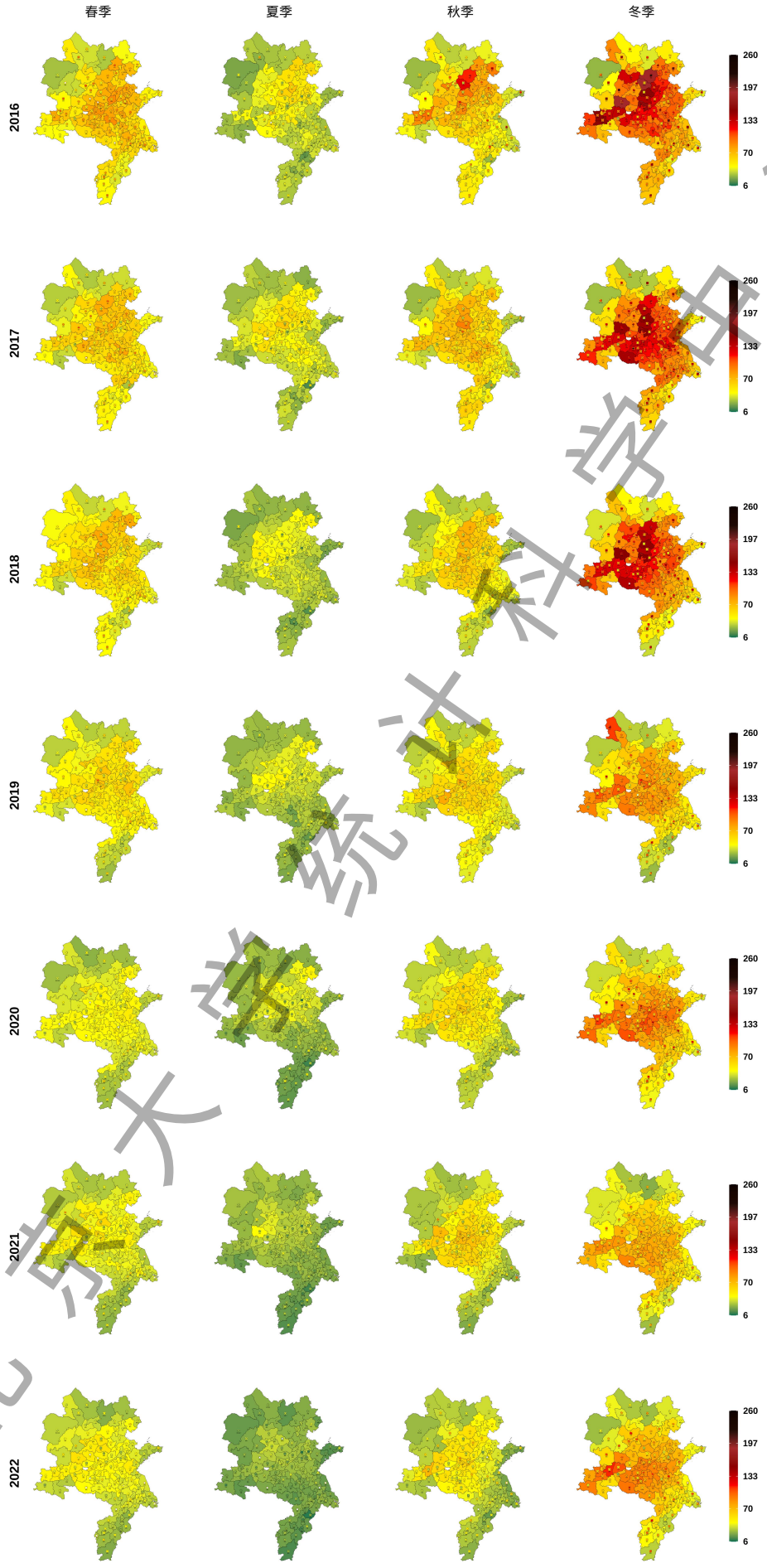



图 3: “3+110”城市气象调整后 2013 年至 2022 年 $PM_{2.5}$ 季节平均浓度（微克/立方米）变化序列图，图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

北京大学统计科学中心




北京大学统计科学中心

图 4: “3+110”城市气象调整后 2016 年至 2022 年 $PM_{2.5}$ 季节平均浓度（微克/立方米）




图 5: “3+110”城市气象调整后 $PM_{2.5}$ 浓度过去一年（蓝色）、七年（红色）的累计降幅
蓝色和红色竖线分别代表“3+110”城市的一年和七年平均降幅

北京大学统计学中心

| 城市 | 2013年 | 排名 | 2014年 | 排名 | 2015年 | 排名 | 2016年 | 排名 | 2017年 | 排名 | 2018年 | 排名 | 2019年 | 排名 | 2020年 | 排名 | 2021年 | 排名 | 2022年 | 排名 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 渭南 | NA | | 66.8 | (46) | 67 | (50) | 84.9 | (10) | 73.1 | (18) | 66.9 | (25) | 58.6 | (16) | 58.8 | (7) | 55.9 | (3) | 64.1 | (1) |
| 运城 | NA | | NA | | 75.5 | (36) | 70.3 | (34) | 73.8 | (17) | 65.8 | (29) | 61.9 | (8) | 58.6 | (9) | 55.8 | (5) | 59.7 | (2) |
| 濮阳 | NA | | NA | | 85.3 | (24) | 71.9 | (30) | 76.2 | (13) | 76.5 | (7) | 61.4 | (9) | 60.9 | (3) | 55.8 | (6) | 58.8 | (3) |
| 临汾 | NA | | 71.1 | (36) | 64.4 | (54) | 89.1 | (7) | 84.7 | (5) | 80.8 | (5) | 62.5 | (6) | 54.3 | (28) | 59.9 | (1) | 57.5 | (4) |
| 安阳 | NA | | 102.7 | (8) | 91.5 | (16) | 94 | (4) | 86.1 | (4) | 85.2 | (1) | 70.1 | (1) | 61.8 | (1) | 56.7 | (2) | 56.8 | (5) |
| 鹤壁 | NA | | NA | | 72.3 | (41) | 75.3 | (24) | 66 | (42) | 65.1 | (33) | 60 | (13) | 57.6 | (13) | 55.9 | (4) | 56.7 | (6) |
| 漯河 | NA | | NA | | 90.3 | (18) | 73.4 | (28) | 71.9 | (23) | 68.9 | (21) | 59 | (15) | 56.9 | (19) | 55.6 | (7) | 56.3 | (7) |
| 新乡 | NA | | NA | | 104.8 | (2) | 82.8 | (13) | 70.3 | (33) | 69.9 | (18) | 54 | (43) | 53 | (34) | 55.4 | (8) | 55.2 | (8) |
| 咸阳 | NA | | 62.8 | (50) | 73.1 | (40) | 90.5 | (5) | 72.4 | (21) | 66.4 | (26) | 62.4 | (7) | 59.3 | (6) | 53.3 | (16) | 55.2 | (9) |
| 焦作 | NA | | 86.9 | (23) | 90.7 | (17) | 86 | (9) | 81.4 | (6) | 76 | (8) | 63.9 | (4) | 61.7 | (2) | 54.8 | (9) | 55 | (10) |
| 洛阳 | NA | | 72.4 | (35) | 83.1 | (27) | 75 | (25) | 78.5 | (9) | 74.4 | (9) | 65.7 | (2) | 58.5 | (10) | 51.3 | (24) | 54.7 | (11) |
| 西安 | 102 | (10) | 70.5 | (37) | 66.5 | (51) | 82.9 | (12) | 71 | (27) | 67 | (24) | 57.3 | (25) | 54.3 | (27) | 48.4 | (37) | 54.5 | (12) |
| 菏泽 | NA | | 99.2 | (11) | 97.7 | (9) | 77.5 | (18) | 76 | (14) | 66.3 | (27) | 56.9 | (29) | 59.8 | (5) | 54.1 | (13) | 54 | (13) |
| 邢台 | 148.7 | (2) | 119.3 | (2) | 102.4 | (6) | 96.4 | (3) | 87.2 | (2) | 84.7 | (2) | 64.3 | (3) | 54.8 | (25) | 54.1 | (12) | 53.8 | (14) |
| 石家庄 | 152.4 | (1) | 115.5 | (3) | 88.7 | (20) | 106.3 | (1) | 87.1 | (3) | 83.4 | (3) | 60.7 | (12) | 56.3 | (22) | 49 | (35) | 52.8 | (15) |
| 开封 | NA | | 85.6 | (26) | 81.5 | (28) | 71.5 | (32) | 75.4 | (15) | 73.7 | (10) | 57.3 | (24) | 58.4 | (11) | 54.5 | (10) | 52.6 | (16) |
| 太原 | NA | | 73.2 | (34) | 59.2 | (67) | 71.3 | (33) | 67.1 | (39) | 69.8 | (19) | 60.9 | (10) | 58.8 | (8) | 52.5 | (20) | 52 | (17) |
| 许昌 | NA | | NA | | 88 | (21) | 69.3 | (39) | 70.9 | (28) | 70.8 | (13) | 57.2 | (26) | 57.8 | (12) | 50.1 | (30) | 51.6 | (18) |
| 商丘 | NA | | NA | | 85.2 | (25) | 71.6 | (31) | 70.4 | (30) | 65.2 | (30) | 56 | (33) | 57 | (18) | 50.2 | (29) | 51.6 | (19) |
| 平顶山 | NA | | 91.2 | (18) | 101.5 | (7) | 75.3 | (23) | 80.4 | (7) | 71.3 | (12) | 56.9 | (28) | 49.9 | (45) | 50.7 | (27) | 51.2 | (20) |
| 晋中 | NA | | NA | | 60.5 | (62) | 61.4 | (53) | 62.6 | (53) | 60.8 | (45) | 46.7 | (64) | 45.3 | (59) | 47 | (41) | 51 | (21) |
| 郑州 | 109.3 | (8) | 103.4 | (7) | 101.2 | (8) | 77.6 | (17) | 77.9 | (10) | 72.7 | (11) | 57.8 | (20) | 54.3 | (29) | 50.3 | (31) | 50.8 | (22) |
| 南阳 | NA | | 87 | (22) | 75 | (37) | 60.9 | (54) | 70.1 | (34) | 70.7 | (15) | 57.7 | (21) | 57 | (17) | 53.4 | (14) | 50.7 | (23) |
| 长治 | NA | | NA | | 76.6 | (33) | 69.7 | (38) | 65.5 | (45) | 60.6 | (46) | 50 | (54) | 51.9 | (37) | 49.1 | (34) | 50.4 | (24) |
| 济宁 | NA | | 86.6 | (24) | 95.7 | (10) | 66 | (43) | 62.3 | (55) | 52.8 | (62) | 58.5 | (17) | 56.9 | (20) | 52.7 | (18) | 49.8 | (25) |
| 淄博 | NA | | 94.4 | (14) | 93.1 | (14) | 76.1 | (21) | 70.4 | (29) | 64.8 | (35) | 56.5 | (31) | 57.4 | (14) | 54.2 | (11) | 49.6 | (26) |
| 聊城 | NA | | 102 | (9) | 103.2 | (5) | 86.9 | (8) | 77.2 | (12) | 69.2 | (20) | 58.2 | (18) | 57.1 | (16) | 51.5 | (23) | 49.6 | (27) |
| 临沂 | NA | | NA | | 76 | (34) | 62.8 | (49) | 64 | (50) | 61.3 | (43) | 57.5 | (23) | 55.4 | (23) | 50.9 | (26) | 49.2 | (28) |
| 邯郸 | 131.6 | (3) | 111.8 | (4) | 91.7 | (15) | 83.6 | (11) | 92.4 | (1) | 80.8 | (4) | 63.2 | (5) | 56.6 | (21) | 52.6 | (19) | 49.1 | (29) |
| 周口 | NA | | 89.1 | (19) | 94 | (12) | 63.7 | (47) | 67.1 | (38) | 64.3 | (38) | 57.6 | (22) | 54.8 | (24) | 51.3 | (25) | 48.8 | (30) |
| 三门峡 | NA | | 75.1 | (33) | 80.4 | (31) | 64 | (45) | 65.7 | (43) | 66.3 | (28) | 54.5 | (41) | 50.1 | (44) | 52.4 | (21) | 48.8 | (31) |
| 驻马店 | NA | | NA | | 80.6 | (30) | 63.9 | (46) | 65.6 | (44) | 64.8 | (36) | 51.8 | (49) | 49.9 | (46) | 46.9 | (42) | 48.1 | (32) |
| 枣庄 | NA | | 93.3 | (15) | 93.6 | (13) | 73.2 | (29) | 72 | (22) | 64.4 | (37) | 60.8 | (11) | 60.4 | (4) | 50.4 | (28) | 48 | (33) |
| 德州 | NA | | 107.6 | (6) | 106.2 | (1) | 81.2 | (14) | 70.3 | (31) | 68 | (23) | 52.4 | (48) | 49.6 | (49) | 47.2 | (40) | 48 | (34) |
| 阳泉 | NA | | 67.6 | (43) | 55.3 | (81) | 57 | (63) | 64.3 | (48) | 63.4 | (40) | 53.1 | (46) | 51.2 | (40) | 48.2 | (38) | 47.4 | (35) |
| 莱芜 | NA | | 96.8 | (13) | 89.4 | (19) | 76.9 | (19) | 73.1 | (19) | 70.3 | (17) | 59 | (14) | 57.3 | (15) | 51.5 | (22) | 47.2 | (36) |
| 衡水 | 123.6 | (5) | 109.4 | (5) | 104.3 | (3) | 90.3 | (6) | 71.5 | (25) | 70.5 | (16) | 57 | (27) | 54.6 | (26) | 48.9 | (36) | 47.1 | (37) |
| 淮北 | NA | | NA | | 61.8 | (59) | 59.1 | (59) | 71 | (26) | 59.6 | (52) | 55.8 | (35) | 50.7 | (41) | 49.7 | (33) | 46.9 | (38) |
| 亳州 | NA | | NA | | 65.9 | (53) | 63.4 | (48) | 70.3 | (32) | 62.9 | (41) | 53.7 | (45) | 50.3 | (42) | 46.9 | (44) | 46.6 | (39) |
| 保定 | 127.8 | (4) | 133.4 | (1) | 104 | (4) | 105.4 | (2) | 80.1 | (8) | 77.6 | (6) | 55.8 | (34) | 46.3 | (55) | 44.8 | (50) | 46.5 | (40) |
| 滨州 | NA | | 86 | (25) | 81.3 | (29) | 78.5 | (16) | 69.5 | (36) | 65.1 | (32) | 53.9 | (44) | 49.9 | (47) | 45.2 | (48) | 46.3 | (41) |
| 阜阳 | NA | | NA | | 55.5 | (80) | 69.2 | (40) | 72.8 | (20) | 60.1 | (48) | 52.8 | (47) | 51.5 | (39) | 53 | (17) | 46.2 | (42) |
| 淮南 | NA | | NA | | 54.6 | (82) | 55.9 | (66) | 69.9 | (35) | 62.1 | (42) | 56.3 | (38) | 53.8 | (30) | 53.4 | (15) | 46.2 | (43) |
| 泰安 | NA | | 78.2 | (29) | 74.2 | (39) | 64.2 | (44) | 64.1 | (49) | 59.8 | (50) | 55.2 | (39) | 53.1 | (31) | 49.7 | (32) | 45.6 | (44) |
| 晋城 | NA | | NA | | 63.9 | (55) | 62.7 | (50) | 71.9 | (24) | 68.3 | (22) | 56.7 | (30) | 51.9 | (36) | 43.3 | (53) | 45.5 | (45) |
| 宝鸡 | NA | | 60.8 | (55) | 63.1 | (57) | 60.1 | (56) | 54.4 | (74) | 51.3 | (66) | 50.4 | (53) | 49.7 | (48) | 46.2 | (46) | 45.4 | (46) |
| 徐州 | 84.8 | (13) | 68 | (42) | 65.9 | (52) | 60.6 | (55) | 77.8 | (11) | 65 | (34) | 56.4 | (32) | 53 | (32) | 47.5 | (39) | 44.8 | (47) |
| 信阳 | NA | | 79.7 | (27) | 72.1 | (42) | 56.7 | (65) | 59 | (63) | 58.1 | (55) | 46.7 | (63) | 45.1 | (60) | 45 | (49) | 44.5 | (48) |
| 沧州 | 102.5 | (9) | 88.2 | (20) | 71.7 | (43) | 75.4 | (22) | 69 | (37) | 64.1 | (39) | 50.5 | (52) | 47.9 | (52) | 41.8 | (56) | 44.1 | (49) |
| 汉中 | NA | | NA | | 56.8 | (76) | 51.2 | (80) | 55.5 | (71) | 53.3 | (61) | 48.9 | (58) | 49.3 | (50) | 38.4 | (69) | 44 | (50) |
| 忻州 | NA | | NA | | 56.5 | (78) | 66.8 | (42) | 61 | (58) | 59.6 | (51) | 42.3 | (77) | 47.1 | (54) | 42 | (55) | 43 | (51) |
| 铜川 | NA | | 62.7 | (51) | 56.1 | (79) | 53.2 | (73) | 48.4 | (88) | 50.9 | (70) | 47.1 | (61) | 45.8 | (58) | 41.3 | (58) | 42.8 | (52) |
| 宿州 | NA | | NA | | 68.8 | (47) | 70.1 | (35) | 75.3 | (16) | 59.5 | (53) | 51.8 | (50) | 47.5 | (53) | 46.2 | (45) | 42.4 | (53) |
| 唐山 | 111.3 | (6) | 97.5 | (12) | 84.5 | (26) | 76.8 | (20) | 66.5 | (41) | 70.8 | (14) | 58.2 | (19) | 51.5 | (38) | 45.9 | (47) | 42.2 | (54) |
| 潍坊 | NA | | 77.4 | (31) | 77 | (32) | 68.5 | (41) | 61.2 | (56) | 60.9 | (44) | 55.1 | (40) | 51.9 | (35) | 43.4 | (52) | 41.5 | (55) |
| 济南 | NA | | 91.2 | (17) | 95.5 | (11) | 73.6 | (27) | 66.6 | (40) | 60.4 | (47) | 54.4 | (42) | 53 | (33) | 46.9 | (43) | 41.4 | (56) |
| 天津 | 94.7 | (12) | 92.1 | (16) | 74.4 | (38) | 74.1 | (26) | 61 | (57) | 63.1 | (31) | 55.4 | (37) | 50.1 | (43) | 41.2 | (59) | 41.2 | (57) |
| 宿迁 | NA | | NA | | 67.4 | (48) | 53.8 | (71) | 63.4 | (52) | 54.5 | (58) | 48.6 | (59) | 48.5 | (51) | 43.6 | (51) | 40.8 | (58) |
| 东营 | NA | | 77.7 | (30) | 87.6 | (22) | 69.9 | (37) | 60.5 | (59) | 55.9 | (57) | 49.7 | (55) | 45.9 | (57) | 39.2 | (66) | 40.5 | (59) |
| 蚌埠 | NA | | NA | | 70.2 | (45) | 61.7 | (52) | 65.1 | (46) | 55.1 | (58) | 51.3 | (51) | 46.2 | (56) | 43 | (54) | 40.4 | (60) |
| 廊坊 | 110 | (7) | 99.7 | (10) | 86.8 | (23) | 70 | (36) | 60.3 | (60) | 60.1 | (49) | 45.5 | (68) | 42.4 | (63) | 37.6 | (71) | 40.3 | (61) |
| 安庆 | NA | | NA | | 57.9 | (73) | 58.3 | (62) | 64.9 | (47) | 52.1 | (65) | 42.5 | (76) | 38.3 | (78) | 39.4 | (64) | 38.3 | (62) |
| 朔州 | NA | | NA | | 50.8 | (87) | 62.6 | (51) | 50 | (82) | 51.3 | (67) | 44.3 | (71) | 39.7 | (71) | 37.4 | (74) | 38 | (63) |
| 淮安 | 72.4 | (19) | 67.2 | (45) | 60.3 | (63) | 51.7 | (76) | 57.4 | (67) | 52.4 | (63) | 43.4 | (73) | 44.8 | (61) | 40.9 | (60) | 37.5 | (64) |
| 镇江 | 70.2 | (20) | 67.5 | (44) | 63 | (58) | 50.8 | (82) | 62.5 | (54) | 53.6 | (60) | 46.1 | (66) | 42 | (65) | 41.8 | (57) | 37 | (65) |
| 萍乡 | NA | | NA | | 58.8 | (68) | 58.4 | (61) | 53.4 | (76) | 43.1 | (86) | 38.5 | (91) | 37.6 | (80) | 36.6 | (78) | 36.6 | (66) |
| 芜湖 | NA | | 65.3 | (47) | 58.7 | (69) | 50.3 | (83) | 57.4 | (66) | 48.2 | (76) | 43.4 | (74) | 37.7 | (79) | 38.7 | (68) | 36.6 | (67) |
| 马鞍山 | NA | | 68.3 | (41) | 59.9 | (64) | 48.7 | (86) | 58.9 | (69) | 45 | (84) | 43.8 | (72) | 37.2 | (82) | 38 | (70) | 36.2 | (68) |
| 合肥 | 96.4 | (11) | 79.2 | (28) | 67.4 | (49) | 58.5 | (60) | 59.5 | (65) | 49.3 | (73) | 41.6 | (78) | 39.5 | (72) | 39.8 | (63) | 36 | (69) |
| 铜陵 | NA | | NA | | 59.3 | (66) | 53.5 | (72) | 59.8 | (61) | 49 | (74) | 46.3 | (65) | 38.4 | (76) | 40.3 | (61) | 35.6 | (70) |
| 扬州 | 70.2 | (21) | 64.4 | (49) | 58.2 | (71) | 54.3 | (69) | 58.2 | (68) | 50.1 | (71) | 43.3 | (75) | 39 | (73) | 37.5 | (73) | 35.5 | (71) |
| 六安 | NA | | NA | | 59.5 | (65) | 47.4 | (87) | 52.6 | (78) | 51.2 | (69) | 40.5 | (84) | 40.8 | (69) | 38.9 | (67) | 35.2 | (72) |
| 九江 | NA | | NA | | 52.8 | (85) | 51.5 | (78) | 51.6 | (80) | 47.3 | (77) | 44.9 | (69) | 42.3 | (64) | 37.2 | (75) | 35.2 | (73) |
| 延安 | NA | | 53.6 | (60) | 46.1 | (93) | 43.9 | (93) | 48.6 | (95) | 41.4 | (92) | 37 | (96) | 35.9 | (87) | 34.1 | (83) | 35.2 | (74) |
| 泰州 | NA | | NA | | 63.3 | (56) | 54.1 | (70) | 55.5 | (70) | 48.4 | (75) | 45.7 | (67) | 39 | (74) | 35.3 | (80) | 35.2 | (75) |
| 常州 | 79.8 | (17) | 70 | (39) | 60.5 | (61) | 51.3 | (79) | 54.3 | (75) | 52.3 | (64) | 48.9 | (57) | 42.7 | (62) | 39.3 | (65) | 34.8 | (76) |
| 北京 | 84.1 | (14) | 87.7 | (21) | 75.8 | (35) | 78.6 | (15) | 55.2 | (72) | 58.2 | (54) | 44.8 | (70) | 41.8 | (66) | 31.6 | (90) | 34.8 | (77) |
| 滁州 | NA | | NA | | 68.8 | (46) | 59.4 | (57) | 59.5 | (62) | 51.2 | (68) | 47.9 | (60) | 40.9 | (68) | 40.3 | (62) | 34.6 | (78) |
| 安康 | NA | | 61.6 | (52) | 50.8 | (86) | 42.2 | (100) | 39.8 | (100) | 42.7 | (88) | 34.9 | (98) | 34.6 | (93) | 30 | (102) | 34.1 | (79) |
| 日照 | NA | | 61.6 | (53) | 71.2 | (44) | 59.4 | (58) | 52.5 | (79) | 49.9 | (72) | 46.8 | (62) | 41.4 | (67) | 36.7 | (77) | 34.1 | (80) |
| 连云港 | 69.5 | (22) | 61.5 | (54) | 58.2 | (72) | 43.4 | (96) | 49.1 | (84) | 46.9 | (78) | 38.8 | (89) | 38.5 | (75) | 35.7 | (79) | 33 | (81) |
| 南洛 | NA | | NA | | 43.9 | (97) | 38.4 | (107) | 38.1 | (105) | 39.9 | (95) | 33.8 | (101) | 34.5 | (94) | 30.7 | (96) | 32.4 | (82) |
| 南昌 | NA | | NA | | 45.2 | (94) | 39.1 | (98) | 39.5 | (101) | 31.6 | (109) | 34.3 | (99) | 35.2 | (90) | 32.7 | (86) | 32.4 | (83) |
| 池州 | NA | | NA | | 38.9 | (109) | 52.3 | (74) | 63.9 | (51) | 45.7 | (81) | 38.6 | (90) | 36.4 | (84) | 37.6 | (72) | 32 | (84) |
| 宣城 | NA | | NA | | 49.3 | (88) | 54.3 | (68) | 54.6 | (73) | 46.9 | (79) | 41.2 | (81) | 35.6 | (88) | 34.2 | (82) | 31.6 | (85) |
| 榆林 | NA | | NA | | 37.7 | (110) | 32.6 | (110) | 37.5 | (106) | 41.9 | (90) | 41.6 | (79) | 36.4 | (83) | 31.5 | (92) | 31.6 | (86) |
| 包头 | NA | | NA | | 48.9 | (89) | 54.6 | (67) | 43.7 | (94) | 46.5 | (80) | 55.5 | (36) | 39.9 | (70) | 34.5 | (81) | 31.5 | (87) |
| 大同 | NA | | 42.2 | (64) | 37.1 | (111) | 40.1 | (105) | 38.9 | (104) | 42.1 | (89) | 37.7 | (95) | 36.3 | (85) | 31.8 | (89) | 31.4 | (88) |
| 南京 | 83.9 | (15) | 75.5 | (32) | 58.3 | (70) | 46.7 | (88) | 48.5 | (87) | 42.8 | (87) | 40.5 | (85) | 34.2 | (96) | 32.7 | (85) | 31.2 | (89) |
| 新余 | NA | | NA | | 41.4 | (103) | 49.5 | (85) | 48.9 | (86) | 39.2 | (96) | 34.1 | (100) | 33.8 | (98) | 33.1 | (84) | 30.8 | (90) |
| 秦皇岛 | 66.7 | (24) | 60.5 | (56) | 46.6 | (92) | 51 | (81) | 42.4 | (96) | 45.4 | (82) | 40.7 | (82) | 38.4 | (77) | 37.1 | (76) | 30.3 | (91) |
| 吕梁 | NA | | NA | | 47.6 | (90) | 56.8 | (64) | 58.8 | (64) | 56.3 | (56) | 41.5 | (80) | 37.3 | (81) | 32.5 | (87) | 29.9 | (92) |
| 承德 | 52 | (27) | 51.4 | (61) | 41.5 | (102) | 39.9 | (106) | 35.1 | (108) | 35.1 | (103) | 32.7 | (106) | 29.9 | (106) | 32.3 | (88) | 29.8 | (93) |
| 宜春 | NA | | NA | | 43.4 | (100) | 51.8 | (75) | 50.6 | (81) | 37.2 | (99) | 33.3 | (103) | 32.2 | (101) | 30.2 | (101) | 29.8 | (94) |
| 苏州 | 75 | (18) | 68.8 | (40) | 57.6 | (74) | 46.5 | (90) | 45.1 | (92) | 40.1 | (94) | 39.3 | (87) | 33.4 | (100) | 30.5 | (98) | 29.6 | (95) |
| 呼和浩特 | NA | | NA | | 41 | (105) | 40.7 | (103) | 45.3 | (91) | 44.3 | (85) | 49 | (56) | 34.7 | (92) | 31.5 | (91) | 29.4 | (96) |
| 吉安 | NA | | NA | | 43.8 | (98) | 49.7 | (84) | 52.7 | (77) | 37.9 | (97) | 33.4 | (102) | 30.9 | (103) | 26.7 | (108) | 29.1 | (97) |
| 无锡 | 79.9 | (16) | 70.4 | (38) | 61.3 | (60) | 51.4 | (78) | 49 | (85) | 41.7 | (91) | 40.5 | (83) | 34.8 | (91) | 31 | (95) | 29 | (98) |
| 盐城 | 63.9 | (25) | 59.4 | (57) | 54.4 | (83) | 43.3 | (97) | 48 | (89) | 45 | (83) | 38.5 | (92) | 33.8 | (97) | 30.3 | (100) | 28.3 | (99) |
| 南通 | 67.1 | (23) | 64.5 | (48) | 57 | (75) | 44.7 | (92) | 41.1 | (98) | 41.1 | (93) | 38.4 | (93) | 36 | (86) | 31.5 | (93) | 27.5 | (100) |
| 青岛 | NA | | 55.7 | (58) | 56.7 | (77) | 43.9 | (94) | 41.8 | (97) | 37.8 | (98) | 40 | (86) | 33.7 | (99) | 31.4 | (94) | 27.4 | (101) |
| 烟台 | NA | | 50.1 | (62) | 46.9 | (91) | 40.7 | (104) | 36.6 | (107) | 35.6 | (100) | 39.3 | (88) | 34.2 | (95) | 30.6 | (97) | 27.2 | (102) |
| 乌兰察布 | NA | | NA | | 43.6 | (99) | 34.6 | (109) | 28.2 | (112) | 32 | (108) | 28.9 | (109) | 27.3 | (111) | 27.6 | (106) | 27.2 | (103) |
| 抚州 | NA | | NA | | 39.8 | (107) | 46.5 | (89) | 49.9 | (83) | 35.3 | (101) | 32.7 | (105) | 30.9 | (104) | 28 | (104) | 26.7 | (104) |
| 上海 | 60.4 | (26) | 54.3 | (59) | 53.6 | (84) | 43.5 | (95) | 39.4 | (102) | 33.8 | (105) | 36.7 | (97) | 30.9 | (105) | 28.8 | (103) | 26.3 | (105) |
| 鹰潭 | NA | | NA | | 42.5 | (101) | 42.1 | (101) | 41 | (99) | 34.9 | (104) | 38.1 | (94) | 35.5 | (89) | 26.5 | (109) | 25.4 | (106) |
| 上饶 | NA | | NA | | 45.1 | (96) | 42.9 | (99) | 44 | (93) | 35.2 | (102) | 30.7 | (107) | 31.3 | (102) | 27.5 | (107) | 24.8 | (107) |
| 鄂尔多斯 | NA | | NA | | 26.6 | (113) | 24.3 | (113) | 27 | (113) | 31.1 | (111) | 28.9 | (110) | 28.9 | (107) | 30.3 | (99) | 24.8 | (108) |
| 威海 | NA | | 42.2 | (63) | 39.5 | (108) | 35 | (108) | 31.1 | (109) | 31.4 | (110) | 33.2 | (104) | 28.1 | (110) | 27.7 | (105) | 24.2 | (109) |
| 景德镇 | NA | | NA | | 45.1 | (95) | 41.1 | (102) | 39.4 | (103) | 30.6 | (112) | 26.7 | (112) | 26.3 | (112) | 24.6 | (111) | 24 | (110) |
| 张家口 | 42.5 | (28) | NA | | 34.3 | (112) | 32.2 | (111) | 31 | (110) | 32.2 | (107) | 29.7 | (108) | 28.6 | (108) | 25.4 | (110) | 22.5 | (111) |
| 赣州 | NA | | NA | | 41.2 | (104) | 46.4 | (91) | 46.1 | (90) | 33.6 | (106) | 27.5 | (111) | 28.6 | (109) | 21.2 | (113) | 22 | (112) |
| 黄山 | NA | | NA | | 40.2 | (106) | 31.1 | (112) | 28.2 | (111) | 25.7 | (113) | 25.4 | (113) | 25.3 | (113) | 21.9 | (112) | 21.1 | (113) |

图 6: “3+110” 城市气象调整后 2013 年至 2022 年 $PM_{2.5}$ 季节年平均浓度（微克/立方米）年际变化表 (浓度列底纹从红到绿表示季节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)

北京大学环境科学中心

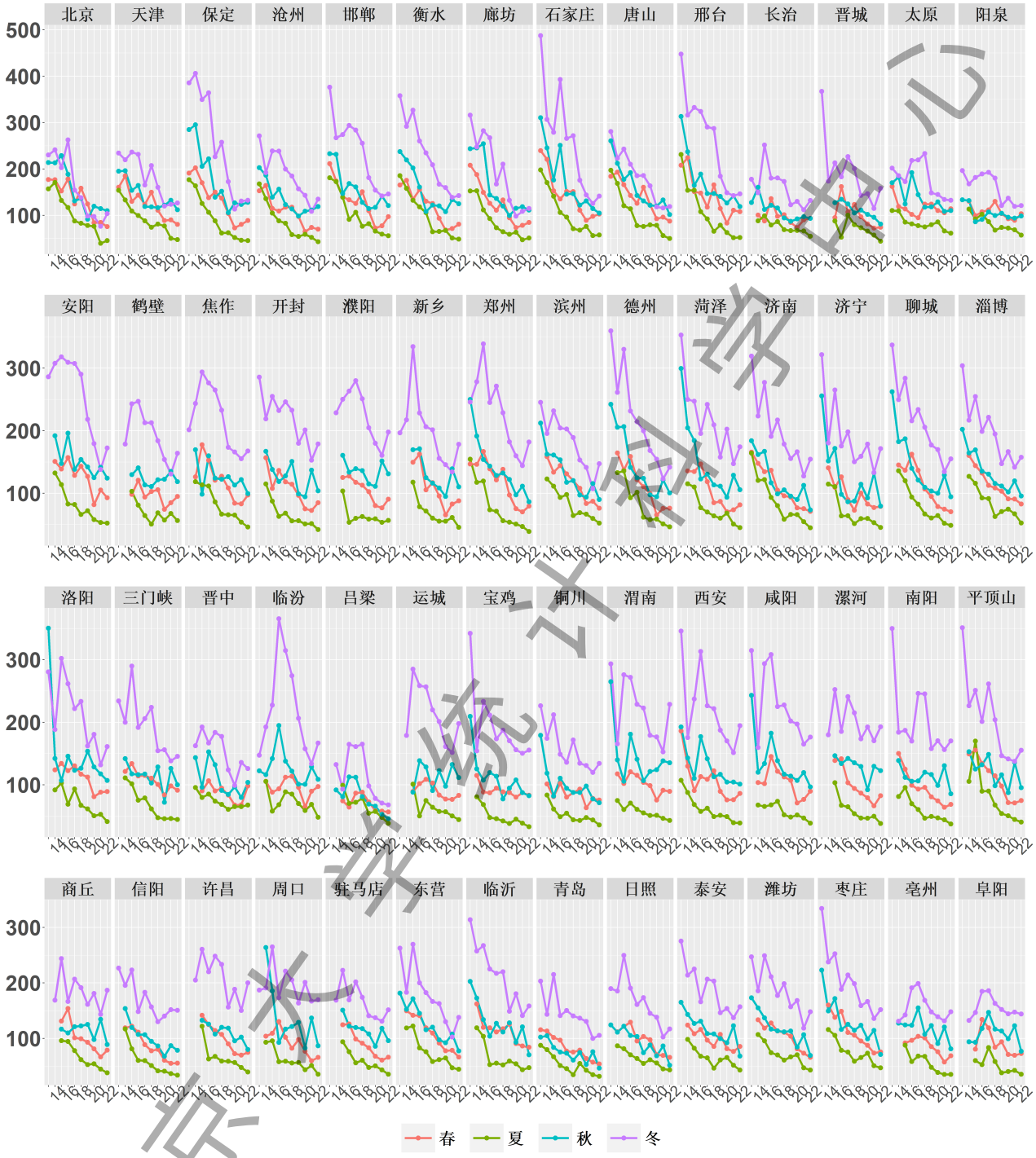



图 7: “3+110”城市气象调整后 2013 年至 2022 年 $PM_{2.5}$ 季节 90% 分位数浓度（微克/立方米）变化序列图，图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

北京大学统计科学中心

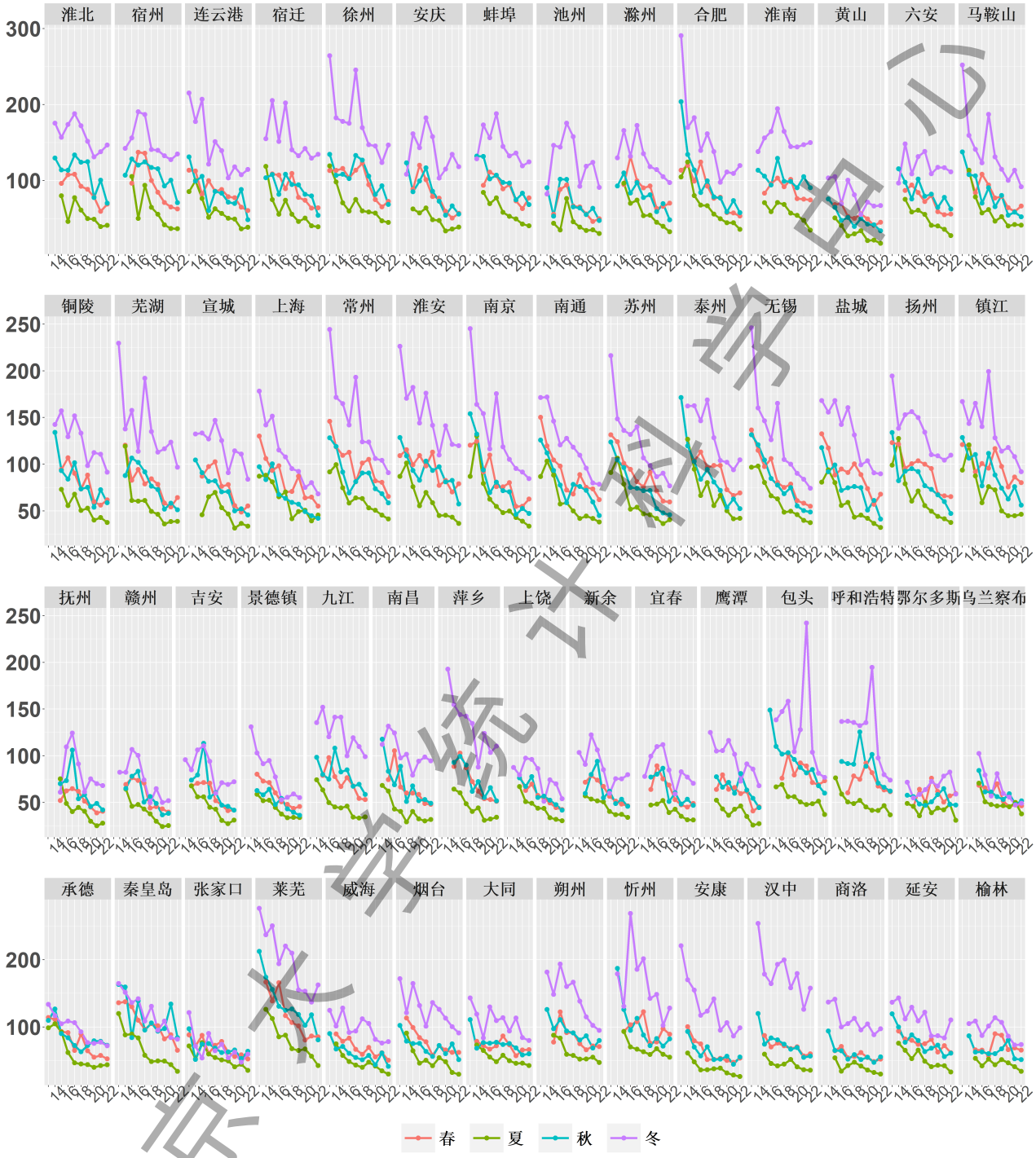



图 8: “3+110”城市气象调整后 2013 年至 2022 年 $PM_{2.5}$ 季节 90% 分位数浓度（微克/立方米）变化序列图，图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

北京大学统计科学中心

**有 24 个城市季节年平均 $PM_{2.5}$ 浓度超过 50 微克/立方米，较上年减少了 7 个，但有 1 个城市的年度平均 $PM_{2.5}$ 浓度反弹到了 60 微克/立方米以上。从图 5中展示的累计降幅来看，相比 2015 年，2022 年“3+110”城市 $PM_{2.5}$ 累计降幅均值为 37.1%（1.1%）；相比 2021 年，2022 年一年降幅均值为 2.8%（0.6%）。**

年均 $PM_{2.5}$ 浓度最高的三个城市分别是渭南（64.1 微克/立方米）、运城（59.7 微克/立方米）和濮阳（58.8 微克/立方米），其中渭南是“3+110”市中唯一一个 $PM_{2.5}$ 浓度反弹到 60 微克/立方米以上的城市。2022 年“3+110”市中有 37 个 $PM_{2.5}$ 恶化（降幅为负）的城市，较 2021 年多出 22 个，这可能是受 2022 年冬季新冠疫情防控政策调整的影响。渭南、汉中、安康、西安和北京 5 个城市单年污染增幅超过 10%，其中渭南市单年污染增幅为 14.7%，污染恶化增幅最大。这些事实都表明渭南市的 $PM_{2.5}$ 污染在上个季节年出现了恶化。截至 2022 年，已有 38 个城市年均 $PM_{2.5}$ 浓度低于 35 微克/立方米，其中黄山、赣州、张家口等 22 个城市年均 $PM_{2.5}$ 浓度低于 30 微克/立方米。

**2015-2022 年排名升高（相对恶化）最多的前 20 个城市中，有 10 个城市 2022 年均 $PM_{2.5}$ 浓度城市排名位于最高的前 1/3。这其中，临汾、渭南、晋中、西安、运城和咸阳位于汾渭平原，太原、阳泉、鹤壁和濮阳属于“2+26”城市，需要持续关注。**排名上升最多的是位于汾渭平原的临汾。临汾市 $PM_{2.5}$ 浓度在 2016 年显著增加，尽管这几年间临汾市年均 $PM_{2.5}$ 浓度整体呈下降趋势，但与 2015 年相比下降幅度不大，污染情况并未明显改善，因而相对排名上升较多。**排名下降最多的前 20 个城市中，无锡、东营、日照、滁州、南通、青岛、潍坊、上海、苏州、合肥、枣庄和南京这 12 个城市不属于“2+26”及汾渭平原城市，非重点关注区域城市，仍改善显著。**

从七年累计降幅来看，2022 年“3+110”城市年均 $PM_{2.5}$ 浓度均小于 2015 年的浓度。济南累计七年降幅最高，达 56.6%，保定其次，为 55.3%。2015 年至 2022 年有 14 个城市 $PM_{2.5}$ 浓度的累计降幅超过了 50%，其中 6 个位于山东省、5 个位于京津冀地区、3 个位于长三角地区，且有 8 个属于“2+26”城市。相比于 2015 年，2022 年降幅最小的前二十个城市中各有 7 个城市分别位于山西和陕西，这两个省累计降幅也相对较低，分别为 21.7% 和 22.0%。此外，降幅最小的前二十个城市中有 10 个城市（渭南、临汾、太原、阳泉、晋中、西安、运城、鹤壁、铜川和咸阳）属于“2+26”和汾渭平原城市，这些城市较早开始污染治理，但改善相对不足。在降幅最大的前十个城市中分别有 5 个和 4 个城市位于山东和京津冀，这两个地区七年累计降幅相对较高，分别为 47.1% 和 48.5%。

**上述关于 $PM_{2.5}$ 年度趋势的讨论说明，京津冀地区、河南和山东近年已然形成稳定的下降趋势，治理效果较好；山西和陕西整体降幅相对较低，省内许多城市虽建立了 $PM_{2.5}$ 浓度的下降趋势，但改善程度不足，且受 2022 年末疫情防控措施调整的影响，多数城市在上个季节年出现反弹回升态势；江淮地区和江西整体污染水平相对较低，年均 $PM_{2.5}$ 浓度平稳下降，空气质量持续向好。**

- **$PM_{2.5}$ 极端污染（90% 分位数）**

我们也计算了经过气象调整的 90% 分位数浓度，它们代表了最严重的 10% 污染情况。极端污染是衡量空气质量的另一重要标准，如美国的考核指标为 $PM_{2.5}$ 日均浓度 98% 分位数浓度不超过 35 微克/立方米。图 7-8展示了研究区域城市过去 40 个季节（2013 年春季至 2022 年冬季）经气象调整的 $PM_{2.5}$ 浓度 90% 分位数随时间变化的情况以及给定季节的时间序列。从 90% 分位数角度，各城市 $PM_{2.5}$ 浓度仍

北京大学统计学中心

具有同均值浓度类似的区域和季节特征。太行山东侧从保定向南到河南北部、山东西部和河南、陕西地区仍为 $PM_{2.5}$ 高浓度区域，尤其在秋冬两季污染最为严重，江淮地区整体浓度较低，污染更轻。

**2015 年“3+110”城市 $PM_{2.5}$ 的 90% 分位数浓度均值（标准误差）为 125.6（3.6）微克/立方米，2021 年下降至 80.0（1.8）微克/立方米，2022 年略微改善，为 77.5（1.9）微克/立方米。近年来全国大部分地区 90% 分位数浓度下降显著，河南、陕西、山西和河北部分城市在 2022 年存在反弹。**

从具体数值分析，2022 年 90% 分位数年均浓度以渭南最高，达 124.2 微克/立方米，濮阳其次，达 119.1 微克/立方米，安阳再次，为 110.5 微克/立方米，共 8 个城市（运城、漯河、鹤壁、邢台、新乡、西安、临汾和邯郸）90% 分位数年均浓度在 105-110 微克/立方米，17 个城市 90% 分位数年均浓度超过 100 微克/立方米。除相对低的夏季外，90% 分位数浓度在春秋季仍普遍高于 60 微克/立方米。在沿太行山东侧的河北、河南及关中平原城市，2018 年冬季 90% 分位数曾高于 200 微克/立方米，而 2019 和 2020 年冬季 90% 分位数仍能达到 150 微克/立方米，如河南 2019 和 2020 年冬季 90% 分位数浓度平均值分别为 167.4 微克/立方米和 169.2 微克/立方米，虽然 2021 年冬季下降至 146.8 微克/立方米，但在 2022 年冬季又反弹至 172.0 微克/立方米，仍有很大改善空间。

- **五种风向下的平均污染浓度：不同城市有利减轻污染的风向不同**

本报告延续从第五份报告开始计算的每个城市五个主要风向下的污染物气象调整浓度，这可以让我们探究各城市的污染输入和输出方向。通过图 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

北京大学公共卫生学院

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 9-10、图 11、图 12和图 13分别展示了“3+110”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、一年和七年累计降幅、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。**

**2015 年春季“3+110”城市 $PM_{10}$ 浓度均值（标准误差）为 114.3（3.3）微克/立方米，2021 年浓度均值已降至 88.6（2.3）微克/立方米，2022 年略微下降至 87.8（2.6）微克/立方米。**2022 年春季西安平均浓度最高，为 142.1 微克/立方米；赣州最低，为 37.9 微克/立方米。相比 2021 年，2022 年春季“3+110”城市一年降幅的平均值为 1.3%，区域内有 65 个城市浓度下降，其余 48 个城市反弹；有 6 个城市降幅超过 20%，其中乌兰察布降幅最大，为 29.7%。有 8 个城市增幅超过 20%，其中许昌的增幅最大，为 31.7%。

**2015 年夏季“3+110”城市 $PM_{10}$ 浓度均值（标准误差）为 82.4（2.3）微克/立方米，2021 年下降至 50.5（1.2）微克/立方米，2022 年继续下降至 46.3（1.1）微克/立方米。**2022 年夏季吕梁平均浓度最高，为 78.7 微克/立方米；黄山最低，为 23.3 微克/立方米。相比 2021 年，2022 年夏季“3+110”城市一年降幅的平均值为 7.6%，区域内有 90 个城市改善，仅 23 个城市不降反增；有 11 个城市降幅超过 20%，其中淮南降幅最大为 29.6%。相比 2015 年，仅有吕梁 $PM_{10}$ 浓度有所上升，增幅为 8.5%，其余城市均有改善，其中南阳降幅最大为 64.8%，已有 34 个城市的降幅超过了 50%。

**2015 年秋季“3+110”城市 $PM_{10}$ 浓度均值（标准误差）为 100.5（2.8）微克/立方米，2021 年下降至 76.3（1.9）微克/立方米，2022 年继续下降至 70.5（1.8）微克/立方米。**2022 年秋季渭南平均浓度最高，为 104.7 微克/立方米；黄山最低，为 30.7 微克/立方米。相比 2021 年，2022 年秋季“3+110”城市一年降幅的平均值为 6.7%，区域内有 84 个城市改善，仅 29 个城市恶化；青岛降幅最大，达到 29.7%，有 17 个城市降幅超过 20%，其中安徽、山东、江苏分别有 7、6、4 个；北京增幅最大，达到 36.7%，是唯一增幅超过 30% 的城市，有 9 个城市增幅介于 15% 至 30% 之间。

北京大学数学科学中心

**2015 年冬季“3+110”城市 $PM_{10}$ 浓度均值（标准误差）为 150.8（5.1）微克/立方米，2021 年为 88.2（2.0）微克/立方米，2022 年大幅度上升至 104.5（2.7）微克/立方米。**2022 年冬季渭南平均浓度最高，为 185.2 微克/立方米；赣州最低，为 48.0 微克/立方米。相比 2021 年，2022 年冬季“3+110”城市一年增幅的平均值达到了 18.3%，区域内仅 11 个城市浓度下降，其余 102 个城市反弹。其中，临汾的增幅超过 60%，为 67.7%；有 24 个城市增幅超过 30%。2022 年冬季 $PM_{10}$ 污染有改善的 11 个城市的降幅均未超过 10%，其中上饶的降幅最高，为 8.8%。**这些都说明 2022 年冬季区域内城市颗粒物污染较上年冬季有所加重，反弹明显，值得关注。**相比 2015 年冬季，2022 年“3+110”城市中有 9 个城市（大同、忻州、吕梁、朔州、阜阳、亳州、淮北、太原和鄂尔多斯）恶化；同时有 4 个城市（邯郸、保定、德州和濮阳）降幅超过了 50%。

- **$PM_{10}$ 年度评估：年度变化趋势与城市相对排名**

**根据图 13，2015 年“3+110”城市的 $PM_{10}$ 浓度均值（标准误差）为 112.0（3.1）微克/立方米，2021 年下降至 75.9（1.7）微克/立方米，2022 年反弹至 77.3（1.9）微克/立方米。有 20 个城市季节年平均浓度超过 100 微克/立方米，相比 2021 年的 9 个有所增加。从图 12中展示的累计降幅来看，相比 2015 年，2022 年“3+110”城市 $PM_{10}$ 累计降幅均值为 29.1%（1.5%）；但整体上看，相比 2021 年，2022 年“3+110”城市 $PM_{10}$ 浓度不降反增，一年增幅均值为 1.5%（0.8%）。**

年均 $PM_{10}$ 浓度最高的三个城市分别是渭南（121.6 微克/立方米）、咸阳（115.3 微克/立方米）与平顶山（110.7 微克/立方米），这三个城市的 $PM_{10}$ 浓度较上一个季节年均有所上升。2022 年“3+110”市中有 56 个 $PM_{10}$ 恶化（降幅为负）的城市，远多于 2021 年的 8 个。在 2022 季节年，有 38 个城市年均 $PM_{10}$ 浓度低于 65 微克/立方米，相比 2021 年的 35 个增加了 3 个；有 11 个城市年均 $PM_{10}$ 浓度低于 50 微克/立方米，其中黄山、赣州的浓度最低，均低于 40 微克/立方米。

2015-2022 年排名升高（相对恶化）最多的前 20 个城市中，太原、阳泉、鹤壁三市属于“2+26”城市，吕梁、临汾、运城、晋中、渭南、咸阳、铜川和西安八市位于汾渭平原，需要持续关注。由此可见，汾渭平原 $PM_{10}$ 的污染治理改善速度仍相对落后。排名下降最多的前 20 个城市中，东营、潍坊、泰州、青岛、日照、临沂、无锡、常州、盐城、南京和萍乡这 11 个城市不属于“2+26”及汾渭平原城市，非重点关注区域城市，仍改善显著。

相比于 2015 年，有 7 个城市（吕梁、朔州、鄂尔多斯、大同、临汾、阜阳和忻州）$PM_{10}$ 浓度不降反增。降幅最小的前二十个城市中分别有 9 个、5 个和 5 个城市位于山西、陕西和安徽，这三个省累计降幅也相对较低，分别为 2.2%、15.0% 和 22.0%。内蒙古自治区的累计降幅也较低，为 16.4%，这是因为鄂尔多斯 2022 年 $PM_{10}$ 浓度相对 2015 年的增幅为 7.6%。此外，降幅最小的前二十个城市中有 9 个城市（吕梁、临汾、晋中、渭南、运城、太原、铜川、阳泉和咸阳）属于“2+26”和汾渭平原城市，这些城市较早开始污染治理，但改善相对不足。在降幅最大的前二十个城市中分别有 10 个和 5 个城市位于山东与京津冀，这两个地区七年累计降幅相对较高，分别为 41.9% 和 40.7%。河南省的累计降幅也较高，为 33.9%。这说明在这三个地区 $PM_{10}$ 的污染治理取得了一定的成效。

