

2020-2021年秋冬季中国重点区域空气质量“稳中求进”，得益于清洁取暖散煤治理抵消工业污染反弹

2020-2021年秋冬季，中国三个大气污染防治重点区域——京津冀及周边地区、汾渭平原和长三角地区，均实现了生态环境部制定的“稳中求进”的秋冬季大气污染控制目标。这主要得益于持续推进清洁取暖散煤治理和工业排放末端治理的努力，抵消了火电、钢铁等工业超过10%的增产所带来的污染反弹。然而2020年16个省份的80多个城市仍然经历了一定数量的重污染天数，这使“十四五”全国范围内基本消除重污染天数的目标颇具挑战。要实现该目标，包括北京、河北等在内的10个省需要实现秋冬季重污染高发时期PM_{2.5}水平下降20%以上。

我们进行了详细的建模，识别出累计较多重污染天数记录的城市所对应的污染来源地，以表明要实现“十四五”基本消除重污染天数的目标，需要在哪些地区采取减排行动。

前言

2020年10月底，中国生态环境部发布了[京津冀及周边地区、汾渭平原和长三角地区](#)2020-2021年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案（以下简称方案）。方案按照巩固成果、稳中求进的原则，充分考虑2020年一季度空气质量的疫情影响，将2020-2021年秋冬季目标设置为两个阶段，根据2019年一季度和四季度污染水平，分类确定各区域和城市的PM_{2.5}浓度控制目标。

根据我们[之前的分析](#)，由于新冠疫情影响，2020年春季空气质量显著优于常年，可以理解生态环境部方案所定的2020-2021年秋冬季PM_{2.5}浓度控制目标是高于2020年春季实际PM_{2.5}浓度的。然而，与2019年春季实际PM_{2.5}浓度相比，要实现2020-2021年秋冬季目标只是略微改善空气质量。

对于京津冀及周边地区2020-2021年秋冬季而言，目标仅仅比2019年同期PM_{2.5}平均浓度降低了2.5%。鉴于2020-2021年秋冬季是以2019年一季度和四季度为基准（相当于目标期与基准期有1.5年的时间差），这样折算成年均速率，改善幅度仅为1.7%。按照这样的速度，需要25年才能达到中国现行的《环境空气质量标准》中PM_{2.5}年平均浓度35μg/m³的限值，而此限值只是世界卫生组织的“过渡时期目标-1”的限值，是逐步达到清洁空气质量的第一步。对汾渭平原而言2020-2021年秋冬季目标意味着PM_{2.5}浓度需要下降3.5%，长三角地区则是下降4.5%。

方案制定了重点地区和城市的空气质量目标，以及详细的措施，如：推进清洁取暖散煤替代工程，严防“散乱污”企业反弹，有序实施钢铁行业超低排放改造，落实钢铁、建材、焦化、化工等行业产业结构调整要求等。

重点地区的秋冬季空气质量实现“稳中求进”目标，重污染天数下降

我们根据中国环境监测总站发布的数据，分析了2020年和2020-2021年秋冬季的空气质量趋势。我们的分析结果与生态环境部最新发布的季度 [环境空气质量状况通报](#) 基本一致，我们进一步分析了导致近期空气质量变化的原因。为了更清楚地了解人为排放对空气污染的影响，需要排除沙尘暴、异常天气条件等影响因素。与前两年相比，2021年春季的沙尘暴发生频次显著增加(见附录)。在分析中，我们剔除了沙尘天气影响。此外，我们还应用了“天气修正”算法¹。该方法将特定地点的天气和空气质量数据连接起来，旨在修正天气对空气污染的影响。经修正消除异常天气影响的数据，在下文中称为“天气修正”数据。

在区域层面，三个重点区域（如表1所示）总体上达到了生态环境部方案确定的2020年第四季度和2021年第一季度PM2.5浓度和重污染天数控制目标。其中，2020年第四季度三个重点地区的空气质量与2019年同期相比，改善有限。京津冀及周边地区2020年第四季度PM2.5平均浓度与2019年同期持平，我们 [之前的分析](#) 显示，污染行业产量激增导致的工业排污增加，个别省份未能有效压减钢铁产能，是导致京津冀及周边地区2020年第四季度空气质量没有改善的主要原因。