**上述关于 $PM_{10}$ 年度趋势的讨论说明，京津冀地区、山东和河南的颗粒物浓度已形成较为稳定下降趋势；而山西、陕西和安徽持续稳定的下降趋势仍有待建立，省内部分城市仍需重点关注。**

北京大学统计科学中心

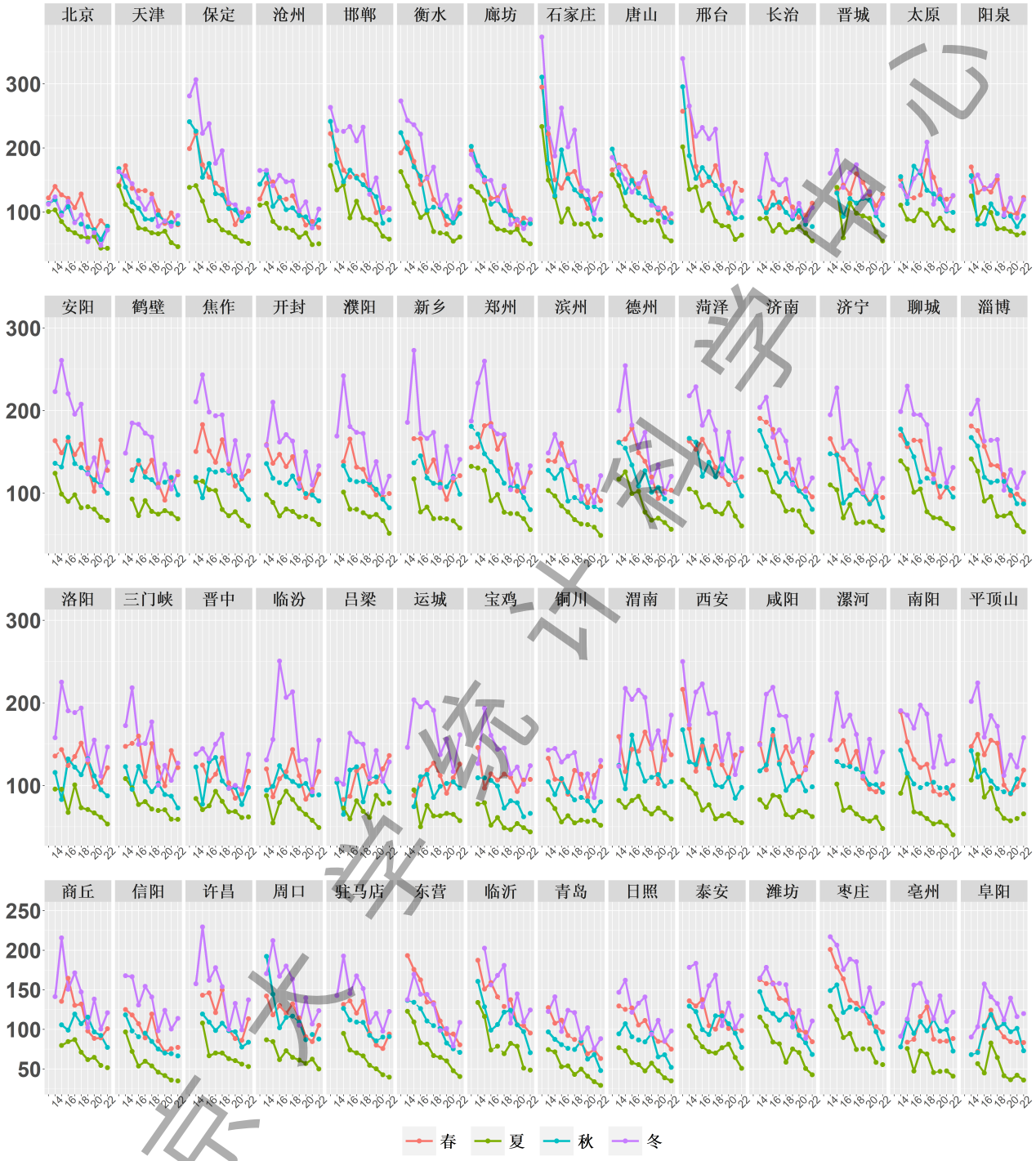



图 9: “3+110”城市气象调整后 2013 年至 2022 年 $PM_{10}$ 季节平均浓度（微克/立方米）变化序列图，图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

北京大学统计科学中心

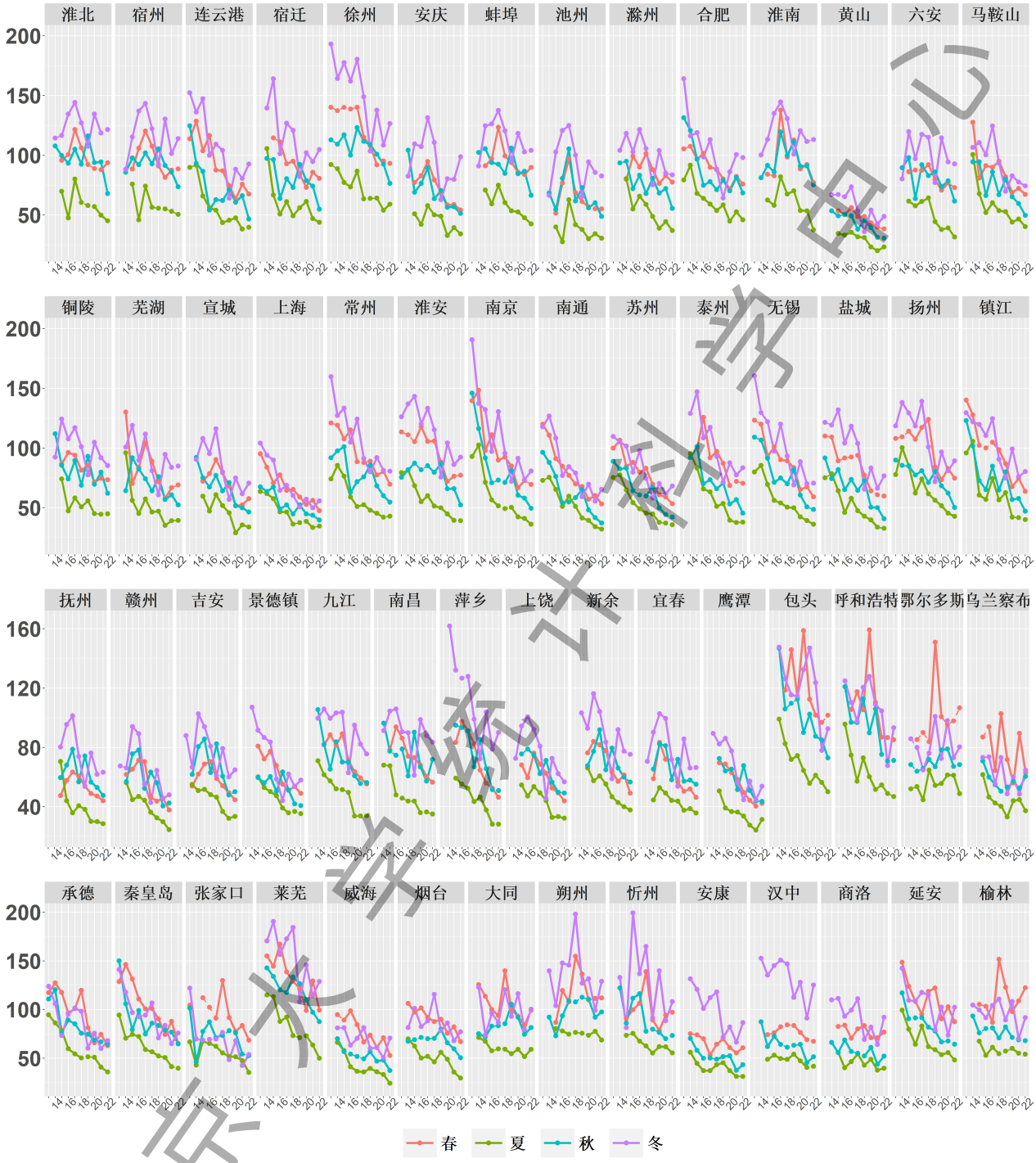



图 10: “3+110”城市气象调整后 2013 年至 2022 年 $PM_{10}$ 季节平均浓度（微克/立方米）变化序列图，图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

北京大学统计科学中心

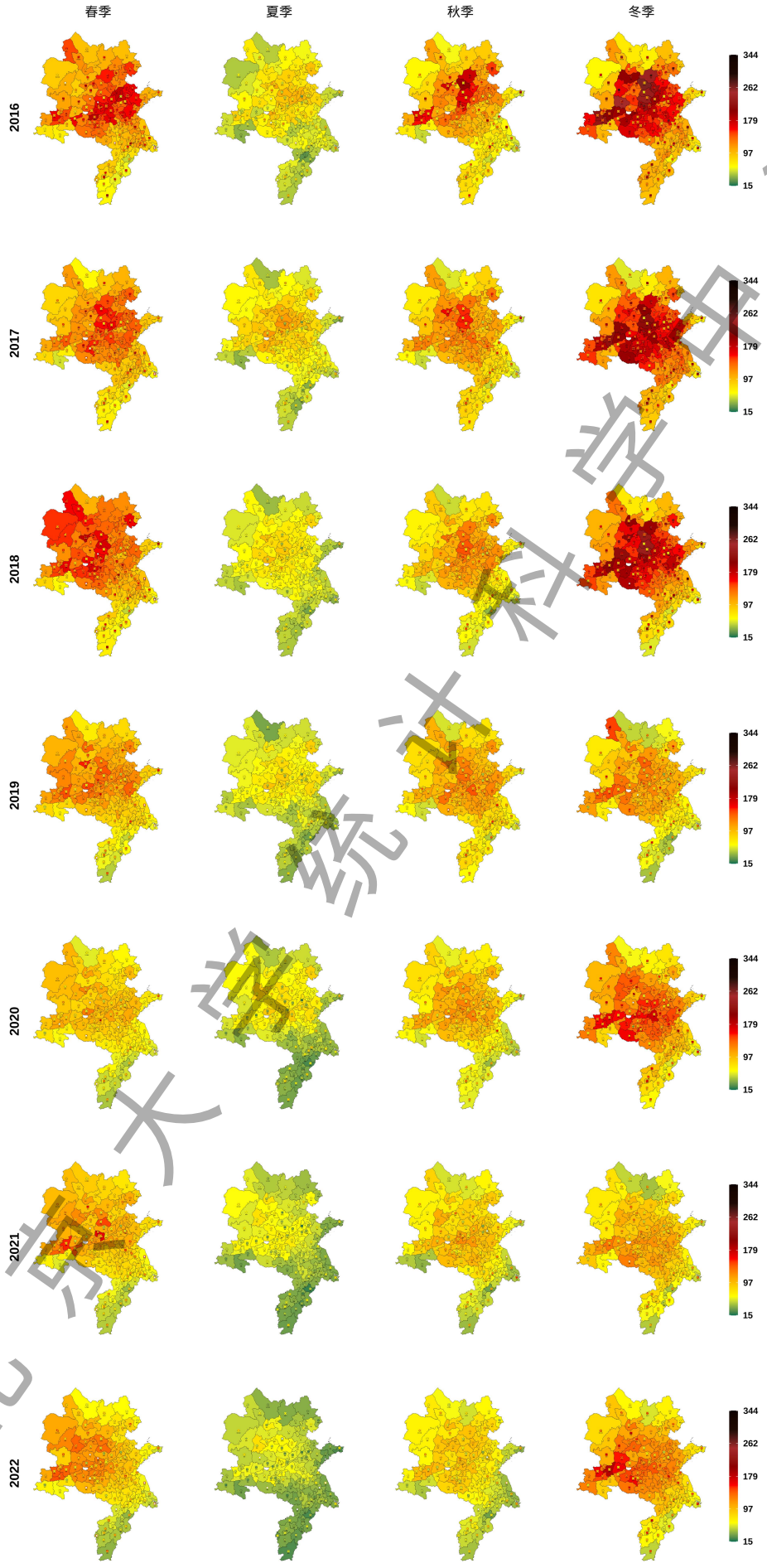



图 11: “3+110”城市气象调整后 2016 年至 2022 年 $PM_{10}$ 季节平均浓度（微克/立方米）

北京大学统计科学中心

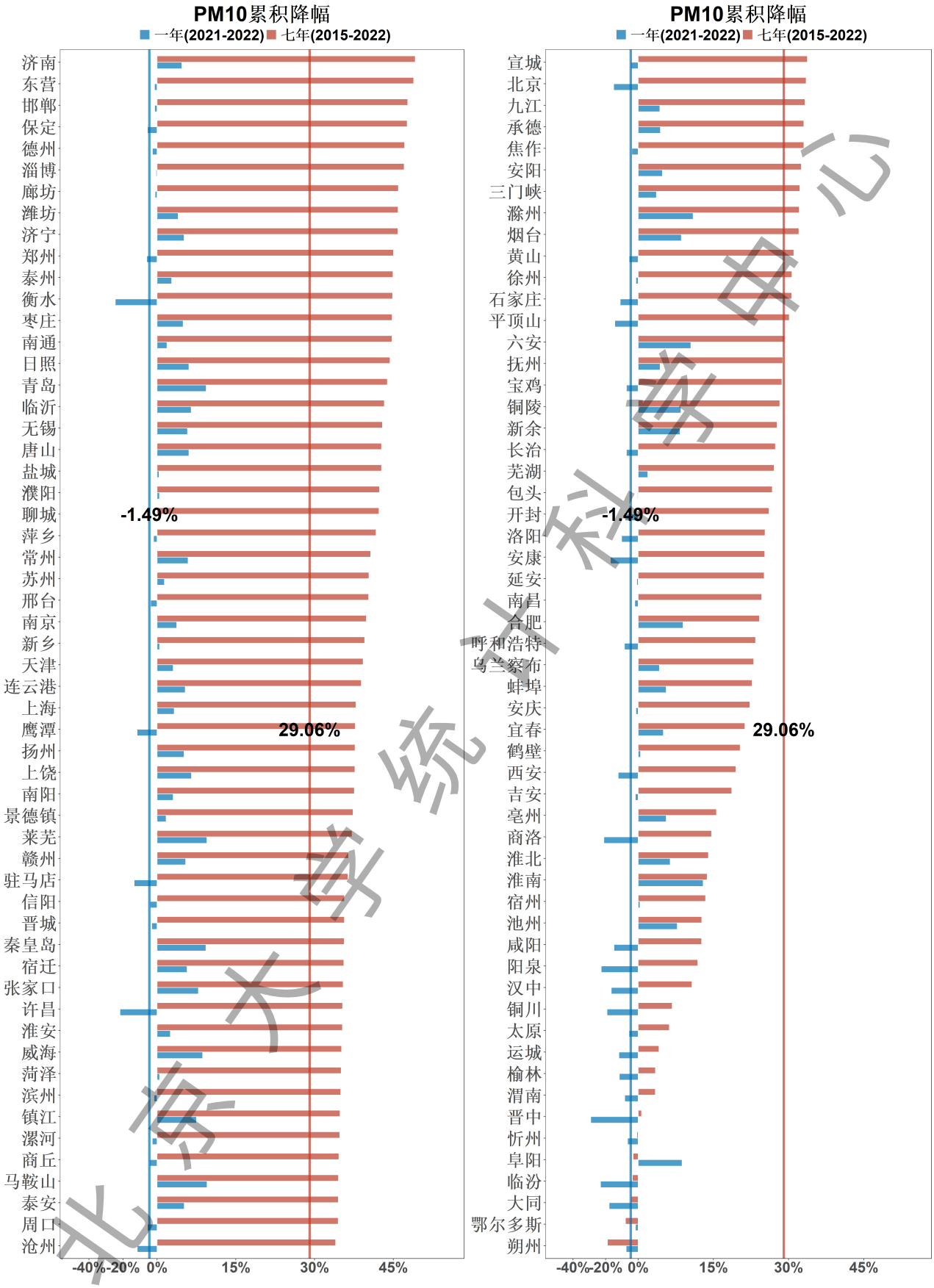



图 12: “3+110”城市气象调整后 $PM_{10}$ 浓度过去一年（蓝色）、七年（红色）的累计降幅
蓝色和红色竖线分别代表“3+110”城市的一年和七年平均降幅

北京大学统计科学中心

| 城市 | 2013年 | 排名 | 2014年 | 排名 | 2015年 | 排名 | 2016年 | 排名 | 2017年 | 排名 | 2018年 | 排名 | 2019年 | 排名 | 2020年 | 排名 | 2021年 | 排名 | 2022年 | 排名 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 渭南 | NA | | 122.2 | (39) | 125.9 | (41) | 147.7 | (12) | 142.4 | (7) | 137 | (7) | 116 | (6) | 113.6 | (6) | 112.6 | (2) | 121.6 | (1) |
| 咸阳 | NA | | 125.2 | (37) | 132 | (36) | 158.8 | (6) | 131.4 | (18) | 122.3 | (29) | 108.9 | (15) | 111 | (10) | 100.7 | (9) | 115.3 | (2) |
| 平顶山 | NA | | 149.4 | (19) | 158.5 | (15) | 125.1 | (31) | 135.4 | (13) | 122.7 | (28) | 91.3 | (47) | 93.5 | (44) | 97.1 | (16) | 110.7 | (3) |
| 运城 | NA | | NA | | 115.1 | (47) | 114.2 | (45) | 127 | (25) | 116.7 | (38) | 102.9 | (26) | 103.8 | (25) | 98.9 | (11) | 110.3 | (4) |
| 西安 | 185.1 | (6) | 142.2 | (27) | 136.4 | (33) | 149 | (9) | 127.7 | (22) | 123.9 | (24) | 104.3 | (21) | 111.5 | (8) | 98.1 | (13) | 109.8 | (5) |
| 吕梁 | NA | | NA | | 80.5 | (93) | 107.1 | (54) | 118.6 | (41) | 105.7 | (53) | 95.8 | (39) | 111.1 | (9) | 101.9 | (7) | 108.9 | (6) |
| 安阳 | NA | | 161.7 | (12) | 160.1 | (13) | 160.3 | (5) | 144.1 | (5) | 145.2 | (5) | 115.5 | (8) | 110.5 | (11) | 113.5 | (1) | 108 | (7) |
| 焦作 | NA | | 148.5 | (20) | 158.8 | (14) | 145.5 | (13) | 140 | (8) | 141.8 | (6) | 114.7 | (10) | 117.7 | (2) | 102.4 | (6) | 106.3 | (8) |
| 太原 | NA | | 139.5 | (28) | 112.3 | (50) | 133 | (20) | 138.7 | (9) | 155.2 | (3) | 118.5 | (5) | 117.3 | (3) | 99.8 | (10) | 105.3 | (9) |
| 新乡 | NA | | NA | | 173.2 | (4) | 140.2 | (16) | 123.4 | (33) | 123.7 | (25) | 100.1 | (30) | 106.4 | (18) | 105.2 | (3) | 104.7 | (10) |
| 菏泽 | NA | | 163.1 | (11) | 161.1 | (12) | 137.7 | (17) | 143 | (6) | 126.3 | (20) | 115.1 | (9) | 124.9 | (1) | 105.1 | (4) | 104.6 | (11) |
| 鹤壁 | NA | | NA | | 130.3 | (39) | 132.8 | (22) | 127.2 | (23) | 125.4 | (22) | 99.9 | (31) | 104.7 | (22) | 104.3 | (5) | 103.8 | (12) |
| 晋中 | NA | | NA | | 104.3 | (55) | 110.5 | (49) | 122.6 | (35) | 120.5 | (32) | 91.1 | (48) | 87.7 | (54) | 80.7 | (49) | 103.6 | (13) |
| 临汾 | NA | | 108.3 | (51) | 98.9 | (63) | 140.5 | (15) | 131.8 | (17) | 136.1 | (9) | 103.3 | (24) | 95.5 | (37) | 83.5 | (43) | 102.3 | (14) |
| 开封 | NA | | 137.6 | (30) | 138.3 | (31) | 123.5 | (33) | 123.7 | (31) | 126.5 | (19) | 100.6 | (28) | 104 | (24) | 94.8 | (19) | 102.2 | (15) |
| 洛阳 | NA | | 126.2 | (35) | 136.7 | (32) | 128.5 | (29) | 136.5 | (12) | 132.8 | (11) | 115.5 | (7) | 107.9 | (14) | 92.9 | (23) | 102.1 | (16) |
| 朔州 | NA | | NA | | 86.1 | (83) | 109.8 | (50) | 109.3 | (52) | 134.3 | (10) | 113 | (12) | 106.5 | (17) | 95.1 | (17) | 101.9 | (17) |
| 石家庄 | 302.9 | (1) | 194.6 | (4) | 146.6 | (22) | 170.1 | (1) | 154.5 | (3) | 151.7 | (4) | 119.3 | (3) | 110 | (12) | 91.8 | (24) | 101.7 | (18) |
| 邢台 | 273.3 | (2) | 213.4 | (2) | 170.2 | (7) | 161.2 | (3) | 157.5 | (2) | 157.1 | (1) | 119.1 | (4) | 104.7 | (23) | 97.9 | (14) | 101.6 | (19) |
| 阳泉 | NA | | 149.8 | (18) | 114.3 | (48) | 115.4 | (43) | 121 | (38) | 119.8 | (34) | 91.7 | (45) | 95.4 | (38) | 82.5 | (45) | 100.7 | (20) |
| 郑州 | 164 | (9) | 172.9 | (8) | 179.2 | (1) | 148.5 | (11) | 137.6 | (10) | 132.5 | (12) | 104.1 | (22) | 105.2 | (21) | 93 | (20) | 98.5 | (21) |
| 聊城 | NA | | 171.4 | (10) | 168.8 | (8) | 151.2 | (8) | 144.2 | (4) | 127 | (18) | 105.7 | (18) | 106.6 | (16) | 97.4 | (15) | 97.4 | (22) |
| 许昌 | NA | | NA | | 149.9 | (18) | 121 | (36) | 117 | (44) | 120.4 | (33) | 90.2 | (50) | 94.8 | (39) | 79.9 | (51) | 96.9 | (23) |
| 衡水 | 213 | (5) | 197.6 | (3) | 174.9 | (3) | 153 | (7) | 127.1 | (24) | 116.6 | (39) | 98 | (36) | 91.4 | (46) | 77.8 | (58) | 96.4 | (24) |
| 铜川 | NA | | 115.7 | (41) | 103.3 | (57) | 99.7 | (57) | 94.9 | (69) | 98.8 | (60) | 88.3 | (54) | 84.3 | (60) | 81.2 | (48) | 96.3 | (25) |
| 晋城 | NA | | NA | | 149 | (20) | 108.3 | (52) | 131 | (19) | 136.3 | (8) | 121.1 | (1) | 116.8 | (4) | 92.9 | (21) | 95.8 | (26) |
| 漯河 | NA | | NA | | 146.5 | (23) | 129.9 | (27) | 126.8 | (27) | 122 | (30) | 98.6 | (35) | 102.5 | (27) | 92.9 | (22) | 95.5 | (27) |
| 三门峡 | NA | | 137.7 | (29) | 140.4 | (29) | 127.4 | (30) | 111.6 | (48) | 122.9 | (27) | 98.6 | (34) | 95.8 | (36) | 98.7 | (12) | 95.1 | (28) |
| 德州 | NA | | 160.1 | (14) | 175.1 | (2) | 148.8 | (10) | 128.8 | (21) | 129.1 | (17) | 100.3 | (29) | 101.2 | (28) | 90.1 | (29) | 92.5 | (29) |
| 周口 | NA | | 147.9 | (21) | 139.9 | (30) | 115.3 | (44) | 122 | (36) | 119.2 | (35) | 97.5 | (37) | 93.6 | (41) | 86.8 | (37) | 91.6 | (30) |
| 莱芜 | NA | | 145.8 | (25) | 145.6 | (24) | 132.9 | (21) | 130.2 | (20) | 130 | (15) | 106.9 | (17) | 106.9 | (15) | 101.1 | (8) | 91.5 | (31) |
| 枣庄 | NA | | 174 | (7) | 163.4 | (11) | 137.6 | (18) | 137.1 | (11) | 129.6 | (16) | 112.2 | (13) | 112.9 | (7) | 94.9 | (18) | 90.2 | (32) |
| 邯郸 | 224.8 | (3) | 183.9 | (5) | 170.2 | (6) | 161 | (4) | 159.2 | (1) | 155.8 | (2) | 120.9 | (2) | 114.1 | (5) | 87.7 | (34) | 88.9 | (33) |
| 淄博 | NA | | 171.5 | (9) | 168 | (9) | 132.4 | (23) | 126.8 | (28) | 121.2 | (31) | 103.2 | (25) | 101.2 | (29) | 88.4 | (32) | 88.9 | (34) |
| 徐州 | 134.6 | (13) | 124.9 | (38) | 128.1 | (40) | 118.6 | (38) | 132.6 | (15) | 109.8 | (48) | 96.2 | (38) | 98.7 | (31) | 87.6 | (35) | 88.8 | (35) |
| 南阳 | NA | | 153.2 | (17) | 141.8 | (26) | 117.6 | (39) | 120.7 | (39) | 118.5 | (36) | 93.1 | (44) | 100.4 | (30) | 91.3 | (25) | 88.5 | (36) |
| 濮阳 | NA | | NA | | 153.6 | (17) | 135.6 | (19) | 124.9 | (29) | 123 | (26) | 102.4 | (27) | 103.7 | (26) | 88.9 | (31) | 88.5 | (37) |
| 长治 | NA | | NA | | 121.3 | (43) | 115.7 | (42) | 111 | (50) | 109.9 | (47) | 90.7 | (49) | 96.1 | (35) | 82.3 | (46) | 88.1 | (38) |
| 商丘 | NA | | NA | | 134.2 | (35) | 124.7 | (32) | 127 | (26) | 114.4 | (41) | 94.4 | (40) | 97.1 | (33) | 84.1 | (41) | 87.7 | (39) |
| 保定 | 214.8 | (4) | 224 | (1) | 167 | (10) | 163.6 | (2) | 134 | (14) | 132.4 | (13) | 99.7 | (32) | 89 | (51) | 82.8 | (44) | 87.4 | (40) |
| 驻马店 | NA | | NA | | 136.4 | (34) | 116.8 | (41) | 117 | (43) | 115.6 | (40) | 87.7 | (59) | 84 | (61) | 76.7 | (59) | 86.8 | (41) |
| 济南 | NA | | 174.7 | (6) | 170.9 | (5) | 145.3 | (14) | 132.3 | (16) | 125.7 | (21) | 107.9 | (16) | 106.2 | (19) | 91.1 | (26) | 86.8 | (42) |
| 泰安 | NA | | 137.1 | (31) | 131.2 | (37) | 111 | (47) | 106.3 | (57) | 114 | (42) | 104.9 | (19) | 105.7 | (20) | 90.6 | (28) | 85.9 | (43) |
| 宝鸡 | NA | | 114.9 | (42) | 119.6 | (45) | 108.2 | (53) | 102.7 | (61) | 95.1 | (64) | 87.9 | (57) | 87 | (55) | 79.7 | (53) | 85.3 | (44) |
| 滨州 | NA | | 129.8 | (32) | 131.1 | (38) | 130.2 | (25) | 108.2 | (53) | 104.2 | (54) | 88.6 | (53) | 85.3 | (57) | 83.7 | (42) | 85.2 | (45) |
| 大同 | NA | | 98.8 | (57) | 81.6 | (91) | 84.2 | (77) | 80.9 | (92) | 101.2 | (55) | 88.2 | (55) | 90.2 | (47) | 72.5 | (67) | 85.1 | (46) |
| 临沂 | NA | | NA | | 149.6 | (19) | 122.1 | (34) | 123.6 | (32) | 125.3 | (23) | 113 | (11) | 108.8 | (13) | 90.7 | (27) | 84.8 | (47) |
| 济宁 | NA | | 154.7 | (16) | 156.4 | (16) | 113.5 | (46) | 118.8 | (40) | 109 | (51) | 91.5 | (46) | 94 | (40) | 89.2 | (30) | 84.6 | (48) |
| 榆林 | NA | | NA | | 87.2 | (81) | 82.1 | (82) | 83.4 | (90) | 97 | (61) | 87.9 | (56) | 84.5 | (59) | 75.7 | (61) | 84.2 | (49) |
| 忻州 | NA | | NA | | 83 | (87) | 121.6 | (35) | 106.8 | (56) | 111 | (46) | 79.1 | (66) | 89.2 | (50) | 78.6 | (56) | 83.6 | (50) |
| 淮北 | NA | | NA | | 95.5 | (69) | 94 | (63) | 112.7 | (47) | 96.6 | (62) | 93.5 | (43) | 93.6 | (43) | 87.7 | (33) | 82.1 | (51) |
| 宿州 | NA | | NA | | 94.4 | (71) | 95.3 | (61) | 110 | (51) | 94.8 | (65) | 86.1 | (62) | 89.6 | (48) | 82 | (47) | 81.7 | (52) |
| 亳州 | NA | | NA | | 95.9 | (67) | 96.4 | (59) | 114.2 | (46) | 107.5 | (52) | 89.8 | (51) | 93.1 | (45) | 85.7 | (38) | 80.9 | (53) |
| 唐山 | 176.7 | (8) | 160.5 | (13) | 140.5 | (28) | 131.7 | (24) | 124.7 | (30) | 131 | (14) | 109.1 | (14) | 98.5 | (32) | 85.6 | (40) | 80.4 | (54) |
| 沧州 | 134.7 | (12) | 145.9 | (24) | 120.5 | (44) | 119 | (37) | 111.3 | (49) | 112.8 | (44) | 89.5 | (52) | 88.7 | (52) | 71.4 | (69) | 79.5 | (55) |
| 包头 | NA | | NA | | 110.7 | (52) | 110.7 | (48) | 104 | (58) | 111.8 | (45) | 104.5 | (20) | 93.6 | (42) | 79.1 | (55) | 79.4 | (56) |
| 阜阳 | NA | | NA | | 75.8 | (99) | 102.2 | (56) | 116.7 | (45) | 100.2 | (57) | 87.8 | (58) | 89.4 | (49) | 85.6 | (39) | 78.1 | (57) |
| 廊坊 | 182 | (7) | 160 | (15) | 142.2 | (25) | 116.9 | (40) | 108.1 | (54) | 113.3 | (43) | 86.5 | (61) | 81.4 | (63) | 75.9 | (60) | 76.8 | (58) |
| 潍坊 | NA | | 147.7 | (22) | 141.5 | (27) | 129.9 | (26) | 122.7 | (34) | 117.8 | (37) | 103.5 | (23) | 96.4 | (34) | 79.7 | (52) | 76.5 | (59) |
| 鄂尔多斯 | NA | | NA | | 70.7 | (106) | 66.3 | (108) | 74.1 | (100) | 93.4 | (67) | 76.8 | (70) | 83.6 | (62) | 74.9 | (64) | 76.1 | (60) |
| 淮南 | NA | | NA | | 87.9 | (80) | 90.5 | (71) | 121 | (37) | 99.2 | (59) | 98.8 | (33) | 88.5 | (53) | 87.1 | (36) | 75.8 | (61) |
| 蚌埠 | NA | | NA | | 98.1 | (65) | 94.1 | (62) | 107.2 | (55) | 91.4 | (69) | 87.1 | (60) | 85.3 | (56) | 80.3 | (50) | 75.8 | (62) |
| 延安 | NA | | 126.9 | (34) | 101 | (61) | 93.2 | (66) | 96.9 | (66) | 94.4 | (66) | 84.7 | (65) | 78.4 | (68) | 75 | (63) | 75.6 | (63) |
| 天津 | 153.5 | (10) | 144.7 | (26) | 124.5 | (42) | 109 | (51) | 99.9 | (62) | 101.2 | (56) | 85.3 | (63) | 81 | (64) | 78 | (57) | 75.6 | (64) |
| 东营 | NA | | 147.5 | (23) | 147.2 | (21) | 129 | (28) | 117.6 | (42) | 109.2 | (50) | 93.8 | (42) | 84.6 | (58) | 74.1 | (65) | 75.2 | (65) |
| 呼和浩特 | NA | | NA | | 96.9 | (66) | 92.3 | (69) | 102.9 | (59) | 109.3 | (49) | 94.2 | (41) | 80.4 | (65) | 68.6 | (73) | 74.2 | (66) |
| 信阳 | NA | | 127 | (33) | 113.7 | (49) | 95.6 | (60) | 99.1 | (63) | 99.7 | (58) | 76.2 | (73) | 76.9 | (70) | 70.3 | (71) | 73.1 | (67) |
| 合肥 | 120.1 | (17) | 109.1 | (49) | 95.1 | (70) | 84.8 | (76) | 85 | (86) | 75.3 | (91) | 70.5 | (86) | 68.2 | (81) | 79.2 | (54) | 72.1 | (68) |
| 汉中 | NA | | NA | | 80.1 | (94) | 86.8 | (72) | 86.8 | (78) | 85.4 | (75) | 78.4 | (68) | 79.1 | (66) | 61.6 | (83) | 71.5 | (69) |
| 宿迁 | NA | | NA | | 110.4 | (51) | 81.8 | (84) | 90.4 | (72) | 84.6 | (76) | 78.7 | (67) | 78.8 | (67) | 75.4 | (62) | 71.1 | (70) |
| 北京 | 112 | (19) | 121.5 | (40) | 101.2 | (59) | 104.6 | (55) | 85.3 | (85) | 91.5 | (68) | 71.4 | (82) | 68.1 | (82) | 58.7 | (93) | 67.3 | (71) |
| 铜陵 | NA | | NA | | 92.7 | (74) | 81.4 | (86) | 89.7 | (75) | 75.6 | (90) | 78 | (69) | 72.8 | (72) | 72.7 | (66) | 66.5 | (72) |
| 淮安 | 98.6 | (25) | 102.9 | (55) | 101.1 | (60) | 93.9 | (64) | 96 | (67) | 88.1 | (72) | 75.2 | (76) | 71.8 | (76) | 67.1 | (76) | 65.4 | (73) |
| 商洛 | NA | | NA | | 76.5 | (97) | 71.6 | (102) | 68.4 | (106) | 75.3 | (92) | 62 | (98) | 65.7 | (86) | 54.2 | (97) | 65.3 | (74) |
| 日照 | NA | | 111.9 | (45) | 116.9 | (46) | 99.3 | (58) | 95.1 | (68) | 96 | (63) | 85.2 | (64) | 77.3 | (69) | 69.2 | (72) | 65 | (75) |
| 六安 | NA | | NA | | 91.4 | (77) | 76.6 | (94) | 89.6 | (76) | 88.6 | (71) | 71.8 | (81) | 74.2 | (71) | 72.3 | (68) | 64.7 | (76) |
| 扬州 | 98.6 | (26) | 108.4 | (50) | 103.4 | (56) | 91.4 | (70) | 102.9 | (60) | 89.4 | (70) | 73.2 | (79) | 72.6 | (73) | 67.9 | (74) | 64.4 | (77) |
| 滁州 | NA | | NA | | 93.4 | (73) | 82.3 | (81) | 90.2 | (74) | 83.5 | (78) | 73.2 | (78) | 72 | (74) | 71.2 | (70) | 63.4 | (78) |
| 常州 | 111.7 | (20) | 107.4 | (52) | 104.7 | (54) | 85.6 | (74) | 84 | (89) | 76.9 | (86) | 75.7 | (75) | 70.8 | (77) | 66 | (77) | 62.1 | (79) |
| 南昌 | NA | | 82 | (80) | 80.6 | (88) | 75.4 | (97) | 67.2 | (100) | 67.1 | (89) | 67.5 | (83) | 60.6 | (88) | 61.8 | (80) | | |
| 连云港 | 120.1 | (16) | 112.5 | (44) | 101 | (67) | 91.8 | (83) | 78.5 | (94) | 74.3 | (93) | 63.8 | (93) | 65 | (90) | 65.2 | (78) | 61.7 | (81) |
| 芜湖 | NA | | 97.9 | (58) | 84.4 | (85) | 75.4 | (97) | 86.9 | (77) | 70.2 | (96) | 64 | (92) | 61.2 | (95) | 62.7 | (81) | 61.5 | (82) |
| 秦皇岛 | 128.6 | (14) | 110.1 | (47) | 95.6 | (68) | 94.7 | (65) | 82.2 | (91) | 87.6 | (73) | 74.4 | (77) | 71.9 | (75) | 67.8 | (75) | 61.5 | (83) |
| 安庆 | NA | | NA | | 76.7 | (96) | 77.2 | (92) | 93.4 | (70) | 76 | (88) | 62.9 | (95) | 57 | (101) | 58.8 | (92) | 59.6 | (84) |
| 泰州 | NA | | NA | | 107.9 | (53) | 92.6 | (68) | 86.5 | (80) | 76.9 | (87) | 70.8 | (85) | 62.3 | (94) | 61.1 | (86) | 59.4 | (85) |
| 南京 | 142.3 | (11) | 126.2 | (36) | 98.3 | (64) | 84 | (78) | 86.3 | (81) | 77.2 | (85) | 72.2 | (80) | 65.3 | (87) | 61.4 | (85) | 59.1 | (86) |
| 承德 | 111.7 | (21) | 110.1 | (48) | 86.5 | (82) | 85.2 | (75) | 85.6 | (84) | 86 | (74) | 67 | (90) | 65.3 | (88) | 60.6 | (87) | 57.9 | (87) |
| 马鞍山 | NA | | 107.4 | (53) | 88.5 | (79) | 77.5 | (91) | 90.2 | (73) | 77.3 | (84) | 71.2 | (83) | 65.2 | (89) | 64 | (79) | 57.9 | (88) |
| 镇江 | 122.2 | (15) | 114.3 | (43) | 88.9 | (78) | 83.2 | (80) | 97.2 | (65) | 77.7 | (82) | 76.2 | (72) | 66.5 | (84) | 62.6 | (82) | 57.9 | (89) |
| 青岛 | NA | | 105.3 | (54) | 101.9 | (58) | 85.7 | (73) | 86.6 | (79) | 81.6 | (79) | 76.7 | (71) | 68.6 | (79) | 63.1 | (80) | 57.2 | (90) |
| 乌兰察布 | NA | | NA | | 73.3 | (101) | 68.6 | (104) | 54.4 | (112) | 66.7 | (101) | 51.7 | (108) | 54.3 | (103) | 58.9 | (90) | 56.4 | (91) |
| 烟台 | NA | | 81.3 | (62) | 82.6 | (89) | 76.5 | (96) | 75.6 | (95) | 80 | (80) | 76.1 | (74) | 69.2 | (78) | 61.4 | (84) | 56.1 | (92) |
| 安康 | NA | | 83.3 | (61) | 74.4 | (100) | 64.6 | (109) | 63.2 | (108) | 68.7 | (98) | 59.6 | (101) | 58.2 | (98) | 47.7 | (107) | 55.6 | (93) |
| 九江 | NA | | NA | | 82.9 | (88) | 77.8 | (90) | 80.2 | (93) | 78.7 | (81) | 63.5 | (94) | 63.4 | (93) | 57.8 | (94) | 55.3 | (94) |
| 新余 | NA | | NA | | 75.8 | (98) | 83.8 | (79) | 84.7 | (88) | 70.5 | (95) | 62.2 | (96) | 64.6 | (91) | 59.8 | (89) | 54.8 | (95) |
| 池州 | NA | | NA | | 62.2 | (110) | 76.5 | (95) | 97.5 | (64) | 68.1 | (99) | 59.4 | (102) | 59.4 | (97) | 58.9 | (91) | 54.3 | (96) |
| 萍乡 | NA | | NA | | 92.5 | (75) | 93.2 | (67) | 90.7 | (71) | 73 | (94) | 67.2 | (88) | 65.9 | (85) | 52.8 | (100) | 53.9 | (97) |
| 无锡 | 118.2 | (18) | 110.5 | (46) | 94.1 | (72) | 81.4 | (85) | 84.9 | (87) | 75.8 | (89) | 71.2 | (84) | 64.2 | (92) | 57 | (96) | 53.7 | (98) |
| 张家口 | 98.7 | (24) | NA | | 81.5 | (92) | 81.1 | (87) | 73.6 | (101) | 83.8 | (77) | 67.7 | (87) | 68.3 | (80) | 57.1 | (95) | 52.6 | (99) |
| 盐城 | 99.6 | (23) | 95.4 | (59) | 91.9 | (76) | 76.9 | (93) | 85.6 | (83) | 77.5 | (83) | 64.7 | (91) | 59.5 | (96) | 52.8 | (99) | 52.6 | (100) |
| 宣城 | NA | | NA | | 78.8 | (95) | 72.2 | (99) | 86.2 | (82) | 68.9 | (97) | 60.5 | (99) | 51.9 | (107) | 50 | (103) | 52.2 | (101) |
| 宜春 | NA | | NA | | 64.8 | (108) | 80.4 | (89) | 75.5 | (96) | 61.5 | (106) | 56.6 | (105) | 57.8 | (99) | 53.7 | (98) | 51 | (102) |
| 苏州 | 93.5 | (27) | 93 | (60) | 83.7 | (86) | 71.7 | (100) | 71.9 | (102) | 65.8 | (102) | 60 | (100) | 54.8 | (102) | 50.6 | (102) | 49.9 | (103) |
| 吉安 | NA | | NA | | 59.4 | (112) | 74.1 | (98) | 75.1 | (98) | 65.6 | (103) | 62.2 | (97) | 57.7 | (100) | 47.5 | (108) | 48.3 | (104) |
| 南通 | 101.8 | (22) | 100.3 | (56) | 85.3 | (84) | 66.8 | (106) | 69.1 | (105) | 64.8 | (105) | 58.5 | (103) | 53.7 | (105) | 48 | (106) | 47.1 | (105) |
| 威海 | NA | | 78.1 | (63) | 71.4 | (105) | 64.4 | (111) | 60.9 | (109) | 58.3 | (107) | 57.6 | (104) | 51.4 | (108) | 50.7 | (101) | 46.3 | (106) |
| 抚州 | NA | | NA | | 64.5 | (109) | 66.4 | (107) | 69.9 | (104) | 58 | (108) | 55.1 | (107) | 53 | (106) | 48 | (105) | 45.9 | (107) |
| 景德镇 | NA | | NA | | 73.1 | (103) | 67.1 | (105) | 67.9 | (107) | 56.1 | (109) | 50.6 | (109) | 50.1 | (109) | 46.6 | (109) | 45.8 | (108) |
| 上饶 | NA | | NA | | 73.2 | (102) | 71.6 | (101) | 74.2 | (99) | 65.4 | (104) | 55.9 | (106) | 53.7 | (104) | 48.8 | (104) | 45.6 | (109) |
| 上海 | 82.7 | (28) | 75.8 | (64) | 71.5 | (104) | 59.5 | (112) | 58.1 | (111) | 51.8 | (111) | 50 | (110) | 48.4 | (111) | 45.9 | (110) | 44.4 | (110) |
| 鹰潭 | NA | | NA | | 68.8 | (107) | 64.6 | (110) | 60.7 | (110) | 50.8 | (112) | 48.9 | (111) | 45.1 | (112) | 38.4 | (112) | 42.8 | (111) |
| 赣州 | NA | | NA | | 60.3 | (111) | 70 | (103) | 71.5 | (103) | 55.7 | (110) | 47.3 | (112) | 49.2 | (110) | 40.5 | (111) | 38.3 | (112) |
| 黄山 | NA | | NA | | 51.2 | (113) | 49.8 | (113) | 53.7 | (113) | 43 | (113) | 40.4 | (113) | 40.1 | (113) | 33.5 | (113) | 35.3 | (113) |

图 13: “3+110”城市气象调整后 2013 年至 2022 年 $PM_{10}$ 季节年平均浓度（微克/立方米）年际变化表 (浓度列底纹从红到绿表示季节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)

北京大学环境科学中心

- **$PM_{10-2.5}$ 的浓度**

“3+110”城市 2016 年至 2022 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 2016-2022 年七年整体来看，春季浓度最高，七年平均值为 53.0 微克/立方米；秋冬两季较高，七年平均值分别为 39.5 微克/立方米和 39.9 微克/立方米；夏季浓度最低，七年平均值仅 27.9 微克/立方米。

**从年际变化来看：2016 年至 2022 年，$PM_{10-2.5}$ 平均浓度整体下降趋势缓慢**，2016 年平均值为 44.0 微克/立方米，2021 年平均值为 34.1 微克/立方米，到 2022 年反弹至 36.5 微克/立方米。过去七年平均值只下降了 7.5 微克/立方米，远低于 $PM_{2.5}$ 下降幅度。

**从地理分布来看：地区间差异较大**，2022 年山西、陕西、河南、内蒙古、京津冀和山东全年平均值分别为 52.7、44.1、44.0、43.3、40.4 和 37.9 微克/立方米，而安徽、江苏、江西和上海全年平均值仅 28.5、26.8、20.6 和 18.1 微克/立方米；“3+110”城市中，吕梁 $PM_{10-2.5}$ 浓度最高，年平均值为 79.1 微克/立方米，黄山 $PM_{10-2.5}$ 浓度最低，全年平均值为 14.2 微克/立方米；吕梁、朔州、咸阳、平顶山、渭南和西安 6 市年均值超过 55 微克/立方米；黄山、赣州、萍乡、鹰潭、上海、抚州、吉安和南通 8 市则不超过 20 微克/立方米。

2016 年到 2022 年，有 40 个城市 $PM_{10-2.5}$ 年平均浓度不降反增，其余 73 个城市中有 30 个城市降幅小于 30%。与 $PM_{2.5}$ 相比降幅改善较小，说明**伴随着 $PM_{2.5}$ 治理和浓度水平的降低，$PM_{10-2.5}$ 的下降速度远低于 $PM_{2.5}$ 的下降速度，$PM_{10-2.5}$ 污染也应逐渐被重视。**

## 3.3 二氧化硫

二氧化硫（$SO_2$）是一种无色、有刺激性气味的气体，一般认为无毒或者毒性不大，但是二氧化硫在大气中易被氧化形成 $SO_3$，再与水分子结合生成硫酸分子，经过均相或非均相成核作用，形成硫酸气溶胶，并同时发生化学反应生成硫酸盐。硫酸和硫酸盐可形成硫酸烟雾和酸性降水，造成较大的危害。二氧化硫之所以被认为是重要的大气污染物，原因就在于它参与了硫酸烟雾和酸雨的形成 [18]。大气中二氧化硫半数由人为源产生。人为源中，燃煤约占排放的 60%，尤其是高硫煤的燃烧，是大气中二氧化硫的主要来源。其次，燃油、工业排放也有一定贡献。

在“十一五计划”（2006-2010 年）期间，我国已将二氧化硫的总量减排任务单独列出。2013 年 9 月，国务院印发的“国十条”明确提出“加快推进集中供热、‘煤改气’、‘煤改电’工程建设”、“加快重点行业脱硫、脱硝、除尘改造工程建设”。2014 年以来，我国在北方地区全面实施散煤综合治理，推进冬季清洁取暖。2015 年，我国对燃煤机组全面实施超低排放和节能改造，以降低发电煤耗和污染排放。这些均是降低大气中二氧化硫浓度的重要举措。

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

图 14-15、图 16、图 17和图 18分别展示了“3+110”市二氧化硫经气象调整的季节平均浓度时间序

北京大学统计科学中心

表 3: 我国目前二氧化硫平均浓度标准

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

列图、季节平均浓度地图、一年和七年累计降幅、年度平均浓度及排名。根据上述四图一表，我们可以总结出二氧化硫浓度有如下几个特征：

- **季度评估**

根据图 14-15，研究区域城市中江淮地区春冬两季浓度差异不大，其它区域具有相似的、明显的季节效应，冬季二氧化硫浓度最高，春秋两季次之，夏季最轻。与 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 相比，二氧化硫浓度的季节效应更加明显，冬季浓度与夏季浓度之间的差异更大。

**2015 年春季“3+110”城市二氧化硫浓度均值（标准误差）为 32.9（1.3）微克/立方米，2021 年下降至 10.7（0.3）微克/立方米，2022 年略微下降至 10.4（0.3）微克/立方米。**2022 年春季东营平均浓度最高，为 20.8 微克/立方米；北京最低，为 3.9 微克/立方米。相比 2021 年，2022 年春季有 53 个城市改善，有 60 个城市恶化，其中分别有 12、11、9 和 9 个城市位于山东、安徽、河南和江苏。相比 2021 年，2022 年春季“3+110”城市平均增幅为 0.8%，有 10 个城市增幅超过 30%，其中盐城增幅最大高达 66.9%，恶化较为严重；汉中降幅最大为 45.9%，仅有 9 个城市降幅超过 30%，22 个城市降幅超过 20%。

**2015 年夏季“3+110”城市二氧化硫浓度均值（标准误差）为 21.2（0.9）微克/立方米，2021 年浓度均值为 8.6（0.3）微克/立方米，2022 年略微降至 8.5（0.3）微克/立方米。**2022 年夏季阳泉平均浓度最高，为 18.3 微克/立方米；北京最低，为 3.4 微克/立方米。相比 2021 年，2022 年夏季 52 个城市改善，61 个城市恶化，其中分别有 12、10 和 9 个城市位于山东、河南和安徽。虽然二氧化硫浓度均值有所下降，但相比 2021 年，2022 年夏季“3+110”城市平均增幅为 2.8%。相比 2015 年，有 4 个城市的降幅超过 80%，仅景德镇、宝鸡和榆林不降反增，增幅分别为 30.6%、28.4% 和 23.4%。

**2015 年秋季“3+110”城市二氧化硫浓度均值（标准误差）为 30.9（1.3）微克/立方米，2021 年下降至 10.6（0.3）微克/立方米，2022 年下降至 10.4（0.3）微克/立方米。**2022 年秋季阳泉平均浓度最高，为 21.8 微克/立方米；北京最低，为 3.3 微克/立方米。相比 2021 年，2022 年秋季有 56 个城市改善，有 57 个城市恶化，其中分别有 10、8、8、7 和 7 个城市位于山东、河北、陕西、河南和江苏；“3+110”城市一年降幅的平均值仅为 0.1%，其中江西鹰潭降幅最大，达到了 48.5%，是唯一一个降幅超过 40% 的城市，仅有 7 个城市降幅超过 30%。

**2015 年冬季“3+110”城市二氧化硫浓度均值（标准误差）为 51.6（3.0）微克/立方米，2021 年浓度仅 11.8（0.5）微克/立方米，2022 年反弹至 12.5（0.4）微克/立方米。**2022 年冬季阳泉平均浓度最高，为 27.5 微克/立方米；北京最低，为 3.9 微克/立方米。相比 2021 年，2022 年冬季“3+110”城

北京大学统计科学中心

市一年增幅的平均值为 7.7%，反弹较为明显。驻马店降幅最大为 40.3%，是唯一一个降幅超过 40% 的城市，且仅有两个城市降幅超过 30%；廊坊增幅最大，为 61.7%，有 7 个城市增幅超过 40%，值得关注。相比 2015 年，所有城市浓度下降，且除景德镇、萍乡外降幅均超过 40%，其中邢台的降幅达到了 90.1%，是唯一一个降幅超过 90% 的城市。景德镇降幅仅有 4.9%，这是因为其二氧化硫浓度在 2015 年已处于较低值，所以降幅较低。

- **年度评估：年度变化趋势与城市相对排名**

**根据图 18，2015 年“3+110”城市的二氧化硫浓度均值（标准误差）为 34.2（1.5）微克/立方米，2021 年下降至 10.4（0.3）微克/立方米，2022 年几乎与 2021 年持平，为 10.4（0.3）微克/立方米。“3+110”城市的年均二氧化硫浓度已下降至 10 微克/立方米左右，可见全国层面的二氧化硫治理已取得了显著的成绩。**二氧化硫的排名与 $PM_{10}$、$PM_{2.5}$ 的排名差异较大，如 2022 年二氧化硫年均浓度排名第二的大同市，其年均 $PM_{2.5}$、$PM_{10}$ 浓度仅分别排所有城市的第 88、46 位，颗粒物浓度较低。2022 季节年，有两个城市二氧化硫平均浓度超过 20 微克/立方米，有 13 个城市二氧化硫平均浓度超过 15 微克/立方米。**从图 17中展示的累计降幅来看，相比 2015 年，2022 年“3+110”城市二氧化硫累计降幅均值为 65.5%（1.2%）；相比 2021 年，2022 年“3+110”城市二氧化硫浓度有小幅回升，一年增幅均值为 1.7%（1.3%）。**

年均二氧化硫浓度最高的三个城市分别是阳泉（22 微克/立方米）、大同（20.9 微克/立方米）和包头（17.6 微克/立方米），其中阳泉与大同位于山西省。2022 季节年排名前十八的城市中，有 7 个位于山西，6 个位于山东，3 个位于江西，2 个位于内蒙古。另外，相比其他省份，山西各城市平均二氧化硫浓度最高，年平均值达到 14.4 微克/立方米，其次为临近山西的内蒙古四市（包头、乌兰察布、呼和浩特、鄂尔多斯），年平均值为 14.3 微克/立方米。这表明这些地区应对治理二氧化硫给予更多重视。在 2022 季节年，有 64 个城市年均二氧化硫浓度低于 10 微克/立方米，**而北京的季节年平均浓度最低，仅为 3.6 微克/立方米，是“3+110”城市中唯一年均二氧化硫浓度低于 5 微克/立方米的城市。**

2015-2022 年排名升高（相对恶化）最多的前 20 个城市中，无“2+26”城市，有 3 个城市属于汾渭平原（铜川、宝鸡和渭南），有 4 个城市位于江西（景德镇、萍乡、新余和吉安），且内蒙古四市均在其中。其中铜川、渭南两市颗粒物与二氧化硫的治理速率较缓，排名相对上升。内蒙古和江西部分城市的二氧化硫污染程度原本较轻，随着全国各地污染程度的减轻，该地区已跃升为值得关注的区域。排名下降最多的前 20 个城市中，驻马店、亳州、平顶山、张家口、南通、镇江、常州、淮北、南阳、连云港、商丘和宿州这 12 个城市不属于“2+26”及汾渭平原城市，非重点关注区域城市，仍改善显著。

从累计降幅来看，全部“3+110”城市 2022 年均二氧化硫浓度均小于 2015 年的浓度。七年累计降幅超过 80% 的城市有 11 个，分别为晋城、吕梁、驻马店、运城、邢台、平顶山、保定、淄博、晋中、唐山和洛阳；累计降幅超过 70% 的城市有 48 个，约占总城市数量的一半。大部分城市二氧化硫七年累计降幅较大，河北、河南和山西的累计降幅均超 70%，其中山西降幅最大，达 75.1%。

相比于 2015 年，降幅最小的前二十个城市中分别有 6 个、4 个、3 个和 3 个城市位于安徽、陕西、内蒙古和江西，其中降幅最低的城市为景德镇，仅有 7.5%，是唯一一个降幅低于 30% 的城市，这是因为在 2015 年景德镇市二氧化硫浓度较低，而二氧化硫浓度在这七年变化不大。安徽、陕西、江西的七年累

北京大学环境设计研究中心

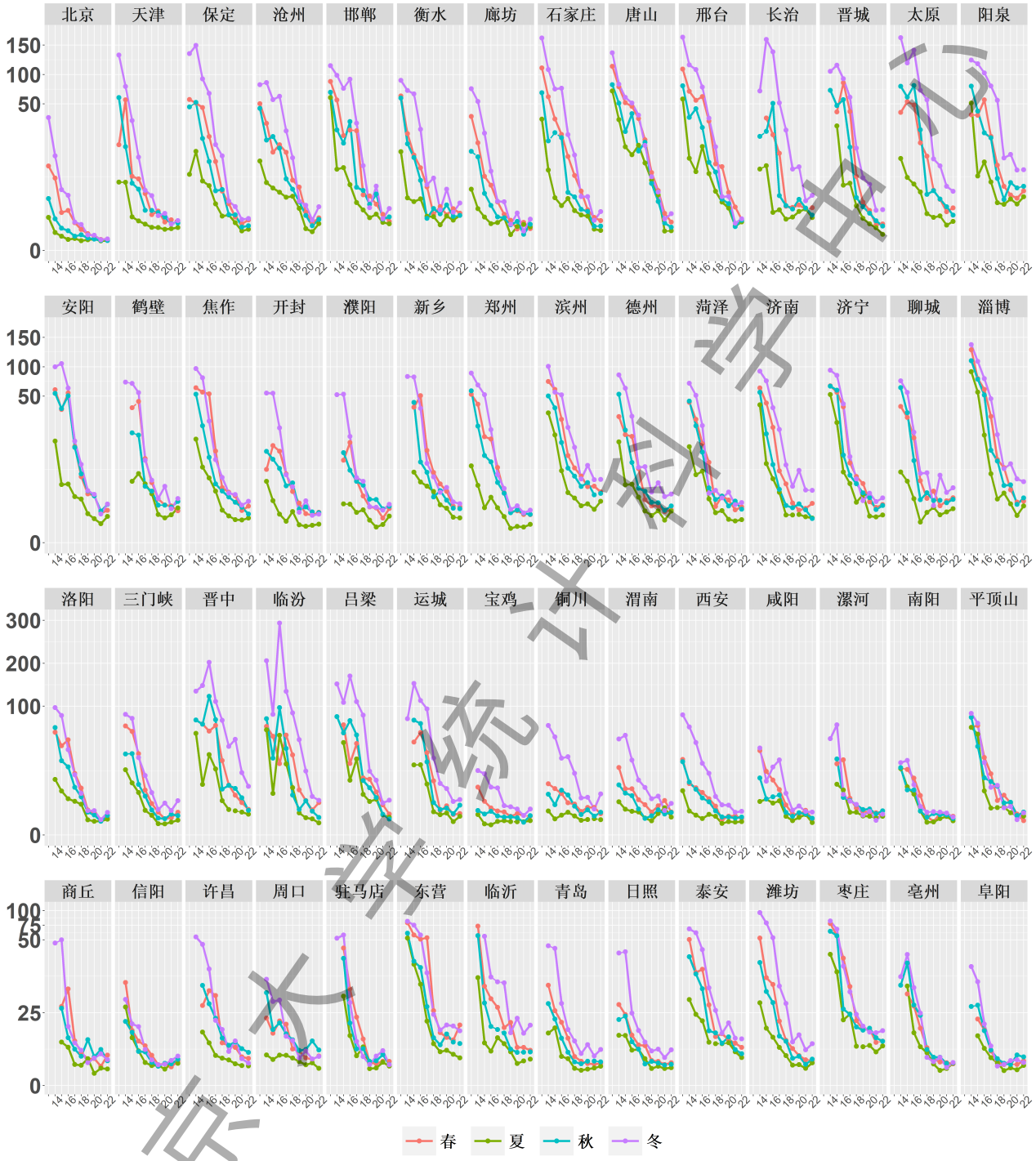



图 14: “3+110”城市气象调整后 2013 年至 2022 年二氧化硫季节平均浓度（微克/立方米）变化序列图，图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

北京大学统计科学中心

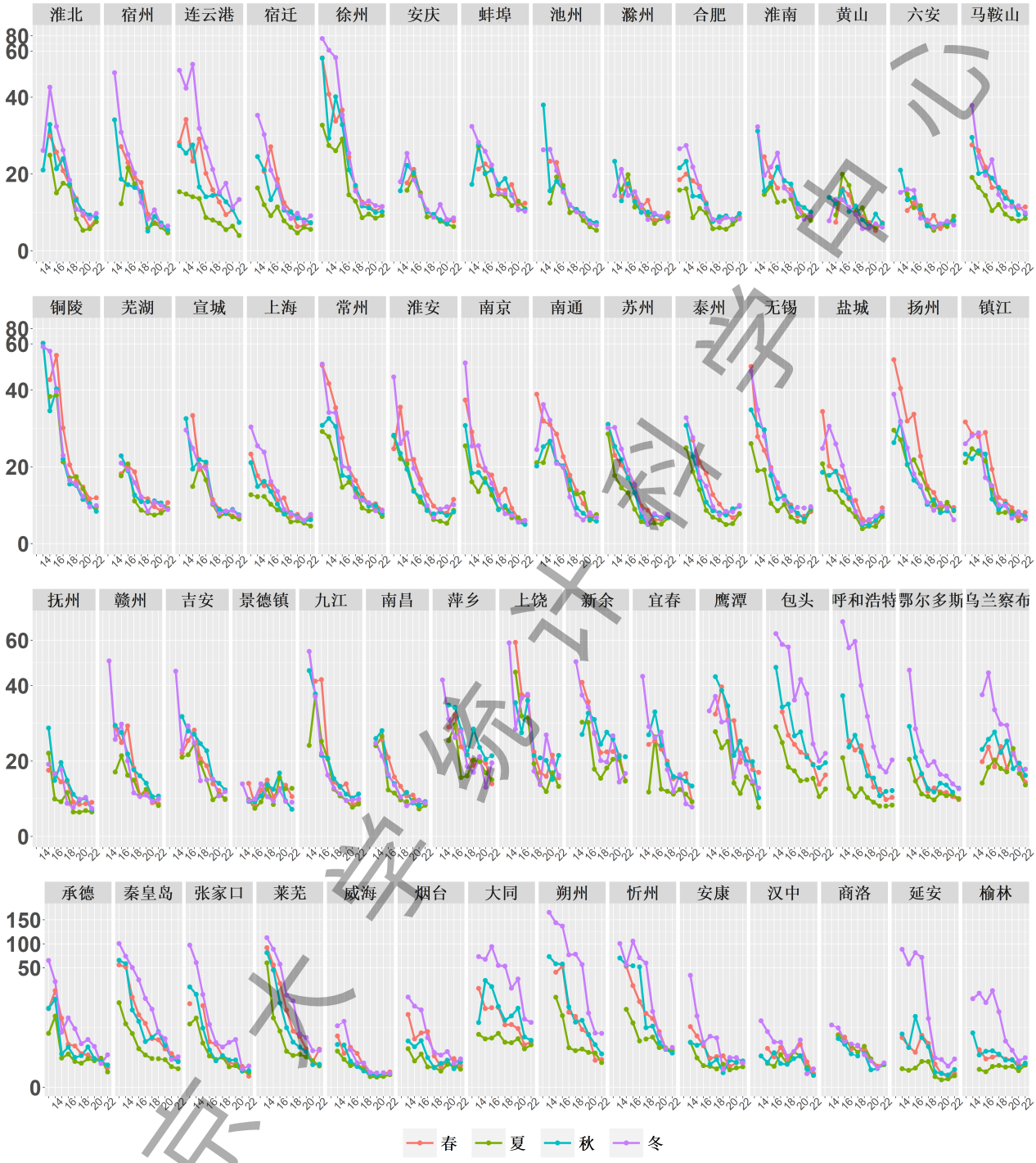



图 15: “3+110”城市气象调整后 2013 年至 2022 年二氧化硫季节平均浓度（微克/立方米）变化序列图，图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

北京大学统计科学中心

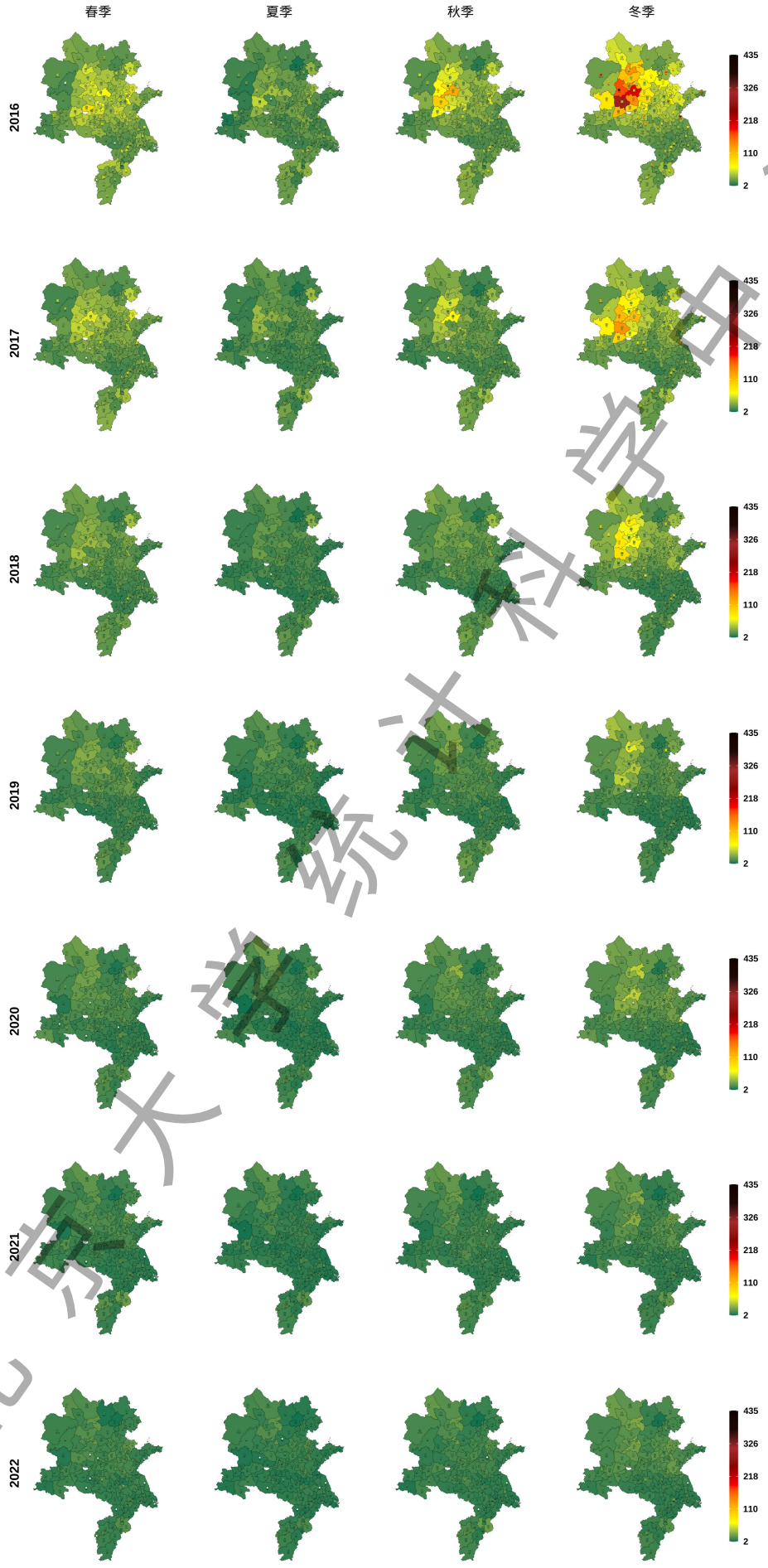



图 16: “3+110”城市气象调整后 2016 年至 2022 年二氧化硫季节平均浓度（微克/立方米）

北京大学统计科学中心

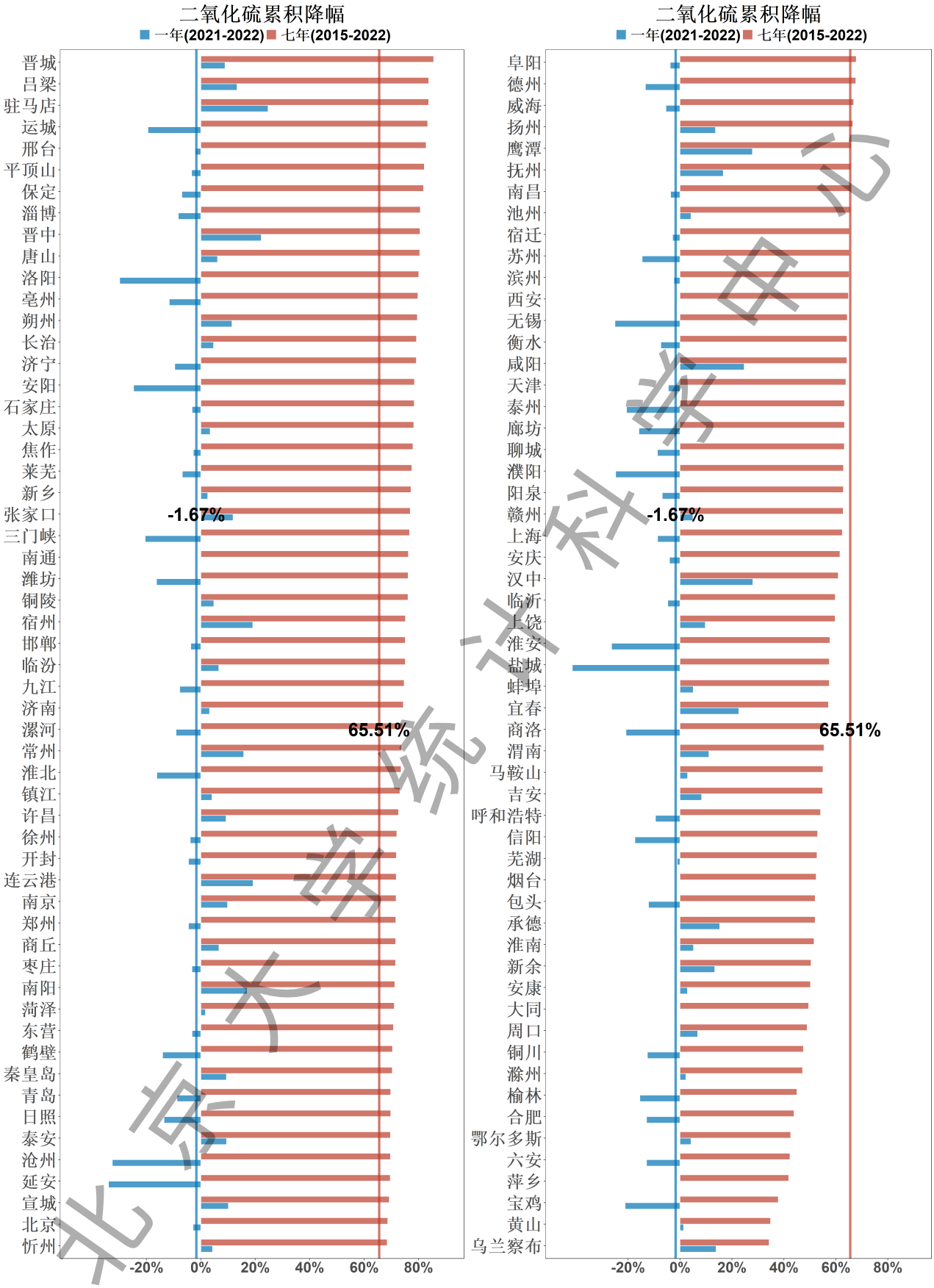



图 17: “3+110”城市气象调整后二氧化硫浓度过去一年（蓝色）、七年（红色）的累计降幅
蓝色和红色竖线分别代表“3+110”城市的一年和七年平均降幅

北京大学统计科学中心

| 城市 | 2013年 | 排名 | 2014年 | 排名 | 2015年 | 排名 | 2016年 | 排名 | 2017年 | 排名 | 2018年 | 排名 | 2019年 | 排名 | 2020年 | 排名 | 2021年 | 排名 | 2022年 | 排名 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 阳泉 | NA | | 75.6 | (5) | 59.3 | (11) | 57.5 | (9) | 45.3 | (5) | 31.5 | (8) | 21.6 | (12) | 23.1 | (4) | 20.6 | (2) | 22 | (1) |
| 大同 | NA | | 41 | (31) | 41.4 | (33) | 47.5 | (14) | 36.2 | (13) | 31.7 | (7) | 29.1 | (2) | 30.9 | (1) | 20.9 | (1) | 20.9 | (2) |
| 包头 | NA | | NA | | 36.7 | (45) | 32.8 | (38) | 26.1 | (27) | 26.6 | (12) | 23.8 | (6) | 19.5 | (11) | 15.7 | (12) | 17.6 | (3) |
| 萍乡 | NA | | NA | | 30.1 | (56) | 30.6 | (41) | 23.9 | (40) | 19.5 | (34) | 21.1 | (13) | 21.2 | (7) | 17.5 | (7) | 17.5 | (4) |
| 滨州 | NA | | 67.5 | (9) | 50.2 | (19) | 38.2 | (24) | 27.9 | (23) | 24 | (13) | 19.1 | (18) | 19.8 | (10) | 17.1 | (8) | 17.5 | (5) |
| 新余 | NA | | NA | | 33.9 | (48) | 33.2 | (35) | 25.9 | (28) | 20.5 | (24) | 22 | (9) | 23.9 | (3) | 19.4 | (3) | 16.8 | (6) |
| 上饶 | NA | | NA | | 41.2 | (34) | 33.4 | (32) | 35.6 | (14) | 20.1 | (29) | 16.4 | (27) | 18.7 | (16) | 18.4 | (4) | 16.6 | (7) |
| 东营 | NA | | 68.7 | (8) | 54.4 | (14) | 46.1 | (16) | 35.3 | (15) | 20.2 | (28) | 15.7 | (33) | 16.8 | (23) | 15.4 | (13) | 15.9 | (8) |
| 淄博 | NA | | 117.2 | (1) | 81.2 | (1) | 57.4 | (10) | 36.8 | (11) | 27 | (11) | 21.8 | (11) | 19.5 | (12) | 14.5 | (17) | 15.7 | (9) |
| 枣庄 | NA | | 67.4 | (10) | 55.2 | (13) | 33.4 | (33) | 28.8 | (22) | 20.1 | (30) | 18 | (20) | 17.8 | (18) | 15.2 | (14) | 15.7 | (10) |
| 忻州 | NA | | NA | | 49.5 | (21) | 57.3 | (11) | 44.5 | (6) | 34 | (6) | 26.8 | (3) | 20.2 | (8) | 16.3 | (11) | 15.6 | (11) |
| 乌兰察布 | NA | | NA | | 23.6 | (79) | 27.8 | (49) | 25 | (31) | 23.5 | (15) | 22.5 | (8) | 21.4 | (6) | 18 | (6) | 15.5 | (12) |
| 聊城 | NA | | 52.8 | (22) | 41.1 | (35) | 29.1 | (47) | 16.6 | (72) | 16.6 | (51) | 14.2 | (46) | 14.9 | (30) | 13.9 | (18) | 15.1 | (13) |
| 朔州 | NA | | NA | | 72 | (3) | 69.4 | (5) | 39.7 | (10) | 37.7 | (2) | 31.3 | (1) | 22.5 | (5) | 16.6 | (9) | 14.7 | (14) |
| 长治 | NA | | NA | | 68.6 | (5) | 60.5 | (8) | 29.3 | (19) | 20.5 | (26) | 17 | (23) | 18.7 | (17) | 14.9 | (15) | 14.2 | (15) |
| 太原 | NA | | 80.3 | (4) | 64.9 | (6) | 73.7 | (4) | 42.7 | (7) | 30.2 | (9) | 20.8 | (14) | 18.9 | (15) | 14.6 | (16) | 14.1 | (16) |
| 晋中 | NA | | NA | | 72 | (4) | 102.7 | (2) | 66.4 | (1) | 34.8 | (5) | 24.9 | (4) | 24 | (2) | 18 | (5) | 14 | (17) |
| 临沂 | NA | | NA | | 33.3 | (49) | 24.8 | (59) | 24.5 | (35) | 21.9 | (20) | 16 | (31) | 13.8 | (40) | 12.8 | (21) | 13.4 | (18) |
| 衡水 | 61.7 | (8) | 41.7 | (30) | 37 | (44) | 27.7 | (51) | 16.6 | (71) | 15.7 | (56) | 12.5 | (54) | 15.1 | (28) | 12.3 | (24) | 13.2 | (19) |
| 鹤壁 | NA | | NA | | 44 | (29) | 41.1 | (20) | 24 | (39) | 19 | (36) | 13.1 | (51) | 13.3 | (45) | 11.4 | (36) | 13 | (20) |
| 德州 | NA | | 54.1 | (21) | 39.6 | (37) | 31.7 | (40) | 21.3 | (51) | 17.2 | (45) | 13.2 | (50) | 14.4 | (35) | 11.3 | (37) | 12.8 | (21) |
| 呼和浩特 | NA | | NA | | 27.9 | (62) | 29.7 | (43) | 24.8 | (33) | 19.3 | (35) | 15.4 | (37) | 12.5 | (52) | 11.7 | (30) | 12.8 | (22) |
| 济宁 | NA | | 70.3 | (7) | 60.7 | (9) | 36.9 | (25) | 24.9 | (32) | 19.6 | (33) | 17 | (25) | 13.8 | (39) | 11.5 | (34) | 12.6 | (23) |
| 莱芜 | NA | | 86.5 | (3) | 55.7 | (12) | 39.9 | (21) | 27.7 | (24) | 23 | (17) | 18.6 | (19) | 16.2 | (25) | 11.7 | (29) | 12.5 | (24) |
| 泰安 | NA | | 48.2 | (27) | 40.9 | (36) | 35.5 | (28) | 23.7 | (41) | 18.8 | (38) | 16.2 | (29) | 17.2 | (21) | 13.7 | (19) | 12.4 | (25) |
| 运城 | NA | | NA | | 74.1 | (2) | 63.3 | (7) | 47.5 | (4) | 21.7 | (21) | 14.2 | (45) | 14.5 | (34) | 10.3 | (46) | 12.3 | (26) |
| 济南 | NA | | 65 | (12) | 46.9 | (23) | 33.5 | (30) | 24.6 | (34) | 17.2 | (46) | 13.5 | (48) | 14.7 | (31) | 12.4 | (23) | 12 | (27) |
| 鹰潭 | NA | | NA | | 34.9 | (47) | 33 | (37) | 30.4 | (18) | 20.5 | (27) | 19.6 | (16) | 19.5 | (13) | 16.5 | (10) | 11.9 | (28) |
| 铜川 | NA | | 27.3 | (52) | 22.3 | (84) | 21.3 | (73) | 20.2 | (55) | 16.4 | (52) | 11.1 | (65) | 12.3 | (54) | 10.4 | (45) | 11.7 | (29) |
| 安阳 | NA | | 62.5 | (15) | 54.1 | (15) | 47.3 | (15) | 28.9 | (21) | 21.9 | (19) | 15.5 | (35) | 14.2 | (38) | 9.3 | (64) | 11.6 | (30) |
| 濮阳 | NA | | NA | | 31.3 | (54) | 27.1 | (53) | 18.7 | (63) | 16.9 | (49) | 11.8 | (60) | 11 | (65) | 9.3 | (62) | 11.6 | (31) |
| 沧州 | 53 | (10) | 47.6 | (28) | 37.6 | (42) | 38.4 | (23) | 29.2 | (20) | 23.7 | (14) | 17.3 | (22) | 11.9 | (56) | 8.6 | (77) | 11.4 | (32) |
| 新乡 | NA | | NA | | 50.1 | (20) | 36.2 | (27) | 25.5 | (30) | 19.9 | (31) | 17 | (24) | 15.7 | (27) | 11.7 | (31) | 11.4 | (33) |
| 菏泽 | NA | | 50.2 | (25) | 39.1 | (38) | 32.3 | (39) | 19.5 | (60) | 13.8 | (69) | 14.5 | (42) | 13.1 | (47) | 11.5 | (35) | 11.3 | (34) |
| 鄂尔多斯 | NA | | NA | | 19.7 | (95) | 16.7 | (99) | 13.5 | (95) | 13.5 | (71) | 13.5 | (49) | 13 | (49) | 11.8 | (28) | 11.3 | (35) |
| 临汾 | NA | | 94.7 | (2) | 45.5 | (24) | 117.5 | (1) | 63.6 | (2) | 40.6 | (1) | 21.9 | (10) | 17.5 | (19) | 12.1 | (25) | 11.3 | (36) |
| 焦作 | NA | | 62.4 | (16) | 50.9 | (17) | 36.6 | (26) | 24.3 | (36) | 17.4 | (42) | 14.7 | (41) | 13.6 | (41) | 10.9 | (40) | 11.2 | (37) |
| 邯郸 | 83.4 | (4) | 56 | (18) | 45.1 | (26) | 49.8 | (13) | 30.5 | (17) | 20.5 | (25) | 15 | (39) | 17.3 | (20) | 10.8 | (41) | 11.2 | (38) |
| 蚌埠 | NA | | NA | | 26.1 | (66) | 22.2 | (68) | 19.7 | (56) | 15.8 | (54) | 16 | (32) | 14.6 | (32) | 11.7 | (33) | 11.1 | (39) |
| 渭南 | NA | | 28.8 | (44) | 24.9 | (72) | 21.4 | (72) | 16.3 | (77) | 13 | (77) | 10.8 | (69) | 13.4 | (44) | 12.5 | (22) | 11.1 | (40) |
| 吉安 | NA | | NA | | 24.4 | (75) | 26.1 | (56) | 26.2 | (26) | 19.9 | (32) | 17.9 | (21) | 13.5 | (42) | 12 | (27) | 11 | (41) |
| 徐州 | 52.8 | (11) | 39.7 | (32) | 37.9 | (41) | 33.5 | (29) | 21.4 | (50) | 15.5 | (58) | 11.3 | (63) | 11.4 | (59) | 10.2 | (48) | 10.6 | (42) |
| 三门峡 | NA | | 50.7 | (24) | 45.5 | (25) | 29.4 | (44) | 19.6 | (57) | 13.8 | (68) | 8.9 | (88) | 8.8 | (87) | 8.8 | (74) | 10.6 | (43) |
| 秦皇岛 | 64.4 | (6) | 52.7 | (23) | 35.8 | (46) | 29.8 | (42) | 24.2 | (37) | 21.6 | (22) | 19.5 | (17) | 16.4 | (24) | 11.7 | (32) | 10.6 | (44) |
| 榆林 | NA | | NA | | 19.1 | (100) | 17.3 | (95) | 19.3 | (61) | 17.1 | (48) | 12.8 | (52) | 11.9 | (57) | 9.1 | (66) | 10.5 | (45) |
| 吕梁 | NA | | NA | | 64 | (7) | 74 | (3) | 58.8 | (3) | 37.5 | (3) | 23.3 | (7) | 19.9 | (9) | 12 | (26) | 10.4 | (46) |
| 邢台 | 102.9 | (1) | 66.1 | (11) | 59.9 | (10) | 54.5 | (12) | 36.4 | (12) | 27.9 | (10) | 20.2 | (15) | 17.1 | (22) | 10.1 | (49) | 10.3 | (47) |
| 安康 | NA | | 27.5 | (51) | 20.3 | (92) | 15.9 | (102) | 13 | (101) | 13.3 | (73) | 9.2 | (85) | 10 | (73) | 10.4 | (43) | 10.1 | (48) |
| 潍坊 | NA | | 55 | (20) | 42 | (31) | 33.3 | (34) | 21.6 | (49) | 17.3 | (44) | 11 | (66) | 11.2 | (61) | 8.6 | (78) | 10 | (49) |
| 商洛 | NA | | NA | | 22.3 | (83) | 19.4 | (83) | 16.4 | (74) | 15.7 | (55) | 15.2 | (38) | 10.5 | (67) | 8.2 | (82) | 9.9 | (50) |
| 铜陵 | NA | | NA | | 41.5 | (32) | 41.9 | (19) | 24.1 | (38) | 17.4 | (43) | 16.1 | (30) | 13.2 | (46) | 10.4 | (44) | 9.9 | (51) |
| 景德镇 | NA | | NA | | 10.7 | (112) | 8.8 | (113) | 11.5 | (107) | 13 | (76) | 10.2 | (76) | 14.3 | (36) | 11.2 | (38) | 9.9 | (52) |
| 宜春 | NA | | NA | | 23.1 | (81) | 27.8 | (50) | 21.9 | (46) | 17.2 | (47) | 13.6 | (47) | 15 | (29) | 12.8 | (20) | 9.9 | (53) |
| 烟台 | NA | | 26 | (54) | 20.6 | (90) | 22.2 | (69) | 16.3 | (76) | 11.1 | (89) | 9.7 | (82) | 11.8 | (58) | 9.8 | (55) | 9.8 | (54) |
| 马鞍山 | NA | | 28.5 | (46) | 21.8 | (88) | 19.1 | (84) | 17.4 | (70) | 15 | (62) | 12.5 | (53) | 11.1 | (62) | 10.1 | (51) | 9.8 | (55) |
| 九江 | NA | | NA | | 38.4 | (39) | 27.6 | (52) | 19.5 | (58) | 13.8 | (70) | 12.1 | (58) | 11.1 | (64) | 9 | (68) | 9.7 | (56) |
| 淮安 | 31.1 | (20) | 26.8 | (53) | 22.7 | (82) | 17.3 | (94) | 13.9 | (92) | 10.1 | (98) | 7.7 | (102) | 7.9 | (99) | 7.6 | (91) | 9.6 | (57) |
| 石家庄 | 96.7 | (3) | 58.8 | (17) | 44.5 | (28) | 42.4 | (18) | 27.3 | (25) | 22.5 | (18) | 16.2 | (28) | 14.3 | (37) | 9.3 | (65) | 9.6 | (58) |
| 漯河 | NA | | NA | | 37.2 | (43) | 23.1 | (61) | 14.9 | (86) | 12.9 | (79) | 10.3 | (75) | 10.5 | (66) | 8.8 | (72) | 9.6 | (59) |
| 周口 | NA | | 25.5 | (56) | 18.8 | (101) | 20.9 | (74) | 16.5 | (73) | 13.3 | (72) | 10.4 | (72) | 10.2 | (70) | 10.3 | (47) | 9.6 | (60) |
| 承德 | 38.4 | (15) | 37.8 | (33) | 19.6 | (96) | 19.5 | (82) | 16.3 | (75) | 13.9 | (67) | 15.6 | (34) | 13.1 | (48) | 11.1 | (39) | 9.4 | (61) |
| 芜湖 | NA | | 21.8 | (59) | 19.9 | (94) | 19.8 | (80) | 14.6 | (89) | 11.9 | (90) | 9.7 | (81) | 9.8 | (75) | 9.3 | (63) | 9.4 | (62) |
| 赣州 | NA | | NA | | 25.3 | (70) | 25.9 | (57) | 21.9 | (47) | 15.6 | (57) | 12.1 | (57) | 12.4 | (53) | 9.9 | (52) | 9.4 | (63) |
| 天津 | 63.2 | (7) | 48.7 | (26) | 26 | (67) | 21.8 | (70) | 15.6 | (80) | 13.1 | (75) | 11.5 | (62) | 10.2 | (71) | 9 | (69) | 9.4 | (64) |
| 保定 | 66.9 | (5) | 71.8 | (6) | 50.8 | (18) | 39.8 | (22) | 25.7 | (29) | 21.2 | (23) | 14.3 | (43) | 12 | (55) | 8.6 | (79) | 9.2 | (65) |
| 唐山 | 101.4 | (2) | 64.5 | (14) | 47.1 | (22) | 44.9 | (17) | 40.2 | (9) | 35.1 | (4) | 24.6 | (5) | 19 | (14) | 9.8 | (54) | 9.2 | (66) |
| 晋城 | NA | | NA | | 63.7 | (8) | 64.5 | (6) | 41.7 | (8) | 23.3 | (16) | 16.8 | (26) | 14.5 | (33) | 10.1 | (50) | 9.2 | (67) |
| 开封 | NA | | 33 | (38) | 32.7 | (50) | 26.4 | (55) | 18.3 | (65) | 16.9 | (50) | 10.4 | (73) | 10.5 | (68) | 8.8 | (71) | 9.2 | (68) |
| 郑州 | 56.8 | (9) | 43.9 | (29) | 32.5 | (52) | 29.3 | (46) | 20.4 | (54) | 15.3 | (59) | 9.3 | (83) | 10 | (72) | 8.8 | (73) | 9.2 | (69) |
| 宝鸡 | NA | | 18.3 | (64) | 14.8 | (109) | 12.7 | (111) | 12.1 | (104) | 9.9 | (100) | 9.1 | (86) | 9.1 | (84) | 7.6 | (90) | 9.2 | (70) |
| 平顶山 | NA | | 64.7 | (13) | 51 | (16) | 29.3 | (45) | 22.1 | (45) | 18.7 | (39) | 14.8 | (40) | 13.4 | (43) | 8.8 | (75) | 9.1 | (71) |
| 无锡 | 38 | (17) | 28.2 | (49) | 25.3 | (71) | 16.9 | (97) | 12.7 | (102) | 11.5 | (85) | 8.8 | (89) | 7.6 | (101) | 7.2 | (98) | 9 | (72) |
| 淮南 | NA | | NA | | 18.6 | (103) | 18.9 | (86) | 19.1 | (62) | 16.1 | (53) | 15.4 | (36) | 11.1 | (63) | 9.5 | (60) | 9 | (73) |
| 泰州 | NA | | 34.4 | (35) | 24 | (77) | 17.3 | (93) | 13.2 | (99) | 9.5 | (103) | 8 | (101) | 7.2 | (104) | 7.3 | (96) | 8.8 | (74) |
| 合肥 | 20.6 | (28) | 21.7 | (60) | 15.7 | (107) | 14.6 | (105) | 11.4 | (108) | 7.3 | (111) | 7.5 | (103) | 8.1 | (96) | 7.8 | (87) | 8.8 | (75) |
| 许昌 | NA | | NA | | 32.2 | (53) | 28.8 | (48) | 21.7 | (48) | 14.9 | (63) | 12 | (59) | 12.7 | (50) | 9.7 | (57) | 8.8 | (76) |
| 信阳 | NA | | 28.5 | (47) | 18.7 | (102) | 14.8 | (104) | 11.4 | (109) | 8.5 | (106) | 7 | (107) | 7 | (105) | 7.5 | (92) | 8.8 | (77) |
| 廊坊 | 44 | (13) | 34.2 | (36) | 24 | (76) | 18.4 | (88) | 13.6 | (94) | 12.8 | (81) | 8.3 | (96) | 9.5 | (77) | 7.6 | (88) | 8.8 | (78) |
| 洛阳 | NA | | 55.2 | (19) | 43.7 | (30) | 33.2 | (36) | 23.7 | (42) | 18.3 | (40) | 10.2 | (78) | 9.4 | (80) | 6.7 | (106) | 8.7 | (79) |
| 南昌 | NA | | NA | | 25.4 | (69) | 15.5 | (100) | 13.7 | (93) | 11 | (91) | 10 | (79) | 9.6 | (76) | 8.4 | (80) | 8.7 | (80) |
| 青岛 | NA | | 32.1 | (40) | 28.8 | (60) | 19 | (85) | 14 | (91) | 9.8 | (101) | 8 | (100) | 8.9 | (86) | 8 | (85) | 8.7 | (81) |
| 淮北 | NA | | NA | | 32.6 | (51) | 23.6 | (60) | 22.2 | (44) | 17.5 | (41) | 11.5 | (61) | 8.7 | (89) | 7.4 | (95) | 8.6 | (82) |
| 滁州 | NA | | NA | | 16.1 | (106) | 17.2 | (96) | 13.4 | (97) | 11.2 | (87) | 10.2 | (77) | 8.6 | (90) | 8.7 | (76) | 8.5 | (83) |
| 日照 | NA | | 28.3 | (48) | 27.8 | (63) | 17.3 | (92) | 14.4 | (90) | 11.3 | (86) | 8.7 | (92) | 8.8 | (88) | 7.4 | (94) | 8.4 | (84) |
| 商丘 | NA | | NA | | 29.6 | (57) | 20.7 | (75) | 12.4 | (103) | 10.1 | (97) | 10.5 | (70) | 8.2 | (94) | 9 | (70) | 8.4 | (85) |
| 西安 | 42.5 | (14) | 27.9 | (50) | 23.9 | (78) | 19.5 | (81) | 17.7 | (68) | 12.9 | (80) | 8.7 | (90) | 9.3 | (81) | 8.4 | (81) | 8.4 | (86) |
| 阜阳 | NA | | NA | | 25.8 | (68) | 18 | (89) | 11.8 | (105) | 8 | (109) | 6.8 | (108) | 7.3 | (102) | 8 | (84) | 8.3 | (87) |
| 扬州 | 35.7 | (18) | 32.8 | (39) | 24.5 | (74) | 22.6 | (65) | 17.7 | (67) | 12.6 | (82) | 10.9 | (68) | 9.2 | (82) | 9.5 | (58) | 8.2 | (88) |
| 盐城 | 24.6 | (26) | 20.7 | (61) | 19.3 | (99) | 15.6 | (103) | 11.7 | (106) | 8.7 | (105) | 5.1 | (112) | 5.3 | (111) | 5.8 | (109) | 8.2 | (89) |
| 连云港 | 29.5 | (22) | 29.2 | (43) | 28.4 | (61) | 22.8 | (63) | 17.5 | (69) | 14.9 | (64) | 12.5 | (55) | 11.3 | (60) | 9.9 | (53) | 8 | (90) |
| 常州 | 38.3 | (16) | 34.1 | (37) | 30.5 | (55) | 20 | (78) | 18.1 | (66) | 14.2 | (65) | 11.3 | (64) | 9.8 | (74) | 9.5 | (59) | 8 | (91) |
| 咸阳 | NA | | 30.5 | (42) | 22.1 | (86) | 22.5 | (66) | 22.7 | (43) | 13.2 | (74) | 9.2 | (84) | 10.4 | (69) | 10.5 | (42) | 7.9 | (92) |
| 六安 | NA | | NA | | 13.7 | (110) | 13.3 | (109) | 10.2 | (112) | 7.1 | (112) | 6.7 | (109) | 6.7 | (108) | 7 | (100) | 7.9 | (93) |
| 南阳 | NA | | 31.8 | (41) | 27.2 | (64) | 22.5 | (67) | 13.5 | (96) | 8.4 | (108) | 8.3 | (97) | 9.5 | (78) | 9.4 | (61) | 7.8 | (94) |
| 安庆 | NA | | NA | | 20.3 | (93) | 19.9 | (79) | 14.7 | (88) | 10 | (99) | 9.1 | (87) | 9 | (85) | 7.5 | (93) | 7.8 | (95) |
| 亳州 | NA | | NA | | 38.1 | (40) | 26.7 | (54) | 20.5 | (53) | 11.6 | (84) | 8.6 | (93) | 8.2 | (95) | 6.9 | (104) | 7.7 | (96) |
| 延安 | NA | | 34.9 | (34) | 24.7 | (73) | 33.4 | (31) | 31.3 | (16) | 18.8 | (37) | 8.2 | (98) | 6.6 | (109) | 5.6 | (112) | 7.5 | (97) |
| 抚州 | NA | | NA | | 21.9 | (87) | 14.5 | (106) | 15.3 | (82) | 12.5 | (83) | 8.6 | (94) | 8.6 | (91) | 9 | (67) | 7.5 | (98) |
| 驻马店 | NA | | NA | | 44.9 | (27) | 25 | (58) | 15.4 | (81) | 13 | (78) | 7.3 | (104) | 8 | (97) | 9.7 | (56) | 7.3 | (99) |
| 宿迁 | NA | | NA | | 21 | (89) | 17.7 | (91) | 16 | (79) | 10.5 | (94) | 8.7 | (91) | 7.3 | (103) | 7.1 | (99) | 7.3 | (100) |
| 宣城 | NA | | NA | | 23.1 | (80) | 20.5 | (76) | 19.5 | (59) | 10.7 | (93) | 8.2 | (99) | 8.2 | (93) | 7.9 | (86) | 7.1 | (101) |
| 苏州 | 30.2 | (21) | 24.1 | (57) | 20.4 | (91) | 16.7 | (98) | 13.2 | (100) | 7.8 | (110) | 6 | (110) | 6.7 | (107) | 6.2 | (107) | 7.1 | (102) |
| 镇江 | 25.5 | (25) | 25.9 | (55) | 26.1 | (65) | 22.7 | (64) | 15.1 | (83) | 9.8 | (102) | 9.9 | (80) | 8 | (98) | 7.3 | (97) | 7 | (103) |
| 南通 | 26.2 | (23) | 28.6 | (45) | 29.1 | (58) | 22.9 | (62) | 20.7 | (52) | 15.1 | (61) | 10.9 | (67) | 9.4 | (79) | 6.9 | (103) | 6.9 | (104) |
| 黄山 | NA | | NA | | 10.6 | (113) | 16.3 | (101) | 13.3 | (98) | 10.2 | (96) | 8.5 | (95) | 6.5 | (110) | 7 | (101) | 6.9 | (105) |
| 张家口 | 50.2 | (12) | NA | | 29.1 | (59) | 18.5 | (87) | 14.9 | (85) | 13.9 | (66) | 12.4 | (56) | 12.6 | (51) | 7.6 | (89) | 6.7 | (106) |
| 池州 | NA | | NA | | 19.5 | (98) | 20.3 | (77) | 16.1 | (78) | 11 | (92) | 10.5 | (71) | 9.1 | (83) | 7 | (102) | 6.7 | (107) |
| 上海 | 21.9 | (27) | 17.6 | (65) | 16.8 | (105) | 13.9 | (107) | 11 | (110) | 9.1 | (104) | 7.2 | (106) | 6.8 | (106) | 5.8 | (110) | 6.3 | (108) |
| 汉中 | NA | | NA | | 15.1 | (108) | 13.8 | (108) | 14.8 | (87) | 11.1 | (88) | 14.2 | (44) | 16 | (26) | 8.2 | (83) | 5.9 | (109) |
| 威海 | NA | | 20.1 | (62) | 17.8 | (104) | 13.2 | (110) | 10.7 | (111) | 8.5 | (107) | 5.5 | (111) | 5.1 | (112) | 5.6 | (111) | 5.9 | (110) |
| 南京 | 35.2 | (19) | 22.2 | (58) | 19.5 | (97) | 17.9 | (90) | 15.1 | (84) | 10.5 | (95) | 10.3 | (74) | 7.8 | (100) | 6.1 | (108) | 5.5 | (111) |
| 宿州 | NA | | NA | | 22.2 | (85) | 21.8 | (71) | 18.3 | (64) | 15.3 | (60) | 7.2 | (105) | 8.5 | (92) | 6.8 | (105) | 5.5 | (112) |
| 北京 | 25.8 | (24) | 18.5 | (63) | 11.5 | (111) | 10.7 | (112) | 7 | (113) | 6.2 | (113) | 4.7 | (113) | 4.4 | (113) | 3.5 | (113) | 3.6 | (113) |

图 18: “3+110”城市气象调整后 2013 年至 2022 年二氧化硫季节年平均浓度（微克/立方米）年际变化表 (浓度列底纹从红到绿表示季节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)

北京大学环境科学中心

计降幅也相对较低，分别为 59.6%、55.1% 和 55.1%，而内蒙古自治区的累计降幅最低，为 45.8%。降幅最小的前二十个城市中有两个城市（宝鸡、铜川）属于汾渭平原城市，这些城市较早开始污染治理，但改善相对不足。此外，过去一年间，有 59 个城市二氧化硫年均浓度相比上一年有所增长，其中增幅最高的是盐城，相比 2021 年增长了 41.4%。这可能是因为受到 2022 年末疫情防控措施调整的影响，二氧化硫排放量有所回升，所以超过半数的城市二氧化硫年均浓度在过去一年中不降反增。

**上述关于二氧化硫年度趋势的讨论说明，过去七年区域内二氧化硫浓度整体改善显著。山西虽是年均二氧化硫浓度最高的区域，近年来已形成稳定的下降趋势，且下降幅度较大。相较而言，内蒙古四市的年均二氧化硫浓度也较高，且二氧化硫治理未受重视，需要更多关注。江西的整体污染水平相对较低，二氧化硫年均浓度稳定下降，但随着全国空气质量整体向好，省内部分城市（如萍乡）需要重点关注。**

## 3.4 一氧化碳

一氧化碳（CO）是一种无色、无味、无臭的气体，是主要并且排放量最大的大气污染物之一 [18]，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 19-20、图 21、图 22和图 23分别展示了“3+110”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，七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 19-20，安徽江苏上海两省一市一氧化碳四季浓度较低，无显著季节差异。其他地区一般以冬季浓度最高，春秋季节次之，夏季浓度最低。

**2015 年春季“3+110”城市一氧化碳浓度均值（标准误差）为 1.18（0.42）毫克/立方米，2021 年下降至 0.71（0.15）毫克/立方米，2022 年春季改善微弱，为 0.68（0.13）毫克/立方米。**2022 年春季萍乡平均浓度最高，为 1.18 毫克/立方米；张家口浓度最低，为 0.40 毫克/立方米。相比 2021 年，2022

北京大学统计科学中心

年春季有 76 个城市改善，37 个城市恶化，后者主要分布在山东和陕西，分别有 8 和 6 个城市。“3+110”城市一年降幅的平均值为 4.7%，其中承德降幅最大，为 39.5%，仅 11 个城市降幅超过 20%。

**2015 年夏季“3+110”城市一氧化碳浓度均值（标准误差）为 0.96（0.35）毫克/立方米，2021 年下降至 0.69（0.16）毫克/立方米，2022 年夏季继续下降至 0.63（0.15）毫克/立方米。**2022 年夏季鹤壁平均浓度最高，为 1.04 毫克/立方米；张家口浓度最低，仅 0.32 毫克/立方米。相比 2021 年，“3+110”城市一年降幅的平均值达 8.8%，承德降幅最大为 43.0%。区域内有 79 个城市浓度下降，34 个城市恶化，其中淮安的增幅达到了 50.9%，淮安、九江、保定和鹤壁的增幅超过 30%。

**2015 年秋季“3+110”城市一氧化碳浓度均值（标准误差）为 1.24（0.42）毫克/立方米，2021 年下降至 0.80（0.18）毫克/立方米，2022 年秋季继续下降至 0.74（0.15）毫克/立方米。**2022 年秋季莱芜浓度最高，为 1.11 毫克/立方米；黄山浓度最低，为 0.35 毫克/立方米。相比 2021 年，2022 年秋季 81 个城市改善，32 个城市恶化，“3+110”城市平均降幅达到 8.3%。

**2015 年冬季“3+110”城市一氧化碳浓度均值（标准误差）为 1.87（0.80）毫克/立方米，2021 年下降至 0.94（0.18）毫克/立方米，2022 年冬季改善微弱，为 0.93（0.21）毫克/立方米。**2022 年冬季临汾浓度最高，为 1.57 毫克/立方米；北京浓度最低，为 0.56 毫克/立方米。相比 2021 年，“3+110”城市一年降幅的平均值为 1.7%，其中商丘降幅最大，为 28.4%；有 3 个城市降幅超过 20%。2022 年冬季有 67 个城市改善，46 个城市恶化。

- 年度评估：年度变化趋势与城市相对排名

**根据图 23，2015 年“3+110”城市的一氧化碳浓度均值（标准误差）为 1.32（0.45）毫克/立方米，2021 年下降至 0.78（0.15）毫克/立方米，2022 年进一步下降至 0.74（0.14）毫克/立方米。2022 年，有 9 个城市一氧化碳季节年均浓度高于 1 毫克/立方米，较 2021 年减少了 4 个。从累计降幅来看，根据图 22，相比 2015 年，2022 年“3+110”城市一氧化碳累计降幅均值为 38.1%（21.0%）；相比 2021 年，2022 年降幅均值为 5.1%（10.7%）。**

年均一氧化碳浓度最高的三个城市分别是临汾（1.1 毫克/立方米）、萍乡（1.1 毫克/立方米）与长治（1.1 毫克/立方米），这三个城市一氧化碳年均浓度较去年均有所下降，但绝对浓度仍处于所有城市中最高的位置。2014-2020 年，临汾的排名始终位于前三位，长治的排名缓慢上升到第二位，这两个城市的一氧化碳治理需要更加努力。在 2022 季节年，年均一氧化碳浓度最低的三个城市分别是张家口（0.5 毫克/立方米）、黄山（0.5 毫克/立方米）与威海（0.4 毫克/立方米）。

2015-2022 年排名升高（相对恶化）最多的前 20 个城市中，阳泉属于重点关注的“2+26”城市，无汾渭平原城市。相对恶化前 20 的城市中有 4 个城市分别地处苏皖鲁豫交界处，有 3 个城市地处长三角地区。排名下降最多的前 20 个城市中，有 9 个城市不属于“2+26”及汾渭平原城市，非重点关注区域城市，仍改善显著。

从七年累计降幅来看，“3+110”城市中除黄山、上饶年均一氧化碳浓度上升，其余城市 2022 年均一氧化碳浓度均小于 2015 年的浓度。吕梁累计七年降幅最高，达 76%。七年累计降幅超过 50% 的城市有 35 个，累计降幅前 20 的城市中有 12 个“2+26”城市。

相比于 2015 年，降幅最小的前十个城市中有 4 个城市属于江西，江西的一氧化碳降幅在九省之中最

北京大学统计科学中心

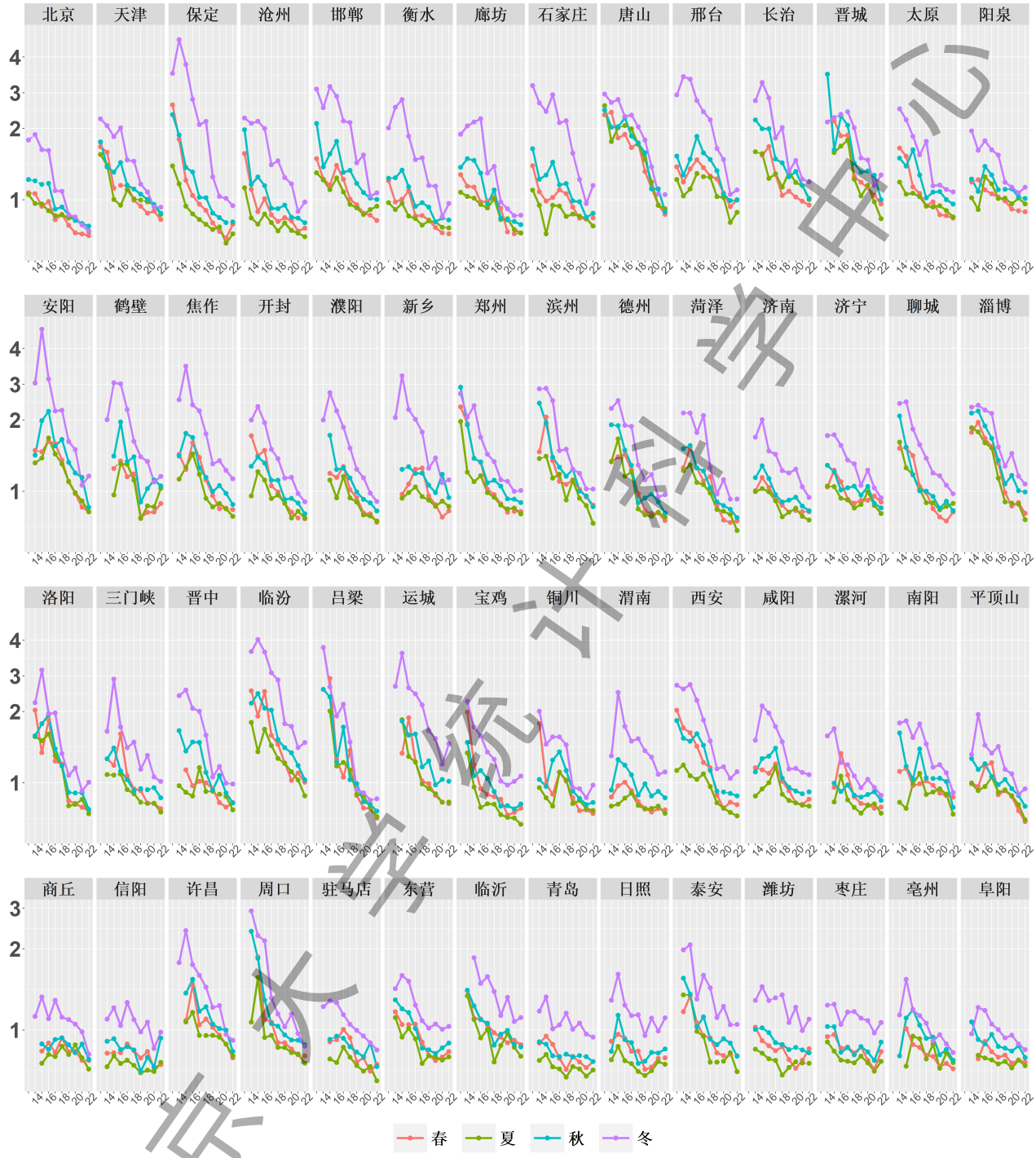



图 19: “3+110”城市气象调整后 2013 年至 2022 年一氧化碳季节平均浓度（毫克/立方米）变化序列图，图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