图1分析比较了京津冀及周边地区、汾渭平原2020年10月至2021年3月与2019年10-12月和1-3月期间污染水平和温度的关系，当气温在零度以下时，采暖污染排放对空气质量影响最大，而数据显示此时2020-2021年秋冬季与2019年相比，PM2.5平均浓度显著下降。这一改善可能应归功于近几年清洁采暖散煤治理所带来的成效。据报道，截至2020年底，京津冀及周边地区、汾渭平原已累计完成了2500万户散煤替代²。生态环境部评估煤改气、煤改电对大气中细颗粒物（PM2.5）下降贡献率达三分之一以上，环境效益明显³。

而当温度在5°C以上时，2020-2021年秋冬季的污染水平高于2019年，很可能是由于工业和交通排放的增加。根据中国国家统计局的数据，2021年第一季度全国钢铁、水泥产量和火电发电量与2019年同期相比分别增长了17%、12%和14%，超过了中国10%的GDP增速。

¹ Centre for Research on Energy and Clean Air. (2020). Weather-correction of air pollution – Application to COVID-19. <https://energyandcleanair.org/weather-correction-of-air-pollution-application-to-covid-19/>

² 截至去年底，2+26城市和汾渭平原累计完成2500万户散煤替代，2021-2-25, <https://www.chinanews.com/ny/2021/02-25/9418822.shtml>

³ 全国将新增清洁取暖面积约15亿平方米——今冬取暖更清洁了，2020-11-23, http://www.gov.cn/xinwen/2020-11/23/content_5563459.htm

表1. 大气污染防治重点区域2020-2021年秋冬季PM2.5控制目标和实际水平

区域	京津冀及周边地区 (2+26城市)		汾渭平原		长三角地区	
年-季度	2020年第 四季度	2021年第 一季度	2020年第 四季度	2021年第 一季度	2020年第 四季度	2021年第 一季度
PM2.5的目标, µg/m ³	63	86	62	90	45	58
观测数据, PM2.5 浓度, µg/m ³	63	65	59	65	39	41
天气修正数据, PM2.5浓度, µg/m ³	50	52	48	51	34	34
观测数据, PM2.5 浓度与基准相比的 变化	-1%	-26%	-6%	-30%	-10%	-29%
天气修正数据, PM2.5浓度与基准 相比的变化	0%	-20%	-3%	-16%	-6%	-16%

注: 生态环境部充分考虑2020年一季度空气质量的疫情影响, 将2020-2021年秋冬季目标设置为两阶段, 根据2019年一季度和四季度污染水平, 分类确定各区域和城市的PM2.5浓度控制目标。我们把2019年一季度和四季度污染水平作为基准, 计算了2020-2021年秋冬季两个阶段PM2.5水平的变化。

图1. 大气污染防治重点区域2020-2021年秋冬季与2019第四和第一季度平均PM2.5浓度和气温相关性分析(2019年秋冬季采用2019年第四和第一季度数据, 2020-2021秋冬季采用2020年第四季度和2021年第一季度数据)

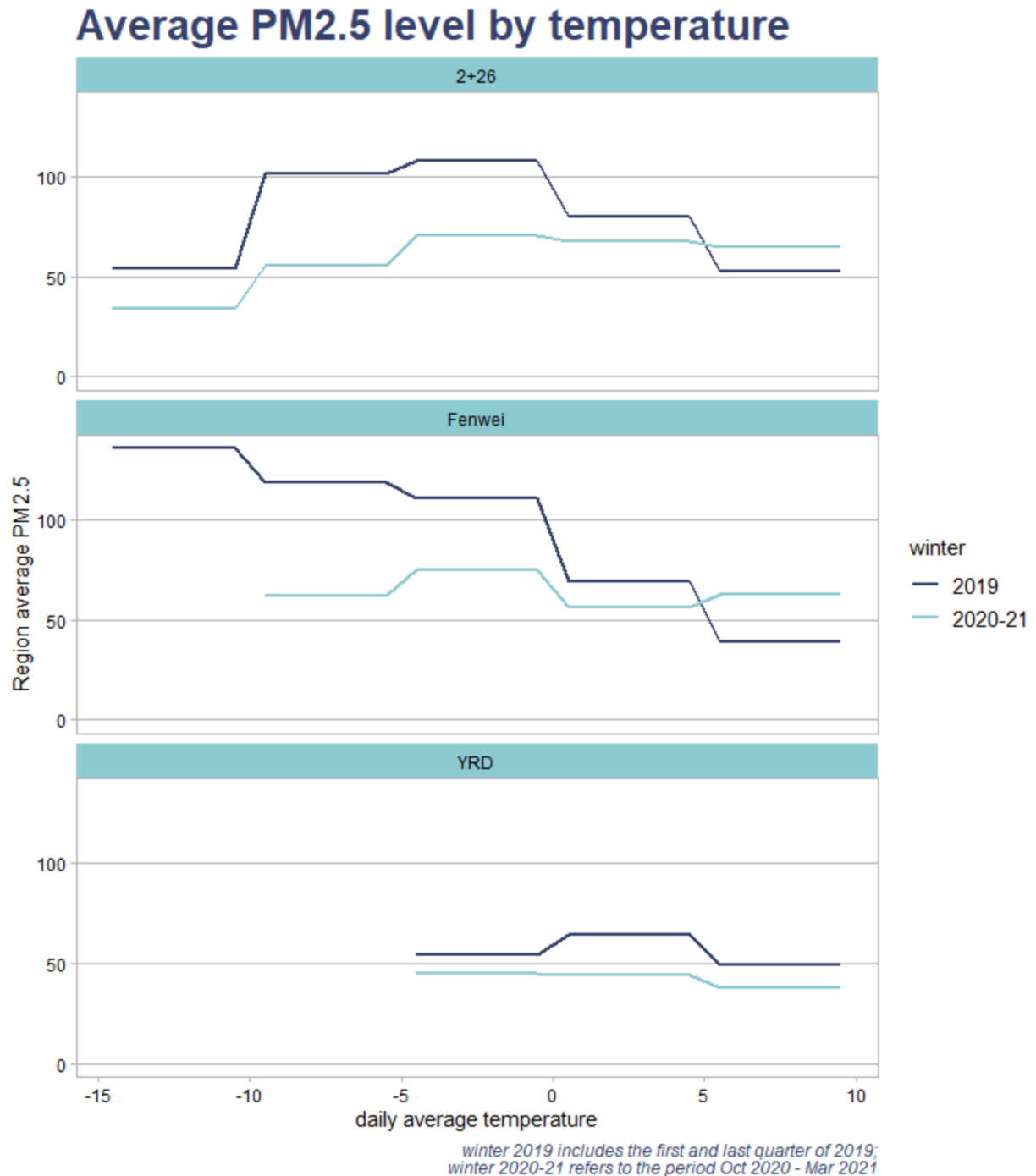
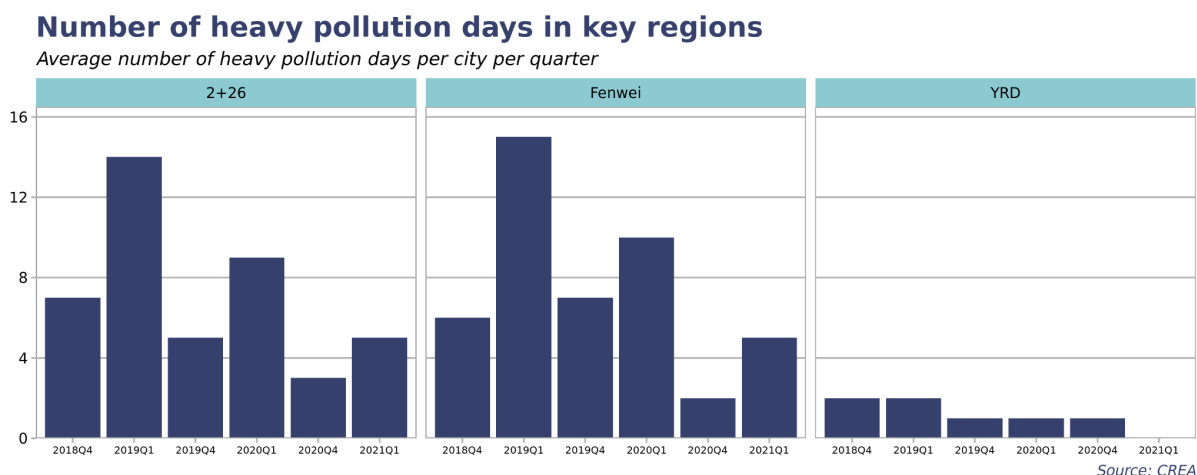