北京大学统计科学中心

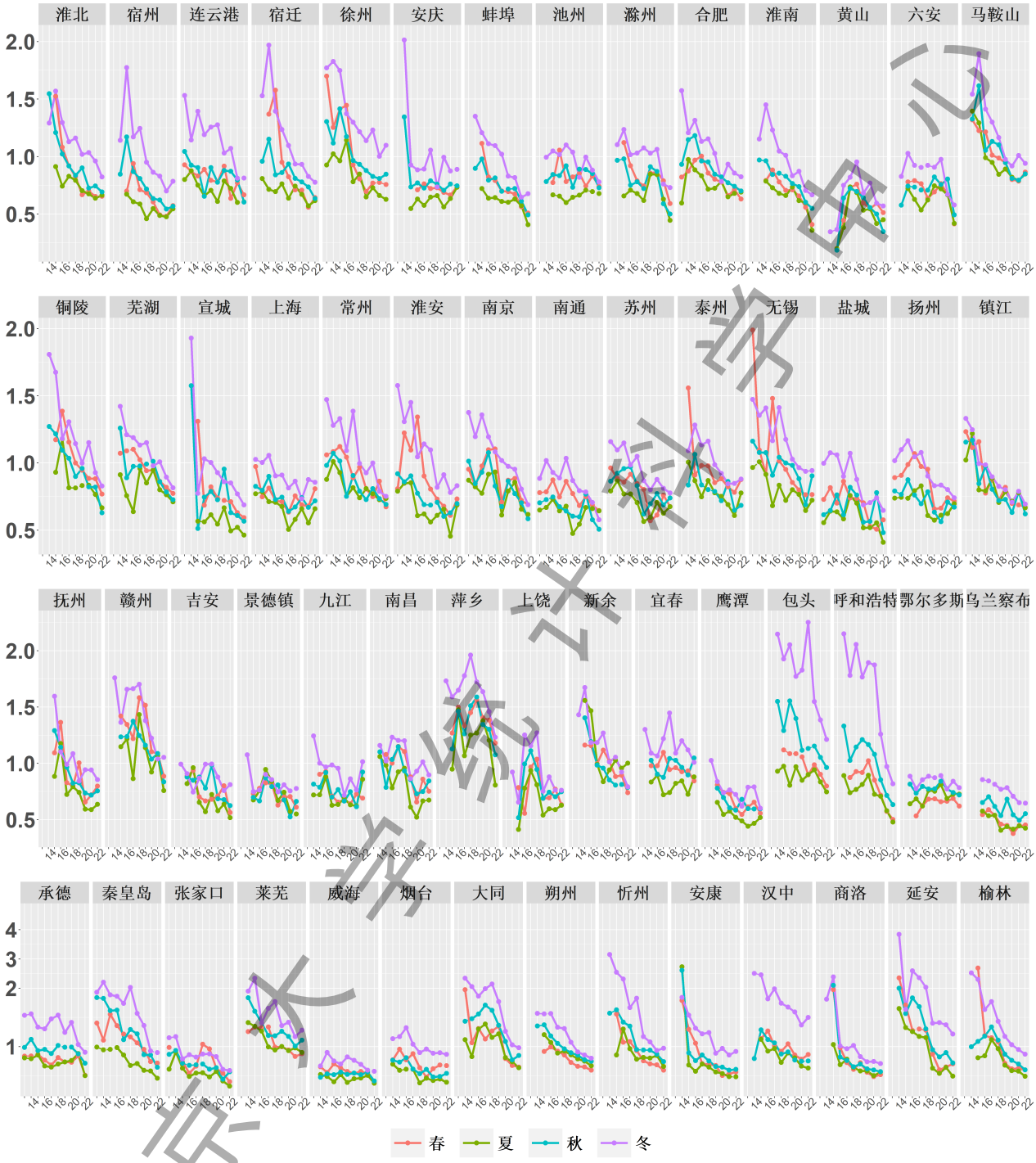
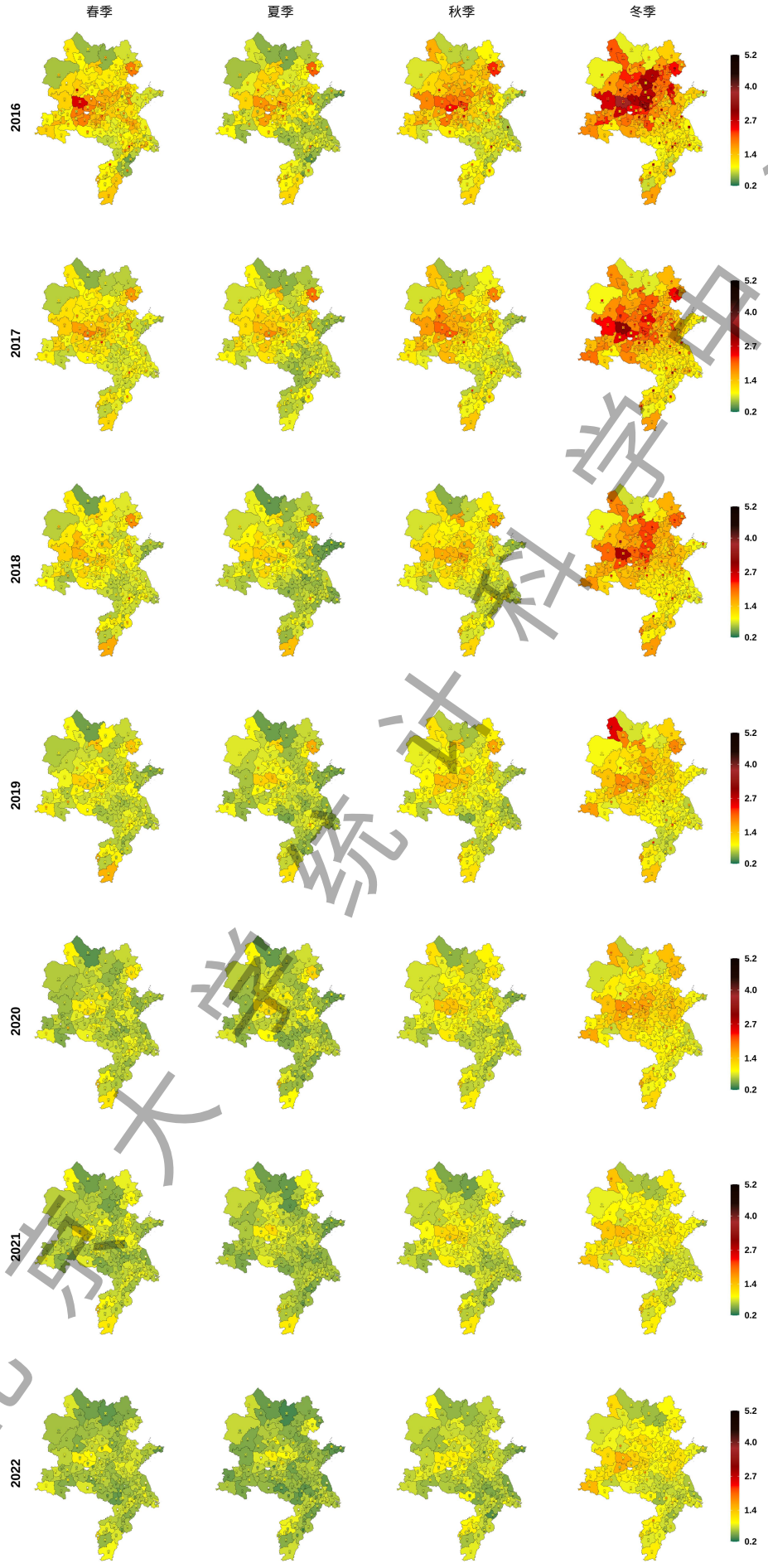


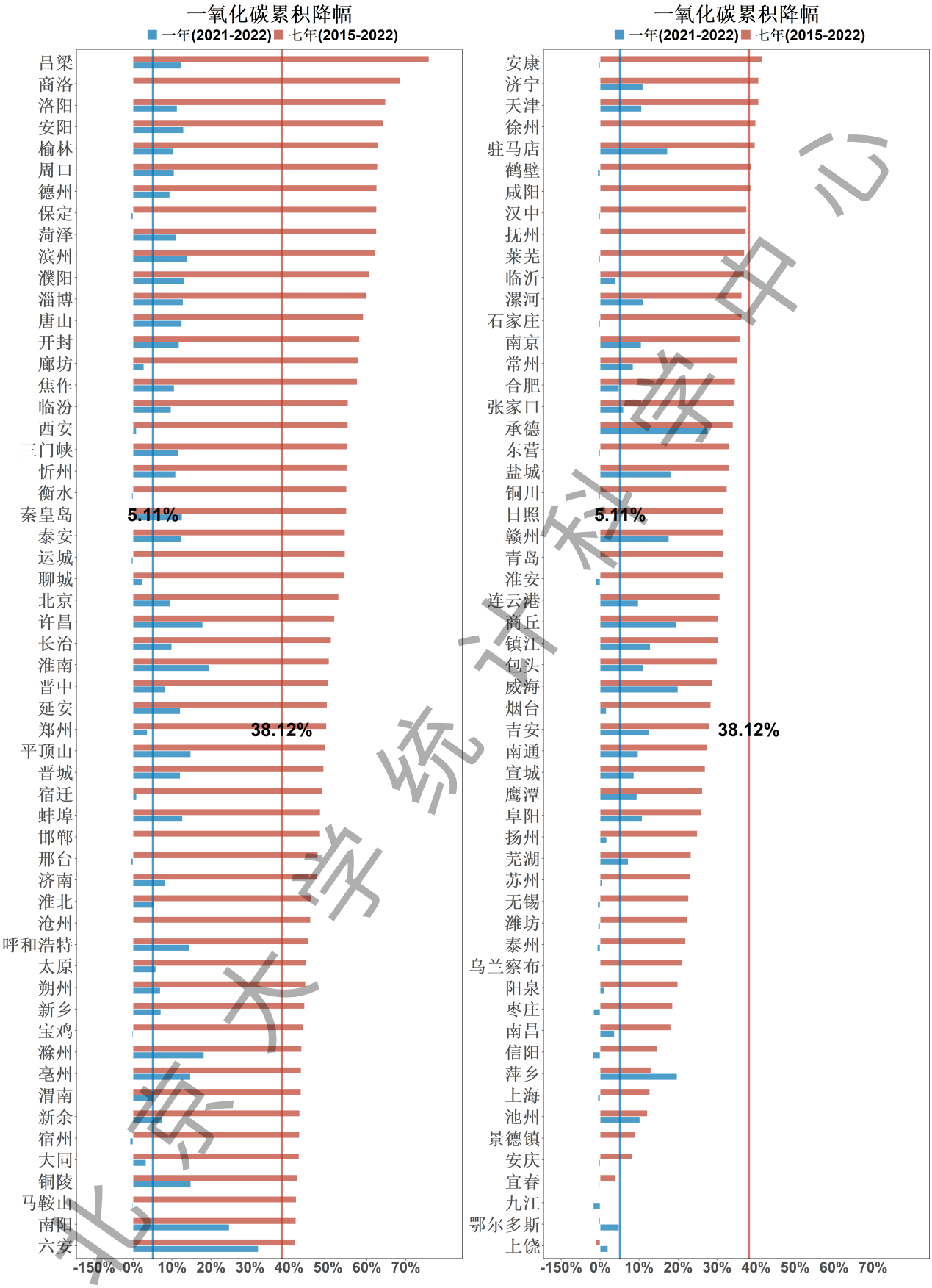

图 20: “3+110”城市气象调整后 2013 年至 2022 年一氧化碳季节平均浓度（毫克/立方米）变化序列图，图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

北京大学统计科学中心




北京大学统计科学中心

图 21: “3+110”城市气象调整后 2016 年至 2022 年一氧化碳季节平均浓度（毫克/立方米）




北京大学统计学中心

图 22: “3+110”城市气象调整后一氧化碳浓度过去一年（蓝色）的降幅、七年（红色）的累计降幅
蓝色和红色竖线分别代表“3+110”城市的一年和七年平均降幅

| 城市 | 2013年 | 排名 | 2014年 | 排名 | 2015年 | 排名 | 2016年 | 排名 | 2017年 | 排名 | 2018年 | 排名 | 2019年 | 排名 | 2020年 | 排名 | 2021年 | 排名 | 2022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) |
| 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) |
| 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) |
| 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 | (4) |
| 鹤壁 | NA | | NA | | 1.7 | (23) | 1.9 | (6) | 1.6 | (11) | 1.4 | (12) | 0.9 | (52) | 1 | (25) | 0.9 | (15) | 1 | (5) |
| 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 | (6) |
| 运城 | NA | | NA | | 2.2 | (4) | 1.9 | (8) | 1.7 | (7) | 1.4 | (14) | 1.2 | (11) | 1.1 | (13) | 0.9 | (17) | 1 | (7) |
| 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 | (8) |
| 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 | (21) | 1 | (9) |
| 宜春 | NA | | NA | | 1 | (85) | 1 | (73) | 1 | (69) | 1 | (48) | 1 | (29) | 1 | (26) | 0.9 | (20) | 0.9 | (10) |
| 汉中 | NA | | NA | | 1.5 | (38) | 1.3 | (43) | 1.3 | (36) | 1.1 | (43) | 1.1 | (17) | 1 | (23) | 0.9 | (28) | 0.9 | (11) |
| 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 | (18) | 0.9 | (12) |
| 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 | (13) |
| 新乡 | NA | | NA | | 1.6 | (29) | 1.4 | (31) | 1.4 | (22) | 1.3 | (15) | 1.1 | (22) | 1 | (21) | 1 | (12) | 0.9 | (14) |
| 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) |
| 太原 | NA | | 1.8 | (14) | 1.6 | (30) | 1.5 | (24) | 1.3 | (33) | 1.2 | (33) | 1 | (24) | 1 | (22) | 0.9 | (16) | 0.9 | (16) |
| 赣州 | NA | | NA | | 1.3 | (53) | 1.4 | (39) | 1.3 | (32) | 1.5 | (8) | 1.3 | (10) | 1.1 | (12) | 1.1 | (5) | 0.9 | (17) |
| 马鞍山 | NA | | 1.4 | (30) | 1.5 | (36) | 1.2 | (59) | 1.1 | (51) | 1 | (49) | 0.9 | (38) | 0.8 | (57) | 0.8 | (32) | 0.9 | (18) |
| 九江 | NA | | NA | | 0.9 | (99) | 0.9 | (80) | 0.8 | (105) | 0.8 | (98) | 0.7 | (100) | 0.7 | (89) | 0.7 | (88) | 0.9 | (19) |
| 临沂 | NA | | NA | | 1.4 | (45) | 1.2 | (57) | 1.2 | (40) | 1 | (60) | 1 | (32) | 1 | (15) | 0.9 | (26) | 0.9 | (20) |
| 咸阳 | NA | | 1.2 | (40) | 1.4 | (42) | 1.4 | (38) | 1.4 | (20) | 1.1 | (38) | 0.9 | (37) | 0.9 | (43) | 0.8 | (23) | 0.9 | (21) |
| 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 | (22) |
| 石家庄 | 1.9 | (6) | 1.5 | (26) | 1.3 | (49) | 1.6 | (16) | 1.4 | (24) | 1.3 | (16) | 1.1 | (19) | 0.9 | (30) | 0.8 | (50) | 0.8 | (23) |
| 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) | 0.8 | (24) |
| 焦作 | NA | | 1.7 | (18) | 2 | (10) | 1.8 | (12) | 1.6 | (10) | 1.3 | (20) | 1 | (26) | 1 | (19) | 0.9 | (14) | 0.8 | (25) |
| 无锡 | 1.4 | (13) | 1.1 | (44) | 1.1 | (72) | 1.1 | (68) | 1.1 | (53) | 1 | (62) | 0.9 | (46) | 0.9 | (51) | 0.8 | (59) | 0.8 | (26) |
| 徐州 | 1.4 | (12) | 1.3 | (37) | 1.4 | (43) | 1.3 | (42) | 1 | (66) | 1 | (63) | 0.8 | (66) | 0.9 | (39) | 0.8 | (43) | 0.8 | (27) |
| 新余 | NA | | NA | | 1.4 | (40) | 1.3 | (45) | 1 | (60) | 1 | (47) | 1 | (34) | 0.9 | (32) | 0.9 | (27) | 0.8 | (28) |
| 枣庄 | NA | | 1 | (51) | 1 | (78) | 0.8 | (98) | 0.9 | (88) | 0.8 | (85) | 0.9 | (61) | 0.8 | (72) | 0.7 | (93) | 0.8 | (29) |
| 东营 | NA | | 1.3 | (35) | 1.2 | (62) | 1.2 | (49) | 1.1 | (54) | 0.8 | (80) | 0.8 | (82) | 0.8 | (71) | 0.8 | (57) | 0.8 | (30) |
| 郑州 | 2.5 | (3) | 1.8 | (13) | 1.6 | (28) | 1.4 | (27) | 1.2 | (46) | 1.1 | (41) | 1 | (31) | 0.9 | (45) | 0.8 | (34) | 0.8 | (31) |
| 聊城 | NA | | 2 | (8) | 1.8 | (19) | 1.5 | (25) | 1.2 | (42) | 1.1 | (42) | 0.9 | (36) | 0.8 | (55) | 0.8 | (38) | 0.8 | (32) |
| 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 | (24) | 0.8 | (33) |
| 泰州 | NA | | 1.1 | (45) | 1 | (77) | 0.9 | (79) | 1 | (72) | 0.9 | (76) | 0.8 | (73) | 0.8 | (64) | 0.7 | (73) | 0.8 | (34) |
| 济宁 | NA | | 1.3 | (34) | 1.4 | (47) | 1.2 | (58) | 1.1 | (55) | 1 | (52) | 0.9 | (42) | 1.1 | (14) | 0.9 | (23) | 0.8 | (35) |
| 潍坊 | NA | | 1 | (50) | 1 | (76) | 0.9 | (74) | 0.9 | (79) | 0.9 | (72) | 0.8 | (85) | 0.8 | (67) | 0.7 | (65) | 0.8 | (36) |
| 西安 | 2 | (5) | 1.8 | (11) | 1.8 | (18) | 1.6 | (15) | 1.5 | (17) | 1.2 | (22) | 0.9 | (49) | 0.8 | (53) | 0.8 | (44) | 0.8 | (37) |
| 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 | (19) | 0.8 | (38) |
| 南昌 | NA | | NA | | 1 | (87) | 1 | (70) | 1.1 | (50) | 1 | (45) | 0.8 | (76) | 0.7 | (94) | 0.8 | (40) | 0.8 | (39) |
| 日照 | NA | | 0.9 | (56) | 1.2 | (65) | 0.9 | (77) | 0.8 | (95) | 0.8 | (99) | 0.6 | (107) | 0.7 | (85) | 0.7 | (67) | 0.8 | (40) |
| 渭南 | NA | | 0.9 | (54) | 1.4 | (44) | 1.2 | (52) | 1.1 | (49) | 1 | (59) | 0.9 | (43) | 0.9 | (52) | 0.8 | (39) | 0.8 | (41) |
| 延安 | NA | | 2.5 | (2) | 1.6 | (32) | 1.7 | (13) | 1.6 | (8) | 1.4 | (10) | 1 | (33) | 0.8 | (54) | 0.9 | (29) | 0.8 | (42) |
| 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 | (47) | 0.8 | (43) |
| 安庆 | NA | | NA | | 0.8 | (100) | 0.7 | (104) | 0.7 | (107) | 0.8 | (86) | 0.7 | (93) | 0.7 | (81) | 0.7 | (69) | 0.8 | (44) |
| 信阳 | NA | | 0.8 | (61) | 0.9 | (93) | 0.8 | (99) | 0.9 | (80) | 0.8 | (88) | 0.6 | (106) | 0.7 | (77) | 0.6 | (107) | 0.8 | (45) |
| 晋中 | NA | | NA | | 1.5 | (35) | 1.4 | (40) | 1.5 | (18) | 1.2 | (32) | 0.9 | (85) | 1 | (29) | 0.8 | (37) | 0.8 | (46) |
| 抚州 | NA | | NA | | 1.2 | (63) | 1.2 | (55) | 0.9 | (83) | 0.9 | (70) | 0.9 | (60) | 0.7 | (83) | 0.7 | (68) | 0.8 | (47) |
| 上海 | 0.9 | (25) | 0.8 | (60) | 0.9 | (97) | 0.8 | (102) | 0.8 | (104) | 0.6 | (109) | 0.7 | (94) | 0.7 | (95) | 0.7 | (82) | 0.8 | (48) |
| 三门峡 | NA | | 1.4 | (32) | 1.7 | (24) | 1.4 | (29) | 1.1 | (47) | 1.1 | (44) | 0.9 | (41) | 0.9 | (34) | 0.9 | (30) | 0.8 | (49) |
| 芜湖 | NA | | 1.2 | (43) | 1 | (84) | 1 | (72) | 1 | (62) | 1 | (55) | 1 | (30) | 0.9 | (42) | 0.8 | (41) | 0.8 | (50) |
| 忻州 | NA | | NA | | 1.6 | (27) | 1.5 | (19) | 1.3 | (35) | 1.1 | (39) | 0.9 | (45) | 0.9 | (44) | 0.8 | (35) | 0.7 | (51) |
| 济南 | NA | | 1.2 | (39) | 1.4 | (41) | 1.2 | (54) | 1.1 | (56) | 0.9 | (69) | 0.9 | (55) | 0.9 | (33) | 0.8 | (46) | 0.7 | (52) |
| 许昌 | NA | | NA | | 1.5 | (34) | 1.6 | (18) | 1.2 | (38) | 1.2 | (24) | 1.1 | (20) | 1 | (17) | 0.9 | (25) | 0.7 | (53) |
| 淮安 | 1 | (21) | 1.1 | (48) | 1.1 | (74) | 0.9 | (75) | 0.8 | (93) | 0.8 | (91) | 0.7 | (95) | 0.7 | (91) | 0.6 | (103) | 0.7 | (54) |
| 池州 | NA | | NA | | 0.8 | (101) | 0.9 | (89) | 0.9 | (89) | 0.8 | (84) | 0.8 | (75) | 0.8 | (58) | 0.8 | (42) | 0.7 | (55) |
| 泰安 | NA | | 1.6 | (23) | 1.6 | (31) | 1.1 | (63) | 1.2 | (45) | 1 | (57) | 0.8 | (70) | 0.9 | (46) | 0.8 | (36) | 0.7 | (56) |
| 周口 | NA | | NA | | 1.9 | (12) | 1.4 | (34) | 1.1 | (48) | 1 | (58) | 0.9 | (51) | 0.9 | (38) | 0.8 | (45) | 0.7 | (57) |
| 铜陵 | NA | | NA | | 1.2 | (57) | 1.2 | (51) | 1.1 | (52) | 1 | (61) | 0.9 | (39) | 0.9 | (35) | 0.8 | (31) | 0.7 | (58) |
| 南阳 | NA | | 1.4 | (33) | 1.2 | (60) | 1.2 | (61) | 1.4 | (25) | 1.1 | (40) | 1 | (25) | 1 | (20) | 1 | (13) | 0.7 | (59) |
| 铜川 | NA | | 1.5 | (28) | 1.1 | (75) | 1.1 | (64) | 1.3 | (26) | 1.2 | (28) | 0.8 | (68) | 0.8 | (73) | 0.7 | (85) | 0.7 | (60) |
| 德州 | NA | | 1.8 | (16) | 1.9 | (13) | 1.6 | (17) | 1.5 | (16) | 1 | (56) | 0.9 | (58) | 0.9 | (40) | 0.8 | (48) | 0.7 | (61) |
| 苏州 | 0.9 | (23) | 0.9 | (53) | 0.9 | (92) | 0.9 | (84) | 0.9 | (87) | 0.7 | (105) | 0.7 | (103) | 0.7 | (80) | 0.7 | (74) | 0.7 | (62) |
| 宝鸡 | NA | | 1.8 | (12) | 1.3 | (54) | 1.1 | (65) | 1 | (63) | 0.9 | (65) | 0.8 | (86) | 0.7 | (101) | 0.7 | (86) | 0.7 | (63) |
| 常州 | 1.1 | (17) | 1.1 | (46) | 1.1 | (69) | 0.9 | (85) | 1 | (64) | 0.9 | (71) | 0.8 | (74) | 0.8 | (59) | 0.8 | (54) | 0.7 | (64) |
| 鄂尔多斯 | NA | | NA | | 0.7 | (109) | 0.7 | (108) | 0.8 | (103) | 0.8 | (93) | 0.8 | (79) | 0.7 | (87) | 0.7 | (62) | 0.7 | (65) |
| 合肥 | 1 | (22) | 1.1 | (49) | 1.1 | (70) | 1 | (71) | 0.9 | (76) | 0.9 | (77) | 0.8 | (80) | 0.8 | (75) | 0.7 | (63) | 0.7 | (66) |
| 淮北 | NA | | NA | | 1.3 | (51) | 1 | (69) | 0.9 | (74) | 0.9 | (67) | 0.8 | (71) | 0.8 | (69) | 0.7 | (61) | 0.7 | (67) |
| 扬州 | 0.9 | (26) | 0.9 | (58) | 0.9 | (90) | 0.9 | (83) | 0.9 | (81) | 0.8 | (83) | 0.7 | (101) | 0.7 | (103) | 0.7 | (76) | 0.7 | (68) |
| 洛阳 | NA | | 1.9 | (9) | 2 | (9) | 1.9 | (11) | 1.5 | (14) | 1.3 | (19) | 0.9 | (62) | 0.9 | (47) | 0.8 | (49) | 0.7 | (69) |
| 漯河 | NA | | NA | | 1.1 | (66) | 1.2 | (60) | 1 | (61) | 0.8 | (78) | 0.8 | (87) | 0.8 | (62) | 0.8 | (51) | 0.7 | (70) |
| 朔州 | NA | | NA | | 1.3 | (55) | 1.2 | (53) | 1 | (57) | 1 | (53) | 0.9 | (53) | 0.8 | (66) | 0.8 | (60) | 0.7 | (71) |
| 衡水 | 1.4 | (14) | 1.4 | (29) | 1.5 | (33) | 1.2 | (47) | 1 | (65) | 1 | (54) | 0.9 | (56) | 0.8 | (68) | 0.7 | (91) | 0.7 | (72) |
| 保定 | 2.5 | (2) | 2.4 | (3) | 1.9 | (16) | 1.5 | (22) | 1.2 | (41) | 1.2 | (29) | 0.8 | (63) | 0.7 | (78) | 0.6 | (97) | 0.7 | (73) |
| 开封 | NA | | 1.5 | (25) | 1.7 | (25) | 1.5 | (20) | 1.2 | (43) | 1.1 | (37) | 0.9 | (40) | 0.9 | (50) | 0.8 | (52) | 0.7 | (74) |
| 上饶 | NA | | NA | | 0.6 | (112) | 0.9 | (88) | 1 | (59) | 1 | (51) | 0.7 | (102) | 0.7 | (84) | 0.7 | (80) | 0.7 | (75) |
| 渡阳 | NA | | NA | | 1.7 | (20) | 1.4 | (33) | 1.4 | (19) | 1.2 | (30) | 1 | (27) | 0.9 | (49) | 0.8 | (53) | 0.7 | (76) |
| 沧州 | 1.8 | (9) | 1.3 | (36) | 1.3 | (56) | 1.3 | (44) | 1 | (71) | 0.9 | (66) | 0.9 | (47) | 0.8 | (63) | 0.7 | (90) | 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 | (31) | 0.8 | (55) | 0.7 | (78) |
| 连云港 | 1.1 | (18) | 1 | (52) | 1 | (86) | 0.8 | (96) | 0.9 | (77) | 0.9 | (74) | 0.9 | (50) | 0.8 | (60) | 0.7 | (64) | 0.7 | (79) |
| 宿迁 | NA | | NA | | 1.3 | (52) | 1.4 | (62) | 1 | (73) | 0.9 | (73) | 0.8 | (78) | 0.8 | (70) | 0.7 | (89) | 0.7 | (80) |
| 镇江 | 1.2 | (16) | 1.2 | (41) | 1 | (85) | 0.9 | (90) | 0.9 | (86) | 0.7 | (101) | 0.8 | (83) | 0.7 | (97) | 0.8 | (58) | 0.7 | (81) |
| 青岛 | NA | | 0.9 | (57) | 1 | (88) | 0.8 | (101) | 0.7 | (109) | 0.7 | (106) | 0.7 | (91) | 0.7 | (86) | 0.6 | (94) | 0.7 | (82) |
| 承德 | 1 | (20) | 1.1 | (47) | 1 | (90) | 0.9 | (81) | 0.9 | (75) | 1 | (50) | 0.9 | (44) | 1 | (28) | 0.9 | (22) | 0.7 | (83) |
| 景德镇 | NA | | NA | | 0.7 | (108) | 0.7 | (106) | 0.9 | (82) | 0.8 | (82) | 0.7 | (96) | 0.7 | (82) | 0.6 | (98) | 0.6 | (84) |
| 阜阳 | NA | | NA | | 0.9 | (95) | 0.9 | (86) | 0.8 | (91) | 0.8 | (95) | 0.7 | (88) | 0.7 | (96) | 0.7 | (71) | 0.6 | (85) |
| 南京 | 1.1 | (19) | 0.9 | (55) | 1 | (79) | 1.1 | (66) | 1 | (67) | 0.8 | (97) | 0.9 | (57) | 0.9 | (48) | 0.7 | (72) | 0.6 | (86) |
| 安康 | NA | | 2.2 | (5) | 1.1 | (68) | 0.9 | (78) | 0.9 | (85) | 0.8 | (79) | 0.7 | (99) | 0.7 | (105) | 0.6 | (104) | 0.6 | (87) |
| 榆林 | NA | | NA | | 1.7 | (21) | 1.2 | (50) | 1.3 | (27) | 1.1 | (35) | 0.9 | (59) | 0.8 | (76) | 0.7 | (78) | 0.6 | (88) |
| 菏泽 | NA | | 1.6 | (22) | 1.7 | (22) | 1.4 | (35) | 1.4 | (21) | 1.1 | (36) | 0.8 | (67) | 0.8 | (61) | 0.7 | (75) | 0.6 | (89) |
| 平顶山 | NA | | 1.2 | (42) | 1.2 | (58) | 1.2 | (46) | 1.2 | (39) | 1 | (46) | 1 | (28) | 0.9 | (36) | 0.7 | (66) | 0.6 | (90) |
| 吉安 | NA | | NA | | 0.9 | (96) | 0.9 | (93) | 0.8 | (102) | 0.8 | (100) | 0.8 | (64) | 0.7 | (92) | 0.7 | (77) | 0.6 | (91) |
| 廊坊 | 1.5 | (11) | 1.5 | (27) | 1.5 | (39) | 1.4 | (36) | 1 | (58) | 1.2 | (34) | 0.8 | (69) | 0.7 | (90) | 0.6 | (96) | 0.6 | (92) |
| 商丘 | NA | | NA | | 0.9 | (94) | 0.9 | (94) | 0.9 | (78) | 0.9 | (64) | 0.8 | (65) | 0.8 | (56) | 0.8 | (56) | 0.6 | (93) |
| 亳州 | NA | | NA | | 1.1 | (71) | 1.1 | (67) | 1 | (68) | 0.8 | (81) | 0.8 | (72) | 0.7 | (100) | 0.7 | (70) | 0.6 | (94) |
| 烟台 | NA | | 0.8 | (59) | 0.9 | (98) | 0.9 | (91) | 0.8 | (101) | 0.6 | (110) | 0.6 | (108) | 0.6 | (110) | 0.6 | (100) | 0.6 | (95) |
| 宿州 | NA | | NA | | 1.1 | (73) | 0.9 | (87) | 0.8 | (94) | 0.7 | (107) | 0.7 | (104) | 0.6 | (108) | 0.6 | (110) | 0.6 | (96) |
| 呼和浩特 | NA | | NA | | 1.1 | (67) | 1.2 | (48) | 1.2 | (44) | 1.2 | (21) | 1.1 | (16) | 0.9 | (41) | 0.7 | (79) | 0.6 | (97) |
| 吕梁 | NA | | NA | | 2.5 | (1) | 1.4 | (28) | 1.6 | (9) | 1.3 | (17) | 0.9 | (54) | 0.8 | (74) | 0.7 | (84) | 0.6 | (98) |
| 南通 | 0.8 | (27) | 0.8 | (62) | 0.8 | (102) | 0.7 | (107) | 0.8 | (100) | 0.7 | (108) | 0.7 | (105) | 0.7 | (79) | 0.7 | (92) | 0.6 | (99) |
| 商洛 | NA | | NA | | 1.9 | (15) | 0.9 | (92) | 0.8 | (98) | 0.7 | (103) | 0.7 | (98) | 0.6 | (106) | 0.6 | (108) | 0.6 | (100) |
| 宣城 | NA | | NA | | 0.8 | (104) | 0.8 | (103) | 0.8 | (99) | 0.7 | (102) | 0.8 | (77) | 0.7 | (102) | 0.6 | (99) | 0.6 | (101) |
| 鹰潭 | NA | | NA | | 0.8 | (106) | 0.7 | (109) | 0.7 | (111) | 0.6 | (111) | 0.6 | (112) | 0.6 | (107) | 0.6 | (101) | 0.6 | (102) |
| 滁州 | NA | | NA | | 1 | (81) | 0.8 | (95) | 0.8 | (97) | 0.8 | (90) | 0.9 | (48) | 0.9 | (37) | 0.7 | (83) | 0.6 | (103) |
| 驻马店 | NA | | NA | | 0.9 | (91) | 0.9 | (76) | 1 | (70) | 0.9 | (75) | 0.7 | (92) | 0.7 | (98) | 0.7 | (87) | 0.6 | (104) |
| 北京 | 1.3 | (15) | 1.3 | (38) | 1.2 | (64) | 1.2 | (56) | 0.9 | (84) | 0.9 | (68) | 0.7 | (89) | 0.7 | (99) | 0.6 | (102) | 0.6 | (105) |
| 盐城 | 0.7 | (28) | 0.8 | (63) | 0.8 | (105) | 0.7 | (105) | 0.8 | (90) | 0.8 | (94) | 0.6 | (109) | 0.6 | (111) | 0.6 | (95) | 0.5 | (106) |
| 蚌埠 | NA | | NA | | 1 | (80) | 0.8 | (97) | 0.8 | (96) | 0.8 | (96) | 0.7 | (97) | 0.7 | (93) | 0.6 | (106) | 0.5 | (107) |
| 乌兰察布 | NA | | NA | | 0.7 | (110) | 0.7 | (110) | 0.6 | (112) | 0.5 | (113) | 0.6 | (111) | 0.5 | (113) | 0.5 | (112) | 0.5 | (108) |
| 淮南 | NA | | NA | | 1 | (82) | 0.9 | (82) | 0.8 | (92) | 0.8 | (87) | 0.8 | (84) | 0.7 | (88) | 0.6 | (105) | 0.5 | (109) |
| 六安 | NA | | NA | | 0.8 | (103) | 0.8 | (100) | 0.7 | (108) | 0.7 | (104) | 0.8 | (81) | 0.8 | (65) | 0.7 | (81) | 0.5 | (110) |
| 张家口 | 0.9 | (24) | NA | | 0.7 | (107) | 0.6 | (111) | 0.7 | (110) | 0.8 | (89) | 0.7 | (90) | 0.7 | (104) | 0.5 | (113) | 0.5 | (111) |
| 黄山 | NA | | NA | | 0.2 | (113) | 0.6 | (113) | 0.8 | (106) | 0.8 | (92) | 0.6 | (110) | 0.6 | (109) | 0.5 | (111) | 0.5 | (112) |
| 威海 | NA | | 0.6 | (64) | 0.6 | (111) | 0.6 | (112) | 0.6 | (113) | 0.6 | (112) | 0.6 | (113) | 0.6 | (112) | 0.6 | (109) | 0.4 | (113) |

图 23: “3+110”城市气象调整后 2013 年至 2022 年一氧化碳季节年平均浓度（毫克/立方米）年际变化表 (浓度列底纹从红到绿表示季节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)

北京大学环境科学中心

低，为 20.2%。有 3 个城市属于安徽，安徽的一氧化碳降幅也在九省之中较低，为 34.7%。内蒙古四市和江苏的累计降幅也较低，分别为 26.6% 和 32.0%。其余省市的平均降幅均达到了 45% 以上。山西、河南、河北降幅最大，分别为 51.4%、51.3% 和 50.7%。此外，降幅最小的前二十个城市中，阳泉属于“2+26”城市，虽属重点关注区域，但改善相对不足。

**上述关于一氧化碳年度趋势的讨论说明，全国大部分区域一氧化碳改善显著，但低于二氧化硫的改善程度。陕西、河北、山西已形成稳定的下降趋势，一氧化碳治理情况向好。安徽、内蒙古的一氧化碳累计降幅相对较低，部分城市一氧化碳浓度回升，稳定的下降趋势有待建立。**

## 3.5 二氧化氮

氮氧化物（$NO_x$）主要来源于高温燃烧，在燃烧过程中，天然存在的 $N_2$ 和 $O_2$ 化合形成 NO 直接排放，NO 在空气中进一步氧化形成二氧化氮 ($NO_2$)。由于存在产生 $NO_2$ 的其他途径，冬季的 $NO_2$ 污染会比较严重，如 NO 在雾滴表面被催化氧化形成 $NO_2$，以及逆温气象条件下使上空已形成的 $NO_2$ 下沉到地面等。二氧化氮是一种重要的空气污染物，主要来自于车辆尾气排放和工业生产过程，是硝酸盐的前体物。硝酸盐是 $PM_{2.5}$ 的重要组分之一。二氧化氮在光照下可与氧气发生化学反应生成臭氧，所以它也是臭氧污染的主要“帮凶”。二氧化氮还可伤害呼吸道，直接影响人的身体健康。

我国从“十二五”（2011-2015 年）开始对氮氧化物实施总量控制，这比对二氧化硫的总量控制晚了五年。二氧化氮在大气中的“存活”时间是本报告所考虑的四种气体（$SO_2$，$NO_2$，CO 和 $O_3$）中最短的，一般在几个小时到二天之间，所以它的空间传输距离很短，基本反映了本地排放。中国目前关于二氧化氮的浓度限值如表 5所示，而美国环境保护署的一级和二级标准为：年平均浓度 53ppb（约为 100 微克/立方米）。

表 5: 我国目前二氧化氮平均浓度标准

| 污染物项目 | 平均时间 | 浓度限值 | | 单位 |
|---|---|---|---|---|
| | | 一级 | 二级 | |
| 二氧化氮 | 年平均 | 40 | 40 | 微克/立方米 |
| | 24 小时平均 | 80 | 80 | |
| | 1 小时平均 | 200 | 200 | |

图 24-25、图 26、图 27和图 28分别展示了“3+110”市二氧化氮经气象调整的季节平均浓度时间序列图，季节平均浓度地图，七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，我们可以总结出二氧化氮浓度如下几个特征：

- **季度评估**

根据图 24-25可见，研究区域城市的二氧化氮也具有明显的季节特征，主要以冬季最高，夏季最低。山西季节效应较其余区域不明显，主要体现在中部和北部城市全年差异较小。

北京大学统计科学中心

**2015 年春季“3+110”城市二氧化氮浓度均值（标准误差）为 35.0（10.3）微克/立方米，2021 年浓度下降至 29.4（7.4）微克/立方米，2022 年春季继续改善至 26.6（6.7）微克/立方米。**2022 年春季吕梁平均浓度最高，为 46.1 微克/立方米；黄山最低，为 10.0 微克/立方米。相比 2015 年，有 21 个城市恶化，其中吕梁累计增幅高达 85.0%。相比 2021 年，“3+110”城市一年降幅平均值为 9.6%。2022 年春季改善显著，有 78 个城市改善，35 个城市恶化，后者主要分布在山西和河南，分别有 10 个和 7 个。

**2015 年夏季“3+110”城市二氧化氮浓度均值（标准误差）为 26.5（8.4）微克/立方米，2021 年下降至 19.7（5.7）微克/立方米，2022 年夏季继续改善，仅 18.3（5.4）微克/立方米。**2022 年夏季吕梁平均浓度最高，为 37.2 微克/立方米；黄山最低，仅 6.1 微克/立方米。相比 2021 年，2022 年夏季“3+110”城市一年降幅平均值为 7.1%，有 6 个城市降幅超过 30%。共有 79 个城市改善，34 个城市恶化，恶化的城市主要集中在河南（6 个）、江苏（5 个）、江西（5 个）、陕西（4 个）和山西（4 个）。相比 2015 年，14 个城市不降反增，其中萍乡、吕梁和新余七年累计增幅最大，均超过 25%；浓度下降的城市中，有 11 个城市七年累计降幅均超过 50%。

**2015 年秋季“3+110”城市二氧化氮浓度均值（标准误差）为 40.7（12.2）微克/立方米，2021 年下降至 36.0（8.1）微克/立方米，2022 年秋季继续改善至 32.7（8.2）微克/立方米。**2022 年秋季太原平均浓度最高，为 52.1 微克/立方米；鹰潭最低，为 14.7 微克/立方米。相比 2021 年，2022 年秋季“3+110”城市一年降幅平均值达 9.2%，有 27 个城市降幅超过 20%，有 51 个城市降幅超过 10%。区域内 90 个城市改善，有 23 个城市恶化，恶化的城市在江西有 6 个，陕西有 5 个，内蒙古和山东各有 4 个，其中商洛增幅高达 29.4%。

**2015 年冬季“3+110”城市二氧化氮浓度均值（标准误差）为 50.3（15.1）微克/立方米，2021 年下降至 39.3（7.4）微克/立方米，2022 年冬季上升至 39.9（8.6）微克/立方米。**2022 年冬季滨州平均浓度最高，为 57.7 微克/立方米；张家口最低，为 19.0 微克/立方米。相比 2021 年，2022 年冬季有 49 个城市浓度下降，有 64 个城市恶化。“3+110”城市一年平均增幅为 1.6%，其中安庆的降幅最大，为 23.7%；仅有 4 个城市降幅超过 20%。相比 2015 年，18 个城市不降反增，其中吕梁七年累计增幅最大，高达 131.8%，还有 5 个城市（忻州、太原、扬州、滨州和萍乡）七年累计增幅超过 20%。

- **年度评估：年度变化趋势与城市相对排名**

**根据图 28，2015 年“3+110”城市的二氧化氮浓度均值（标准误差）为 38.1（10.6）微克/立方米，2021 年下降至 31.1（6.4）微克/立方米，2022 年进一步下降至 29.4（6.6）微克/立方米，相比去年下降幅度较大。**2022 季度年，全部“3+110”城市二氧化氮浓度低于 50 微克/立方米。仅 5 个城市二氧化氮季节年平均浓度超过 40 微克/立方米，比去年减少了 6 个。从累计降幅来看，根据图 27，相比 2015 年，2022 年“3+110”城市二氧化氮七年累计降幅均值为 20.0%（18.7%）；相比 2021 年，2022 年降幅均值为 5.5%（8.7%）。**去年单年降幅明显，可见去年二氧化氮治理取得了很大成效。**

年均二氧化氮浓度最高的三个城市分别是太原（46.3 微克/立方米）、阳泉（45.1 微克/立方米）与吕梁（44.8 微克/立方米），且三市年均二氧化氮浓度相比去年都有所上升，特别是阳泉市，上升幅度较大，治理需要更加努力。在 2022 季节年，有 60 个城市年均二氧化氮浓度低于 30 微克/立方米，相比 2021 年的 37 个增加了 23 个，其中黄山、抚州与鹰潭年均二氧化氮浓度最低，有 11 个城市年均二氧化氮浓

北京大学统计科学中心

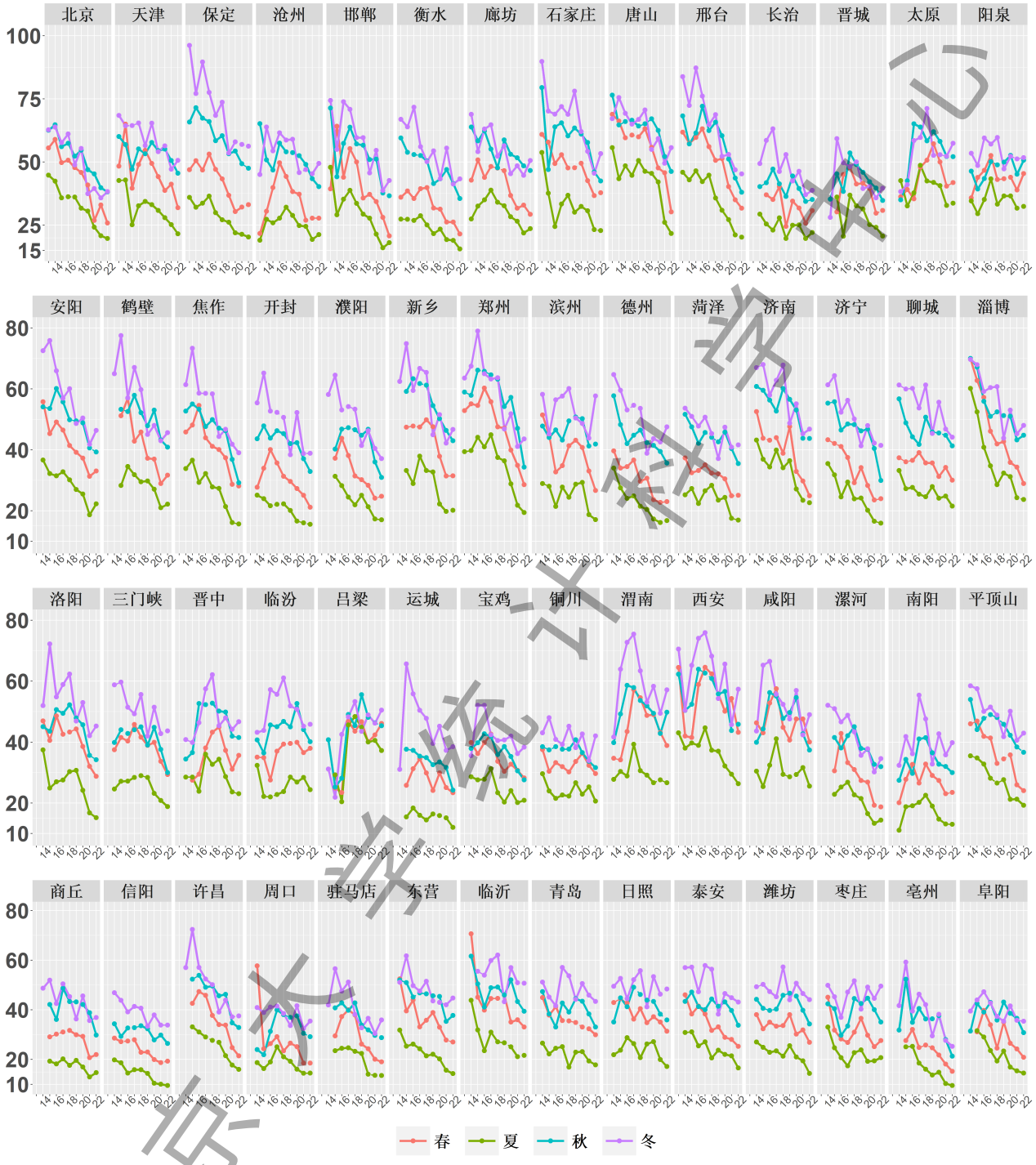



图 24: “3+110”城市气象调整后 2013 年至 2022 年二氧化氮季节平均浓度（微克/立方米）变化序列图，图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

北京水滨统计科学中心

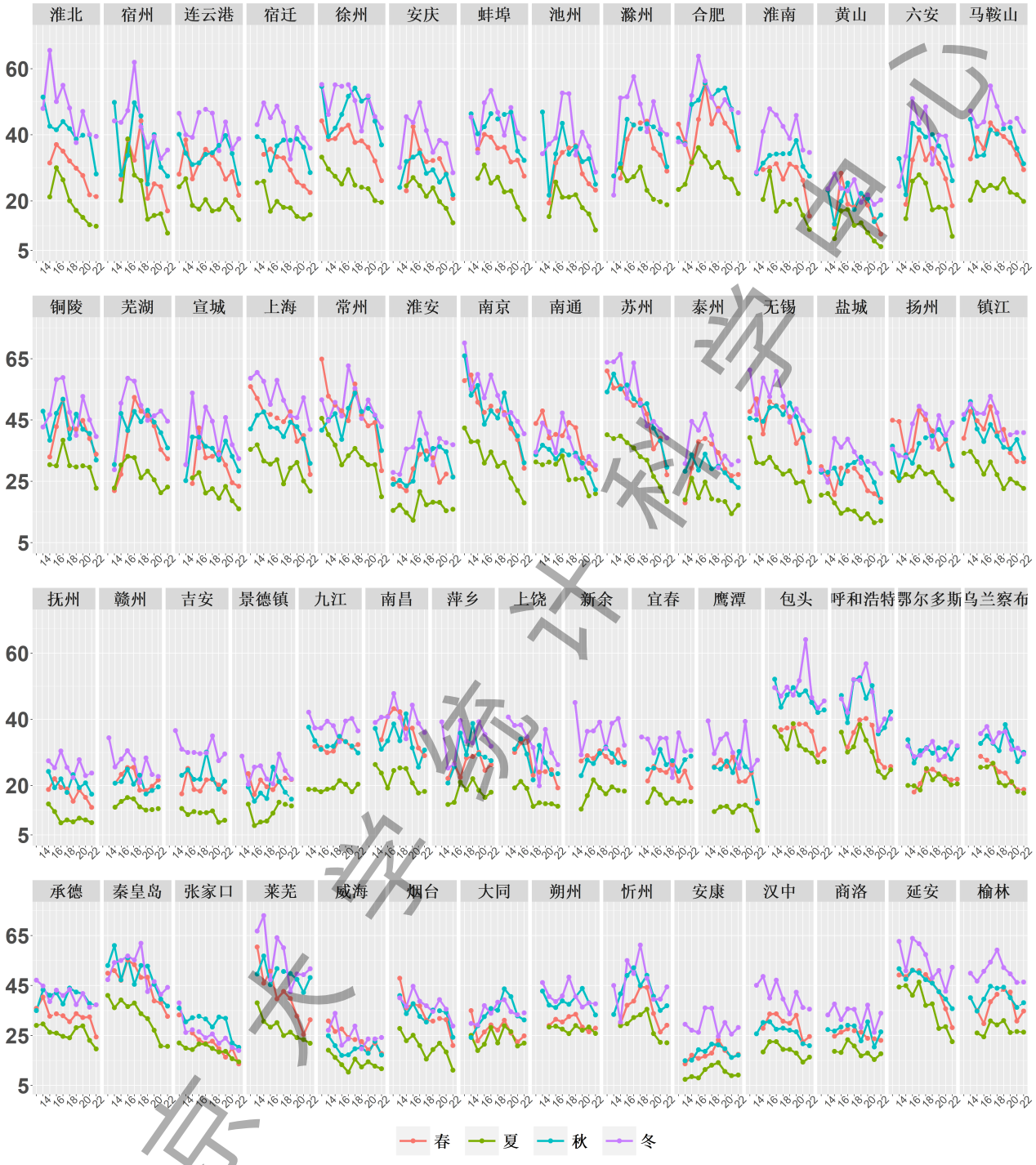



图 25: “3+110”城市气象调整后 2013 年至 2022 年二氧化氮季节平均浓度（微克/立方米）变化序列图，图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

北京大学统计科研中心

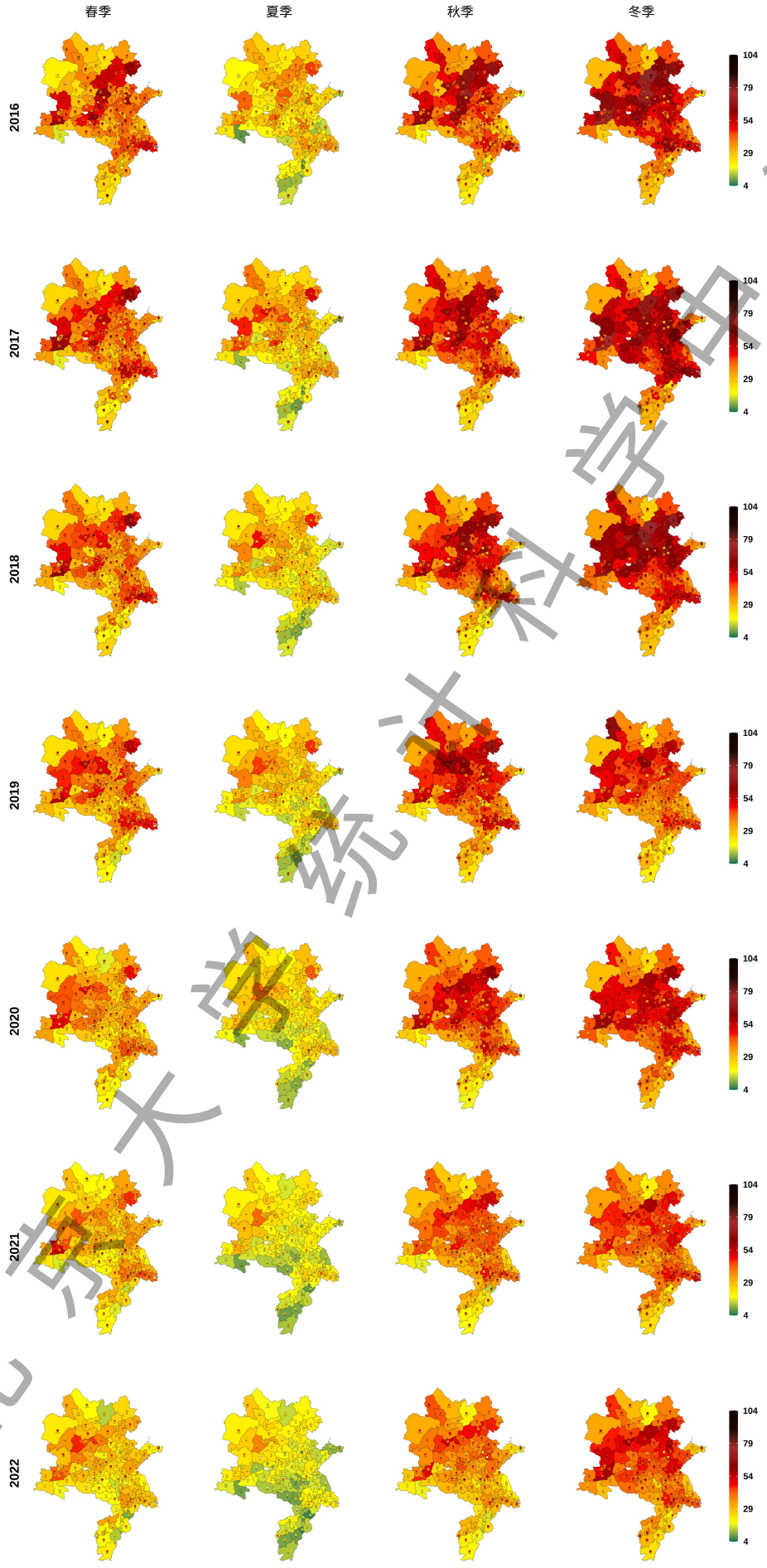
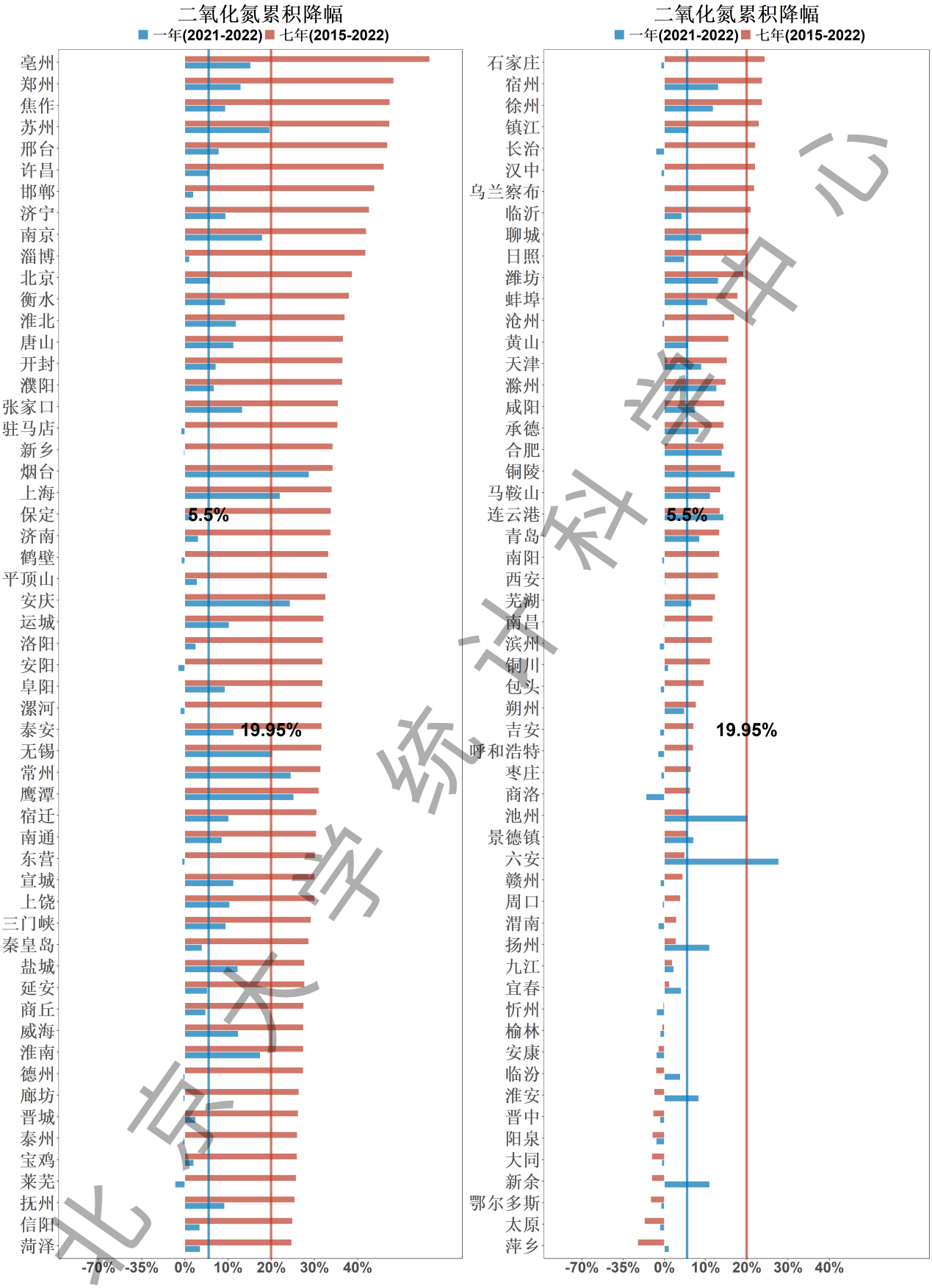



图 26: “3+110”城市气象调整后 2016 年至 2022 年二氧化氮季节平均浓度（微克/立方米）

北京大学统计科学中心




北京大学统计科学中心

图 27: “3+110”城市气象调整后二氧化氮浓度过去一年（蓝色）的降幅、七年（红色）的累计降幅
蓝色和红色竖线分别代表“3+110”城市的一年和七年平均降幅

| 城市 | 2013年 | 排名 | 2014年 | 排名 | 2015年 | 排名 | 2016年 | 排名 | 2017年 | 排名 | 2018年 | 排名 | 2019年 | 排名 | 2020年 | 排名 | 2021年 | 排名 | 2022年 | 排名 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 太原 | NA | | 38.1 | (45) | 38.8 | (54) | 49.2 | (20) | 55.1 | (6) | 55.7 | (3) | 53.5 | (2) | 50.4 | (3) | 44.4 | (1) | 46.3 | (1) |
| 阳泉 | NA | | 42.6 | (35) | 40.4 | (50) | 46.2 | (27) | 50.8 | (12) | 46.3 | (21) | 44.3 | (16) | 46.4 | (5) | 41.8 | (6) | 45.1 | (2) |
| 吕梁 | NA | | NA | | 25.3 | (97) | 28.6 | (96) | 47.4 | (25) | 47.7 | (17) | 47.7 | (6) | 44.3 | (10) | 43.9 | (2) | 44.8 | (3) |
| 西安 | 60.1 | (5) | 45.2 | (30) | 49.7 | (19) | 58.9 | (3) | 62 | (1) | 57.2 | (2) | 50.7 | (4) | 51.1 | (2) | 43.3 | (4) | 43.2 | (4) |
| 渭南 | NA | | 36 | (51) | 44.4 | (30) | 51 | (15) | 57.5 | (3) | 50.6 | (10) | 45.7 | (10) | 45.9 | (7) | 40.7 | (10) | 43.1 | (5) |
| 保定 | 61.3 | (4) | 57.8 | (3) | 59.4 | (5) | 58.3 | (4) | 51 | (11) | 51.1 | (9) | 42.5 | (25) | 41.2 | (21) | 40 | (11) | 39.3 | (6) |
| 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 | (15) | 39.1 | (7) |
| 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) | 38.5 | (8) |
| 莱芜 | NA | | 53.7 | (11) | 51.6 | (14) | 43 | (35) | 46.5 | (30) | 44.6 | (29) | 39.6 | (41) | 38.5 | (40) | 35.1 | (31) | 38.3 | (9) |
| 咸阳 | NA | | 40.1 | (39) | 44.5 | (29) | 52 | (9) | 52.3 | (9) | 43.6 | (36) | 41.6 | (31) | 47.1 | (4) | 41.1 | (7) | 38 | (10) |
| 廊坊 | 50.7 | (13) | 49 | (18) | 51.1 | (16) | 51.7 | (11) | 45.4 | (36) | 48.6 | (14) | 40.9 | (34) | 39.6 | (33) | 37 | (19) | 37.6 | (11) |
| 天津 | 54.9 | (9) | 57.3 | (6) | 44.1 | (32) | 50.6 | (16) | 49.7 | (19) | 51.4 | (8) | 45.9 | (9) | 44.6 | (8) | 41.1 | (8) | 37.4 | (12) |
| 临汾 | NA | | 37.8 | (47) | 34.3 | (74) | 38.1 | (63) | 40.1 | (60) | 42.7 | (41) | 41.2 | (32) | 42.6 | (15) | 38.6 | (13) | 37.1 | (13) |
| 晋中 | NA | | NA | | 33.1 | (78) | 38.1 | (64) | 46 | (33) | 47.7 | (16) | 43.7 | (19) | 40.9 | (23) | 35.2 | (30) | 36.7 | (14) |
| 包头 | NA | | NA | | 40.6 | (48) | 41.4 | (42) | 43.3 | (42) | 42.4 | (42) | 45.5 | (11) | 39.5 | (36) | 35.4 | (29) | 36.7 | (15) |
| 榆林 | NA | | NA | | 35.6 | (67) | 36.1 | (72) | 42.1 | (48) | 43.5 | (37) | 42.7 | (23) | 39.6 | (34) | 35 | (33) | 36.4 | (16) |
| 淄博 | NA | | 67.4 | (1) | 62.6 | (2) | 53.3 | (8) | 48.1 | (20) | 45.9 | (24) | 42.5 | (24) | 42.8 | (14) | 36.8 | (20) | 36.4 | (17) |
| 临沂 | NA | | NA | | 45.8 | (27) | 39.6 | (51) | 46.1 | (32) | 45.7 | (25) | 40.5 | (35) | 42.3 | (17) | 37.8 | (16) | 36.2 | (18) |
| 滨州 | NA | | 46.6 | (25) | 40.5 | (49) | 39.3 | (55) | 40.9 | (56) | 43.9 | (35) | 43.3 | (20) | 42.2 | (18) | 34.2 | (39) | 35.8 | (19) |
| 新乡 | NA | | NA | | 53.7 | (7) | 49.9 | (18) | 53.5 | (7) | 52.4 | (7) | 44.9 | (13) | 40.5 | (26) | 34.9 | (34) | 35.3 | (20) |
| 安阳 | NA | | 54.8 | (9) | 51.7 | (12) | 51.7 | (12) | 48 | (22) | 45.4 | (26) | 41.1 | (33) | 40.5 | (25) | 33.1 | (47) | 35.2 | (21) |
| 合肥 | 35.9 | (23) | 34.3 | (55) | 41 | (45) | 48.8 | (23) | 50.2 | (14) | 44 | (34) | 45.1 | (12) | 43.9 | (11) | 40.8 | (9) | 35.1 | (22) |
| 鹤壁 | NA | | NA | | 52.6 | (10) | 50.3 | (17) | 49.9 | (17) | 46.8 | (20) | 40 | (38) | 41.3 | (20) | 34 | (40) | 35.1 | (23) |
| 沧州 | 37.7 | (20) | 43.1 | (33) | 41.8 | (41) | 49.1 | (21) | 47.3 | (28) | 45 | (28) | 40.1 | (37) | 36.9 | (50) | 34 | (42) | 34.7 | (24) |
| 延安 | NA | | 52 | (13) | 48 | (21) | 51.8 | (10) | 52.3 | (10) | 47.8 | (15) | 44.4 | (15) | 41 | (22) | 36.6 | (22) | 34.7 | (25) |
| 济南 | NA | | 55.9 | (7) | 52.1 | (11) | 48 | (24) | 49.9 | (18) | 50.2 | (12) | 47.4 | (7) | 42 | (19) | 35.6 | (27) | 34.5 | (26) |
| 聊城 | NA | | 47.2 | (23) | 43 | (37) | 42.2 | (39) | 40 | (62) | 43.1 | (39) | 38.7 | (44) | 39.1 | (39) | 37.6 | (17) | 34.2 | (27) |
| 芜湖 | NA | | 26 | (59) | 38.8 | (55) | 43.7 | (31) | 47.6 | (24) | 42.1 | (43) | 42 | (28) | 39.8 | (32) | 36.4 | (23) | 34 | (28) |
| 邢台 | 65 | (3) | 57.5 | (5) | 63.7 | (1) | 63.4 | (1) | 57 | (5) | 55.2 | (4) | 48.7 | (5) | 42.9 | (13) | 36.7 | (21) | 33.8 | (29) |
| 秦皇岛 | 47.8 | (16) | 50.6 | (15) | 47.1 | (22) | 51.2 | (14) | 48 | (21) | 49.2 | (13) | 43.8 | (18) | 39.5 | (35) | 35 | (32) | 33.6 | (30) |
| 枣庄 | NA | | 42.6 | (34) | 35.6 | (69) | 28.9 | (95) | 31.2 | (94) | 37.5 | (63) | 35.8 | (60) | 35.1 | (57) | 32.3 | (52) | 33.3 | (31) |
| 日照 | NA | | 37.4 | (48) | 41.4 | (42) | 39.3 | (54) | 41 | (55) | 40.8 | (47) | 36.5 | (54) | 40.3 | (29) | 34.9 | (35) | 33.2 | (32) |
| 呼和浩特 | NA | | NA | | 35.7 | (66) | 42.9 | (36) | 45.7 | (34) | 44.3 | (31) | 41.7 | (30) | 31 | (81) | 31.3 | (57) | 33.2 | (33) |
| 忻州 | NA | | NA | | 32.7 | (79) | 42.7 | (37) | 43.2 | (43) | 46 | (23) | 44.2 | (17) | 34.9 | (62) | 30.8 | (61) | 33.1 | (34) |
| 铜陵 | NA | | NA | | 37.1 | (58) | 44.6 | (29) | 50.1 | (15) | 39.7 | (49) | 39.7 | (40) | 42.4 | (16) | 38.6 | (14) | 32 | (35) |
| 镇江 | 41.3 | (19) | 46 | (26) | 41.4 | (43) | 38.6 | (58) | 44.2 | (40) | 38.8 | (55) | 34.8 | (66) | 34 | (65) | 33.9 | (44) | 31.9 | (36) |
| 长治 | NA | | NA | | 40.7 | (47) | 42.1 | (40) | 38.9 | (66) | 33.4 | (80) | 36.6 | (53) | 35.7 | (58) | 29.3 | (70) | 31.7 | (37) |
| 常州 | 50.9 | (12) | 45.7 | (28) | 46.1 | (24) | 40.8 | (45) | 47.4 | (26) | 50.4 | (11) | 43.1 | (21) | 43.5 | (12) | 41.9 | (5) | 31.6 | (38) |
| 晋城 | NA | | NA | | 42.7 | (38) | 38.4 | (59) | 46.6 | (29) | 43.2 | (38) | 39.6 | (42) | 36.8 | (52) | 32.3 | (51) | 31.5 | (39) |
| 郑州 | 53.7 | (11) | 55.1 | (8) | 61 | (3) | 58 | (5) | 57.2 | (4) | 53 | (6) | 46.1 | (8) | 44.4 | (9) | 36.2 | (25) | 31.5 | (40) |
| 朔州 | NA | | NA | | 33.8 | (76) | 33.8 | (79) | 34.4 | (84) | 36.1 | (69) | 35.9 | (59) | 33.9 | (68) | 32.8 | (48) | 31.2 | (41) |
| 徐州 | 46.8 | (18) | 38.5 | (44) | 40.9 | (46) | 41.9 | (41) | 44.8 | (37) | 41.7 | (44) | 38.4 | (46) | 40.8 | (24) | 35.4 | (28) | 31.2 | (42) |
| 青岛 | NA | | 42.5 | (36) | 35.9 | (65) | 35.1 | (75) | 40.2 | (59) | 36.3 | (67) | 36.6 | (52) | 37.6 | (42) | 34 | (41) | 31.1 | (43) |
| 铜川 | NA | | 37.2 | (49) | 34.9 | (71) | 33.5 | (81) | 32.9 | (88) | 33.8 | (79) | 34.8 | (65) | 34.6 | (64) | 31.3 | (58) | 31 | (44) |
| 东营 | NA | | 46.9 | (24) | 44.4 | (31) | 41.3 | (43) | 38 | (72) | 38.8 | (54) | 37.6 | (49) | 35.4 | (60) | 30.2 | (65) | 31 | (45) |
| 扬州 | 36.2 | (22) | 32.3 | (57) | 31.8 | (82) | 34.1 | (78) | 41.2 | (52) | 39.7 | (50) | 36.4 | (57) | 37.1 | (47) | 34.7 | (36) | 30.9 | (46) |
| 洛阳 | NA | | 45.4 | (29) | 45.3 | (28) | 45.3 | (28) | 44.6 | (38) | 47.1 | (18) | 42.5 | (26) | 40.4 | (28) | 31.6 | (54) | 30.8 | (47) |
| 德州 | NA | | 49 | (16) | 42.3 | (40) | 38.4 | (60) | 40.2 | (58) | 37.8 | (61) | 33.1 | (72) | 31.5 | (78) | 30.2 | (64) | 30.7 | (48) |
| 平顶山 | NA | | 48.5 | (20) | 45.8 | (26) | 43.1 | (33) | 42.5 | (47) | 39.1 | (53) | 37.4 | (50) | 37.3 | (44) | 31.6 | (55) | 30.7 | (49) |
| 北京 | 56.4 | (8) | 57.5 | (4) | 49.8 | (18) | 51.4 | (13) | 46.3 | (31) | 46.9 | (19) | 39 | (43) | 33.9 | (67) | 32.4 | (50) | 30.5 | (50) |
| 三门峡 | NA | | 40.2 | (38) | 43.1 | (36) | 40.4 | (48) | 41.9 | (49) | 42.8 | (40) | 37.1 | (51) | 39.8 | (31) | 33.7 | (45) | 30.5 | (51) |
| 上海 | 48 | (15) | 49 | (17) | 46.1 | (25) | 42.5 | (38) | 44.5 | (39) | 39.9 | (48) | 41.9 | (29) | 39.4 | (37) | 39 | (12) | 30.4 | (52) |
| 马鞍山 | NA | | 36.2 | (50) | 35.2 | (70) | 34.2 | (77) | 41.2 | (51) | 38.5 | (57) | 37.8 | (48) | 36.6 | (53) | 34.2 | (38) | 30.4 | (53) |
| 潍坊 | NA | | 39.7 | (41) | 37 | (59) | 36.3 | (70) | 35.6 | (79) | 39.5 | (52) | 38.6 | (45) | 36.9 | (51) | 34.4 | (37) | 29.9 | (54) |
| 菏泽 | NA | | 42 | (37) | 39.6 | (52) | 36.4 | (68) | 39.5 | (64) | 37.5 | (62) | 33.8 | (71) | 37 | (48) | 30.9 | (59) | 29.8 | (55) |
| 九江 | NA | | NA | | 30.4 | (88) | 29.4 | (92) | 30 | (95) | 29.9 | (92) | 30.9 | (78) | 31.6 | (77) | 30.5 | (63) | 29.8 | (56) |
| 无锡 | 48.5 | (14) | 43.7 | (32) | 43.6 | (33) | 46.4 | (26) | 47.4 | (27) | 44.1 | (33) | 42.3 | (27) | 39.1 | (38) | 37.4 | (18) | 29.8 | (57) |
| 南京 | 59.1 | (6) | 51.4 | (14) | 51.2 | (15) | 43.6 | (32) | 48 | (23) | 44.1 | (32) | 44.8 | (14) | 39.9 | (30) | 36.2 | (24) | 29.7 | (58) |
| 泰安 | NA | | 44.3 | (31) | 43.5 | (34) | 38.9 | (56) | 40.8 | (57) | 38.3 | (59) | 34.2 | (69) | 35.2 | (61) | 33.5 | (46) | 29.7 | (59) |
| 承德 | 36.8 | (21) | 39.5 | (42) | 34.7 | (73) | 36.2 | (71) | 34 | (86) | 35.5 | (75) | 35.4 | (62) | 36.2 | (55) | 32.4 | (49) | 29.7 | (60) |
| 滁州 | NA | | NA | | 34.8 | (72) | 40.2 | (49) | 42.7 | (46) | 41.3 | (46) | 37.9 | (47) | 37.2 | (46) | 33.9 | (43) | 29.6 | (61) |
| 邯郸 | 58.3 | (7) | 48.1 | (22) | 52.6 | (9) | 57.2 | (6) | 50.1 | (16) | 45.3 | (27) | 40.4 | (36) | 40.4 | (27) | 30.1 | (66) | 29.5 | (62) |
| 衡水 | 47.5 | (17) | 45.9 | (27) | 46.8 | (23) | 44.2 | (30) | 41.4 | (50) | 37.3 | (65) | 35.4 | (63) | 37 | (49) | 32 | (53) | 29 | (63) |
| 宝鸡 | NA | | 35.5 | (52) | 38.9 | (53) | 40.6 | (47) | 39.5 | (63) | 33.4 | (81) | 32.5 | (74) | 33.5 | (70) | 29.4 | (69) | 28.8 | (64) |
| 苏州 | 54.8 | (10) | 54.6 | (10) | 54.4 | (6) | 49.6 | (19) | 50.3 | (13) | 46.2 | (22) | 43.1 | (22) | 37.3 | (45) | 35.6 | (26) | 28.6 | (65) |
| 南昌 | NA | | NA | | 32.3 | (81) | 33.6 | (80) | 38.6 | (69) | 35.4 | (76) | 34.5 | (67) | 33.5 | (72) | 28.3 | (79) | 28.5 | (66) |
| 蚌埠 | NA | | NA | | 34.3 | (75) | 40.8 | (46) | 41.1 | (53) | 38.7 | (56) | 36.2 | (58) | 37.5 | (43) | 31.5 | (56) | 28.2 | (67) |
| 大同 | NA | | 28.5 | (58) | 25 | (98) | 29.4 | (94) | 31.8 | (93) | 30.7 | (89) | 35.7 | (61) | 31.9 | (76) | 27.3 | (85) | 28 | (68) |
| 焦作 | NA | | 48.5 | (21) | 53.3 | (8) | 48.9 | (22) | 45.6 | (35) | 44.3 | (30) | 39.7 | (39) | 37.9 | (41) | 30.9 | (60) | 28 | (69) |
| 济宁 | NA | | 48.9 | (19) | 48.5 | (20) | 41.1 | (44) | 42.9 | (45) | 37.9 | (60) | 36.5 | (55) | 35.8 | (56) | 30.7 | (62) | 27.8 | (70) |
| 渡阳 | NA | | NA | | 43.3 | (35) | 43 | (34) | 41 | (54) | 38.3 | (58) | 35.4 | (64) | 35.7 | (59) | 29.5 | (68) | 27.5 | (71) |
| 开封 | NA | | 38 | (46) | 42.7 | (39) | 39.6 | (52) | 39.1 | (65) | 37.4 | (64) | 32.5 | (73) | 34.6 | (63) | 29.2 | (72) | 27.1 | (72) |
| 许昌 | NA | | NA | | 50.1 | (17) | 47.4 | (25) | 44.1 | (41) | 41.3 | (45) | 36.4 | (56) | 36.4 | (54) | 28.6 | (78) | 27 | (73) |
| 南阳 | NA | | 22.7 | (64) | 30.7 | (86) | 29.4 | (93) | 36.8 | (78) | 36.1 | (68) | 29.3 | (89) | 29.4 | (91) | 26 | (90) | 26.6 | (74) |
| 鄂尔多斯 | NA | | NA | | 23.4 | (103) | 24.7 | (105) | 29.1 | (103) | 27.4 | (101) | 26.5 | (97) | 26.1 | (100) | 25.7 | (92) | 26.5 | (75) |
| 淮安 | 23.3 | (28) | 23.3 | (63) | 24 | (100) | 25.7 | (102) | 35.3 | (80) | 31.2 | (86) | 29.2 | (90) | 29.5 | (90) | 28.8 | (75) | 26.4 | (76) |
| 新余 | NA | | NA | | 23.1 | (109) | 27.5 | (98) | 28.3 | (102) | 29.7 | (93) | 27.3 | (96) | 28.8 | (94) | 29.1 | (74) | 25.9 | (77) |
| 萍乡 | NA | | NA | | 20.6 | (103) | 23.4 | (106) | 29.7 | (97) | 27.4 | (102) | 30.6 | (82) | 29.3 | (92) | 26.2 | (89) | 25.9 | (78) |
| 商丘 | NA | | NA | | 35.6 | (68) | 31.8 | (85) | 37.6 | (74) | 34.5 | (77) | 32.3 | (75) | 33.5 | (71) | 27.1 | (87) | 25.8 | (79) |
| 宿迁 | NA | | NA | | 37 | (80) | 31.4 | (87) | 34.6 | (82) | 33.3 | (82) | 29.6 | (88) | 30.5 | (83) | 28.6 | (77) | 25.7 | (80) |
| 南通 | 35.8 | (24) | 39.8 | (40) | 36.8 | (67) | 34.4 | (76) | 38.9 | (68) | 35.6 | (71) | 33.9 | (70) | 29.7 | (87) | 28 | (82) | 25.6 | (81) |
| 阜阳 | NA | | NA | | 37.3 | (57) | 38.8 | (57) | 35.8 | (77) | 29.3 | (95) | 34.3 | (68) | 30.9 | (82) | 28 | (81) | 25.4 | (82) |
| 淮北 | NA | | NA | | 40.2 | (50) | 39.7 | (50) | 40.1 | (61) | 35.5 | (74) | 30.8 | (80) | 32.4 | (74) | 28.7 | (76) | 25.3 | (83) |
| 商洛 | NA | | NA | | 27 | (93) | 26.1 | (99) | 28.9 | (100) | 28 | (98) | 23.6 | (102) | 27.4 | (96) | 21.5 | (103) | 25.3 | (84) |
| 宜城 | NA | | NA | | 35.9 | (64) | 39.4 | (67) | 34.9 | (81) | 34 | (78) | 29.9 | (86) | 34.4 | (65) | 28.3 | (80) | 25.1 | (85) |
| 连云港 | 34.7 | (25) | 34.9 | (54) | 28.9 | (92) | 31.8 | (86) | 34.5 | (83) | 33 | (83) | 30.2 | (83) | 32.6 | (73) | 29.2 | (71) | 25 | (86) |
| 漯河 | NA | | NA | | 36.5 | (62) | 38.2 | (62) | 37.7 | (73) | 35.5 | (73) | 30.6 | (81) | 29.7 | (88) | 23.9 | (96) | 24.9 | (87) |
| 泰州 | NA | | 24 | (62) | 33.4 | (77) | 32 | (84) | 36.1 | (75) | 31.4 | (85) | 28.1 | (94) | 27.1 | (97) | 24.3 | (94) | 24.7 | (88) |
| 运城 | NA | | NA | | 36.1 | (63) | 35.7 | (73) | 34.1 | (85) | 31.7 | (84) | 28.2 | (93) | 31.1 | (80) | 27.3 | (86) | 24.5 | (89) |
| 周口 | NA | | 35.3 | (53) | 25.4 | (96) | 29.5 | (91) | 33.9 | (87) | 30.3 | (90) | 29.1 | (91) | 30.1 | (84) | 24 | (95) | 24.4 | (90) |
| 汉中 | NA | | NA | | 31.3 | (83) | 31.7 | (88) | 32.7 | (89) | 29.4 | (94) | 27.5 | (95) | 30 | (86) | 23.7 | (98) | 24.4 | (91) |
| 驻马店 | NA | | NA | | 37.6 | (56) | 38 | (65) | 38.9 | (67) | 35.5 | (72) | 28.8 | (92) | 26.7 | (98) | 23.5 | (99) | 24.3 | (92) |
| 乌兰察布 | NA | | NA | | 30.7 | (85) | 31.5 | (90) | 29.7 | (96) | 27.9 | (99) | 29.6 | (87) | 26.6 | (99) | 23.9 | (97) | 24 | (93) |
| 宜春 | NA | | NA | | 23.8 | (101) | 24.9 | (104) | 26.8 | (104) | 24.8 | (103) | 23 | (105) | 24 | (105) | 24.5 | (93) | 23.5 | (94) |
| 宿州 | NA | | NA | | 29.5 | (91) | 39.6 | (52) | 43 | (44) | 39.6 | (51) | 24.1 | (101) | 30.1 | (85) | 25.9 | (91) | 22.5 | (95) |
| 信阳 | NA | | 32.4 | (56) | 29.7 | (89) | 28.4 | (97) | 29.5 | (98) | 28.2 | (97) | 25.8 | (99) | 24.1 | (104) | 23.1 | (100) | 22.3 | (96) |
| 淮南 | NA | | NA | | 30.6 | (87) | 35.2 | (74) | 32.1 | (92) | 30.8 | (87) | 30.8 | (79) | 33.7 | (69) | 26.9 | (88) | 22.2 | (97) |
| 池州 | NA | | NA | | 23.4 | (102) | 32.6 | (83) | 38 | (71) | 35.9 | (70) | 32.2 | (76) | 29.7 | (89) | 27.6 | (84) | 22 | (98) |
| 烟台 | NA | | 39.2 | (43) | 32.4 | (80) | 36.3 | (69) | 32.3 | (91) | 28.5 | (96) | 30 | (85) | 32 | (75) | 29.9 | (67) | 21.3 | (99) |
| 六安 | NA | | NA | | 22.2 | (106) | 38.2 | (61) | 38 | (70) | 36.4 | (66) | 31.1 | (77) | 31.5 | (79) | 29.2 | (73) | 21.1 | (100) |
| 安庆 | NA | | NA | | 31.3 | (84) | 36.6 | (66) | 36.1 | (76) | 30.7 | (88) | 30.1 | (84) | 29.2 | (93) | 27.9 | (83) | 21.1 | (101) |
| 上饶 | NA | | NA | | 29.6 | (90) | 31.6 | (89) | 29.4 | (99) | 22.5 | (106) | 22.7 | (106) | 25.6 | (101) | 23.1 | (101) | 20.7 | (102) |
| 吉安 | NA | | NA | | 21.1 | (108) | 22.7 | (107) | 20.7 | (110) | 20.4 | (110) | 23.3 | (103) | 22.7 | (106) | 18.8 | (109) | 19.6 | (103) |
| 盐城 | 26.8 | (27) | 25.2 | (61) | 26.7 | (94) | 26.1 | (100) | 28.3 | (101) | 27.6 | (100) | 25.7 | (100) | 24.2 | (103) | 22 | (102) | 19.3 | (104) |
| 赣州 | NA | | NA | | 20.1 | (110) | 21.9 | (109) | 24.3 | (107) | 22.4 | (107) | 19 | (111) | 19.2 | (110) | 18.5 | (110) | 19.2 | (105) |
| 景德镇 | NA | | NA | | 19.4 | (111) | 16.4 | (113) | 18.5 | (113) | 16.7 | (113) | 19.1 | (110) | 21.7 | (108) | 19.7 | (107) | 18.3 | (106) |
| 安康 | NA | | 16.4 | (65) | 17 | (112) | 17.4 | (112) | 20.7 | (109) | 22.2 | (108) | 20.8 | (108) | 19.9 | (109) | 16.7 | (112) | 18 | (107) |
| 亳州 | NA | | NA | | 41.1 | (44) | 33 | (82) | 32.5 | (90) | 30.1 | (91) | 26.1 | (98) | 28.1 | (95) | 21 | (105) | 17.8 | (108) |
| 威海 | NA | | 25.5 | (60) | 24.4 | (99) | 19.8 | (110) | 18.9 | (112) | 21.9 | (109) | 18.8 | (112) | 18.8 | (112) | 20.2 | (106) | 17.7 | (109) |
| 张家口 | 32.3 | (26) | NA | | 26.2 | (95) | 26 | (101) | 24.8 | (106) | 24.1 | (104) | 23.1 | (104) | 22.7 | (107) | 19.5 | (108) | 16.9 | (110) |
| 鹰潭 | NA | | NA | | 23.2 | (104) | 25 | (103) | 25.6 | (105) | 23.6 | (105) | 22.6 | (107) | 25.1 | (102) | 21.4 | (104) | 16 | (111) |
| 抚州 | NA | | NA | | 21.2 | (107) | 19.7 | (111) | 20.1 | (111) | 17.9 | (112) | 17.4 | (113) | 19 | (111) | 17.4 | (111) | 15.8 | (112) |
| 黄山 | NA | | NA | | 15.4 | (113) | 22.3 | (108) | 21.2 | (108) | 18.6 | (111) | 19.3 | (109) | 17.9 | (113) | 13.8 | (113) | 13 | (113) |

图 28: “3+110”城市气象调整后 2013 年至 2022 年二氧化氮季节年平均浓度（微克/立方米）年际变化表 (浓度列底纹从红到绿表示季节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)

北京大学环境科学中心

度低于 20 微克/立方米。

2015-2022 年排名升高（相对恶化）最多的前 20 个城市中，太原、阳泉和滨州属于重点关注的“2+26”城市，吕梁、临汾、晋中、铜川四市位于汾渭平原，需要持续关注。这些城市与 $PM_{10}$ 年均浓度排名升高最多的前二十个城市重合度较高。排名下降最多的前 20 个城市中，亳州、苏州、许昌、南京、驻马店、淮北、上海、泰安、阜阳和漯河这 10 个城市不属于“2+26”及汾渭平原城市，非重点关注区域城市，仍改善显著。

从七年累计降幅来看，有 11 个城市二氧化氮年均浓度不降反增，其中 7 个位于山西。吕梁二氧化氮七年累计增幅最高，为 19.5 微克/立方米，近一年上升了 0.9 微克/立方米，二氧化氮治理需要更加努力。亳州七年累计降幅最高，达 56.7%。七年累计降幅超过 40% 的城市有 10 个，分别为亳州、郑州、焦作、苏州、邢台、许昌、邯郸、济宁、南京与淄博；七年累计降幅超过 30% 的城市有 40 个。

相比于 2015 年，降幅最小的前二十个城市中有 7 个位于山西、5 个位于江西，其中江西省平均累计降幅较低，为 8.3%，而山西省相比 2015 年上升了 2.0%。内蒙古四市的降幅也较低，为 7.7%。河南、河北的平均二氧化氮累计降幅高于 30%，位列各省之首。北京市二氧化氮七年累计降幅也相当可观，达到了 38.8%，年均二氧化氮浓度也下降到了 30.5 微克/立方米。天津的二氧化氮污染水平却相对较高，年均浓度分别为 37.4 微克/立方米，在所有城市间排第 12 位。相比 2021 年，上海的二氧化氮浓度显著降低，一年的降幅高达 22.1%。此外，降幅最小的前二十个城市中有 6 个城市（吕梁、太原、阳泉、晋中、临汾、渭南）属于“2+26”和汾渭平原城市，这些城市较早开始污染治理，但改善相对不足。

**上述关于二氧化氮年度趋势的讨论说明，在七年间“3+110”城市的二氧化氮浓度下降程度不高，但近一年下降幅度十分可观，各城市二氧化氮浓度初显下降势头。山西的二氧化氮治理情况相对落后，年均二氧化氮浓度排名已上升到各省首位。各省的省会城市近年来二氧化氮污染均较为严重，这与二氧化氮排放大量来源于移动源 (车辆) 的特点是吻合的。太原、西安、石家庄均位列 2022 年全年平均二氧化氮浓度排名前十，天津位列排名前十五，这些城市 2022 年全年平均二氧化氮浓度均高于 37 微克/立方米。相较而言，北京、上海的二氧化氮治理已经取得了不错的成效。**

## 3.6 八小时臭氧

臭氧（$O_3$）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 [18]。同时，臭氧可促使空气中的气体污染物转化为颗粒物，进而转化为 $PM_{2.5}$。因此，近地面臭氧浓度超标，其危害程度不亚于 $PM_{2.5}$。

中国这几年臭氧污染问题日益突出，臭氧和 $PM_{2.5}$ 已成为大气污染的两个首要污染物。低空臭氧的生成主要来自大气光化学反应。已知的低空臭氧生成的一个重要途径是：

$$NO_2 + O_2 \xrightarrow{\text{紫外光}} NO + O_3$$

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

$$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$$

北京大学环境科学中心

这个反应不需要光照作为条件，在白天和夜晚都会发生。机动车行驶，尤其是低速行驶时燃料的不完全燃烧，会产生氮氧化物。从上述两个反应中可以看到，氮氧化物是臭氧的重要前体物。

我国关于臭氧的标准基于日最高的 8 小时平均浓度。其中，一级标准限值是 100 微克/立方米，二级是 160 微克/立方米。美国环境保护署关于臭氧的限值标准为 0.07ppm（约为 140 微克/立方米），要求一年间第四高的最大 8 小时平均浓度值的三年平均不超过以上限值，这实际上是非常严格的。

由于臭氧的生成受到光照强度的影响，一天中臭氧浓度差异很大，光照越强，臭氧浓度越高。由于人们的活动主要集中在光照较强的白天，分析包含夜间时段的臭氧浓度会低估其对人体健康的影响。国家标准是基于臭氧最高 8 小时的浓度，因此，我们这里分析中午 12 时到傍晚 20 时共 8 小时的臭氧浓度数据，并计算其气象调整后的平均浓度。

图 29-30、图 32和图 33分别展示了“3+110”城市 8 小时臭氧经气象调整的季节平均浓度时间序列图，七年累计增幅和一年增幅，年度平均浓度及排名。附录中图 31展示了“3+110”城市气象调整后 2013 年至 2022 年八小时臭氧季节平均浓度地图。图 34-35还展示了 8 小时臭氧经气象调整的季节 90% 分位数浓度时间序列图。根据上述六图一表，我们可以总结出 8 小时臭氧浓度如下几个特征：

- **季度评估**

根据图 29-30，臭氧具有与前五种污染物不同的季节效应，在夏季浓度最高，冬季最低。这是由于夏天光照强，臭氧的产生与光照强度高度相关而造成的。其中江淮地区春夏两季浓度更接近，相比其它区域的城市冬季浓度更高，这与其较高的平均气温有关。

**2015 年春季“3+110”城市 8 小时臭氧浓度均值（标准误差）为 98.4（22.5）微克/立方米，2021 年春季均值（标准误差）增长至 116.6（13.0）微克/立方米，2022 年春季均值（标准误差）继续上升至 123.8（11.1）微克/立方米。**2022 年春季山东莱芜和滨州两市浓度最高，均超过 140 微克/立方米；萍乡浓度最低，为 92.6 微克/立方米。相比 2015 年，2022 年有 106 个城市浓度增加，7 个城市浓度降低，改善的城市主要集中在河北、山东和山西各有 2 个，陕西有 1 个。相比 2021 年，2022 年改善微弱，仅 18 个城市改善，共有 95 个城市恶化。其中改善的城市山西有 6 个，山东有 4 市，河北和河南各有 3 个，安徽有 2 个。“3+110”城市一年增幅的平均值为 6.2%，其中淮南降幅最大为 5.6%；铜陵增幅最大为 24.9%。

**2015 年夏季“3+110”城市 8 小时臭氧浓度均值（标准误差）为 114.4（29.5）微克/立方米，2021 年夏季均值（标准误差）增长至 140.4（25.5）微克/立方米，2022 年夏季略微下降，均值（标准误差）为 139.0（22.6）微克/立方米。**2022 年夏季山东德州、河北石家庄和河南安阳浓度最高，均超过 170 微克/立方米；共 25 个城市夏季浓度超过 160 微克/立方米；共 94 个城市夏季浓度超过 120 微克/立方米；新余和赣州浓度最低，均不超过 90 微克/立方米。相比 2015 年，2022 年有 98 个城市浓度增加，安庆、宿州、滁州和芜湖七年累计增幅超过 200%，仅 15 个城市浓度下降，其中有 4 个城市在江苏。相比 2021 年夏季，“3+110”城市一年降幅的平均值仅 0.5%。2022 年夏季有 48 个城市恶化，65 个城市改善，恶化的城市包括江苏 11 市、安徽 8 市、山东 7 市、陕西 6 市、河南和江西各 5 市、山西 3 市、河北 2 市和上海。尽管 2022 年夏季略微改善，研究区域各城市臭氧平均浓度依旧基本都超过了中国和世卫组织 100 微克/立方米的标准，113 个城市中有 40 个城市的 8 小时臭氧平均浓度超过 150 微克/立方米。可以说，

北京大学统计学中心

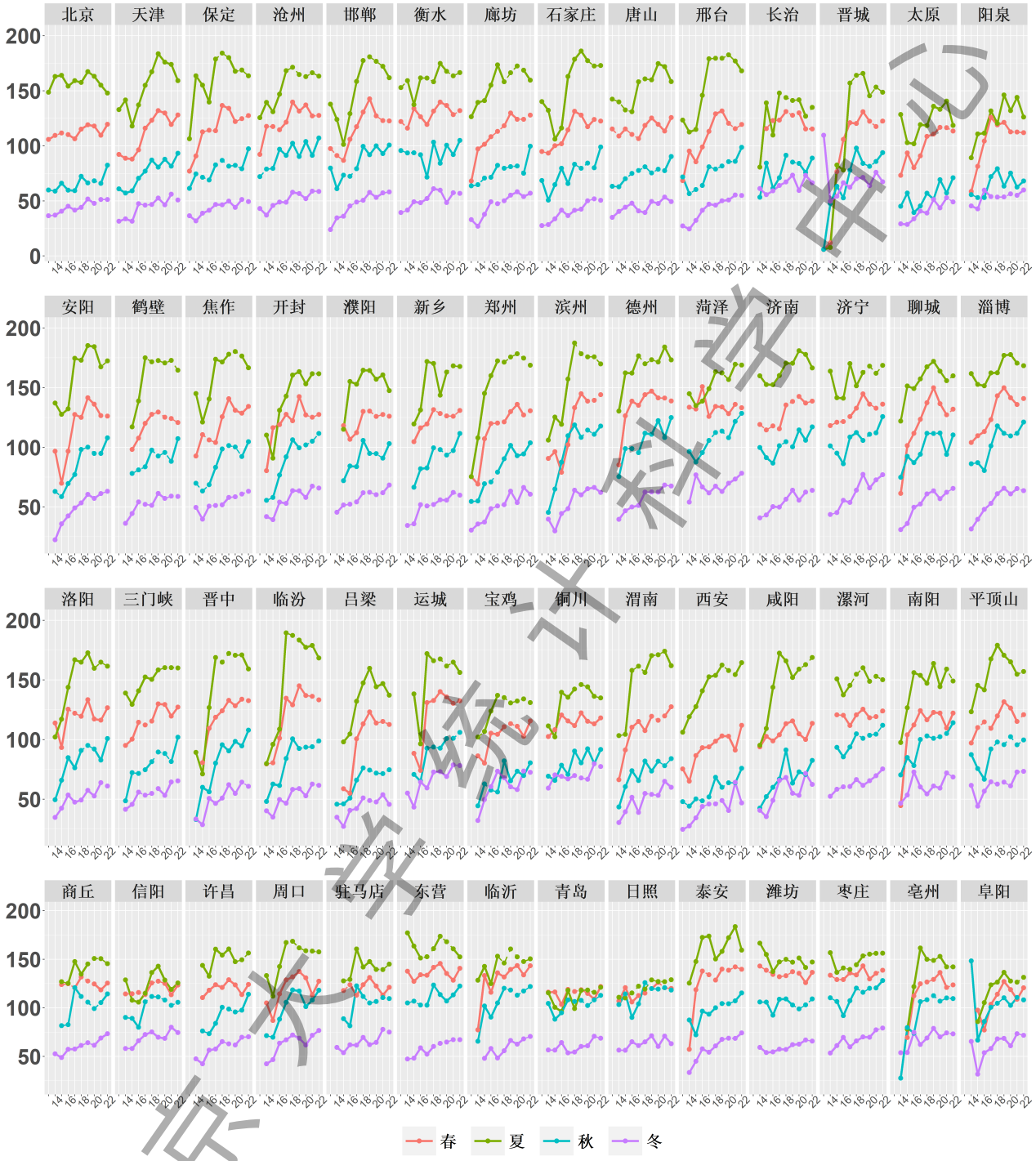



图 29: “3+110”城市气象调整后 2013 年至 2022 年八小时臭氧季节平均浓度（微克/立方米）变化序列图，图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

北京大学统计科学中心

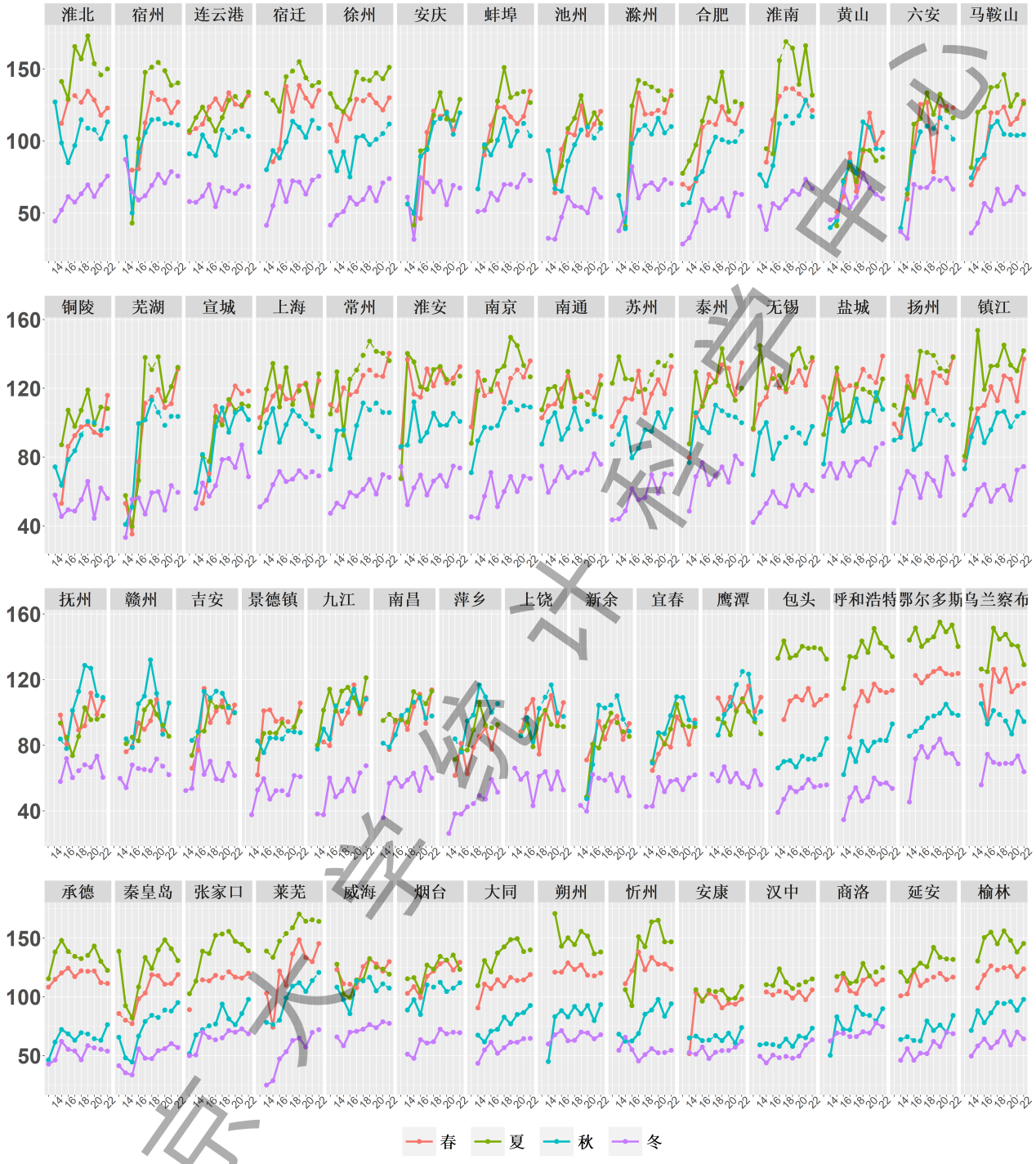



图 30: “3+110”城市气象调整后 2013 年至 2022 年八小时臭氧季节平均浓度（微克/立方米）变化序列图，图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

北京大学统计科学中心

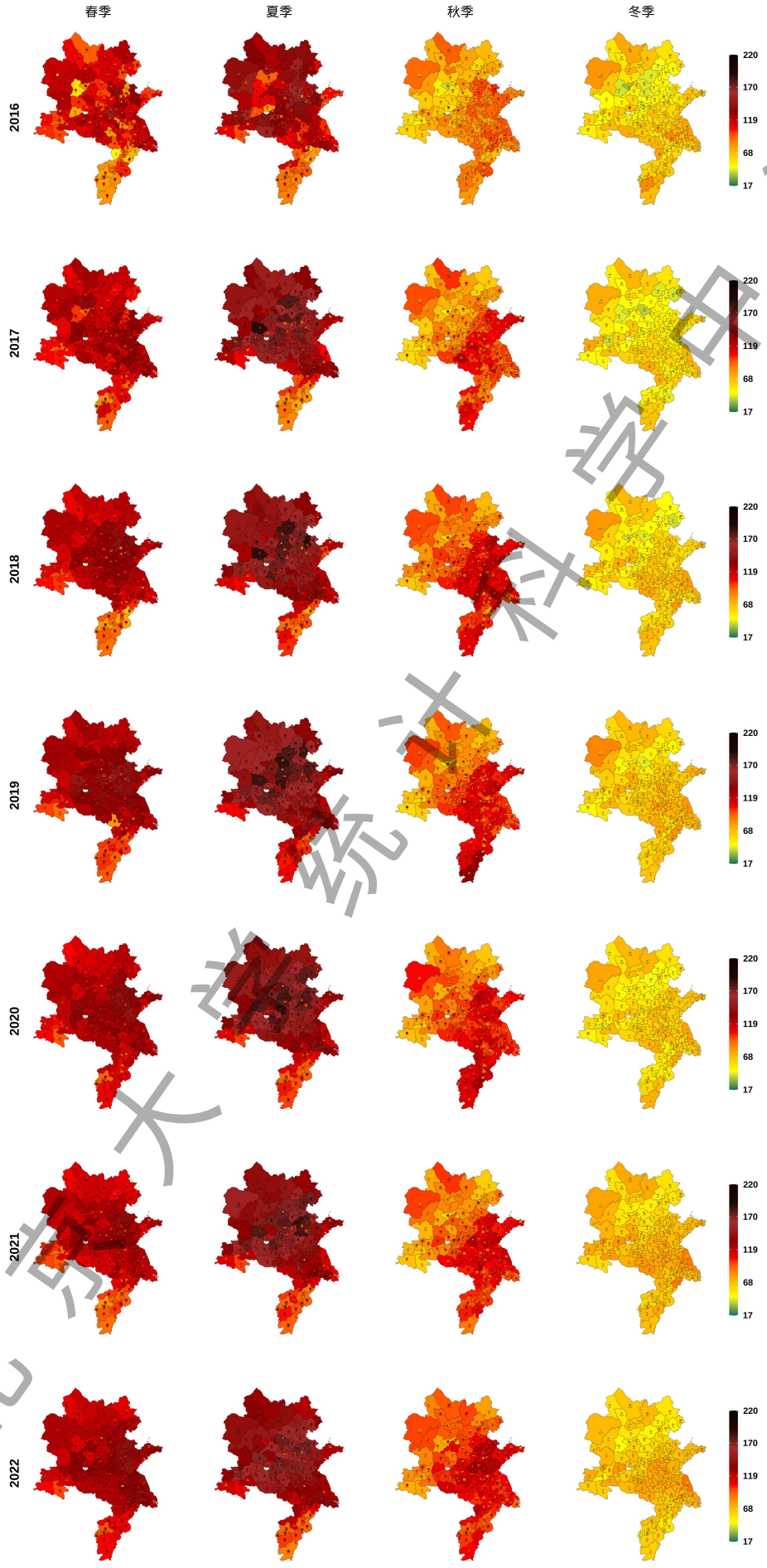
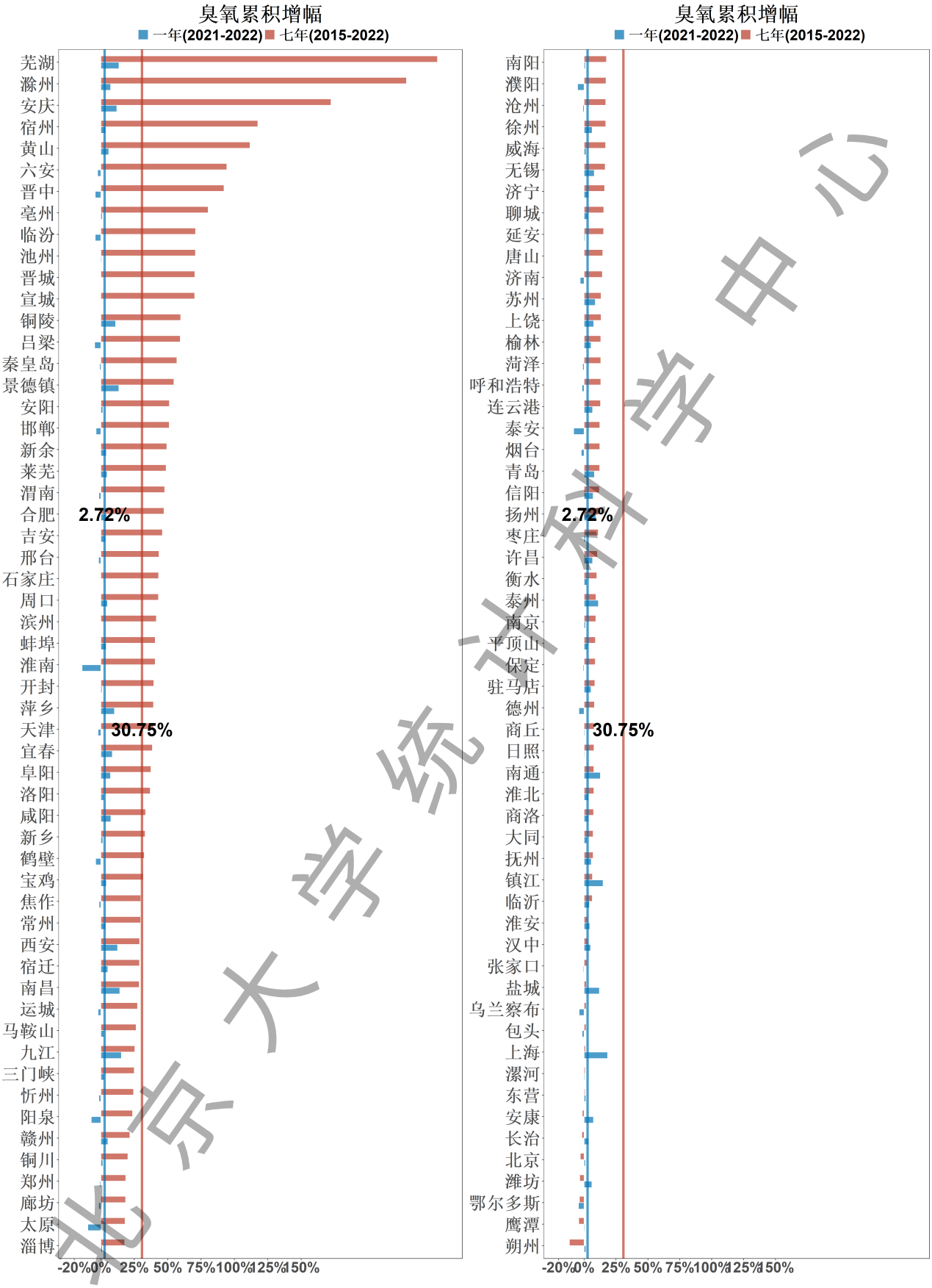