图2. 大气污染防治重点区域2018年第四季度至2021年第一季度秋冬季重污染天数分析



2020-2021年秋冬季, 京津冀及周边地区、汾渭平原的重污染天数均在生态环境部方案所定的限值内(长三角地区2019年平均每个城市仅为1.5天重污染天数, 因此生态环境部未设置重污染天数改善目标)。如图2所示, 过去3年三个重点地区秋冬季重污染天数均成下降趋势。根据生态环境部数据, 全国重度及以上污染天数占比从2015年的2.8%已经下降到2020年的1.2%, 重点地区改善更明显, 从5.0%下降到1.9%。

在城市层面, 我们的分析(见图3)显示在2020年第四季度, 京津冀及周边地区28个城市中的13个城市, 汾渭平原11个城市中的3个城市, 以及长三角地区41个城市中的11个城市, 未能达到生态环境部方案所确定的对应城市PM_{2.5}浓度控制目标⁵。河南省中有5个位于京津冀大气污染传输通道上的城市未达标, 天气修正数据进一步显示, 这5个城市的PM_{2.5}水平与2019年同期相比没有改善, 反而存在1%到7%不同程度的增加。

2021年第一季度, 北京是三个重点区域中唯一PM_{2.5}浓度未达到生态环境部方案限值的城市。2021年1-3月, 北京PM_{2.5}平均浓度为62μg/m³, 较2019年第一季度增长21%。然而, 经天气修正后, 数据显示北京同期的人为因素导致的PM_{2.5}水平下降了15%。可见2月和3月频繁发生的静稳高湿的不利气象条件, 阻碍了北京污染物的有效扩散, 邻近城市的钢铁等工业增产造成的空气污染物的增加也对北京空气质量造成不良影响⁶。生态环境部部长黄润秋2021年3月11日

⁴ 生态环境部: 科学制定“十四五”各地重污染天数下降指标, 2021-2-25, <https://news.cctv.com/2021/02/25/ARTI1g4PHaeTMOOn5PVTwwgY210225.shtml?spm=C94212.P4YnMod9m2uD.ENPMkWvfnaiV.5>