图 31: “3+110”城市气象调整后 2016 年至 2022 年八小时臭氧季节平均浓度（微克/立方米）

北京大学统计科学中心




北京大学统计科学中心

图 32: “3+110”城市气象调整后八小时臭氧浓度过去一年（蓝色）的增幅、七年（红色）的累计增幅
蓝色和红色竖线分别代表“3+110”城市的一年和七年平均增幅

| 城市 | 2013年 | 排名 | 2014年 | 排名 | 2015年 | 排名 | 2016年 | 排名 | 2017年 | 排名 | 2018年 | 排名 | 2019年 | 排名 | 2020年 | 排名 | 2021年 | 排名 | 2022年 | 排名 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 菏泽 | NA | | 107.3 | (4) | 107.9 | (8) | 113 | (2) | 110.6 | (15) | 119.3 | (8) | 118.2 | (21) | 115.7 | (15) | 125.2 | (3) | 127.2 | (1) |
| 济宁 | NA | | 106.7 | (5) | 100.8 | (20) | 101.2 | (20) | 114.6 | (3) | 115.2 | (18) | 122.7 | (7) | 120.3 | (6) | 119.9 | (9) | 126.9 | (2) |
| 德州 | NA | | 82.7 | (37) | 108.6 | (5) | 112.5 | (3) | 114.6 | (2) | 122.1 | (3) | 123.5 | (5) | 124.4 | (1) | 125.5 | (1) | 126.2 | (3) |
| 莱芜 | NA | | 86.3 | (34) | 78.2 | (75) | 99.2 | (26) | 104 | (43) | 116.8 | (12) | 123.9 | (4) | 114.9 | (19) | 119.8 | (10) | 125.5 | (4) |
| 枣庄 | NA | | 113.5 | (3) | 108.3 | (7) | 107.9 | (5) | 110.6 | (17) | 116.1 | (15) | 120.6 | (12) | 118.7 | (8) | 122.3 | (6) | 125.5 | (5) |
| 淄博 | NA | | 95.9 | (16) | 97.3 | (29) | 98.3 | (33) | 109.9 | (19) | 121.2 | (5) | 126.1 | (1) | 122.4 | (4) | 120.9 | (7) | 123.5 | (6) |
| 滨州 | NA | | 70.4 | (51) | 79.2 | (73) | 82.6 | (90) | 104.4 | (41) | 125.8 | (1) | 123 | (6) | 123.6 | (2) | 123.1 | (5) | 123.5 | (7) |
| 泰安 | NA | | 75.9 | (45) | 95.9 | (34) | 116.1 | (1) | 113.9 | (5) | 110 | (39) | 117.5 | (23) | 121 | (5) | 125.3 | (2) | 122.2 | (8) |
| 济南 | NA | | 104.9 | (7) | 100.4 | (22) | 101.9 | (15) | 106.7 | (30) | 116.8 | (13) | 118.3 | (19) | 123.5 | (3) | 120.8 | (8) | 121.6 | (9) |
| 临沂 | NA | | NA | | 106.4 | (11) | 97.4 | (38) | 110.6 | (16) | 113.4 | (25) | 121.2 | (11) | 117.9 | (10) | 116.8 | (14) | 121.5 | (10) |
| 东营 | NA | | 116.8 | (2) | 111.5 | (2) | 111.7 | (4) | 110.3 | (18) | 121.6 | (4) | 124.1 | (3) | 118.8 | (7) | 117.4 | (13) | 120.7 | (11) |
| 周口 | NA | | 88 | (29) | 78.9 | (74) | 102.2 | (12) | 117.2 | (1) | 122.7 | (2) | 121.3 | (10) | 113.2 | (25) | 112.8 | (20) | 120 | (12) |
| 运城 | NA | | NA | | 85.3 | (61) | 75.1 | (105) | 113.9 | (6) | 116.4 | (14) | 118.5 | (18) | 116.9 | (13) | 118.7 | (11) | 118.3 | (13) |
| 新乡 | NA | | NA | | 81.6 | (69) | 95.4 | (47) | 106.2 | (32) | 113.4 | (27) | 106.5 | (71) | 109.6 | (39) | 113.4 | (19) | 117.5 | (14) |
| 安阳 | NA | | 79.8 | (41) | 73 | (88) | 85.3 | (83) | 107.1 | (27) | 112.4 | (30) | 121.9 | (8) | 118.1 | (9) | 112.6 | (22) | 117.4 | (15) |
| 焦作 | NA | | 89.3 | (28) | 83.7 | (64) | 91.5 | (60) | 103.1 | (49) | 111.9 | (34) | 119.6 | (14) | 117.5 | (11) | 114.6 | (18) | 117.2 | (16) |
| 聊城 | NA | | 72.3 | (48) | 95.3 | (37) | 99.5 | (25) | 106.9 | (29) | 119.4 | (7) | 124.3 | (2) | 117.3 | (12) | 109.8 | (39) | 117 | (17) |
| 徐州 | 94.6 | (2) | 87.8 | (31) | 96 | (33) | 94.9 | (53) | 108.9 | (22) | 108.4 | (52) | 109.8 | (56) | 108.3 | (46) | 110.2 | (36) | 116.7 | (18) |
| 开封 | NA | | 72 | (50) | 76.2 | (78) | 95.2 | (48) | 103.8 | (44) | 113.2 | (28) | 117.3 | (25) | 110.1 | (34) | 114.9 | (17) | 116.6 | (19) |
| 许昌 | NA | | NA | | 93.2 | (42) | 95.1 | (49) | 106.5 | (31) | 110.3 | (38) | 112.8 | (39) | 107.1 | (55) | 107.6 | (53) | 116.2 | (20) |
| 郑州 | 59 | (27) | 67 | (54) | 89.8 | (51) | 99.8 | (23) | 105.7 | (35) | 108.7 | (47) | 117.6 | (22) | 115.3 | (16) | 115.7 | (16) | 116 | (21) |
| 临汾 | NA | | 62 | (61) | 68.6 | (98) | 80.3 | (97) | 113.8 | (7) | 118.8 | (9) | 120 | (13) | 115.2 | (17) | 118 | (12) | 115.6 | (22) |
| 淮北 | NA | | NA | | 101.1 | (17) | 101 | (22) | 112.8 | (10) | 115.5 | (17) | 121.5 | (9) | 112.9 | (28) | 108.7 | (48) | 115.4 | (23) |
| 漯河 | NA | | NA | | 105.9 | (13) | 101 | (21) | 102.9 | (50) | 111.7 | (37) | 112.1 | (43) | 109.1 | (43) | 111.7 | (26) | 115.4 | (24) |
| 晋中 | NA | | NA | | 60.1 | (103) | 85.8 | (82) | 103.6 | (47) | 108.9 | (46) | 114.4 | (32) | 113.1 | (26) | 115.9 | (15) | 115.1 | (25) |
| 衡水 | 102.5 | (1) | 102.6 | (9) | 103.5 | (15) | 107.1 | (6) | 101.2 | (60) | 113.5 | (24) | 114.6 | (29) | 113.3 | (23) | 110.4 | (31) | 115.1 | (26) |
| 宿迁 | NA | | NA | | 90.6 | (47) | 93.9 | (56) | 109.9 | (20) | 113.8 | (22) | 118.6 | (17) | 109.8 | (37) | 112.4 | (23) | 115 | (27) |
| 盐城 | 88.2 | (6) | 99.4 | (10) | 109.5 | (4) | 98 | (34) | 98.6 | (71) | 108.5 | (49) | 107.6 | (67) | 105.1 | (64) | 109.8 | (40) | 115 | (28) |
| 镇江 | 69.5 | (25) | 86.9 | (33) | 106.3 | (12) | 95.5 | (45) | 100.9 | (63) | 103.1 | (72) | 110.6 | (52) | 102.9 | (72) | 104.7 | (67) | 114.8 | (29) |
| 潍坊 | NA | | 118.7 | (1) | 113.4 | (1) | 104.7 | (10) | 111.4 | (13) | 112.3 | (31) | 112.3 | (40) | 112 | (30) | 109.3 | (44) | 114.6 | (30) |
| 商丘 | NA | | NA | | 95.3 | (36) | 97.5 | (37) | 111.7 | (12) | 109.9 | (41) | 110.7 | (50) | 109 | (44) | 110.8 | (31) | 114.6 | (31) |
| 沧州 | 83.2 | (13) | 93.3 | (21) | 93.5 | (41) | 101.8 | (16) | 107.5 | (26) | 117.8 | (10) | 110.9 | (48) | 114 | (21) | 111 | (30) | 114.2 | (32) |
| 三门峡 | NA | | 81 | (39) | 86.9 | (57) | 95.7 | (43) | 98.2 | (73) | 100.6 | (75) | 109.2 | (60) | 107.8 | (51) | 106.5 | (60) | 113.7 | (33) |
| 南阳 | NA | | 64.8 | (57) | 92.3 | (45) | 104.9 | (9) | 109.6 | (21) | 105.3 | (64) | 112.2 | (42) | 107.1 | (56) | 111.5 | (27) | 113.5 | (34) |
| 宿州 | NA | | NA | | 59.4 | (104) | 83.3 | (88) | 107 | (28) | 117.1 | (11) | 118.8 | (16) | 115 | (18) | 112.4 | (24) | 113.5 | (35) |
| 鹤壁 | NA | | NA | | 84.5 | (62) | 95.4 | (46) | 107.7 | (25) | 112.1 | (33) | 114.1 | (33) | 112.2 | (29) | 111.1 | (29) | 112.8 | (36) |
| 平顶山 | NA | | 92.4 | (23) | 93.8 | (39) | 95 | (51) | 108.4 | (24) | 114.9 | (20) | 115.6 | (27) | 113.8 | (22) | 109.6 | (41) | 112.8 | (37) |
| 驻马店 | NA | | NA | | 97 | (31) | 99.1 | (27) | 114.5 | (4) | 111.8 | (36) | 111.5 | (45) | 108.3 | (47) | 110.2 | (35) | 112.7 | (38) |
| 常州 | 83.9 | (11) | 96.3 | (15) | 89.9 | (50) | 95.1 | (50) | 101.1 | (61) | 109.9 | (40) | 113.1 | (35) | 109.7 | (38) | 110.8 | (32) | 112.6 | (39) |
| 洛阳 | NA | | 75.1 | (46) | 79.7 | (71) | 101.9 | (14) | 103.2 | (48) | 106.2 | (59) | 114.7 | (28) | 105.5 | (62) | 107 | (57) | 112.6 | (40) |
| 苏州 | 87.9 | (7) | 95.5 | (18) | 97.8 | (28) | 94.9 | (52) | 97.1 | (76) | 94.3 | (90) | 102.3 | (81) | 106.2 | (59) | 104.3 | (68) | 112.3 | (41) |
| 亳州 | NA | | NA | | 70.3 | (94) | 95.7 | (44) | 113.7 | (8) | 113.4 | (26) | 117.3 | (24) | 116.5 | (14) | 111.9 | (25) | 112.1 | (42) |
| 滁州 | NA | | NA | | 42.5 | (113) | 101.5 | (17) | 110.8 | (14) | 109.6 | (43) | 108 | (64) | 109.5 | (40) | 106.7 | (58) | 111.8 | (43) |
| 扬州 | 85.3 | (9) | 87.6 | (32) | 106.9 | (9) | 95.8 | (42) | 102.6 | (54) | 107 | (55) | 110.4 | (54) | 104.4 | (67) | 109.5 | (43) | 111.3 | (44) |
| 石家庄 | 82.8 | (15) | 76.2 | (44) | 76.2 | (79) | 84.8 | (84) | 94.9 | (84) | 108.7 | (48) | 109 | (61) | 107.3 | (53) | 107.1 | (56) | 111.2 | (45) |
| 濮阳 | NA | | NA | | 89.2 | (53) | 99.7 | (24) | 100.8 | (65) | 115.6 | (16) | 113.6 | (37) | 109.5 | (41) | 110.3 | (34) | 111.2 | (46) |
| 廊坊 | 72.8 | (22) | 82.1 | (38) | 87.8 | (55) | 96 | (41) | 104.1 | (42) | 101.6 | (73) | 108.1 | (63) | 109.1 | (42) | 105.4 | (63) | 111.1 | (47) |
| 邯郸 | 84.8 | (10) | 77.7 | (43) | 74.4 | (83) | 88.2 | (75) | 101 | (62) | 114.5 | (21) | 118.3 | (20) | 114.3 | (20) | 111.4 | (28) | 110.8 | (48) |
| 邢台 | 72.7 | (23) | 72.3 | (49) | 73.3 | (87) | 87.6 | (79) | 105.1 | (38) | 108.4 | (51) | 110.7 | (49) | 109.9 | (36) | 108.5 | (49) | 110.3 | (49) |
| 南京 | 75.4 | (20) | 95.5 | (17) | 98.8 | (26) | 101.3 | (18) | 100.5 | (67) | 103.3 | (71) | 114 | (34) | 110.7 | (32) | 109.6 | (42) | 109.8 | (50) |
| 保定 | 70.3 | (24) | 90.2 | (25) | 94.5 | (38) | 91.1 | (64) | 105.5 | (36) | 113.5 | (23) | 111.4 | (46) | 104 | (68) | 106 | (61) | 109.4 | (51) |
| 蚌埠 | NA | | NA | | 83.7 | (65) | 91.3 | (62) | 102.7 | (51) | 114.9 | (19) | 103.3 | (78) | 104.9 | (65) | 110 | (37) | 109.3 | (52) |
| 连云港 | 90.5 | (4) | 93 | (22) | 100.2 | (24) | 101.2 | (19) | 95.2 | (83) | 103.4 | (69) | 107.3 | (69) | 106.7 | (57) | 106.5 | (59) | 109.2 | (53) |
| 淮南 | NA | | NA | | 71.8 | (90) | 86.3 | (81) | 113 | (9) | 120.5 | (6) | 119.5 | (15) | 113.1 | (27) | 124 | (4) | 109.2 | (54) |
| 安庆 | NA | | NA | | 43.2 | (112) | 75.8 | (104) | 91.5 | (91) | 104.1 | (66) | 109.5 | (58) | 102.7 | (73) | 98.9 | (85) | 108.8 | (55) |
| 淮安 | 78.3 | (17) | 104.1 | (8) | 106.6 | (10) | 98.7 | (29) | 100.7 | (66) | 105.8 | (62) | 107.9 | (65) | 102.5 | (75) | 107.3 | (54) | 108.5 | (56) |
| 威海 | NA | | 106.3 | (6) | 92.2 | (46) | 91.4 | (61) | 101.5 | (59) | 108.6 | (57) | 114.5 | (31) | 108 | (50) | 108.8 | (47) | 108.5 | (57) |
| 烟台 | NA | | 89.6 | (27) | 92.5 | (43) | 88 | (76) | 103.8 | (45) | 103.9 | (67) | 111.9 | (44) | 108.9 | (45) | 108.9 | (46) | 108.5 | (58) |
| 渭南 | NA | | 60.9 | (62) | 73.9 | (85) | 98.5 | (30) | 95.4 | (82) | 100.2 | (79) | 104.4 | (74) | 105.6 | (61) | 109.3 | (45) | 108.3 | (59) |
| 晋城 | 31.8 | (29) | 29.2 | (65) | 69.2 | (96) | 75.8 | (103) | 104.5 | (39) | 113.1 | (29) | 113 | (36) | 103.3 | (70) | 108.2 | (50) | 108 | (60) |
| 无锡 | 76.1 | (19) | 99.3 | (11) | 97 | (30) | 99 | (28) | 97.3 | (74) | 95.1 | (87) | 105.8 | (73) | 106.4 | (58) | 101.4 | (76) | 108 | (61) |
| 阜阳 | NA | | NA | | 70.5 | (93) | 80.6 | (95) | 96.5 | (78) | 103.3 | (70) | 110.6 | (51) | 102.4 | (76) | 104.8 | (65) | 108 | (62) |
| 天津 | 79.3 | (16) | 80.3 | (40) | 74.2 | (84) | 87.9 | (78) | 98.5 | (72) | 106.1 | (60) | 112.2 | (41) | 110 | (35) | 107.8 | (51) | 107.9 | (63) |
| 榆林 | NA | | NA | | 96.1 | (32) | 102.7 | (11) | 106.1 | (34) | 106.1 | (61) | 111.4 | (47) | 107.1 | (54) | 103.5 | (71) | 107.8 | (64) |
| 泰州 | NA | | 73.2 | (47) | 101.9 | (16) | 98.4 | (31) | 101.7 | (57) | 106.8 | (56) | 114.5 | (30) | 105.8 | (60) | 103.3 | (72) | 107.7 | (65) |
| 鄂尔多斯 | NA | | NA | | 108.6 | (6) | 107 | (7) | 108.8 | (23) | 111.9 | (35) | 116.3 | (26) | 113.2 | (24) | 112.7 | (21) | 107.7 | (66) |
| 日照 | NA | | 94.4 | (20) | 100.4 | (23) | 94.1 | (55) | 100.5 | (68) | 106.3 | (58) | 109.9 | (55) | 108.2 | (48) | 109.8 | (38) | 107.5 | (67) |
| 信阳 | NA | | 97.8 | (13) | 92.4 | (44) | 92 | (59) | 101.8 | (56) | 112.2 | (32) | 112.8 | (38) | 107.6 | (52) | 103.8 | (70) | 107.3 | (68) |
| 南通 | 93.1 | (3) | 97.3 | (14) | 100.9 | (19) | 98.4 | (32) | 105.4 | (37) | 101.5 | (74) | 99.6 | (86) | 100.5 | (81) | 102.1 | (75) | 107.2 | (69) |
| 咸阳 | NA | | 68.1 | (53) | 74.9 | (81) | 88 | (77) | 102.3 | (55) | 109.7 | (42) | 96.6 | (94) | 97.6 | (89) | 101.4 | (77) | 106.9 | (70) |
| 芜湖 | NA | | 46.1 | (64) | 45.3 | (111) | 74.8 | (106) | 99.4 | (70) | 104.6 | (65) | 105.9 | (72) | 92.3 | (104) | 99.8 | (83) | 106.6 | (71) |
| 张家口 | 73.3 | (21) | NA | | 98.9 | (25) | 97.8 | (35) | 102.7 | (52) | 107.1 | (54) | 107.4 | (68) | 102.5 | (74) | 104.8 | (66) | 106.4 | (72) |
| 青岛 | NA | | 98.2 | (12) | 90.4 | (49) | 89.8 | (76) | 99.7 | (69) | 94.3 | (89) | 101.1 | (83) | 99.1 | (85) | 101 | (78) | 106.2 | (73) |
| 唐山 | 89 | (5) | 88 | (30) | 90.6 | (48) | 91 | (65) | 99.8 | (81) | 99.9 | (78) | 102.6 | (80) | 105.1 | (63) | 104.1 | (69) | 106 | (74) |
| 铜川 | NA | | 85.7 | (35) | 86.7 | (58) | 102 | (13) | 97.2 | (75) | 103.6 | (68) | 104.2 | (76) | 104.6 | (66) | 102.3 | (74) | 105.6 | (75) |
| 马鞍山 | NA | | 65.4 | (56) | 82.6 | (67) | 89.7 | (71) | 104.5 | (40) | 109.4 | (45) | 107.7 | (66) | 99.7 | (83) | 104.9 | (64) | 105.3 | (76) |
| 朔州 | NA | | NA | | 110.7 | (3) | 105.9 | (8) | 106.1 | (33) | 105.6 | (63) | 109.6 | (57) | 108 | (49) | 99.6 | (84) | 104.9 | (77) |
| 合肥 | 58 | (28) | 60.8 | (63) | 71.7 | (91) | 90.4 | (67) | 96.8 | (77) | 98.7 | (81) | 108.1 | (62) | 95.5 | (95) | 100.7 | (80) | 104.8 | (78) |
| 忻州 | NA | | NA | | 86.2 | (59) | 83 | (89) | 100.9 | (64) | 100.4 | (76) | 110.5 | (53) | 110.7 | (33) | 102.6 | (73) | 104.8 | (79) |
| 大同 | NA | | 77.7 | (42) | 89.5 | (52) | 90.4 | (68) | 94 | (86) | 97.8 | (82) | 100.9 | (85) | 102.4 | (77) | 101 | (79) | 104 | (80) |
| 上海 | 83.5 | (12) | 95.4 | (19) | 105.5 | (11) | 97.7 | (36) | 102.6 | (53) | 99.7 | (79) | 104 | (77) | 103.2 | (71) | 95 | (93) | 103.4 | (81) |
| 六安 | NA | | NA | | 55.5 | (108) | 92.3 | (57) | 103.7 | (46) | 109.5 | (44) | 94.9 | (101) | 111.3 | (31) | 107.2 | (55) | 101.7 | (82) |
| 长治 | NA | | NA | | 98.7 | (27) | 86.3 | (74) | 101.6 | (58) | 108.4 | (50) | 106.9 | (70) | 103.8 | (69) | 97.8 | (87) | 101.4 | (83) |
| 九江 | NA | | NA | | 77.7 | (77) | 84.4 | (85) | 89.4 | (95) | 89.8 | (101) | 95 | (100) | 98 | (88) | 91.2 | (100) | 101.4 | (84) |
| 乌兰察布 | NA | | NA | | 101 | (18) | 96.4 | (40) | 112.1 | (11) | 107.7 | (53) | 109.5 | (59) | 102.4 | (78) | 107.7 | (52) | 101.2 | (85) |
| 商洛 | NA | | NA | | 93.8 | (40) | 94.6 | (54) | 88.6 | (97) | 93.4 | (93) | 99.5 | (88) | 97.2 | (92) | 97.2 | (88) | 101 | (86) |
| 池州 | NA | | NA | | 58.8 | (106) | 72.3 | (108) | 90.4 | (94) | 93.1 | (94) | 104.4 | (75) | 93.4 | (101) | 100 | (82) | 100.6 | (87) |
| 秦皇岛 | 82.8 | (14) | 63.9 | (59) | 59.3 | (105) | 82.2 | (91) | 90.8 | (92) | 93.6 | (92) | 98.6 | (91) | 100.9 | (80) | 100.1 | (81) | 100.4 | (88) |
| 延安 | NA | | 82.9 | (36) | 84.4 | (63) | 88.6 | (72) | 88.2 | (98) | 92.7 | (96) | 98.1 | (92) | 96.8 | (93) | 96.7 | (90) | 100.3 | (89) |
| 北京 | 87.7 | (8) | 92.1 | (24) | 95.6 | (35) | 92.3 | (58) | 91.7 | (90) | 97.3 | (83) | 101.1 | (84) | 99.3 | (84) | 95.5 | (91) | 100.3 | (90) |
| 宝鸡 | NA | | 66.3 | (55) | 75 | (80) | 86.9 | (80) | 92.8 | (88) | 99 | (80) | 92.5 | (107) | 93.8 | (100) | 95.1 | (92) | 99.9 | (91) |
| 西安 | 63.6 | (26) | 64 | (58) | 74.7 | (82) | 81.7 | (93) | 86.1 | (101) | 91.7 | (99) | 93.7 | (104) | 91.3 | (105) | 93.4 | (97) | 99.8 | (92) |
| 宣城 | NA | | NA | | 70.1 | (95) | 67.8 | (111) | 93.6 | (87) | 96.7 | (85) | 99.4 | (89) | 102.1 | (79) | 105.7 | (62) | 99.6 | (93) |
| 呼和浩特 | NA | | NA | | 86.2 | (60) | 90.4 | (66) | 96.2 | (79) | 92.1 | (98) | 102.6 | (79) | 98.8 | (86) | 97.9 | (86) | 98.6 | (94) |
| 南昌 | NA | | NA | | 77.9 | (76) | 83.9 | (87) | 86.5 | (100) | 86 | (104) | 96.4 | (95) | 95.5 | (96) | 90.4 | (101) | 96.2 | (95) |
| 包头 | NA | | NA | | 89.1 | (54) | 91.3 | (63) | 90.7 | (93) | 93.7 | (91) | 96.1 | (98) | 92.5 | (103) | 94 | (95) | 95.7 | (96) |
| 铜陵 | NA | | NA | | 62.3 | (101) | 80.3 | (96) | 80.6 | (106) | 88.2 | (102) | 96.1 | (96) | 84.4 | (110) | 89.8 | (103) | 94.2 | (97) |
| 抚州 | NA | | NA | | 83.4 | (66) | 78.8 | (99) | 84 | (104) | 88 | (103) | 97.9 | (93) | 100.2 | (82) | 94.6 | (94) | 93.8 | (98) |
| 吕梁 | NA | | NA | | 57.5 | (107) | 62.9 | (113) | 85.2 | (102) | 97 | (84) | 101.6 | (82) | 94.4 | (98) | 96.9 | (89) | 92.6 | (99) |
| 阳泉 | NA | | 62.2 | (60) | 72 | (89) | 82.2 | (92) | 95.9 | (80) | 93 | (95) | 96.1 | (97) | 94.1 | (99) | 93.5 | (96) | 91.5 | (100) |
| 吉安 | NA | | NA | | 69.1 | (97) | 84.1 | (86) | 94.6 | (85) | 95 | (88) | 94.2 | (103) | 95.2 | (97) | 92.4 | (98) | 91.4 | (101) |
| 承德 | 78.1 | (18) | 90.1 | (26) | 100.7 | (21) | 96.7 | (39) | 92.2 | (89) | 92.6 | (97) | 95.9 | (99) | 96.5 | (94) | 90.1 | (102) | 91 | (102) |
| 赣州 | NA | | NA | | 73.8 | (86) | 77.7 | (101) | 86.8 | (99) | 91.6 | (100) | 99.5 | (87) | 97.5 | (90) | 83.8 | (107) | 89.7 | (103) |
| 汉中 | NA | | NA | | 79.6 | (72) | 80.2 | (98) | 83.6 | (105) | 82.4 | (107) | 77.9 | (113) | 82.6 | (111) | 83.6 | (108) | 89.4 | (104) |
| 景德镇 | NA | | NA | | 67.2 | (99) | 80.8 | (94) | 80.2 | (107) | 79.6 | (111) | 81.4 | (111) | 80.3 | (112) | 82.9 | (109) | 88.7 | (105) |
| 鹰潭 | NA | | NA | | 87.3 | (56) | 90 | (69) | 89.3 | (96) | 95.6 | (86) | 99.2 | (90) | 98.6 | (87) | 88.9 | (104) | 88.2 | (106) |
| 太原 | NA | | 69 | (52) | 70.6 | (92) | 63.8 | (112) | 74.1 | (112) | 80.8 | (110) | 87.3 | (110) | 90.7 | (106) | 91.8 | (99) | 88 | (107) |
| 黄山 | NA | | NA | | 46.1 | (110) | 68.1 | (109) | 78.5 | (109) | 68.9 | (113) | 94.3 | (102) | 97.5 | (91) | 85.5 | (106) | 87.2 | (108) |
| 上饶 | NA | | NA | | 79.7 | (70) | 88.6 | (73) | 78.1 | (110) | 83.4 | (106) | 93.4 | (105) | 93.2 | (102) | 86.8 | (105) | 86.9 | (109) |
| 安康 | NA | | NA | | 81.9 | (68) | 78.4 | (100) | 79.8 | (108) | 81 | (109) | 78.3 | (112) | 79 | (113) | 77.6 | (113) | 85.7 | (110) |
| 宜春 | NA | | NA | | 61.7 | (102) | 77.5 | (102) | 75.2 | (111) | 81.2 | (108) | 92.7 | (106) | 86.6 | (108) | 81.9 | (111) | 85.5 | (111) |
| 萍乡 | NA | | NA | | 63.7 | (100) | 68 | (110) | 69.2 | (113) | 77.7 | (112) | 89.3 | (109) | 84.9 | (109) | 81.8 | (112) | 85.5 | (112) |
| 新余 | NA | | NA | | 51.7 | (109) | 72.9 | (107) | 84.3 | (103) | 84.1 | (105) | 90.2 | (108) | 88.4 | (107) | 81.9 | (110) | 79.1 | (113) |

图 33: “3+110”城市气象调整后 2013 年至 2022 年臭氧季节年平均浓度（微克/立方米）年际变化表 (浓度列底纹从红到绿表示季节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)

北京大学环境科学中心

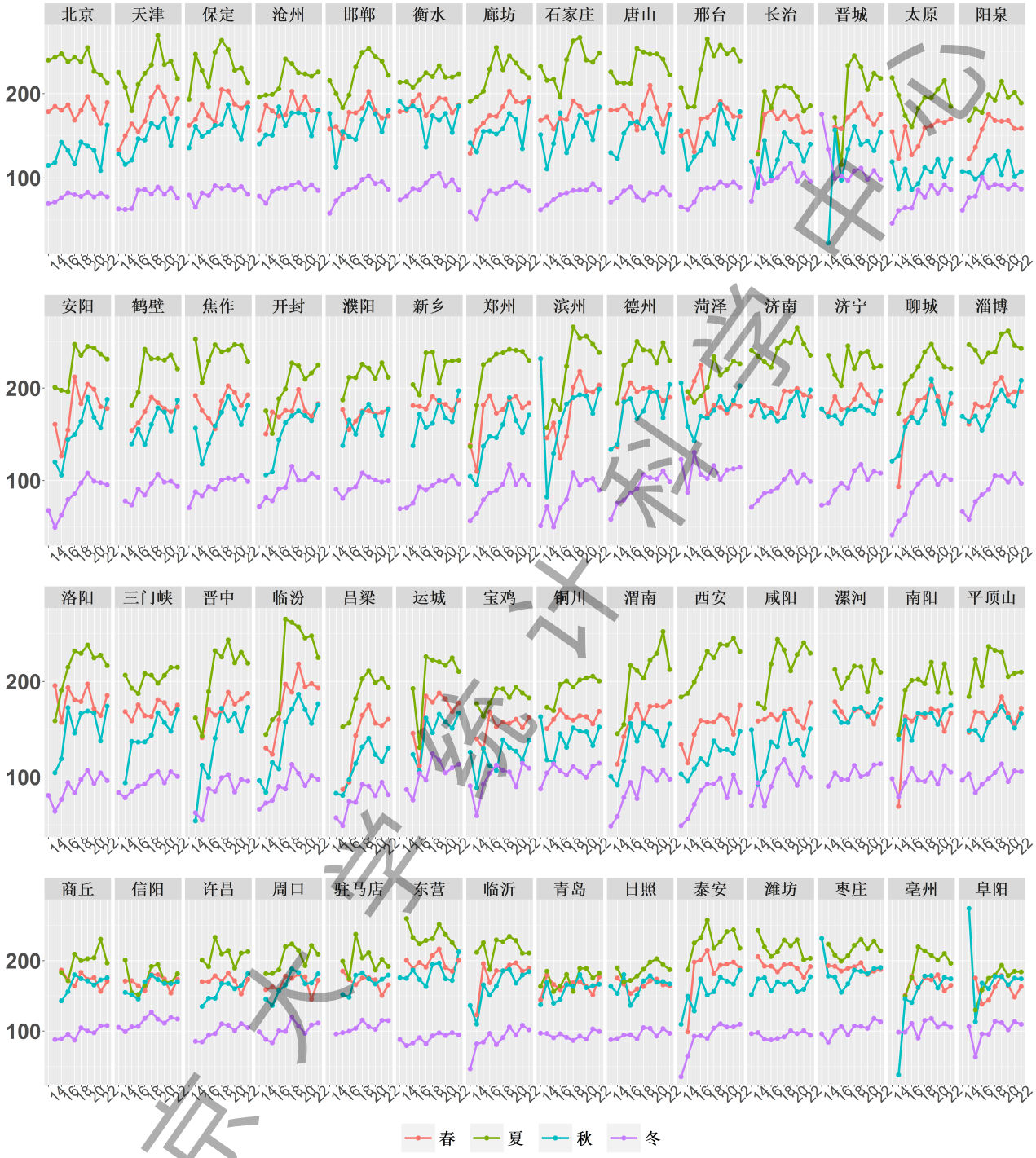



图 34: “3+110”城市气象调整后 2013 年至 2022 年八小时臭氧季节 90% 分位数浓度（微克/立方米）变化序列图，图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

北京大学统计科学中心

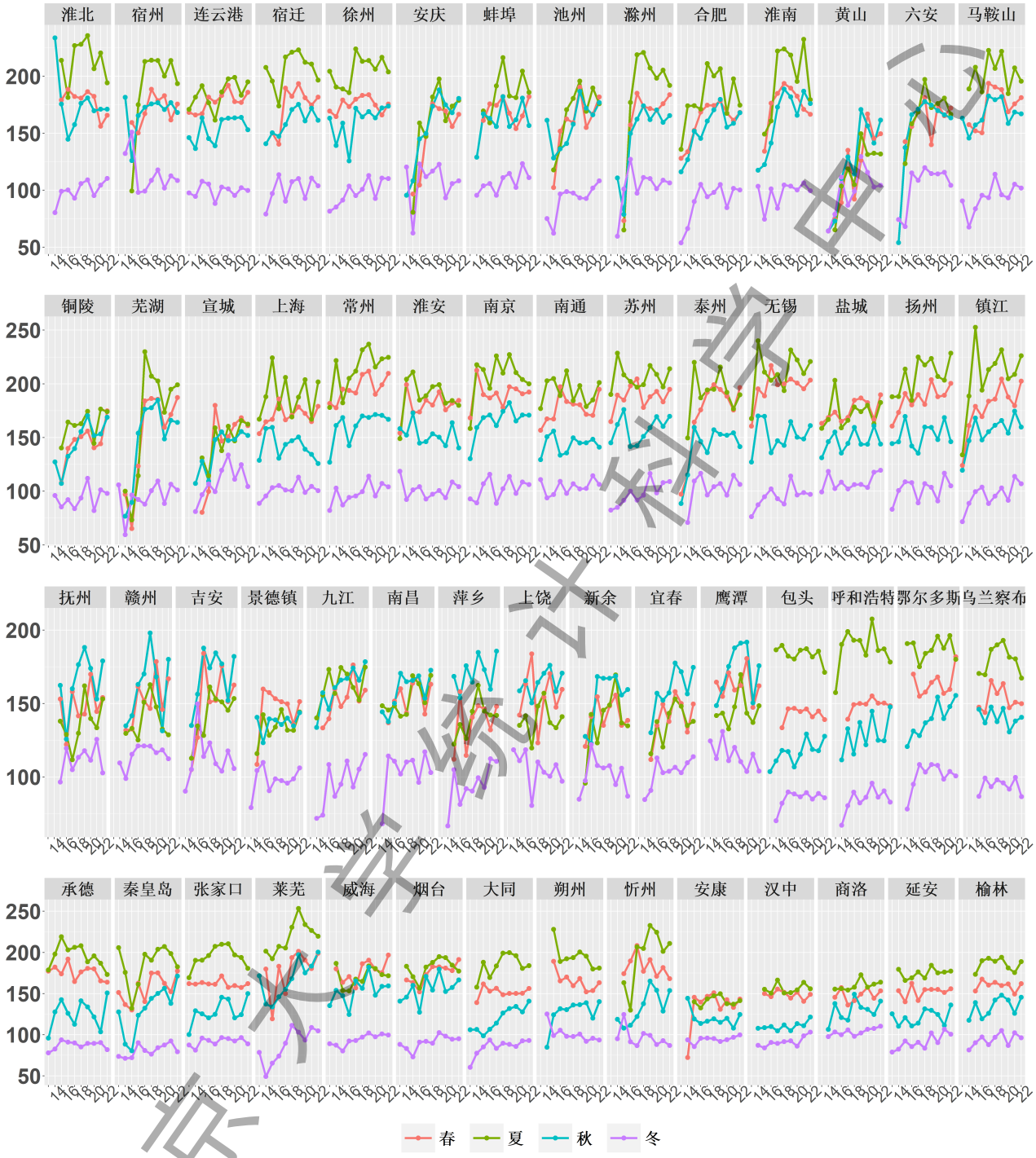



图 35: “3+110”城市气象调整后 2013 年至 2022 年八小时臭氧季节 90% 分位数浓度（微克/立方米）变化序列图，图中实线 (虚线) 代表在 5% 统计学显著水平比上一年有 (无) 显著的增加或减少

北京大学统计科学中心

夏季臭氧污染已经成为研究区域城市大气污染的一个突出问题。

**2015 年秋季“3+110”城市 8 小时臭氧浓度均值（标准误差）为 78.3（17.8）微克/立方米，2021 年秋季均值（标准误差）增长至 95.7（15.1）微克/立方米，2022 年秋季略微上升至 102.2（12.6）微克/立方米。**2022 年秋季山东的 8 个城市，菏泽、枣庄、济宁、德州、东营、临沂、淄博和莱芜浓度最高，均超过 120 微克/立方米，共 69 个城市浓度超过 100 微克/立方米；阳泉浓度最低，为 68.1 微克/立方米。相比 2015 年，2022 年有 104 个城市恶化，仅 9 个城市改善。相比 2021 年，2022 年秋季有 30 个城市改善，83 个城市恶化，“3+110”城市一年增幅的平均值为 6.7%。

**2015 年冬季“3+110”城市 8 小时臭氧浓度均值（标准误差）为 48.8（11.5）微克/立方米，2021 年冬季均值（标准误差）增长至 67.1（7.9）微克/立方米，2022 年冬季略微下降至 65.1（8.3）微克/立方米。**2022 年冬季盐城浓度最高，为 87.9 微克/立方米；吕梁浓度最低，为 45.7 微克/立方米。相比 2015 年，106 个城市浓度增加，仅 7 个城市（忻州、承德、上饶、鄂尔多斯、鹰潭、张家口和扬州）浓度下降。相比 2021 年，2022 年冬季 35 个城市恶化，78 个城市改善。“3+110”城市一年降幅的平均值为 3.1%。

- **年度评估：年度变化趋势与城市相对排名**

**根据图 33，2015 年“3+110”城市的臭氧浓度均值（标准误差）为 85.0（16.4）微克/立方米，2021 年上升至 105.0（10.6）微克/立方米，2022 年略微上升，年均臭氧浓度为 107.5（10.4）微克/立方米。**有 90 个城市臭氧季节年平均浓度超过 100 微克/立方米。从累计增幅来看，根据图 32，相比 2015 年，2022 年“3+110”城市臭氧七年累计增幅均值为 30.8%（40.0%）；相比 2021 年，2022 年一年增幅均值为 2.7%（5.6%）。由此可见，**臭氧年均浓度的增长速度有所放缓，但还没有形成下降趋势。**

年均臭氧浓度最高的三个城市分别是菏泽（127.2 微克/立方米）、济宁（126.9 微克/立方米）、德州（126.2 微克/立方米），均位于山东且相比上一年浓度上升。德州自 2015 年至 2022 年臭氧浓度始终位于所有“3+110”城市前五位，臭氧污染恶化趋势需要进一步控制。**2022 年臭氧年均浓度前十名为菏泽、济宁、德州、莱芜、枣庄、淄博、滨州、泰安、济南、临沂，10 个城市均为山东城市。可见臭氧污染应成为山东省大气治理的重要命题。**在 2022 季节年，仅 11 个城市年均臭氧浓度低于 90 微克/立方米，其中 7 个城市位于江西。

2015-2022 年排名升高（相对恶化）最多的前 20 个城市中，石家庄、邢台、邯郸、开封、安阳、新乡、焦作、滨州、莱芜、晋城十市属于“2+26”城市，临汾、晋中、运城三市位于汾渭平原，这些城市属于重点治理区域，需要加快 $PM_{2.5}$ 与臭氧协同治理的进程。排名下降最多的前 20 个城市中，只有长治属于“2+26”与汾渭平原城市，其余城市均不位于早期重点关注区域。

从七年累计增幅来看，“3+110”城市除承德、朔州、上海、鄂尔多斯年均臭氧浓度下降，其余城市 2022 年均臭氧浓度均大于 2015 年的浓度。承德累计七年降幅最高，为 9.6%。

相比于 2015 年，增幅最大的十个城市中有 7 个城市位于安徽，分别是滁州、安庆、芜湖、宿州、黄山、六安和池州。安徽省的七年累计增幅也最高，高达 72.2%，比第二高的省高了 44%。除安徽外，山西、江西、河南的累计增幅超过了 20%，分别为 28.2%、26.6% 和 21.6%。直辖市中，北京的年均臭氧浓度略有下降，上海几乎持平，天津的臭氧浓度七年累计增幅却达到了 39.8%，臭氧治理值得关注。此外，七年累计降幅最小的前二十个城市中有 8 个城市（晋中、临汾、吕梁、安阳、莱芜、晋城、滨州、开封）

北京大学统计学中心

属于“2+26”和汾渭平原城市，这些城市较早开始污染治理，但改善相对不足。

**上述关于臭氧年度趋势的讨论说明，臭氧治理仍有较大改善的空间，在全国范围内仍未形成稳定的下降趋势。山东臭氧年均浓度的基数较高，安徽近年来臭氧年均浓度增幅较大，这两个省在臭氧治理上需要更加努力。**

- **$O_3$ 极端污染（90% 分位数）**

图 34-35展示了研究区域城市 2013 年以来经气象调整的臭氧浓度 90% 分位数给定季节的时间序列，这从另一个侧面又刻画了臭氧污染的严峻形势。**2015 年“3+110”城市 90% 分位数浓度均值（标准误差）为 140.5（21.4）微克/立方米，2021 年上升至 155.8（13.9）微克/立方米，2022 年继续上升至 159.6（13.1）微克/立方米**。相比 2021 年，有 27 个城市 8 小时极端污染下降，仍有 86 个城市呈现增长态势，其中改善的城市中有 10 个分布在安徽，其余城市包括山西 4 个、江苏 4 个、山东 3 个、河南和内蒙古各 2 个、陕西渭南和江西新余。增幅最高的三个城市分别为赣州、北京和九江，增幅最大的前 10 个的城市中有 7 个城市位于江西。北京 2013 至 2019 年每年夏天 90% 分位数始终保持在 235 微克/立方米以上，近两年分别下降至 222.3 和 213.0 微克/立方米。江西、河北、河南沿太行山城市，山东西部城市，山西中部城市恶化趋势明显，尤其体现在夏季臭氧 90% 分位数浓度上。

2022 年“3+110”城市中夏季 90% 分位数超过 240 微克/立方米的有 2 个（石家庄和淄博）；超过 230 微克/立方米的有 7 个；超过 200 微克/立方米的有 53 个。浓度最高的 20 个城市中有 14 个属于“2+26”城市，区域内 $PM_{2.5}$ 与臭氧协同治理已迫在眉睫，尤其体现在降低极端污染发生的频次上。

# 4 六种常规空气污染物综合评价

本节将首先给出 $PM_{2.5}$ 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 2022 年的总体状况。

图 36给出“3+110”城市 2022 年和 2021 年 $PM_{2.5}$ 秋冬和 8 小时臭氧春夏平均浓度的联合分布。图 35(a)中的联合分布呈现出三个峰值，它们将“3+110”城市明显地分成三个群体。一个是主要由“2+26”城市、苏皖鲁豫地区和 8 个汾渭平原城市组成的高 $PM_{2.5}$ 和高臭氧群（双高群）；一个是主要由长三角和北方六省边缘地区城市构成的相对低 $PM_{2.5}$ 和低臭氧群（双低群）；第三个是主要由江西城市构成的集群，其春夏臭氧平均浓度显著低于前二者。北京虽然属于“2+26”城市，但依然保持在双低群，格外亮眼。

图 37给出了“3+110”城市 2022 和 2021 年 $PM_{2.5}$ 秋冬和 8 小时臭氧春夏年平均 90% 分位数浓度的分布。这一 $PM_{2.5}$ 和臭氧的极端污染的联合分布呈现出类似于图 36的两个峰值及围绕它们的两个群体（对于 2021 年，双低群处存在第三个群体），但群体间的界限不如图 36所展示的平均值分布分明。双高群仍主要由“2+26”城市、大部分苏皖鲁豫交界地区和汾渭平原城市组成，但少部分苏皖鲁豫交界地区城市靠近双低群。极端污染的双低群主要由江西、长三角地区和北方六省边缘地区城市构成。

根据图 36，相比 2021 年，2022 年 $PM_{2.5}$ 秋冬浓度整体有上升趋势，如渭南、运城等城市浓度上升幅度较大。从浓度分布上看，臭氧的平均浓度有上升趋势，但在 2021 年臭氧浓度高的城市，如德州、泰

北京大学统计学中心

安、临汾等，存在一定程度的改善。针对极端污染情况，根据图 37，$PM_{2.5}$ 的整体分布浓度有轻微程度的下降，显示出我国在治理极端污染方面的成效，但 8 小时臭氧（春夏）的 90% 分位数几无变化。复合型污染问题依然存在。

图 36和图 37说明我国仍然面临着 $PM_{2.5}$ 和臭氧的复合型污染问题。“3+110”城市中 $PM_{2.5}$ 浓度高的城市臭氧浓度也高，如“2+26”城市、汾渭平原 11 市和苏皖鲁豫交界地区；而 $PM_{2.5}$ 浓度低的城市臭氧浓度往往也低，如长三角和冀晋鲁豫陕的边缘城市。这说明有必要通过协同控制措施，加强对 $PM_{2.5}$ 与臭氧两种污染物的管控。

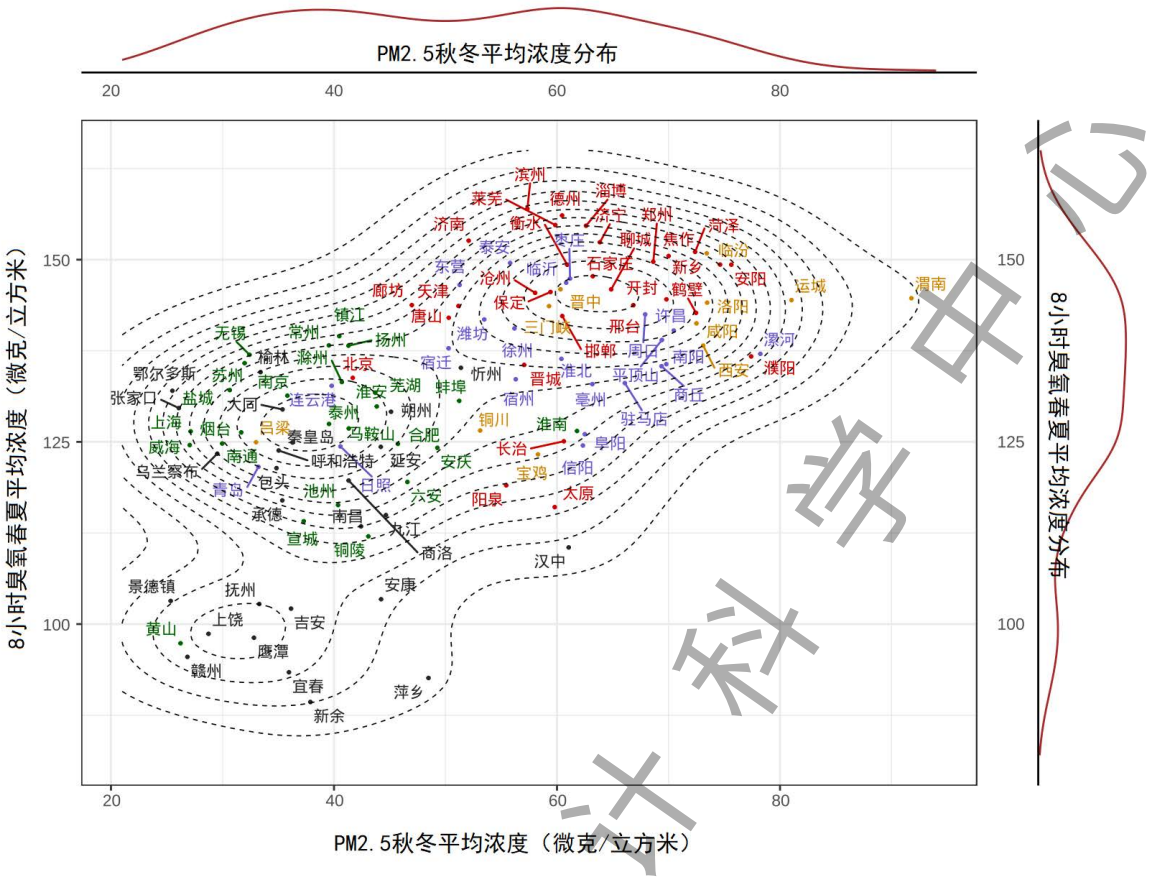
表 6给出每个城市过去三年或一年气象调整后的综合改善情况。由于 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 有重合部分，所以尽管我们使用六种污染物等权重平均，$PM_{2.5}$ 所占比例仍高于其他污染物。我们的方法去除了气象因素的干扰，所以表 6给出的是各城市污染物受人为影响的下降比例。为了体现 2022 年污染物浓度与 2019 年（疫情前）的变化情况，与上一份报告相比，我们将六年综合改善情况改为三年综合。根据表 6，110 个城市的三年平均改善率是 12.7%，而一年平均改善率是 1.3%。部分城市的一年累计平均降幅为负，这说明相比 2021 年，这些城市 2022 年的空气质量有所降低。改善排名前三分之一的 38 个城市中包含 24 个非“2+26”城市和汾渭平原 11 市（张家口、淮南、南京、秦皇岛、呼和浩特、包头、鹰潭、铜陵、吉安、常州、朔州、滁州、承德、大同、黄山、南通、蚌埠、池州、赣州、连云港、亳州、宣城、镇江和萍乡），同时改善排名后三分之一的城市中包含 16 个“2+26”城市和汾渭平原 11 市（长治、晋中、新乡、衡水、聊城、廊坊、运城、德州、三门峡、咸阳、西安、宝鸡、铜川、阳泉、渭南和鹤壁）。前三分之一的 38 个城市中有 24 个城市不在重点治理区域，但空气质量改善显著，说明污染治理颇有成效；而后三分之一的 34 个城市包含 16 个重点治理区域的城市，表明这些城市应当加强治理。对于 110 城市的数值变化及综合改善情况，可具体查看表 6。

图 38给出六种污染物各季节逐年变化率的情况。17-21 年，$PM_{2.5}$ 各季节污染情况总体上逐年降低。22 年夏、秋季相比 21 年有较大幅度的下降，降幅排名 25% 至 75% 的城市的降幅集中在 20% 附近。但 22 年春季相比 21 年无明显改善，且 22 年冬季相比 21 年有较大幅度的上升。$PM_{10}$ 夏、秋季的逐年降幅变化趋缓。21-22 年冬季 $PM_{10}$ 的浓度有较大幅度（集中在 25% 附近）的上升，同时春季浓度变化较少。17-21 年，二氧化硫各季节浓度总体上逐年降低，但降幅逐年减少；21-22 年，二氧化硫各季节浓度大致处于上升趋势，其中冬季增幅较为明显（集中在 10% 附近）。一氧化碳各季节降幅总体平稳。21-22 年夏、秋季存在一定程度的改善（集中在 10% 附近），春、冬季降幅不明显，且有接近一半的城市浓度上升。17-21 年，二氧化氮浓度总体降低，且下降幅度总体增加，但相比 21 年，超过一半的城市 22 年冬季浓度上升。22 年春夏秋三季的二氧化氮浓度相比 21 年有较好改善（降幅集中在 10% 附近）。臭氧各季节浓度总体呈上升趋势，21-22 年夏冬两季臭氧浓度略有改善，但有超过 75% 的城市春、秋季浓度上升（涨幅集中在 10% 附近）。

为了方便各级部门了解 2022 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 39、40和 41）和“3+110”城市 2021 年超标污染物情况的汇总表（表 7）。为了剔除 $PM_{10}$ 中 $PM_{2.5}$ 的部分，我们将 $PM_{10}$ 替换成了 $PM_{10-2.5}$。$PM_{10-2.5}$ 是 $PM_{10}$ 中空气动力学当量直径介于 2.5 微米到 10 微米之间的颗粒物，通过用 $PM_{10}$ 的浓度减去 $PM_{2.5}$ 的浓度而得到。

北京大学环境科学中心

(a) 2022 年




(b) 2021 年

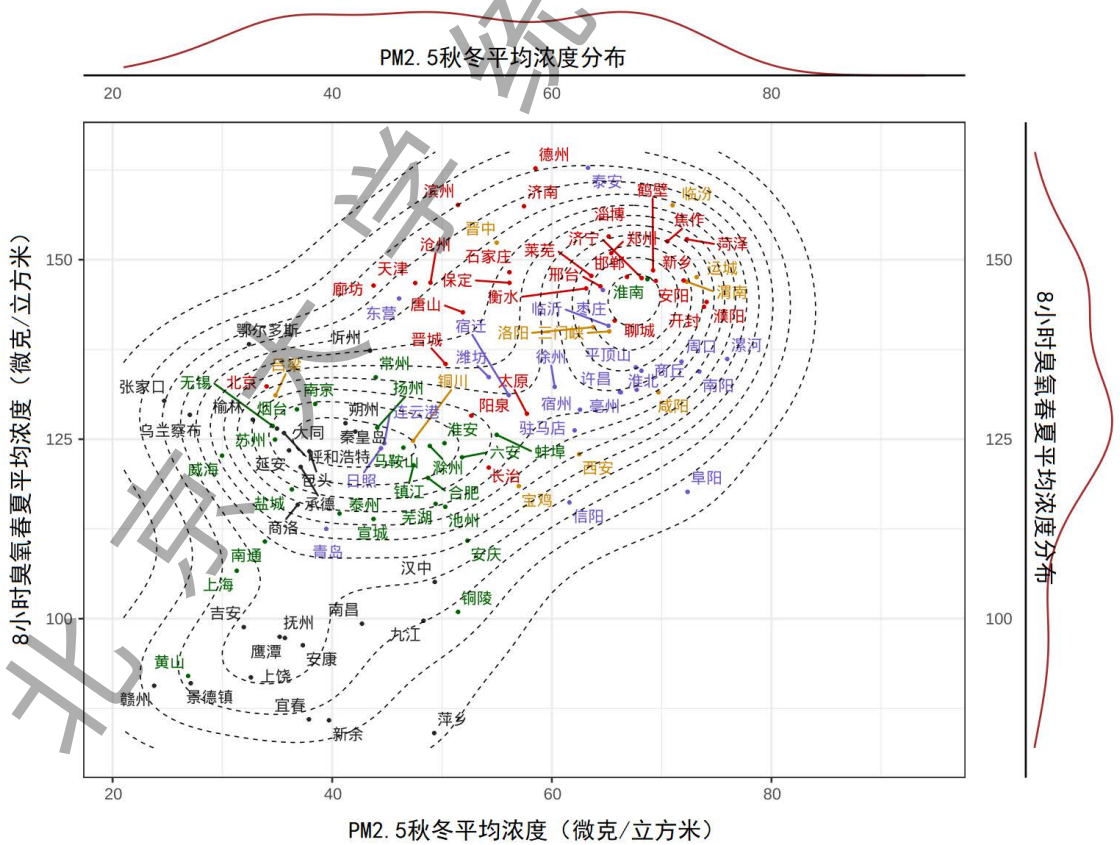
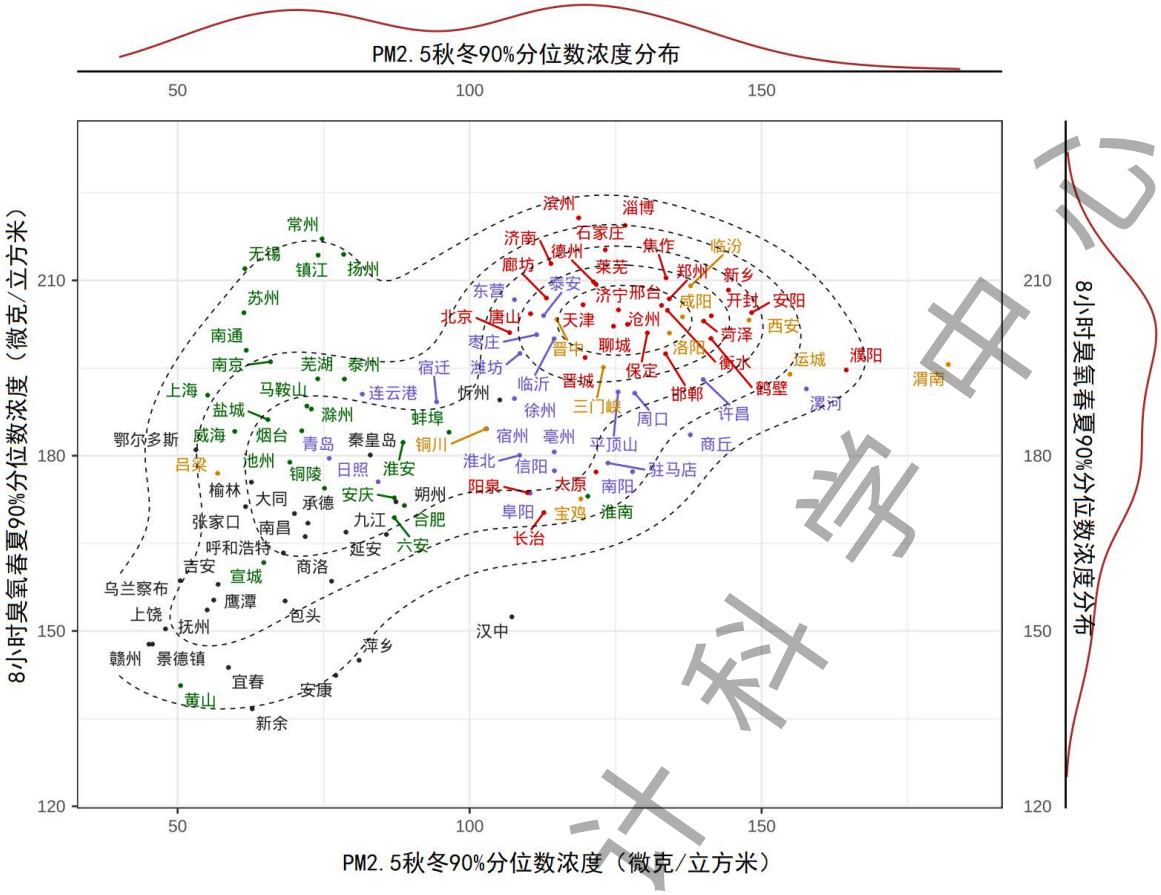



图 36: “3+110”城市 $PM_{2.5}$ 秋冬和八小时臭氧春夏（微克/立方米）平均浓度散点图，其中红色点代表“2+26”城市，棕色点代表汾渭平原城市，蓝色点代表苏皖鲁豫城市，绿色点代表长三角地区城市，黑色点代表其他城市

北京统计科学中心

(a) 2022 年




(b) 2021 年

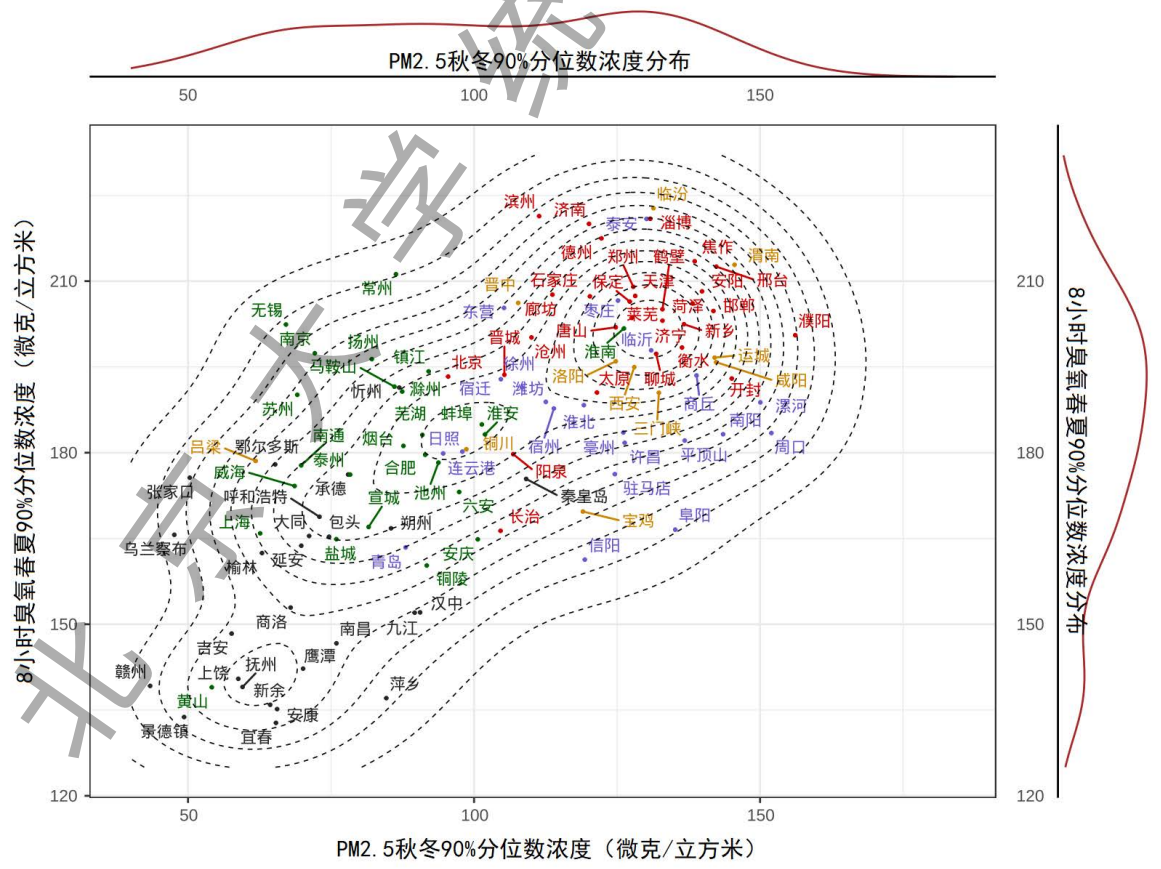



图 37: “3+110”城市 $PM_{2.5}$ 秋冬和八小时臭氧春夏（微克/立方米）年 90% 分位数浓度散点图，其中红色点代表“2+26”城市，棕色点代表汾渭平原城市，蓝色点代表苏皖鲁豫城市，绿色点代表长三角地区城市，黑色点代表其他城市

北京大学统计科学中心

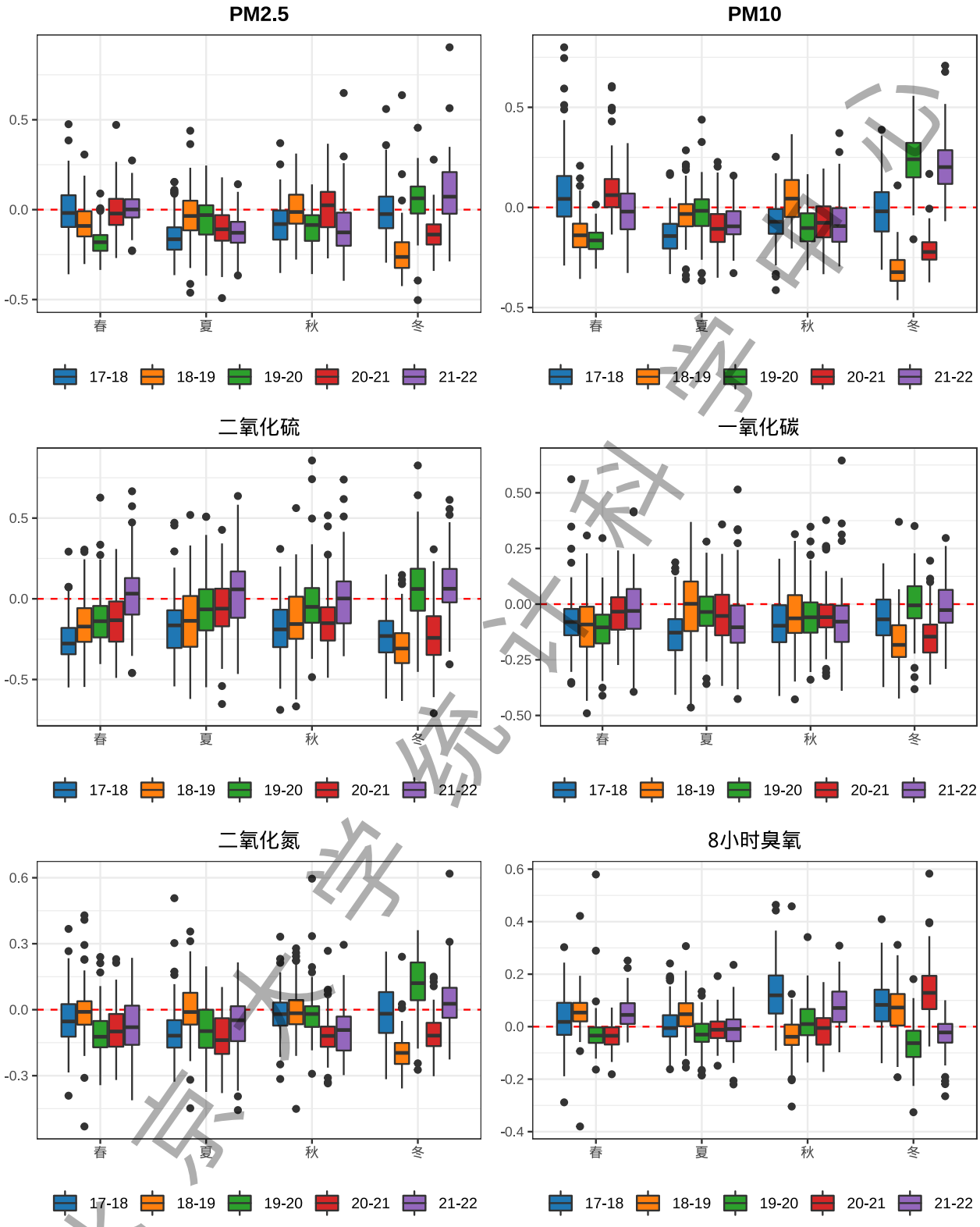



图 38: “3+110”城市六种污染物 2017 年-2022 年各季节平均浓度逐年变化幅度箱线图

北京大学统计科学中心

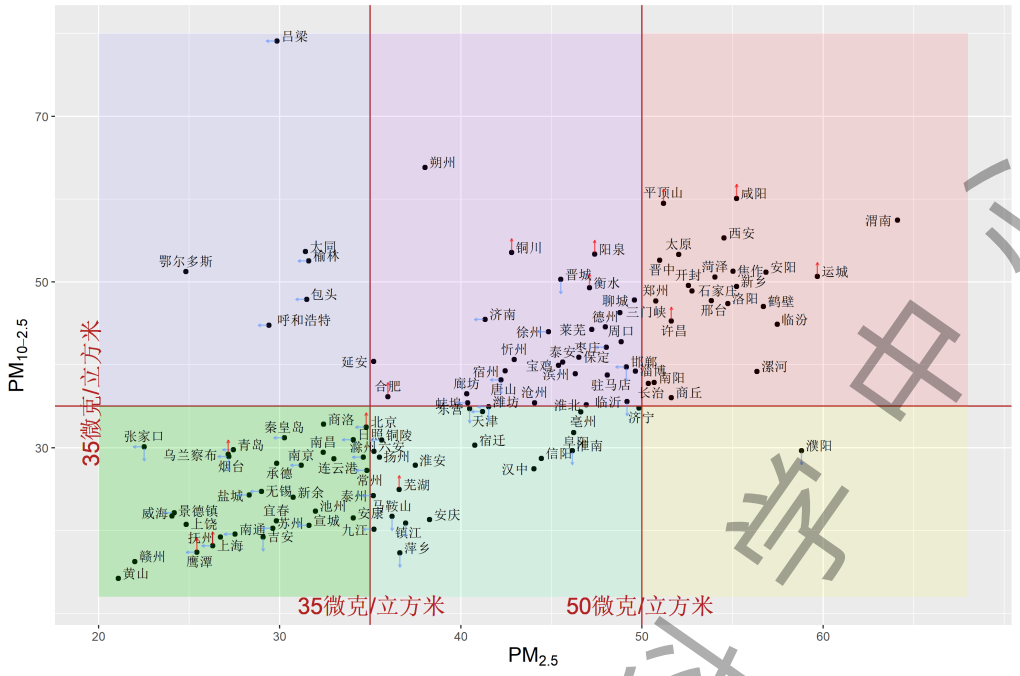



图 39: “3+110”城市 2022 年 $PM_{10-2.5}$ 和 $PM_{2.5}$ 的监视坐标图，其中横向（纵向）蓝色箭头表示该城市过去三年（相比 2019 年）$PM_{2.5}$（$PM_{10-2.5}$）降幅至少 20%，横向（纵向）红色箭头表示该城市过去三年（相比 2019 年）$PM_{2.5}$（$PM_{10-2.5}$）增幅至少 20%。

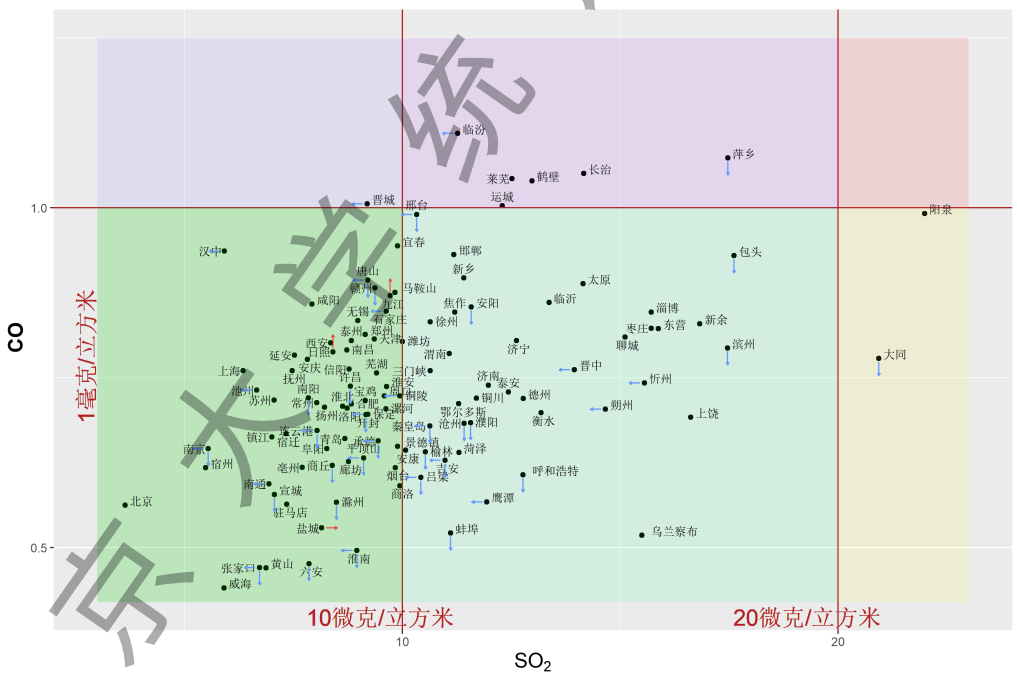



图 40: “3+110”城市 2022 年一氧化碳和二氧化硫的监视坐标图，其中横向（纵向）蓝色箭头表示该城市过去三年（相比 2019 年）二氧化硫（一氧化碳）降幅至少 35%（25%），横向（纵向）红色箭头表示该城市过去三年（相比 2019 年）二氧化硫（一氧化碳）增幅至少 35%（25%）。

北京大学统计科学中心

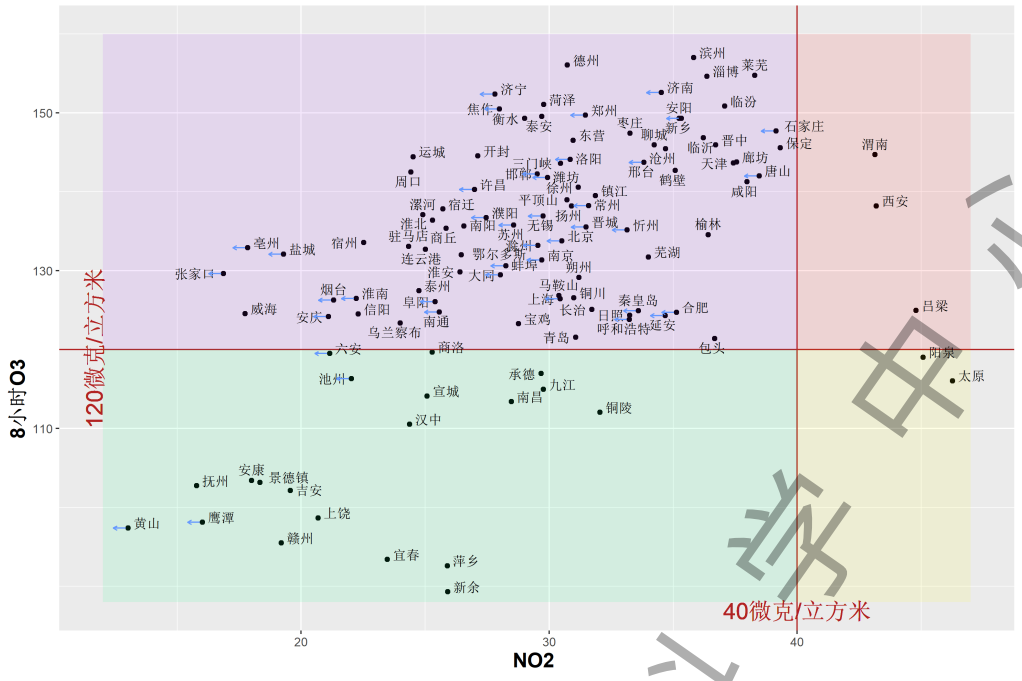



图 41: “3+110”城市 2022 年二氧化氮和春夏 8 小时臭氧的监视坐标图，其中横向蓝色箭头表示该城市过去三年（相比 2019 年）二氧化氮降幅至少 20%，横向红色箭头表示该城市过去三年（相比 2019 年）二氧化氮增幅至少 20%，春夏两季 8 小时臭氧未用箭头标记降幅。

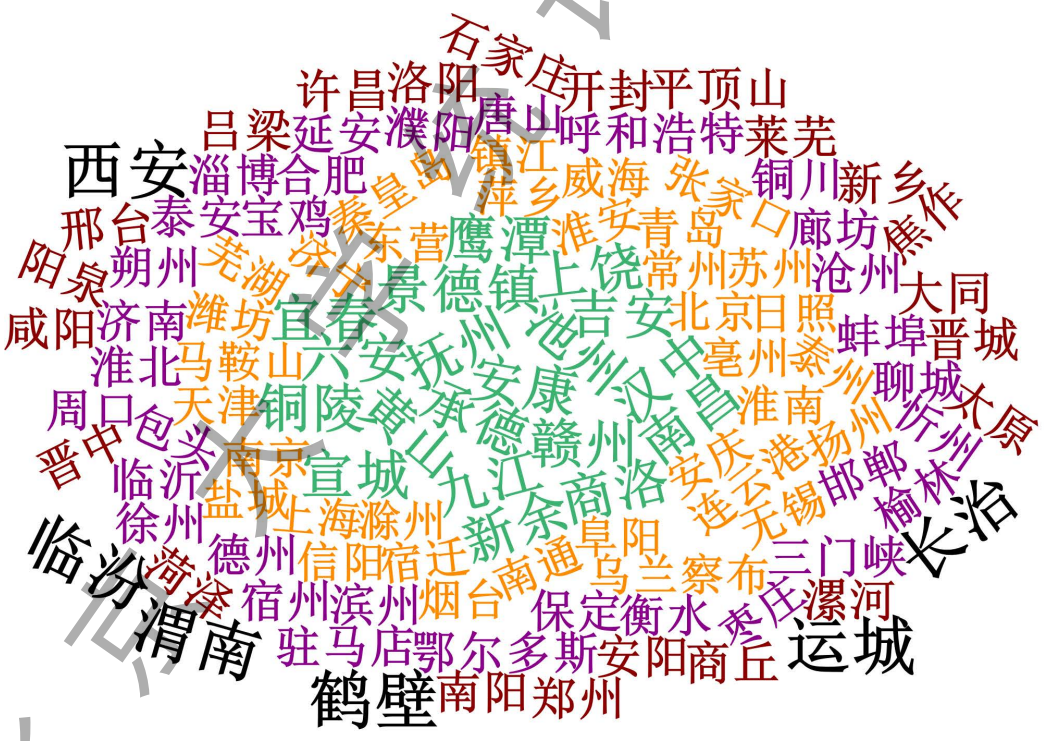



图 42: “3+110”城市 2022 年超标污染物词云图。城市名称中，绿色代表无污染物超标，橙色代表 1 个污染物超标，紫色代表 2 个污染物超标，红色代表 3 个污染物超标，黑色代表 4 个污染物超标

北京大学统计科学中心

| 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 | 31.5(7) | 39 | 淄博 | 15.3(1.9) | 77 | 长治 | 9.5(-1.2) |
| 2 | 张家口 | 26(8.2) | 40 | 汉中 | 15.2(-2.9) | 78 | 宜春 | 9.4(4.3) |
| 3 | 淮南 | 25.4(13.5) | 41 | 淮北 | 15(1.1) | 79 | 晋中 | 9.3(-1.7) |
| 4 | 南京 | 25.2(7.7) | 42 | 洛阳 | 14.9(-6.3) | 80 | 东营 | 8.8(-3.3) |
| 5 | 秦皇岛 | 25.1(8.9) | 43 | 烟台 | 14.9(8.4) | 81 | 安庆 | 8.7(1) |
| 6 | 呼和浩特 | 24.8(-0.6) | 44 | 榆林 | 14.9(-4.2) | 82 | 新乡 | 8.7(1) |
| 7 | 包头 | 24.1(0.3) | 45 | 无锡 | 14.5(-1.5) | 83 | 衡水 | 8.6(-4.6) |
| 8 | 邢台 | 23.1(-1.2) | 46 | 马鞍山 | 14.4(4.1) | 84 | 鄂尔多斯 | 8.3(4.5) |
| 9 | 晋城 | 22.4(2.6) | 47 | 太原 | 14.2(0.8) | 85 | 上饶 | 8.1(6.4) |
| 10 | 鹰潭 | 21.4(9.3) | 48 | 平顶山 | 14.1(-0.6) | 86 | 泰州 | 8.1(-5.8) |
| 11 | 邯郸 | 21(0.7) | 49 | 忻州 | 14(-0.5) | 87 | 聊城 | 8(0) |
| 12 | 铜陵 | 20(8.7) | 50 | 许昌 | 13.9(0.1) | 88 | 徐州 | 8(0.7) |
| 13 | 吉安 | 19.7(1.2) | 51 | 济宁 | 13.7(2.6) | 89 | 廊坊 | 7.7(-4.7) |
| 14 | 吕梁 | 19.5(4.9) | 52 | 泰安 | 13.3(8.2) | 90 | 南昌 | 7.6(-1.3) |
| 15 | 常州 | 19.3(10.8) | 53 | 滨州 | 13.2(0.4) | 91 | 驻马店 | 7.4(3.4) |
| 16 | 朔州 | 19.2(1.5) | 54 | 莱芜 | 13.1(-1.3) | 92 | 阜阳 | 7.2(5.8) |
| 17 | 滁州 | 19(8.9) | 55 | 商丘 | 13(3.4) | 93 | 运城 | 7(-5.6) |
| 18 | 承德 | 18.7(10.4) | 56 | 临沂 | 12.8(1.6) | 94 | 德州 | 6.9(-1.8) |
| 19 | 大同 | 18.7(-3) | 57 | 濮阳 | 12.7(-1.7) | 95 | 商洛 | 6.9(-11.6) |
| 20 | 石家庄 | 18.7(-5.9) | 58 | 新余 | 12.7(8.4) | 96 | 日照 | 6.6(0.1) |
| 21 | 黄山 | 18.6(2.4) | 59 | 上海 | 12.4(1.2) | 97 | 苏州 | 6.6(0.4) |
| 22 | 南通 | 18.5(4.7) | 60 | 宿迁 | 12.4(3) | 98 | 漯河 | 6.2(-1.6) |
| 23 | 蚌埠 | 18(6.7) | 61 | 潍坊 | 12.4(-1.3) | 99 | 合肥 | 4.9(3.4) |
| 24 | 池州 | 17.7(9.5) | 62 | 威海 | 12.3(8.1) | 100 | 三门峡 | 4.5(0.7) |
| 25 | 安阳 | 17.5(-3) | 63 | 抚州 | 12.0(5.5) | 101 | 咸阳 | 4.5(1.2) |
| 26 | 赣州 | 17(2.2) | 64 | 六安 | 11.7(12) | 102 | 景德镇 | 4.4(2.3) |
| 27 | 天津 | 16.8(3) | 65 | 郑州 | 11.3(0.7) | 103 | 九江 | 4(-5.8) |
| 28 | 北京 | 16.4(-2.9) | 66 | 青岛 | 11.2(2.5) | 104 | 西安 | 3.9(-5) |
| 29 | 济南 | 16(5) | 67 | 乌兰察布 | 11.1(3.9) | 105 | 宝鸡 | 3.4(-5.6) |
| 30 | 连云港 | 15.9(9) | 68 | 周口 | 11(1.4) | 106 | 铜川 | 2.9(-6.9) |
| 31 | 临汾 | 15.9(0.6) | 69 | 宿州 | 10.8(4.6) | 107 | 盐城 | 2.8(-1.4) |
| 32 | 亳州 | 15.8(4.1) | 70 | 菏泽 | 10.7(2.6) | 108 | 阳泉 | 2(-5.3) |
| 33 | 沧州 | 15.7(-9.4) | 71 | 扬州 | 10.7(5.9) | 109 | 安康 | 1.9(-8.3) |
| 34 | 焦作 | 15.7(1.8) | 72 | 芜湖 | 10.5(2.2) | 110 | 淮安 | 1.4(-4.6) |
| 35 | 宣城 | 15.7(6.5) | 73 | 延安 | 10.4(-4.1) | 111 | 渭南 | 0.1(-1.9) |
| 36 | 镇江 | 15.5(5.4) | 74 | 南阳 | 10.2(7.6) | 112 | 鹤壁 | 0(-4.9) |
| 37 | 保定 | 15.3(-4.4) | 75 | 开封 | 10.1(1.5) | 113 | 信阳 | -2.7(-8.4) |
| 38 | 萍乡 | 15.3(2.4) | 76 | 枣庄 | 10(-4.3) | 平均降幅 | | 12.7(1.3) |

表 6: “3+110”城市 2019 年（2021 年）-2022 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 2022 年经气象调整后的三年累计降幅的平均值，括号内为 2021 年到 2022 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“2+26”城市及汾渭平原 11 市以及排名后三分之一的“2+26”城市和汾渭平原 11 市

对于这六种污染物，我们设定的超标标准分别为：50 微克/立方米（$PM_{2.5}$）、35 微克/立方米（$PM_{10-2.5}$）、20 微克/立方米（二氧化硫）、1 毫克/立方米（一氧化碳）、120 微克/立方米（春夏两季 8 小时臭氧）、40

北京大学统计科学中心

微克/立方米（二氧化氮）。这份标准考虑了大气污染的总体改善情况与国际标准，并参考了国家标准、年均浓度分布和数据的区分度。我们标出 $PM_{2.5}$ 的 35 微克/立方米分界线，这是我国的二级标准限值；以及 $SO_2$ 的 10 微克/立方米分界线，这表示其内的城市 $SO_2$ 浓度已达个位数。我们将六种污染物分成三对给出监视坐标图。每个图中右上象限指两种污染物均过高，左上和右下象限表示一种污染物过高，左下象限的城市情况相对较好，图中箭头代表过去三年某污染物已有显著下降或上升。

| 序号 | 城市 | $PM_{2.5}$ | $PM_{10-2.5}$ | 二氧化硫 | 一氧化碳 | 二氧化氮 | 8 小时臭氧（春夏） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 长治 | X | X | | X(X) | | X(X) |
| 2 | 鹤壁 | X(X) | X(X) | | X | | X(X) |
| 3 | 临汾 | X(X) | X | | X(X) | | X(X) |
| 4 | 渭南 | X(X) | X(X) | | | X(X) | X(X) |
| 5 | 西安 | X | X(X) | | | X(X) | X(X) |
| 6 | 运城 | X(X) | X(X) | | X | | X(X) |
| 7 | 安阳 | X(X) | X(X) | | | | X(X) |
| 8 | 大同 | | X(X) | X(X) | | | X(X) |
| 9 | 菏泽 | X(X) | X(X) | | | | X(X) |
| 10 | 焦作 | X(X) | X(X) | | | | X(X) |
| 11 | 晋城 | | X(X) | | X(X) | | X(X) |
| 12 | 晋中 | X | X | | | | X(X) |
| 13 | 开封 | X(X) | X(X) | | | | X(X) |
| 14 | 莱芜 | (X) | X(X) | | X | | X(X) |
| 15 | 漯河 | X(X) | X(X) | | | | X(X) |
| 16 | 洛阳 | X(X) | X(X) | | | | X(X) |
| 17 | 吕梁 | | X(X) | | | X(X) | X(X) |
| 18 | 南阳 | X(X) | X(X) | | | | X(X) |
| 19 | 平顶山 | X(X) | X(X) | | | | X(X) |
| 20 | 商丘 | X(X) | X | | | | X(X) |
| 21 | 石家庄 | X | X(X) | | | | X(X) |
| 22 | 太原 | X(X) | X(X) | | | X(X) | (X) |
| 23 | 咸阳 | X(X) | X(X) | | | (X) | X(X) |
| 24 | 邢台 | X(X) | X(X) | | | | X(X) |
| 25 | 新乡 | X(X) | X(X) | | | | X(X) |
| 26 | 许昌 | X(X) | X | | | | X(X) |
| 27 | 阳泉 | | X | X(X) | (X) | X(X) | (X) |
| 28 | 郑州 | X | X(X) | | | | X(X) |
| 29 | 保定 | | X(X) | | | | X(X) |
| 30 | 宝鸡 | | X | | | | X |
| 31 | 包头 | | X(X) | | (X) | | X(X) |
| 32 | 蚌埠 | | X(X) | | | | X(X) |
| 33 | 滨州 | | X(X) | | | | X(X) |
| 34 | 沧州 | | X | | | | X(X) |
| 35 | 德州 | | X(X) | | | | X(X) |
| 36 | 邯郸 | (X) | X(X) | | | | X(X) |
| 37 | 合肥 | | X(X) | | | (X) | X |
| 38 | 衡水 | | X | | | | X(X) |
| 39 | 呼和浩特 | | X(X) | | | | X(X) |
| 40 | 淮北 | | X(X) | | | | X(X) |

北京大学统计科学中心

| 序号 | 城市 | $PM_{2.5}$ | $PM_{10-2.5}$ | 二氧化硫 | 一氧化碳 | 二氧化氮 | 8 小时臭氧（春夏） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 41 | 济南 | | X(X) | | | | X(X) |
| 42 | 廊坊 | | X(X) | | | | X(X) |
| 43 | 聊城 | (X) | X(X) | | | | X(X) |
| 44 | 临沂 | (X) | X(X) | | | | X(X) |
| 45 | 鄂尔多斯 | | X(X) | | | | X(X) |
| 46 | 濮阳 | X(X) | | | | | X(X) |
| 47 | 三门峡 | (X) | X(X) | | | | X(X) |
| 48 | 朔州 | | X(X) | | | | X(X) |
| 49 | 宿州 | | X(X) | | | | X(X) |
| 50 | 泰安 | | X(X) | | | | X(X) |
| 51 | 唐山 | | X(X) | | (X) | (X) | X(X) |
| 52 | 铜川 | | X(X) | | | | X(X) |
| 53 | 忻州 | | X(X) | | | | X(X) |
| 54 | 徐州 | | X(X) | | | | X(X) |
| 55 | 延安 | | X(X) | | | | X(X) |
| 56 | 榆林 | | X(X) | | | | X(X) |
| 57 | 枣庄 | (X) | X(X) | | | | X(X) |
| 58 | 周口 | (X) | X(X) | | | | X(X) |
| 59 | 驻马店 | | X | | | | X(X) |
| 60 | 淄博 | (X) | X | | | | X(X) |
| 75 | 萍乡 | | | | X(X) | | |
| 安庆 ($O_3$)、北京 ($O_3$)、亳州 ($PM_{10-2.5}/O_3$)、常州 ($NO_2/O_3$)、滁州 ($O_3$)、东营 ($O_3$)、阜阳 ($PM_{2.5}/O_3$)、淮安 ($O_3$)、淮南 ($PM_{2.5}/O_3$)、济宁 ($PM_{2.5}/PM_{10-2.5}/O_3$)、连云港 ($O_3$)、马鞍山 ($O_3$)、南京 ($O_3$)、南通 ($O_3$)、青岛 ($O_3$)、秦皇岛 ($O_3$)、日照 ($O_3$)、上海 ($O_3$)、宿迁 ($O_3$)、苏州 ($O_3$)、天津 ($PM_{10-2.5}/NO_2/O_3$)、泰州 ($O_3$)、乌兰察布 ($O_3$)、潍坊 ($PM_{10-2.5}/O_3$)、威海 ($O_3$)、芜湖 ($O_3$)、无锡 ($O_3$)、信阳 ($O_3$)、盐城 ($O_3$)、扬州 ($O_3$)、烟台 ($O_3$)、张家口 ($O_3$)、镇江 ($O_3$) | | | | | | | 8 小时臭氧（春夏）超标 |
| 安康、承德 ($O_3$)、池州、抚州、赣州 (CO)、汉中、黄山、吉安、景德镇、九江、六安 ($O_3$)、南昌、商洛、上饶、铜陵、新余、宣城、宜春、鹰潭 | | | | | | | 无超标 |

表 7: “3+110”城市 2022 年超标污染物情况汇总，“×”代表污染物过高。文字颜色代表经气象调整后的浓度下城市污染物超标个数：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。(×) 和 (污染物) 代表 2021 年浓度超标。

由表 7可知，长治、鹤壁、临汾、渭南、西安和运城 6 市四种污染物过高；三个污染物超标的有 22 个城市；两个和一个污染物超标的各有 32 和 34 个；安康、承德、池州、抚州、赣州、汉中、黄山、吉安、景德镇、九江、六安、南昌、商洛、上饶、铜陵、新余、宣城、宜春和鹰潭 19 个城市无超标污染物。超标城市数最多的污染物是 8 小时臭氧（春夏），有 91 个城市超标；其次是 $PM_{10-2.5}$（59 个）和 $PM_{2.5}$（24 个），一氧化碳（7 个）和二氧化氮（5 个）；二氧化硫仅有 2 个城市超标，说明对该污染物的治理效果显著。这也说明“3+110”城市的臭氧污染已经超过 $PM_{2.5}$ 成为首要大气污染问题。我们希望图 39，40，42，41 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。

北京大学统计科学中心

# 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 43和图 44分别展示了“3+110”城市 2022 年和 2021 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，2022 年夏秋两季减排情况较好，“人努力”城市数量较多。而冬季的排放情况则很严重，大量城市出现了排放量的增加。这样反常的增加虽然可能与 2021 年冬季较高的减排相关，但也很可能要归因于 2022 年年底全国开始逐步放开。限制放开后，各种生产活动激增，导致了冬季排放的反弹。从“天帮忙”指数地图可以看到，2022 年春季与冬季的气象状况较好，而夏季与秋季的气象状况较差，和 2021 年的情况刚好相反，这也进一步体现了我们分别讨论气象影响和人为影响重要性。

- **2022 年“人努力”情况**

  图 43左侧四图反映了 2022 年相对 2021 年“3+110”城市各季节“人努力”的情况。夏季与秋季的“人努力”城市较多（98/113、89/113）；其中夏季排放在 2021 年减少的情况下多数城市出现了进一步的减少，这说明我们的减排政策在持续发挥着作用。主要的几个反弹城市为萍乡、廊坊和上海。上海此时会出现反弹可能由于春季经历过过于严重的封锁政策，在部分放开后居民消费出现反弹。不过这些反弹总体也不大。真正严重的反弹出现在冬季，在疫情放开之后，113 个城市中的 74 个城市的本地排放出现了反弹。反弹最严重的滨州本地排放上涨了 35%，其余也还有东营、渭南、延安、沧州、晋城、汉中、安阳、新乡、北京这 9 个城市的本地排放上涨了超过 25%，可见疫情放开造成的巨大影响。从区域上看，74 个排放反弹的城市大部分分布在研究区域的北部，较南部的几个城市本地排放还有一定的下降。这可能是由于北方许多城市在冬季本就容易产生大量排放，疫情放开的刺激使得排放增加的效应被放大导致的结果。

北京大学统计学系

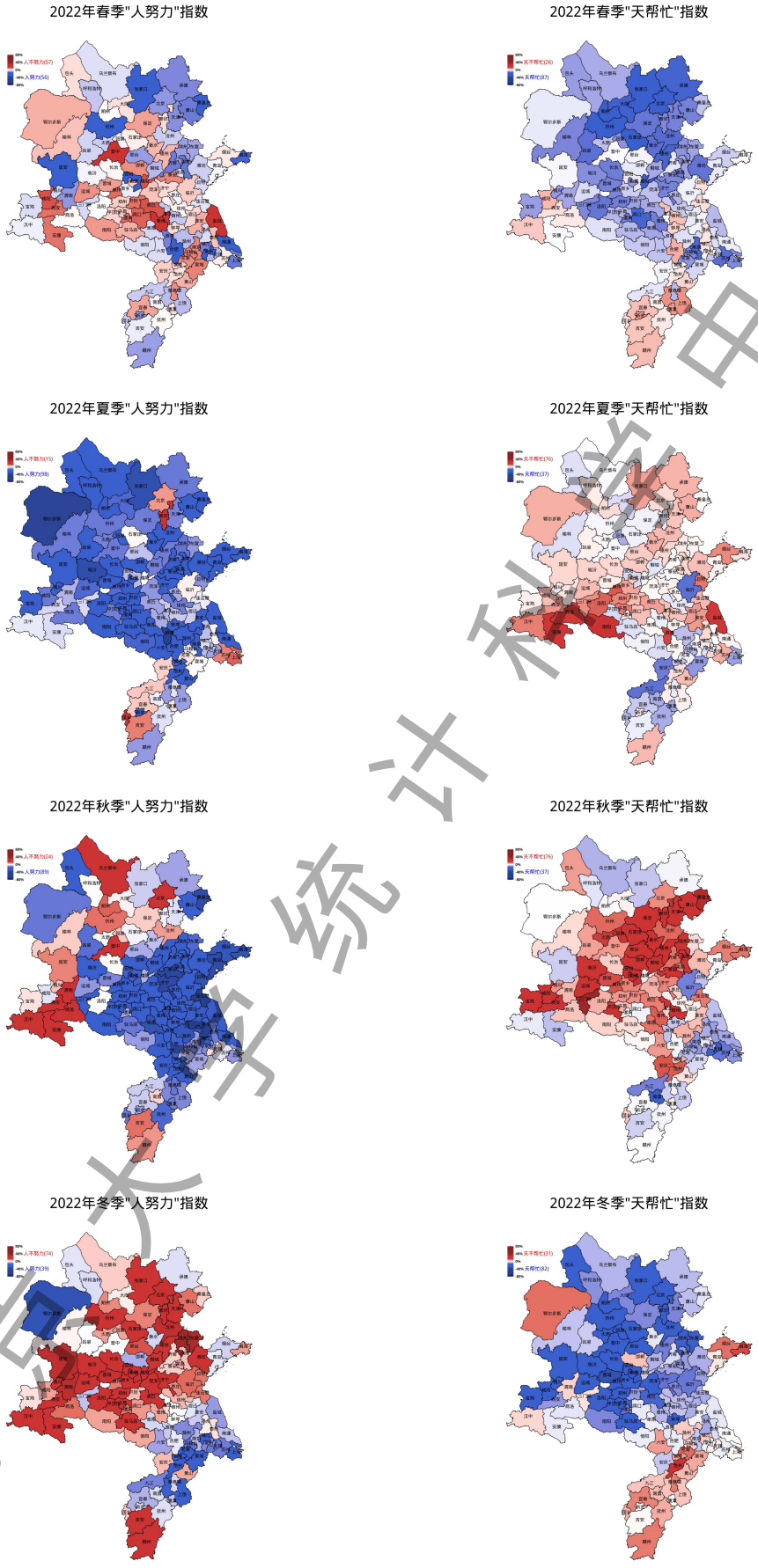



图 43: “3+110”城市 2022 年各季节 $PM_{2.5}$“人努力”和“天帮忙”指数地图

北京大学统计科学中心

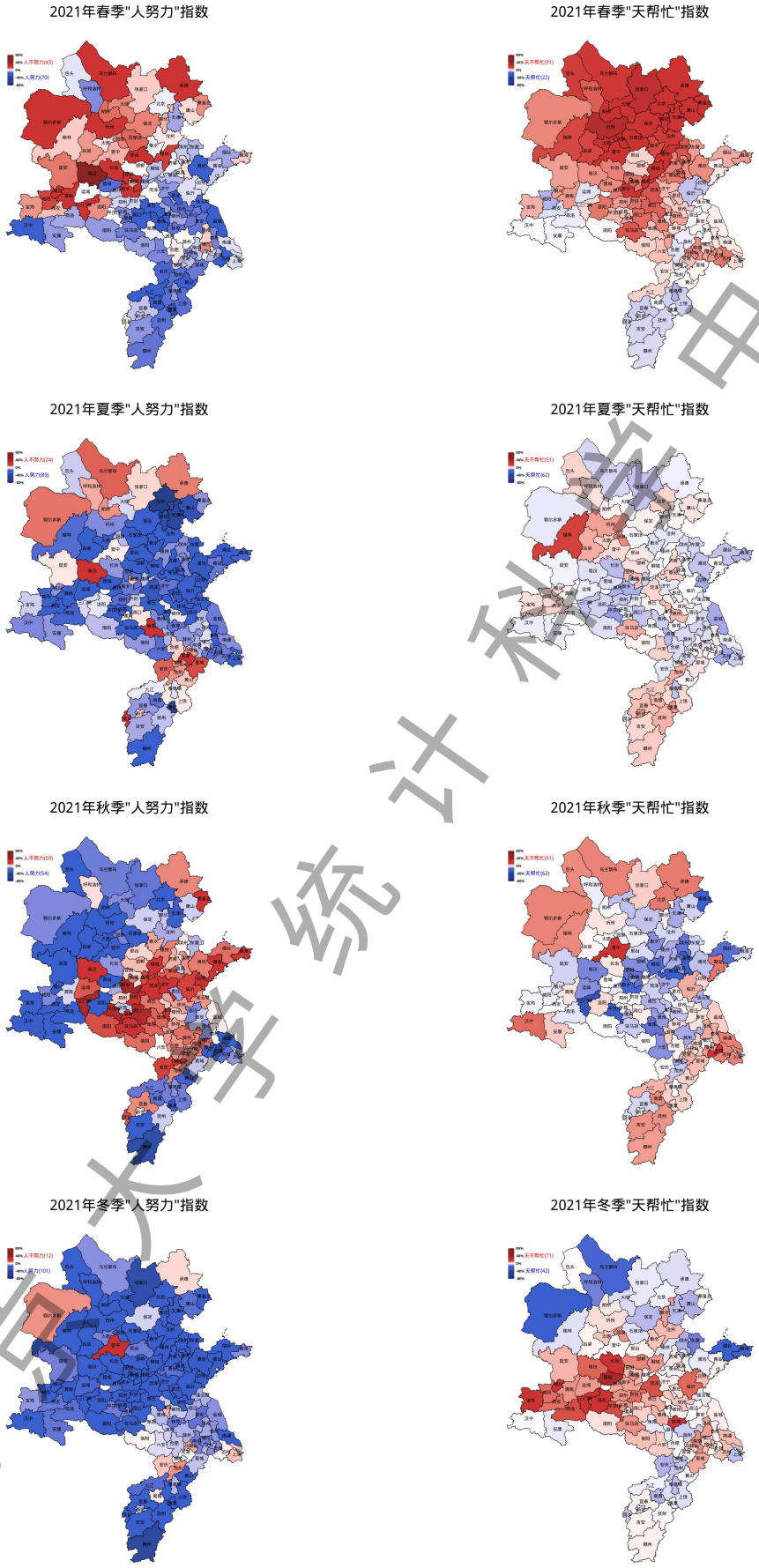



图 44: “3+110”城市 2021 年各季节 $PM_{2.5}$“人努力”和“天帮忙”指数地图

北京大学统计科学中心

- **2022 年“天帮忙”情况**

  图 43右侧四图反映了 2022 年相对 2021 年“3+99”城市各季节“天帮忙”的情况。可以看到，2022 年春季的气象条件与 2021 年相比变好了许多，绝大部分城市（87/113）的气象条件与 2021 年相比促进了 $PM_2$.5 的下降，和 2021 年的“天帮忙”指数对比，可以推测是 2021 年时的气象条件较为恶劣，使得 2022 年的气象条件相比 2021 年显得有利。夏季整体气象条件和 2021 年相仿，只有盐城、淮南、南阳、安康、商洛这几个城市的气象条件出现了较为明显的变化，其余城市气象条件导致的污染物浓度变化均在 12% 以内。秋季的气象条件整体较差。有 76 个城市的气象条件和去年相比较为不利，其中秦皇岛、邯郸、宿州、安阳、三门峡的气象条件导致的污染增加幅度均超过了 25%，三门峡更是达到了 35%。与此相比，仅有无锡和南昌两个个城市的气象条件贡献了超过 12% 的污染物减幅。冬季气象条件再次变好，“天帮忙”城市达到了 82 个，其中晋城、平顶山和北京三个城市的气象条件均带来了超过 25% 的污染物减幅。相比之下，气象条件最差的池州，气象条件导致的污染物增幅也仅有 14%。

# 6 主要结论与建议

2022 年关于空气质量的关键词是“反弹”。2015—2021 年，六种污染物浓度整体呈下降趋势，期间也有出现的反弹现象，但都是在少数孤立的省市和污染物。但是 2022 年 $PM_{2.5}$、$PM_{10}$、二氧化硫和春夏臭氧均出现了规模性反弹，涉及污染物种多、涵盖范围广。其中，基于经过气象调整的年平均值统计，$PM_{2.5}$ 在北京、陕西和山西三省市反弹，“3+110”城市中有 37 个城市出现年均浓度上升；$PM_{10}$ 在北京、山西、陕西、河南和河北五省市反弹，“3+110”城市中有 56 个城市出现年均浓度上升；二氧化硫在上海、山东、河南、天津、江苏、北京、河北和陕西八省市反弹，“3+110”城市中有 63 个城市出现年均浓度上升；春夏八小时臭氧在上海、江西、陕西、江苏、安徽、河南、北京和山东八省市反弹，“3+110”城市中有 78 个城市出现年均浓度上升。从极端污染情况看，$PM_{2.5}$ 的年均 90% 分位数浓度在北京、山西、陕西三省市反弹，“3+110”城市中有 35 个城市出现 90% 分位数浓度上升。春夏八小时臭氧的 90% 分位数浓度在北京、上海、河南、山东、江苏、陕西、江西七省市反弹，“3+110”城市中有 66 个城市出现 90% 分位数浓度上升。

## 6.1 三省市 $PM_{2.5}$ 反弹

2022 年九省三市中的北京、陕西和山西 $PM_{2.5}$ 年均浓度出现了反弹回升的情况。这是自 2015 年以来不多见的。其中，北京和陕西的年均浓度分别上升了 3.2（10.2%）和 3（7.2%）微克/立方米；山西小幅上升了 0.6（1.2%）微克/立方米。天津、河南和江西 2022 年的 $PM_{2.5}$ 浓度与 2021 年基本持平，未有改善。山东、内蒙古四市以及长三角省市的 $PM_{2.5}$ 浓度继续下降，内蒙古四市、上海、安徽、江苏、山东和河北较 2021 年分别下降 2.8（8.9%）、2.5（8.6%）、3.4（8.3%）、2.6（7.0%）、2.3（5.2%）和 1（2.3%）微克/立方米。整体来看，2022 年 $PM_{2.5}$ 浓度年均下降 1.1 微克/立方米（2.8%），$PM_{2.5}$90% 分位数浓度年均下降 2.5 微克/立方米（3.1%）。与 2019 年相比，九省三市 $PM_{2.5}$ 年均浓度均有改善，其中内蒙古

北京大学统计科学中心

四市、上海和天津改善最为显著，降幅在 25.6% ～ 30.4% 之间；北京、江苏、山东、河北、安徽和江西的降幅在 15.3% ～ 22.3% 之间；河南、山西和陕西的降幅在 10% 以内。

这次 $PM_{2.5}$ 浓度反弹主要发生在冬季，相较于 2021 年冬季，华北地区、陕西、河南、山西和山东均出现浓度上升的情况，其中，北京、天津、陕西、河南、山西、山东和河北的浓度分别上升了 8.7（28.4%）、8.2（17%）、10.4（16%）、11.7（15.1%）、8.4（14.6%）、7.1（11.5%）和 4.7（9.1%）微克/立方米。除此以外，北京和陕西在其它三个季度也出现较大反弹。整体来说，2022 年 $PM_{2.5}$ 的反弹受到取消疫情管控、恢复生产生活的影响。另外，由于华北地区在 2021 年（季节年）冬奥会期间实施了管控措施，导致 2021 年冬季 $PM_{2.5}$ 浓度大幅下降，这也导致华北地区各省市 2022 年冬季 $PM_{2.5}$ 浓度出现反弹。

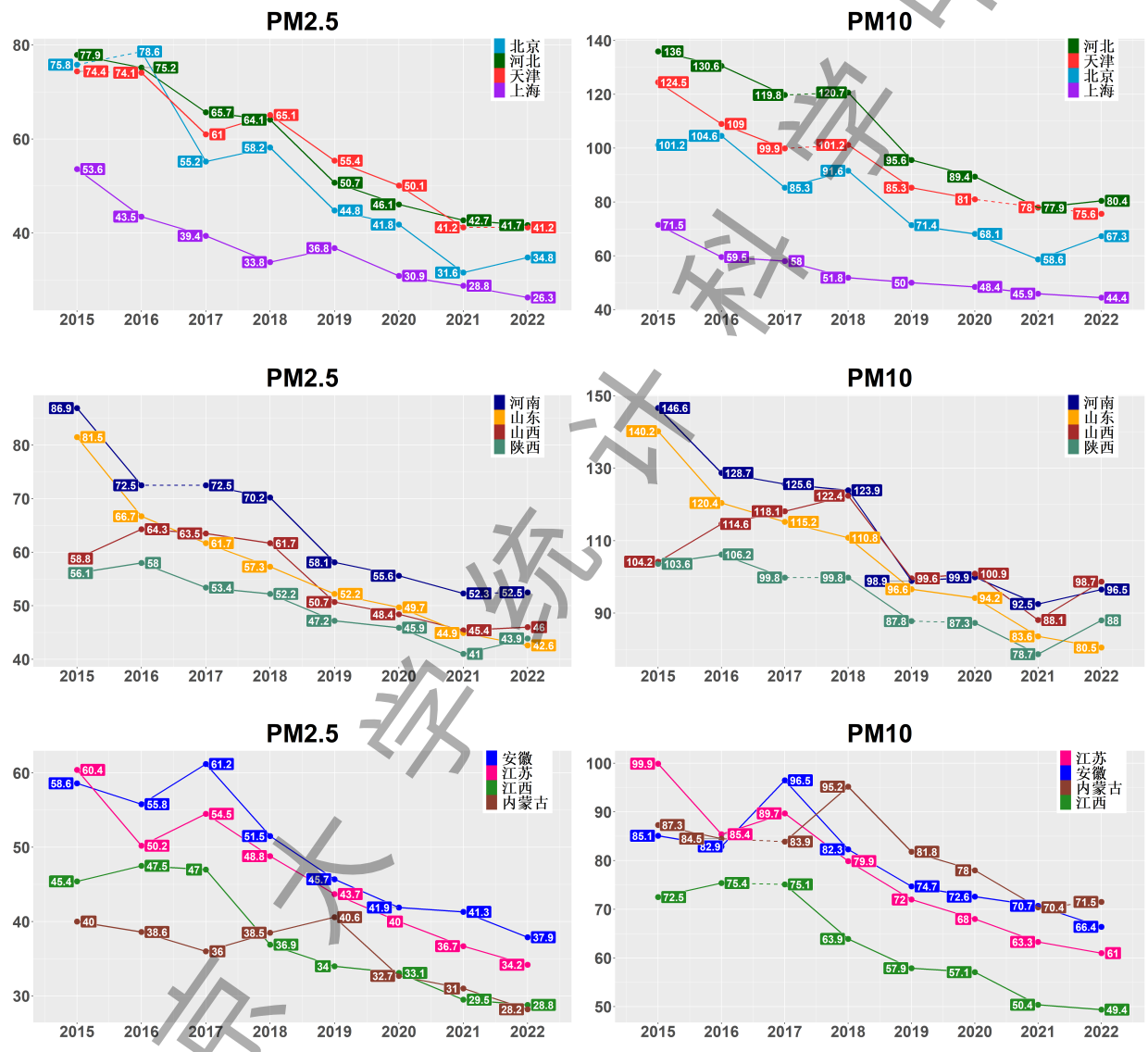



图 45: 九省三市去除气象因素影响后 $PM_{2.5}$、$PM_{10}$ 年平均浓度时间序列（微克/立方米），实线（虚线）代表在 5% 统计学显著水平比上年有（无）显著增加或减少

具体看各省市的 $PM_{2.5}$ 年均浓度，河南在 2017 年超过河北后一直是九省三市中 $PM_{2.5}$ 年均浓度最

北京大学统计学中心

高的省份。在 2022 年，河南 $PM_{2.5}$ 年均浓度是 52.5 微克/立方米，其他省市的 $PM_{2.5}$ 年均浓度均在 50 微克/立方米以下。2022 年年均浓度从高到低依次为山西 46、陕西 43.9、山东 42.6、河北 41.7、天津 41.2、安徽 37.9、北京 34.8、江苏 34.2、江西 28.8、内蒙四市 28.2 和上海 26.3 微克/立方米。

## 6.2 五省市 $PM_{10}$ 反弹，$PM_{10-2.5}$ 仍是首要污染物

2022 年可吸入颗粒物 $PM_{10}$ 浓度在北京、山西、陕西、河南和河北五省市出现反弹，自 2013 年后少有如此规模的上升。具体来看，山西、陕西、北京、河南和河北的 $PM_{10}$ 年均浓度反弹显著，分别是 10.6（12.1%）、9.4（11.9%）、8.6（14.7%）、4（4.3%）和 2.6（3.3%）微克/立方米；内蒙古四市的 $PM_{10}$ 年均浓度与 2021 年基本持平；安徽、山东、江苏、上海、天津和江西的 $PM_{10}$ 年均浓度较 2021 年有所改善，分别下降了 4.3（6.1%）、3（3.6%）、2.3（3.6%）、1.5（3.2%）、2.5（3.1%）和 1（2%）微克/立方米。整体上，2022 年“3+110”城市 $PM_{10}$ 年均浓度的增幅均值为 1.5%。从纵向排名来看，2022 年 $PM_{10}$ 年均浓度排名前三的省市分别是山西、河南和陕西，均不低于 88 微克/立方米。$PM_{10}$ 在这五个省市的反弹原因主要来自于两方面，一是 $PM_{2.5}$ 的显著上升或下降放缓，二是 $PM_{10-2.5}$ 的增加。