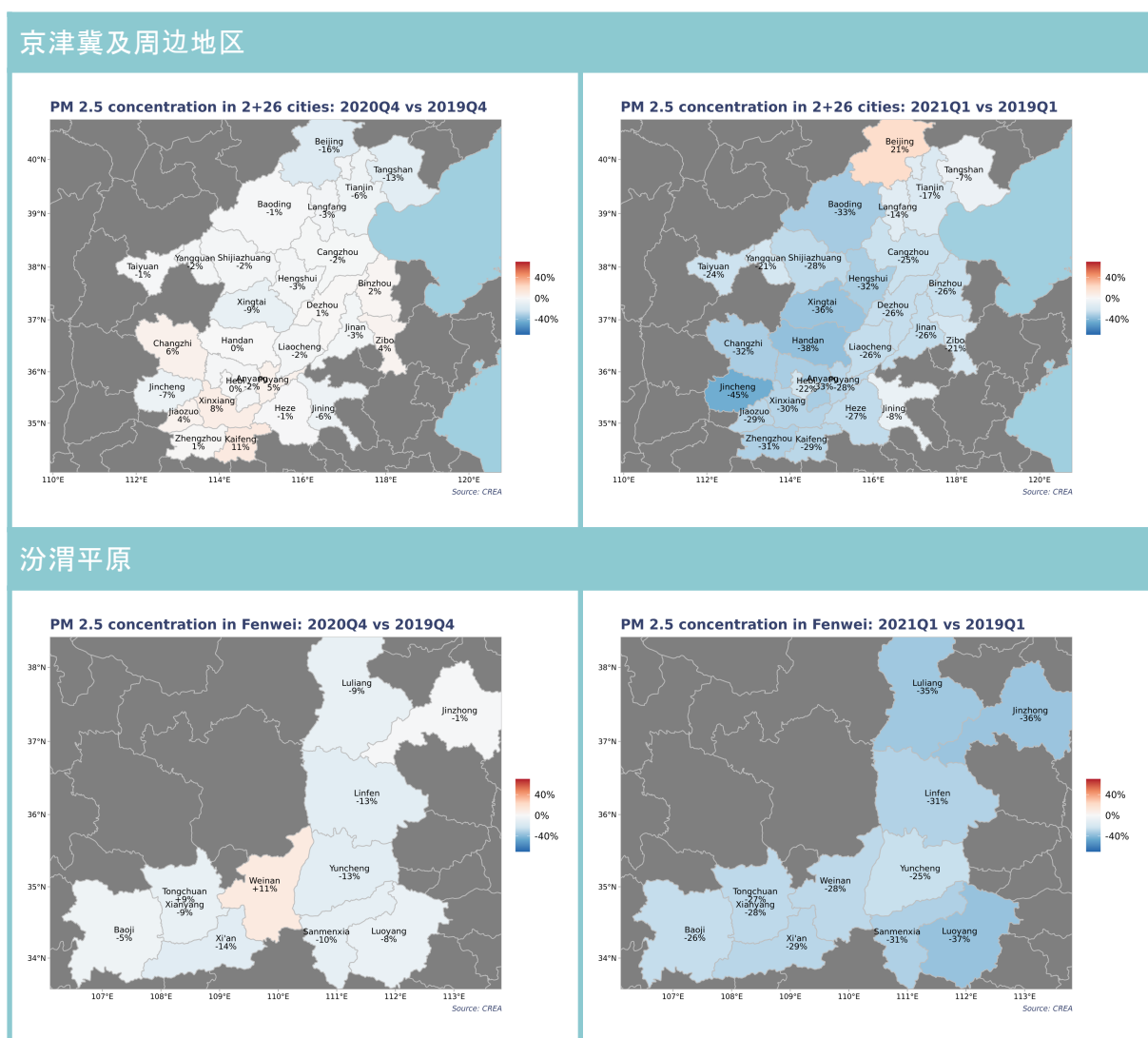
⁵ 本分析采用以下条件确定是否达到生态环境部方案目标: 1) 对于有明确PM_{2.5}浓度目标的城市, PM_{2.5}实际浓度<目标浓度; 2) 对于全年PM_{2.5}浓度已经达到《环境空气质量标准》的11个城市, 生态环境部未设置质量改善目标; 3) 对于目标为持续改善的城市, 2020-2021年秋冬季PM_{2.5}实际浓度<去年同期。

⁶ 一季度空气质量明显下降 未来保蓝天应从何处发力?, 2021-4-21, http://www.xinhuanet.com/politics/2021-04/20/c_1127353176.htm

赴唐山4家企业检查时发现，这4家钢铁企业在重污染天气应急响应期间高负荷生产，生产记录造假问题普遍，有的甚至互相通风报信、删除生产记录应对检查。

表2显示，在重点区域以外的省份中，宁夏和青海的PM_{2.5}在2020年第四季度期间有明显的增加，与2019年同期相比，两省的PM_{2.5}水平分别上升了28%和22%。在2021年第一季度，南部和西南部省份的PM_{2.5}水平显著上升，包括云南(+31%)、广西(+28%)、海南(+17%)、贵州(+16%)、福建(+9%)和广东(+2%)。天气修正分析证实，云南(+22%)、广西(+12%)和贵州(+14%)的污染水平增加是由于人为排放增加导致的。

图3. 大气污染防治重点区域2020-2021年秋冬季各个城市PM_{2.5}水平变化（与2019年第四季度和第一季度比较）



⁷ 生态环境部长赴唐山暗访 发现四家钢企抱团造假, 2021-3-14, http://www.xinhuanet.com/2021-03/14/c_1127208018.htm