尽管 2016-2021 年 $PM_{10}$ 整体呈下降趋势，但 $PM_{10}$ 中空气动力学直径大于 2.5 微米的颗粒物，即 $PM_{10-2.5}$ 的下降速度远低于 $PM_{2.5}$ 的下降速度。相较于 2015 年，2022 年“3+110”城市中有 27 个城市的 $PM_{10-2.5}$ 年均浓度有所上升，且 $PM_{10-2.5}$ 年均浓度的七年累计降幅只有 9 微克/立方米（14.3%），远低于 $PM_{2.5}$37.1% 的降幅。相较于 2021 年，共有 64 个城市的 $PM_{10-2.5}$ 年均浓度上升，这导致 **“3+110”城市的年均 $PM_{10-2.5}$ 浓度平均上升 2.4(7.6%) 微克/立方米**。$PM_{10-2.5}$ 与臭氧已成为当前的两个主要污染物。

不同于 $PM_{2.5}$，$PM_{10-2.5}$ 不计入各级官员的考核。但是可吸入颗粒物 $PM_{10}$ 对呼吸道疾病患者，尤其是哮喘、慢性支气管炎和肺气肿患者易产生不利影响，可以导致急性发作。2020 年，中国慢阻肺（肺气肿及慢性支气管炎两种主要形式）患者数目已经超过 1 亿人，哮喘患者数目达 6 千 5 百万 [21]。因此，我们建议加强对工业源排放、建筑工地、地面扬尘、野外生物质和垃圾焚烧的管理，以有效减少 $PM_{10-2.5}$ 的浓度。

## 6.3 八省市二氧化硫首次出现反弹，一氧化碳持续改善

与 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 在部分省市的反弹相呼应，一改自 2015 年以来的下降趋势，2022 年二氧化硫浓度在八省市也出现了反弹。具体来看，上海、山东、河南、天津和江苏的二氧化硫浓度分别上升了 0.53（9.1%）、0.55（4.6%）、0.41（4.3%）、0.38（4.2%）和 0.3（3.9%）微克/立方米；北京、河北和陕西的反弹幅度则均在 0.2 微克/立方米以内。此外，内蒙古四市和安徽的二氧化硫浓度与 2021 年基本持平；山西和江西的二氧化硫浓度则较 2021 年下降了 0.71（4.7%）和 1.38（10.5%）微克/立方米。整体来看，**2022 年“3+110”城市二氧化硫年均浓度的增幅均值为 1.7%**。

2022 年冬季二氧化硫浓度反弹情况尤为明显。上海、河北、陕西和天津分别增长了 25.3%、24.8%、19.8% 和 12.9%；河南、北京、内蒙古四市、山东、江苏和江西的上升幅度在 10% 以内；仅山西和安徽的二氧化硫浓度有所下降，分别降低了 0.59（2.9%）和 0.31（3.6%）微克/立方米。从春夏秋三季来看，北

北京大学统计科学中心

京、天津、山东、河南、江苏、上海和安徽的二氧化硫浓度已经出现了增长，增幅在 1.2% ～ 4.6% 之间，其它省市的二氧化硫年均浓度有所下降。所以，二氧化硫的反弹并非只发生于冬季。**尽管 2022 年二氧化硫整体反弹幅度只有 1.7%，但涉及的时间和空间范围较广，打破了原来稳定下降的趋势，值得关注。**

2022 年，九省三市中仅上海的一氧化碳年均浓度上升了 0.07（9.5%）毫克/立方米，其余省市的一氧化碳浓度均有改善或持平。具体来看，截至 2022 年，九省三市的一氧化碳年均浓度均已降至 1 毫克/立方米以下，天津、河南、安徽、山西、内蒙古四市、北京、江西、江苏和河北分别下降了 0.1（10.6%）、0.08（9.8%）、0.07（9.2%）、0.06（6.8%）、0.06（8%）、0.06（9.6%）、0.04（5.1%）、0.03（4%）和 0.03（3.4%）毫克/立方米, 山东与山西的一氧化碳年均浓度与 2021 年基本持平。“3+110”城市全年平均浓度下降幅度在 0.01 ～ 0.1 毫克/立方米之间，降幅均值为 5.1%。

相比于 2015 年，2022 年北京、天津、山西、河南、河北、陕西和山东的一氧化碳浓度降幅在 40% 以上；安徽、江苏、内蒙古四市和江西的降幅在 20% ～ 35% 之间；上海的降幅最少，只有 12.7%。由于一氧化碳也会促进臭氧的生成，我们建议通过有效减少一般工业排放、机动车排放和生物质燃烧等措施进一步降低一氧化碳浓度。

## 6.4 二氧化氮两省出现小幅反弹

2022 年，“3+110”城市二氧化氮年均浓度同比下降 1.7（5.5%）微克/立方米。相较于 2021 年，上海、安徽和江苏的下降最为明显，二氧化氮年均浓度均至少下降了 4 微克/立方米，降幅在 12% ～ 22% 之间，部分原因是春季由于疫情防控导致的下降；天津、北京、江西、山东、河北和河南的二氧化氮年均浓度下降量在 0.8 ～ 3.6 微克/立方米之间，降幅在 2.7% ～ 8.8% 之间；内蒙古四市和山西的年均浓度则分别反弹了 1（3.4%）和 0.6（1.7%）微克/立方米。

2015 年，在“3+110”城市二氧化氮年平均浓度（气象调整后的）最高的十个城市中，河北、河南各有 4 个城市，其余两个城市分别是山东淄博和江苏苏州。2021 年，浓度最高的十个城市中，山西、陕西各有 3 个城市，其它城市是河北唐山、安徽合肥、江苏常州和天津。2022 年，山西、陕西和河北各有 3 个城市，另外一个城市是山东莱芜。具体来看，2022 年太原的年均二氧化氮浓度最高，为 46.3 微克/立方米；天津、山西、河北和陕西的年均二氧化氮浓度均超过了 32 微克/立方米。这些省市需要进一步加强二氧化氮污染防治的力度。鉴于本研究涉及的国控站点多在城市中心区，其所度量的二氧化氮来源主要是机动车排放，故机动车排放的控制应是下一步大气防治的重点。由于二氧化氮是臭氧的前体物，减少二氧化氮也是遏制区域内臭氧增加的有效手段。我们建议各省市采取有效措施降低机动车产生的二氧化氮浓度，在遏制臭氧上升的同时也能促进颗粒物浓度的下降。

## 6.5 八省市春夏臭氧出现反弹

2022 年“3+110”城市春夏八小时平均臭氧浓度整体比 2021 年上升了 2.9 微克/立方米（2.7%），春夏臭氧 90% 分位数浓度整体平均比 2021 年上升 2.5 微克/立方米（1.7%），“3+110”城市中有 78 个城市的春夏臭氧浓度增加。具体来看，相比于 2021 年，2022 年上海春夏平均臭氧浓度上升了 19.8 微克/立方米，增幅为 18.5%，城市年均浓度排名（排名越高，污染越严重）由 2021 年的第十一名升至第九名。

北京大学统计科学中心

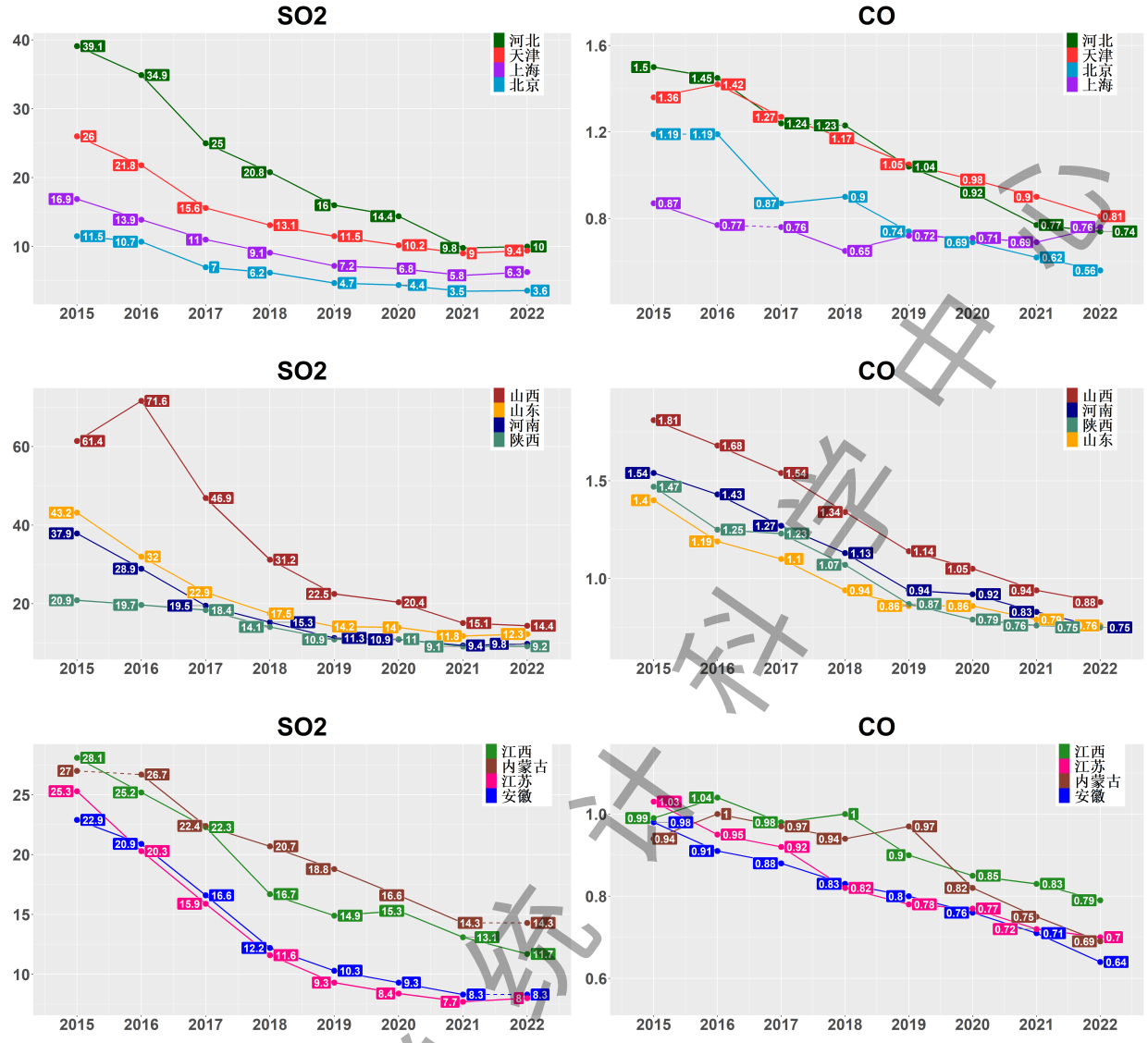



图 46: 九省三市去除气象因素影响后二氧化硫（微克/立方米）和一氧化碳（毫克/立方米）年平均浓度时间序列，实线（虚线）代表在 5% 统计学显著水平比上年有（无）显著增加或减少

主要原因是上海受到疫情管控的影响，二氧化氮浓度显著下降，降低其滴定臭氧效应，导致了臭氧浓度的上升。江西、陕西以及长三角地区的江苏和安徽的春夏八小时平均臭氧浓度分别上升了 7.5（8%）、5.3（4.4%）、9.7（7.8%）和 4（3.3%）微克/立方米。河南、北京和山东的反弹幅度较小，分别上升了 2、1.4 和 1 微克/立方米。九省三市中仅内蒙古四市、山西、天津和河北的春夏八小时臭氧有下降，但降幅仅在 1.1% ～ 2.9% 之间。

2015 年，在臭氧年平均浓度（经气象调整后的）排名最高的前十个城市中，有 5 个山东城市，3 个江苏城市，另外两个城市分别在山西和内蒙古。**2021 年臭氧年平均浓度排名最高的前 10 个城市中，除安徽淮南外均在山东；2022 年排名最高的前 10 个城市均在山东。山东应采取有效措施治理臭氧。**

北京大学统计科学中心

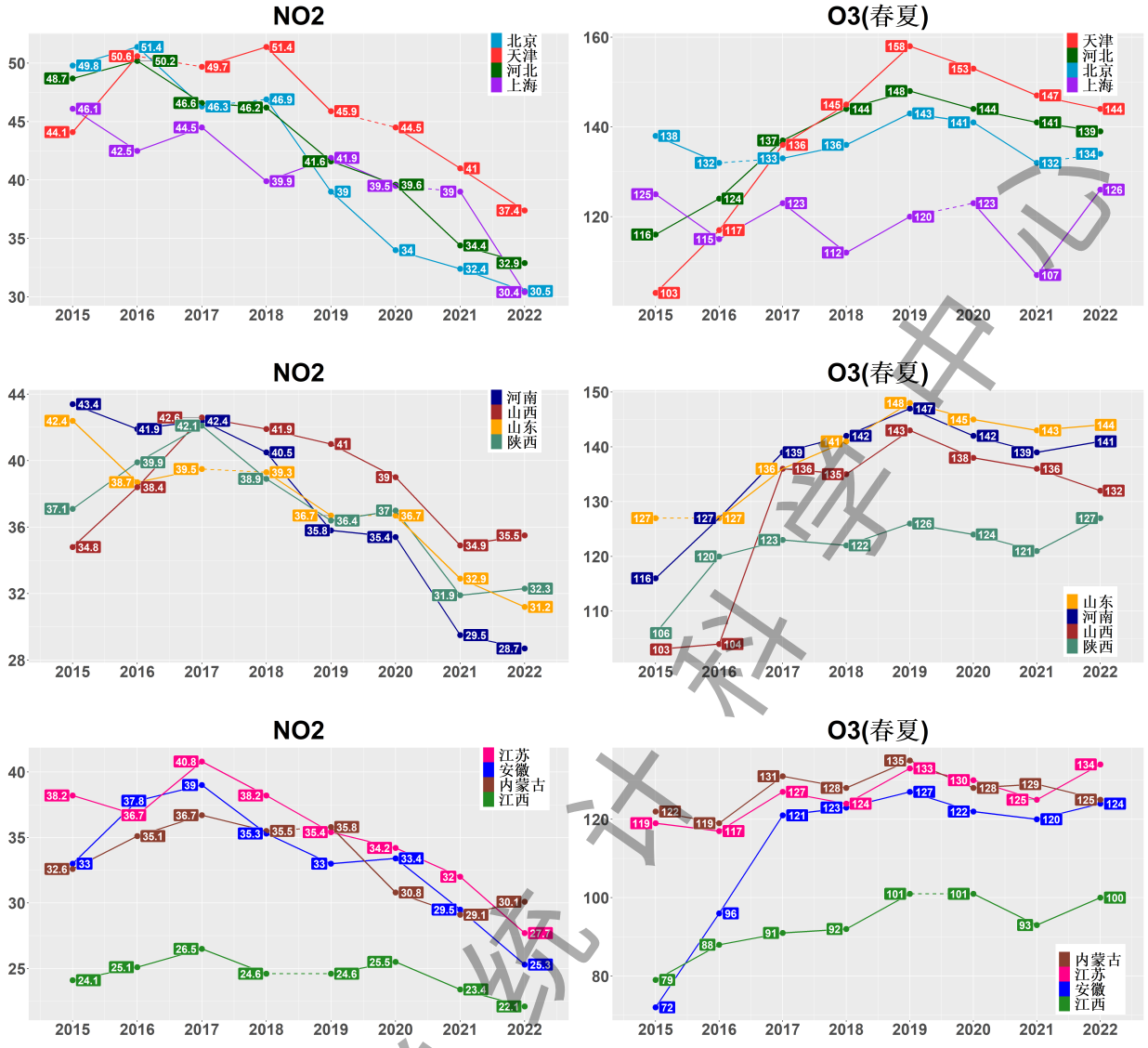



图 47: 九省三市去除气象因素影响二氧化氮和八小时臭氧（春夏）平均浓度时间序列（微克/立方米），实线（虚线）代表在 5% 统计学显著水平比上年有（无）显著增加或减少

## 6.6 臭氧和 $PM_{10-2.5}$ 仍是主要污染物

自 2013 年开始，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，二氧化硫、一氧化碳和 $PM_{2.5}$ 的浓度大幅度降低，但臭氧浓度却有显著上升。尽管在过去几年中，春夏臭氧平均浓度的上升在一定程度上受到遏制，但仍未形成稳定的下降趋势，在 2022 年更是表现出了反弹回升。如图 48所示，以春夏平均臭氧浓度为标准，在本报告所涵盖的 113 个城市中有 91 个城市的春夏平均臭氧超标，且其超标值是六种污染物中最高的。第二突出的污染物是 $PM_{10-2.5}$，有 59 个城市超标。如 6.2 所述，近几年 $PM_{10-2.5}$ 的下降比较缓慢。

北京大学统计学中心

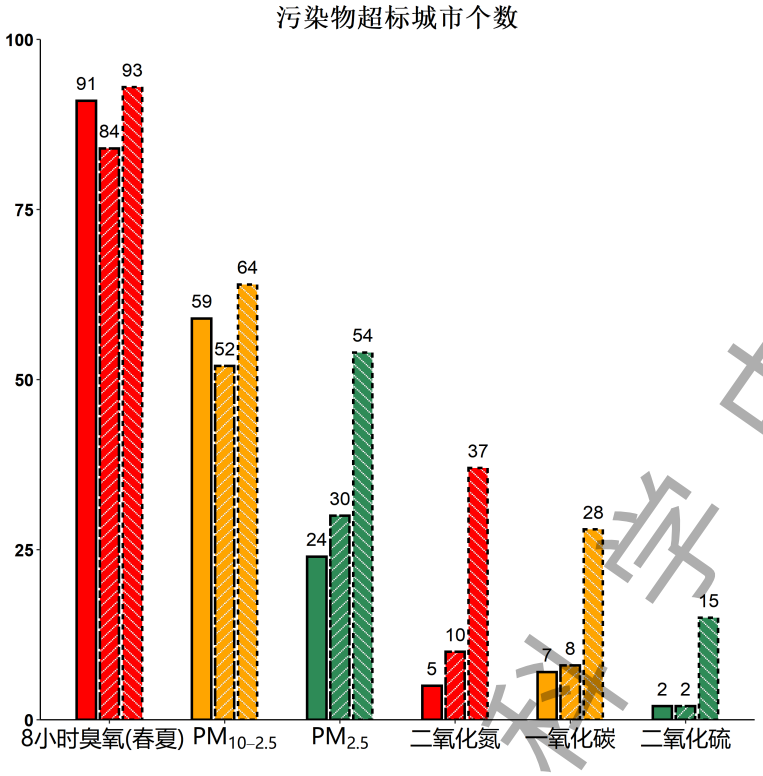



图 48: “3+110”城市各污染物超标情况，同一污染物从左至右依次为 2022/2021/2019 年超标城市个数

## 6.7 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 $PM_{2.5}$ 日均浓度 98% 分位数浓度不超过 35 微克/立方米，八小时臭氧每年第四高日均浓度不超过 137 微克/立方米 [22]。报告第3章给出了各市 $PM_{2.5}$ 和八小时臭氧的 90% 分位数浓度，用以衡量污染最严重的 10% 时段的情况，相比于 98% 分位数，这是更为宽松的标准，但比均值浓度要严格。

图 49给出九省三市 2015 至 2022 年 $PM_{2.5}$ 和八小时臭氧年平均 90% 分位数浓度的变化趋势。首先看 $PM_{2.5}$ 的 90% 分位数浓度变化。相比 2021 年，2022 年北京、陕西、山西三省市分别反弹 4.9（6.3%）、4.5（5.8%）、2.4（2.8%）微克/立方米；河南省略有 0.6（0.5%）微克/立方米的下降；其他省市普遍下降，其中天津市下降最为显著，为 7.5（7.5%）微克/立方米；“3+110”城市中有 35 个城市 $PM_{2.5}$ 的 90% 分位数浓度出现反弹，其中渭南市反弹最严重，增幅达 16.9（15.8%）微克/立方米。综合各区域来看，伴随 $PM_{2.5}$ 均值浓度的下降，其 90% 分位数也呈现出明显下降趋势，“3+110”城市 90% 分位数平均值从 2015 年的 125.6 微克/立方米下降至 2021 年的 80 微克/立方米，并继续下降至 2022 年的 77.5 微克/立方米，2015-2022 年累计降幅 38.3%，2021-2022 年降幅为 3.1%。2022 年 $PM_{2.5}$ 的极端污染区域仍集中在京津冀及周边地区，其中河南和天津 90% 分位数浓度最高，分别为 99.1 和 91.8 微克/立方米；山西、河北、北京、山东和陕西的 90% 分位数浓度在 81.5 ～ 88.5 微克/立方米之间；安徽和江苏略低，分别为 68 和 64.6 微克/立方米；江西、内蒙四市和上海则不超过 55 微克/立方米。

虽然过去七年来 $PM_{2.5}$ 的 90% 分位数已有显著下降，但在“3+110”城市中仍有 17 个城市 90% 分位数浓度超过 100 微克/立方米。而在污染最严重的冬季，“3+110”城市 90% 分位数浓度平均值可达

北京大学统计科学中心

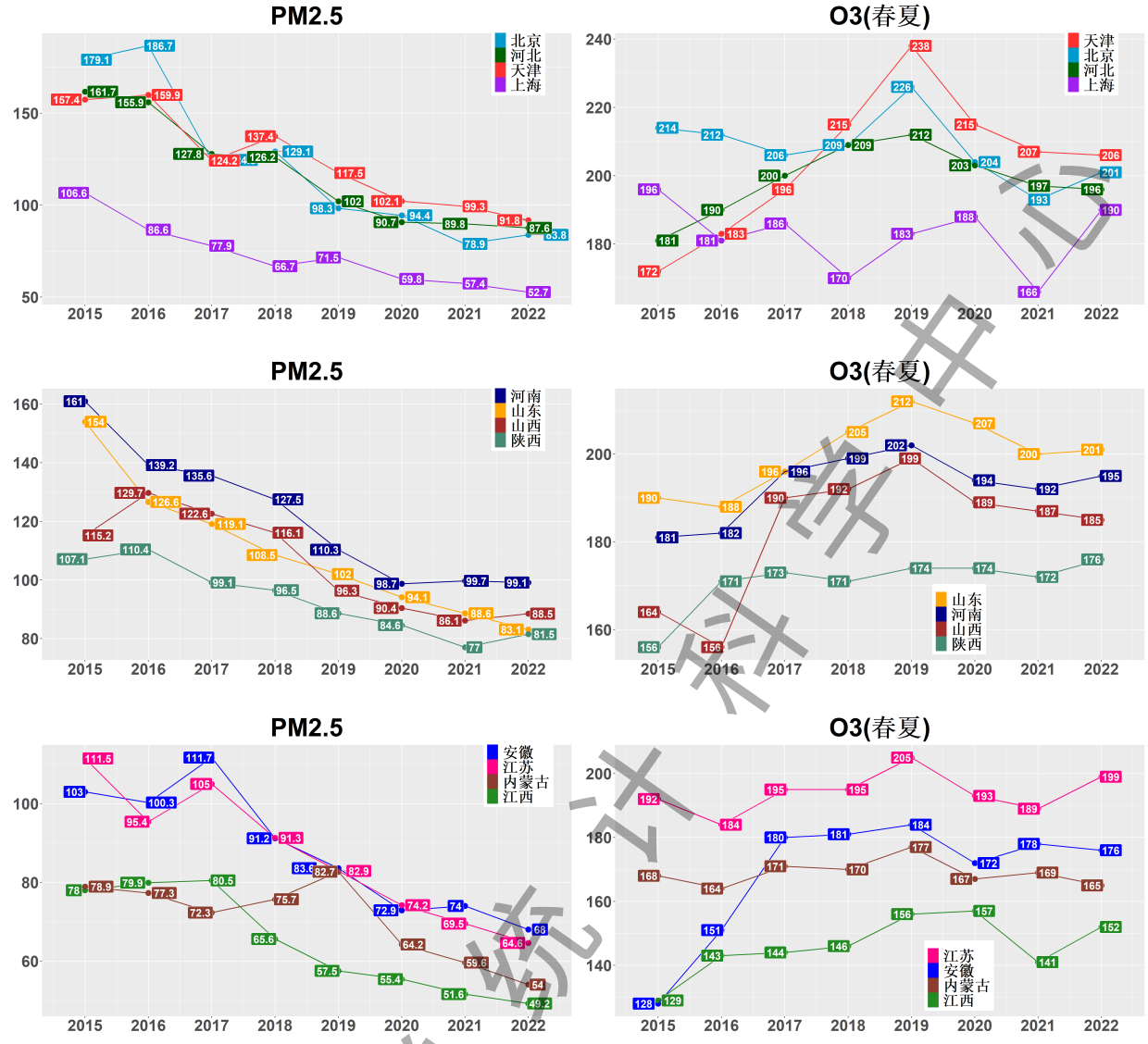



图 49: 九省三市去除气象因素影响 $PM_{2.5}$ 和八小时臭氧（春夏）平均 90% 分位数浓度时间序列（微克/立方米），实线（虚线）代表在 5% 统计学显著水平比上年有（无）显著增加或减少

123.7 微克/立方米；有 33 个城市超过 150 微克/立方米，这意味着这 33 个城市在冬季平均至少有 9 天时间达到重度污染。因此在污染物平均浓度普遍改善的情况下，考核标准应该从平均浓度向分位数浓度转变，进而同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。

对于春夏八小时臭氧 90% 分位数浓度，相比 2021 年，2022 年北京、上海、江苏、江西四省市反弹较大，分别增加了 8（4.1%）、24（14.5%）、10（5.3%）和 11（7.8%）微克/立方米；陕西、河南、山东也有小幅增长，分别为 4（2.3%）、3（1.6%）和 1（0.5%）微克/立方米；其他省市则略有下降，内蒙四市下降最为显著，为 4（2.4%）微克/立方米。“3+110”城市中有 66 个城市春夏八小时臭氧 90% 分位数浓度出现反弹，上海市反弹最大，达 24.5（14.5%）微克/立方米；其中 23 个城市反弹超过 2019 年。综合各区域来看，**“3+110”城市 90% 分位数均值从 2015 年的 167.1 微克/立方米上升至 2019 年 194.5**

北京大学统计科学中心

**微克/立方米，2021 年下降至 183.3 微克/立方米，2022 年反弹至 185.8 微克/立方米**。2022 年春夏臭氧的极端污染区域仍集中在京津冀及周边地区，其中天津、北京、山东 90% 分位数浓度最高，分别为 206、201 和 201 微克/立方米；江苏、河北、河南、上海的 90% 分位数浓度在 190～ 199 微克/立方米之间；山西略低，为 185 微克/立方米；陕西、安徽、江西、内蒙四市则不超过 176 微克/立方米。

相比 2015 年，2022 年北京、上海和内蒙四市的春夏八小时臭氧 90% 分位数浓度分别下降了 6%、3% 和 1.8%，其他八省一市均无明显改善，上升幅度从高到低为安徽、天津、江西、山西、陕西、河北、河南、山东和江苏分别为 48（37.5%）、34（19.8%）、23（17.8%）、21（12.8% ）、20（12.8%）、15（8.3%）、14（7.7%）、11（5.8%）、7（3.6%）微克/立方米。

## 6.8 三个重点监测区域污染差异变小

京津冀及周边地区“2+26”城市、汾渭平原 11 市和苏皖鲁豫交界地区均是生态环境部大气污染治理的重点监测区域。本节将比较这三个重点监测区域六种主要污染物剔除气象影响后的变化情况。

根据图 50，2022 年，“2+26”城市和汾渭平原在 $PM_{2.5}$、二氧化硫、二氧化氮和一氧化碳的平均浓度上表现较为接近。从浓度极差（三个区域平均浓度的最大值与最小值之差）的角度来看，2015 年这四种污染物的极差分别为 20.2、12.6、11.4 微克/立方米和 0.56 毫克/立方米；2021 年极差下降至 2.7、1.6、6.8 微克/立方米和 0.12 毫克/立方米；2022 年极差有所反弹，分别为 6.2、2.2、7.9 微克/立方米和 0.11 毫克/立方米。但是 $PM_{10}$ 和春夏臭氧的区域差异较大。2015 年，$PM_{10}$ 和春夏臭氧的区域极差分别为 31.5 和 18.7 微克/立方米，2021 年下降至 11.2 和 13 微克/立方米，2022 年极差则分别为 22.3 和 7.5 微克/立方米。2022 年，$PM_{10}$ 污染以汾渭平原（104.6 微克/立方米）污染程度最高，“2+26”城市（92.7 微克/立方米）次之；春夏八小时臭氧则以“2+26”城市（144 微克/立方米）污染程度最高，汾渭平原（139 微克/立方米）次之。苏皖鲁豫交界地区的六种污染物浓度均较低，且在颗粒物和二氧化氮污染上显著优于“2+26”城市和汾渭平原。

从污染改善情况来看，相较 2015 年，$PM_{2.5}$、$PM_{10}$、二氧化硫和二氧化氮四种污染物均以“2+26”城市改善程度最显著，污染物浓度降幅分别为 43.9%、37.8%、74.7% 和 30.3%；$PM_{2.5}$、$PM_{10}$ 和二氧化氮以汾渭平原改善程度最小，降幅分别为 23.6%、11% 和 9.6%；二氧化硫在三区域的改善情况较为接近，以苏皖鲁豫交界地区改善程度最小，累计下降 71.9%；一氧化碳以汾渭平原改善程度最大，累计下降 54.3%，苏皖鲁豫交界地区改善程度最小，累计下降 39.9%；春夏八小时臭氧以汾渭平原反弹情况最严重，七年增加 40.7%，苏皖鲁豫交界地区增加较少，七年增加 16.4%。

从未来污染治理来看，至 2021 年，三个区域的二氧化硫浓度均已达到较低水平，下降空间有限。但是，三个区域的臭氧平均浓度仍保持在较高水平。例如，“2+26”城市和苏皖鲁豫地区从 2021 年的 138 和 132 微克/立方米上升至 2022 年的 139 和 137 微克/立方米，汾渭平原地区从 2021 年的 145 微克/立方米只小幅下降至 144 微克/立方米。因此，臭氧污染治理将是未来三个区域的共同挑战。此外，“2+26”和汾渭平原地区的 $PM_{10}$、一氧化碳和二氧化氮污染水平较苏皖鲁豫交界地区仍有差距，将成为未来进一步的工作目标。虽然苏皖鲁豫交界地区的六种污染物浓度最低，但伴随着区域间污染差异的缩小和臭氧平均浓度的反弹，苏皖鲁豫交界地区较其他两个区域的优势不再显著，该地区应继续保持并加强在大气

北京大学统计科学中心

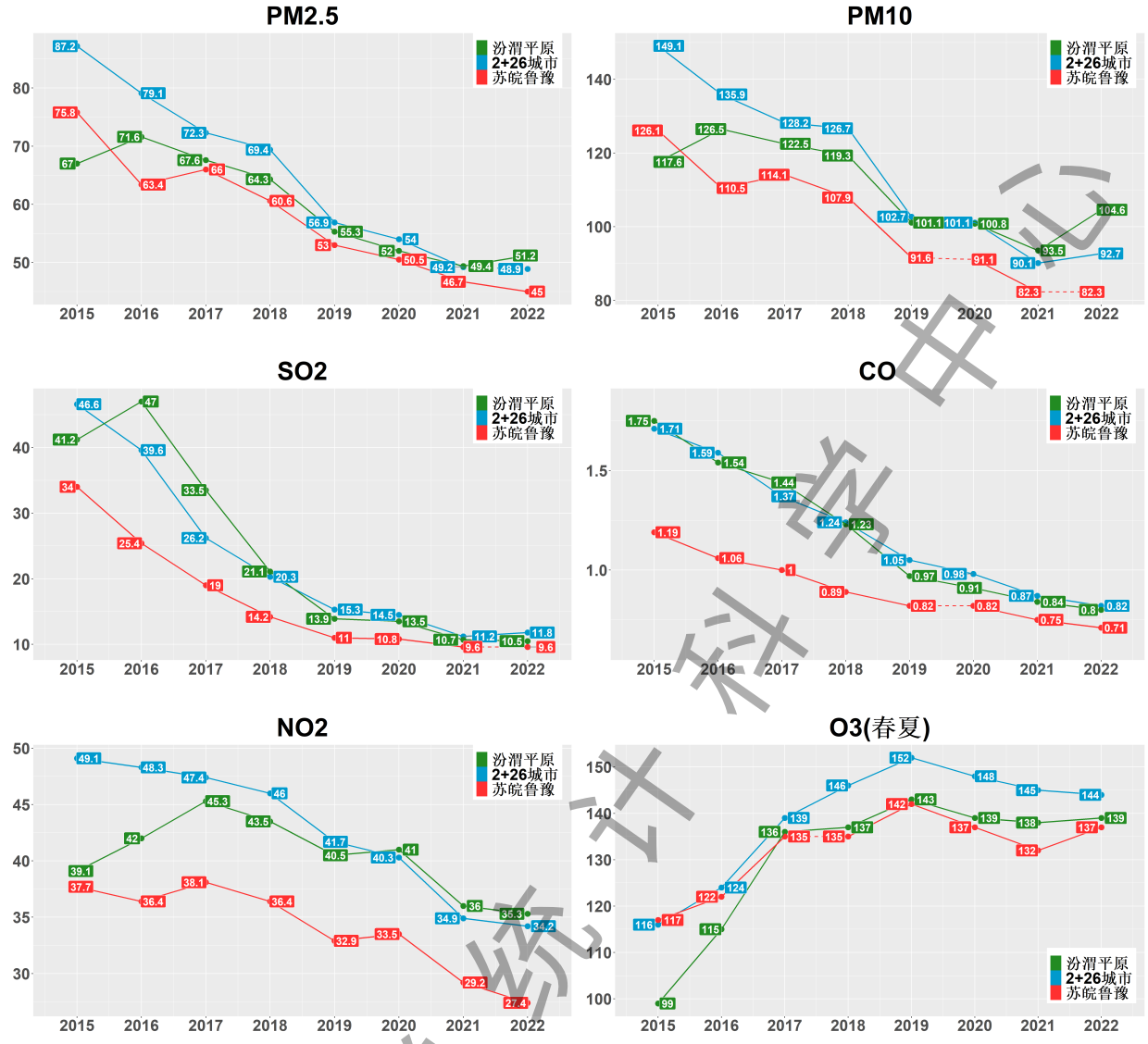



图 50: “2+26”城市、汾渭平原和苏皖鲁豫交界地区六种污染物年平均浓度时间序列图（一氧化碳的单位为毫克/立方米，其余污染物的单位为微克/立方米）

污染治理方面的工作力度，争取做到稳中求进。

## 6.9 提高空气质量“良”的标准

“3+110”城市涵盖中国污染最严重的区域，这些城市的空气质量数据验证了中国的空气质量已有非常显著的改善。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 $PM_{2.5}$ “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 WHO“过渡时期”的初级指标所建议的 75 微克/立方米更严格。我们建议使用 WHO“过渡时期”第二级指标所给定的 50 微克/立方米作为“良”的上限。这样将提高大气污染预警提示的范围，

北京大学统计科学中心

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 $PM_{2.5}$ 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 $PM_{2.5}$ 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 51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 12%，但所有城市“优良空气”占比仍都超过 55.7%，其中 87 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；另一方面，提高“良”的标准也会降低未来个人及国家的医疗健康开支，同时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。

北京大学统计科学中心

# 附录




图 51: “3+110”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 71.5% 和 55.7% 分别代表在 75 和 50 微克/立方米“良”的标准下 2022 年“3+110”城市优良天数比例的最低值，为方便展示起见，图中仅展示 2016、2018、2020、2022 四年的数据）

北京大学环境科学研究中心

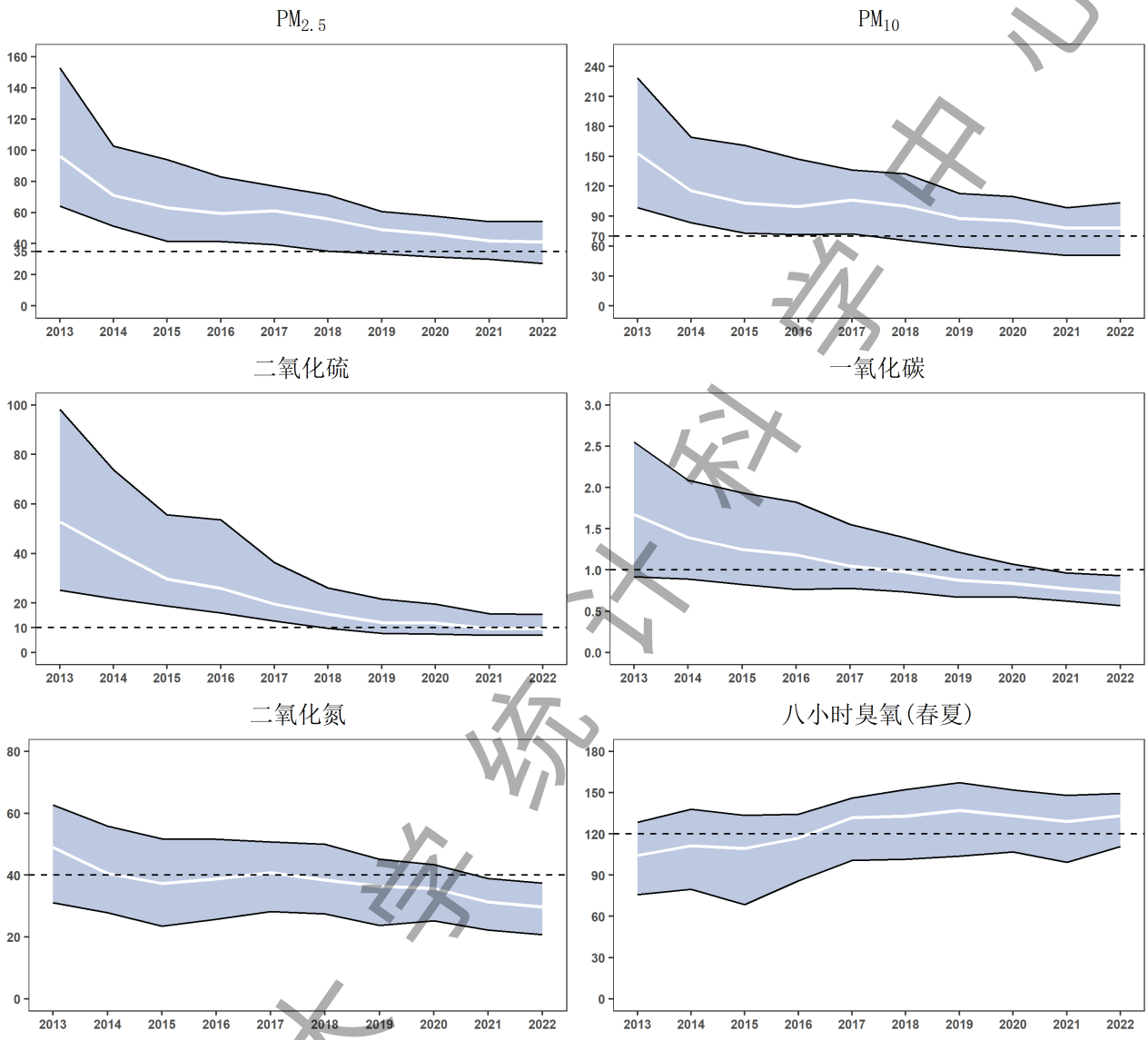



图 52: “3+110”城市 2013-2022 年平均浓度和 90% 分位数浓度变化趋势

（蓝色区间为“3+110”城市年均浓度 10%-90% 分位数区间，白色折线为“3+110”城市逐年平均浓度。除一氧化碳外污染物浓度单位为微克/立方米，一氧化碳为毫克/立方米。黑色虚线为第四章设定参考标准，其中 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 使用国家二级标准）

北京大学统计科学中心

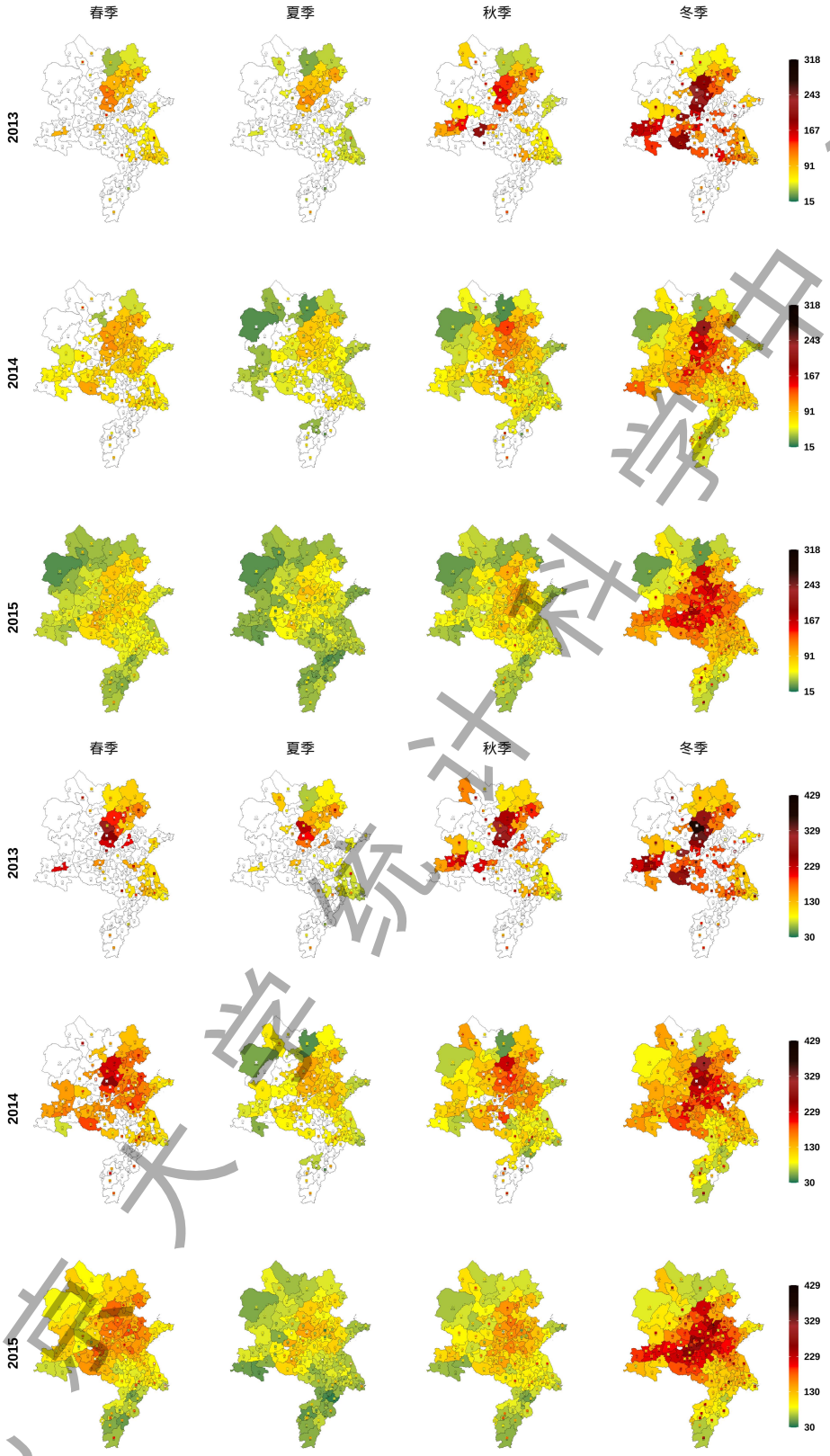



图 53: “3+110”城市气象调整后 2013 年至 2015 年 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 季节平均浓度（微克/立方米）

北京大学统计科学中心

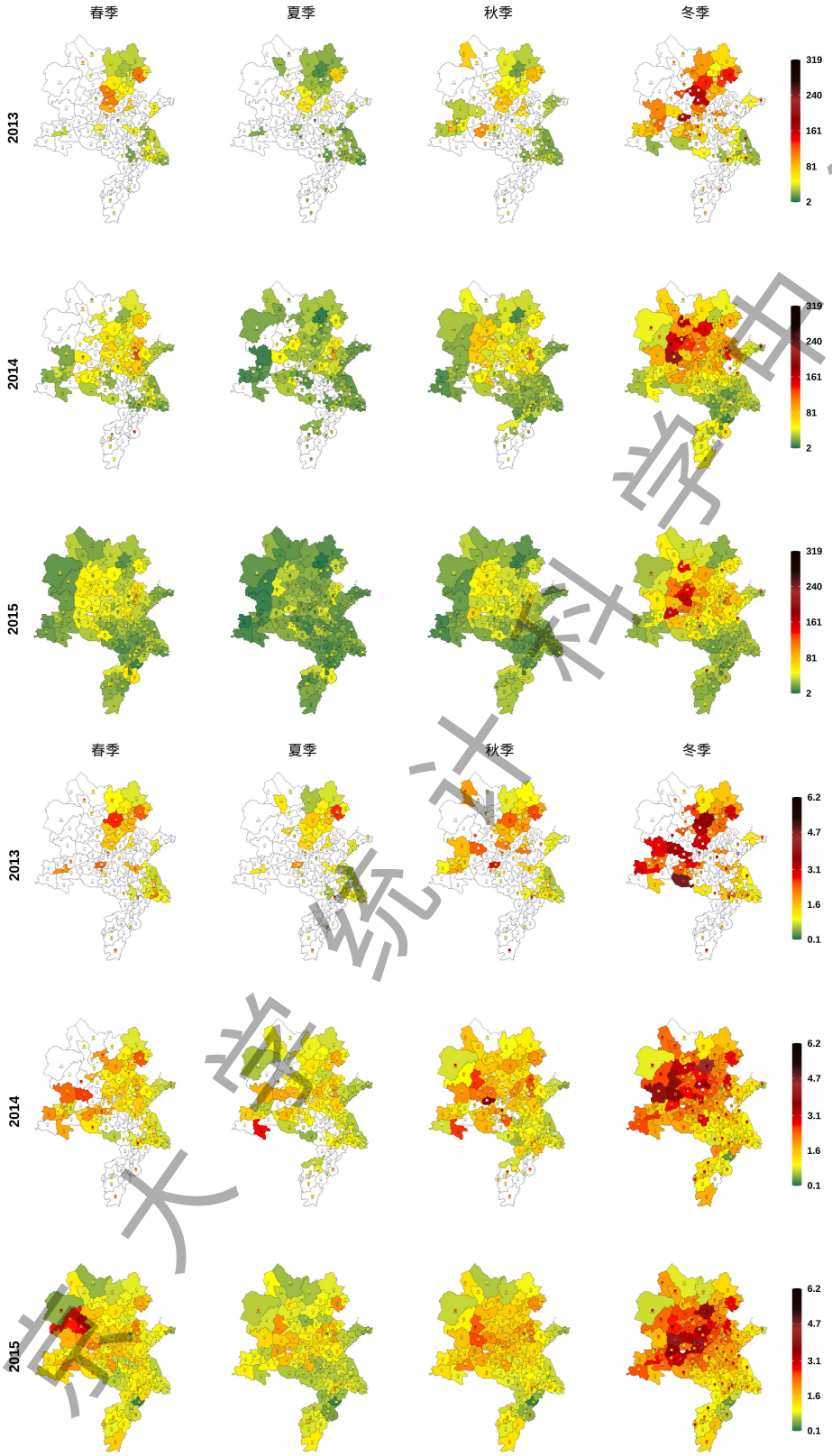



图 54: “3+110”城市气象调整后 2013 年至 2015 年二氧化硫（微克/立方米）和一氧化碳（毫克/立方米）季节平均浓度

北京大学统计科学中心

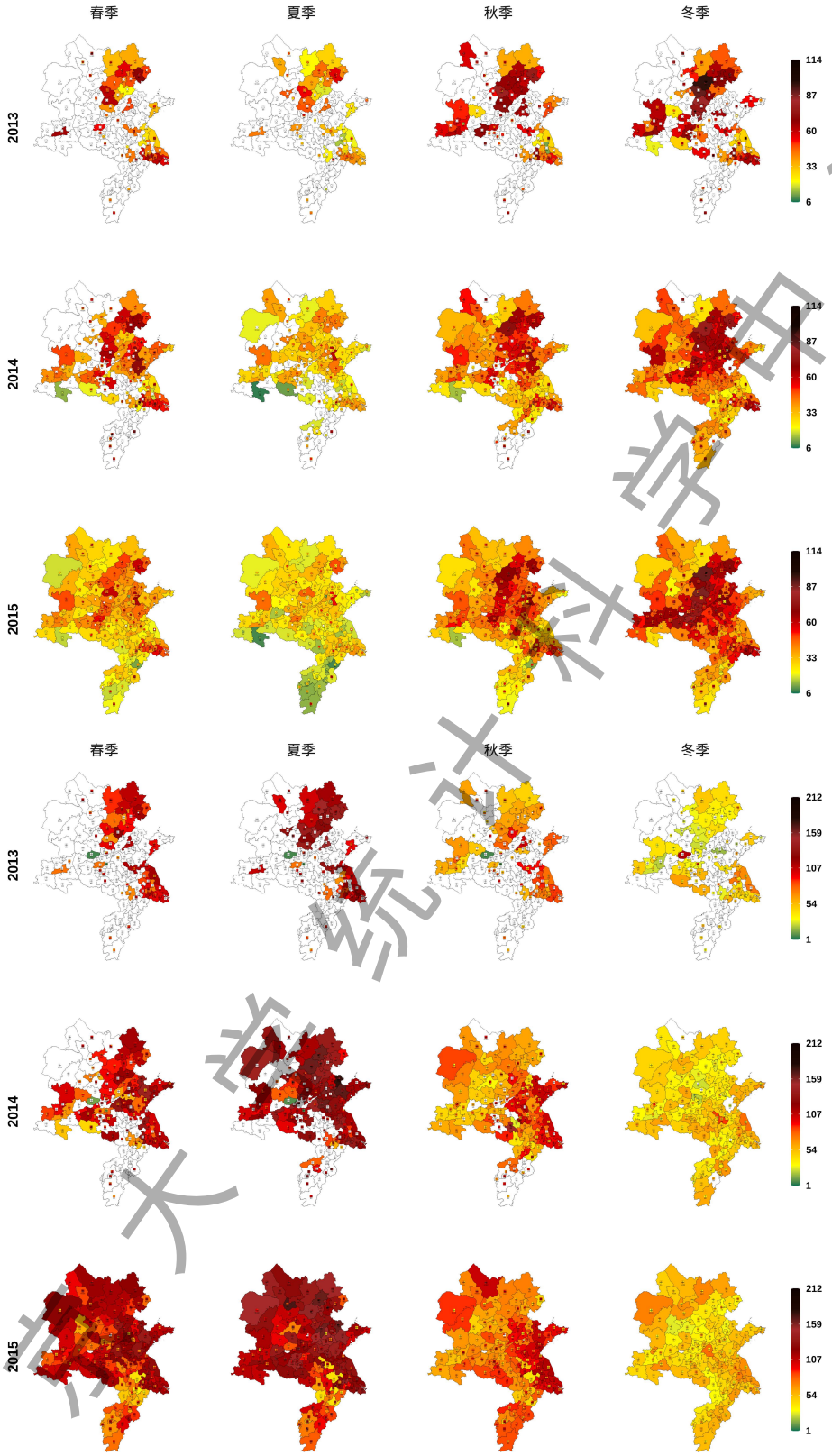



图 55: “3+110”城市气象调整后 2013 年至 2015 年二氧化氮和八小时臭氧季节平均浓度（微克/立方米）

北京大学统计科学中心

# 参考文献

[1] 北京大学统计科学中心环境统计组 (2015). 空气质量评估报告 (一): 北京城区 2010-2014 年 $PM_{2.5}$ 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] 中国国务院 (2013). 大气污染防治行动计划. 国发〔*2013*〕*37* 号, 2013.

[11] 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.

北京大学统计科学中心

[12] 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.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 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 $O_3$. *Atmospheric Environment*, 193:290–301, 2018.

[18] 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.

[19] 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.

[20] Qian Di, Yan Wang, Antonella Zanobetti, Yun Wang, Petros Koutrakis, Christine Choirat, Francesca Dominici, and Joel D Schwartz. Air pollution and mortality in the medicare population. *New England Journal of Medicine*, 376(26):2513–2522, 2017.

[21] 中商产业研究院 (2021). 中国大健康产业市场前景及投资研究报告. 2021.

[22] EPA, OAR, and US. Naaqs table | us epa. (`https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table`). 2021.

北京大学统计科学中心

## 课题组成员



罗山杉，北京大学前沿交叉学科研究院硕士研究生


陈涵玥，北京大学统计科学中心博士研究生


王　佳，江西财经大学统计学院博士研究生


詹皓翔，北京大学数学科学学院本科生


林鸿斌，北京大学数学科学学院本科生


刘　俊，江西财经大学统计学院博士研究生


丁嘉麟，北京大学数学科学学院本科生


王昺皓，北京大学前沿交叉学科研究院硕士研究生


闫　夏，北京大学前沿交叉学科研究院硕士研究生


戴华凝，北京市十一学校学生


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、统计学院副教授


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



**致谢**：本报告得到国家自然科学基金重点项目 71532001, 71973005 和 11701466 的资助，及北京大学光华管理学院光华思想力项目和国家大数据分析与应用工程实验室的支持。感谢中国环境监测总站，青悦开放环境数据中心和中国气象局气象数据中心为本次报告提供数据。感谢中国科学院数学与系统科学研究院马志明院士的长期指导。感谢环境监测总站李健军总工程师、王帅博士的帮助与讨论，北京大学陶澍院士、张远航院士、朱彤院士、胡敏教授，中国科学院大气物理研究所王自发研究员，中国环境科学研究院柴发合研究员、高健研究员在本项目研究过程中提出的建议。感谢北京大学统计与经济计量同仁的长期鼓励，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。感谢光华管理学院对外关系团队王奂然、晏琴的安排，感谢统计科学中心行政团队的协助。

# 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

**Song Xi Chen Lab: www.songxichen.com**

**空气质量评估平台:http://www.songxichen.com/AQAssess/#/**