长三角地区

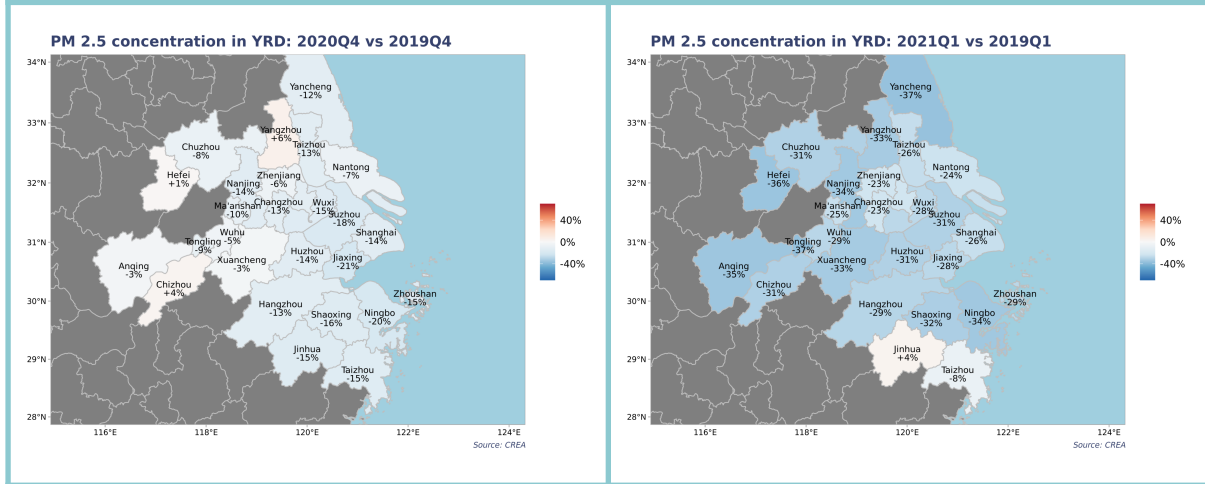


表2. 2020-2021年秋冬季各省PM2.5水平变化 (与2019年第四季度和第一季度比较)

省	观测数据		天气修正数据	
	2020年 第四季 度与 2019年 第四季 度比较	2021年 第一季 度与 2019年 第一季 度比较	2020年 第四季 度与 2019年 第四季 度比较	2021年 第一季 度与 2019年 第一季 度比较
安徽	-1.70%	-31.40%	-3.10%	-20.40%
河北	-5.90%	-21.70%	-0.80%	-23.30%
黑龙江	-15.90%	-20.40%	0.40%	-4.70%
河南	1.20%	-28.60%	-2.80%	-18.70%
湖北	4.50%	-26.40%	3.10%	-13.80%
湖南	-0.10%	-13.80%	8.10%	0%
江苏	-7.70%	-28.60%	-6.40%	-15.40%
江西	-6.40%	-3.90%	3.90%	-2.40%
吉林	-14.60%	-22%	6.60%	-19.40%

辽宁	-9%	-3.70%	-4.50%	-12%
内蒙古	-10.80%	-6.90%	-0.60%	-19.40%
北京	-16.30%	20.80%	6%	-14.60%
宁夏	28%	-8.80%	7.90%	-12.50%
青海	21.80%	-6.50%	8.40%	-2.50%
陕西	-1.20%	-24.50%	2.90%	-9.70%
山东	-1.30%	-24.90%	-2%	-12.80%
上海	-13.80%	-25.50%	-7.60%	-9.70%
山西	-4.10%	-26.40%	-3.90%	-16%
四川	0.60%	-2.60%	3.70%	3.20%
天津	-5.70%	-17.50%	1%	-20.90%
新疆	-6.10%	-14%	-9%	-11.20%
西藏	4.50%	1.30%	-2.50%	0%
重庆	-5.20%	-12.20%	0.10%	-6.80%
云南	-5.70%	31.50%	-0.70%	22.10%
浙江	-15.20%	-23.30%	-6%	-13.90%
福建	-25%	9.20%	-4.60%	2%
甘肃	3.90%	-12.20%	1.20%	-12.50%
广东	-21.60%	1.50%	-5.20%	-9.70%
广西	-12.90%	28.20%	5.50%	12.30%
贵州	-6.90%	15.70%	1.70%	14.20%
海南	-3.90%	17%	11.60%	-0.10%

到2025年基本消除重污染天数将要求大幅减排

中国“十四五”规划纲要提出，到2025年，要基本消除重污染天气。这是一项全国性的目标，不仅包括大气污染防治重点地区，也包括其他各省和城市。我们的分析显示，2020年，尽管新冠疫情期间空气质量显著改善，位于16个省的86个城市仍然出现了5天或5天以上的重污染天数。这86个城市中，只有35个位于大气污染防治重点区域。东北地区（特别是黑龙江）、河南南部、新疆、内蒙古等工业污染排放严重的地区，需要优先制定消除重污染天数的方案。

减少重污染天数有两种可能的方法：一是在秋冬季系统性地减少排放，二是雾霾多发时期采取管控工业排放等有针对性的行动。国家城市环境污染控制技术研究センター研究员彭应登估计，为了消除京津冀地区的重污染天数，华北地区的污染物排放总量，应该在现有的基础上再消减70%到80%⁸。

为了预测在容易发生雾霾的时期需要减少多少排放量才能达到消除重污染天数的目标，我们进行了简单的统计建模。我们拟合了2019-2020年每个城市PM2.5日水平的对数正态分布，并假设在重污染天数占比少于1%的情况下实现了目标，这与[世界卫生组织 \(World Health Organization\) 所用的24小时PM2.5和PM10限值](https://www.who.int/air-quality-guidelines)的方式一致。

从表3的分析可以看出，北京、河北、山东在雾霾易发时期PM2.5浓度需要下降约25%，陕西、安徽、黑龙江需要下降约30%，河南需要下降约35%。天津、辽宁、山西需要下降约20%，湖南、吉林、内蒙古、四川需要下降10-15%。位于新疆的五家渠和乌鲁木齐由于工业污染严重，PM2.5浓度需要下降超过50%。

⁸ “十四五”要基本消除重污染天气 专家：华北污染排放需再降七成, 2021-3-9, <https://finance.sina.com.cn/china/gncj/2021-03-09/doc-ikkntiak6624129.shtml>

表3. 为达到每年重污染天数不超过3天的阈值目标，应对重污染天气时，PM2.5所需削减量（仅包括2019年-2020年经历重污染天气的省份）

省、市、自治区	污染最严重情况下，所辖城市重污染天数达标，PM2.5所需削减量	所辖城市2020年重污染天数最高数值	离阈值目标差距最大的城市
安徽	-31.1%	14	阜阳
北京	-23.9%	6	北京
河北	-24.8%	20	石家庄
黑龙江	-30.6%	22	哈尔滨
河南	-36.1%	28	安阳
湖北	-21.8%	6	襄阳
湖南	-12.7%	3	益阳
江苏	-2.3%	5	徐州
吉林	-10.9%	15	长春
辽宁	-18.8%	8	锦州
内蒙古	-13.6%	21	呼和浩特
陕西	-30.2%	22	咸阳
山东	-23.2%	16	德州
山西	-20.6%	18	运城
四川	-9.2%	2	宜宾
天津	-19.1%	10	天津
新疆	-57.4%	50	五家渠

图4. 2020年各省重污染天数月平均值 (仅包括2020年经历重污染天气的省份)

Number of heavy pollution days in provinces in 2020

Average number of heavy pollution days per city per month



Source: CREA

识别雾霾天污染来源地

确定主要的污染来源地可有助于应对重污染天气。我们分析了风向和空气污染的数据，并使用HYSPLIT模型来确定污染来源地。[HYSPLIT模型](#)可以追踪大气气团的流动，并反演特定时间到达某个城市的气团所经过的路径。我们反演了部分发生重污染天气的省会城市对应时期的气团路径。气团路径显示携带污染物的空团的来源地，这对应对重污染天气是非常重要的。

图5所示为过去三年秋冬季部分省会城市的主导风向。京津冀及周边地区的重污染天气与南向气流有关，表明京津冀及周边地区和位于其南边的地区（山东南部 and 河南）需要进一步控制污染源排放。图6所示为针对北京的分析，显示出河北南部、山东北部、山西东部、河南西部和安徽是引起北京重污染天气的污染来源地，这与大气污染防治重点地区中所划定的范围基本一致。

上海的主导风向为西风，南京为东风，可见工业发达、人口密集的长三角地区对这两个城市空气质量的影响，而东北地区的城市受到来自其南面和西面工业密集地区气流污染传输的影响（图5）。就上海、哈尔滨和石家庄而言（图6），由于到达这些城市的气团途径若干省份，传输沿途污染，重污染天气是区域性的。

西安重污染天气时的主导风向为南风、东风和西风，污染气团在到达西安的前72小时内仅移动了100-200公里，污染源较为本地化（图6）。西安要消除重污染天气，周边100-200公里内的区域是污染控制的重点。

我们制作了在线地图⁹，展示部分城市重污染天气的气团路径，并且叠加了显示主要污染源和污染区域的NO₂污染卫星图层。

⁹ <https://energyandcleanair.org/china-winter2020-trajectories>

图5. 过去三年秋冬季重污染天气发生时部分省会城市主导风向

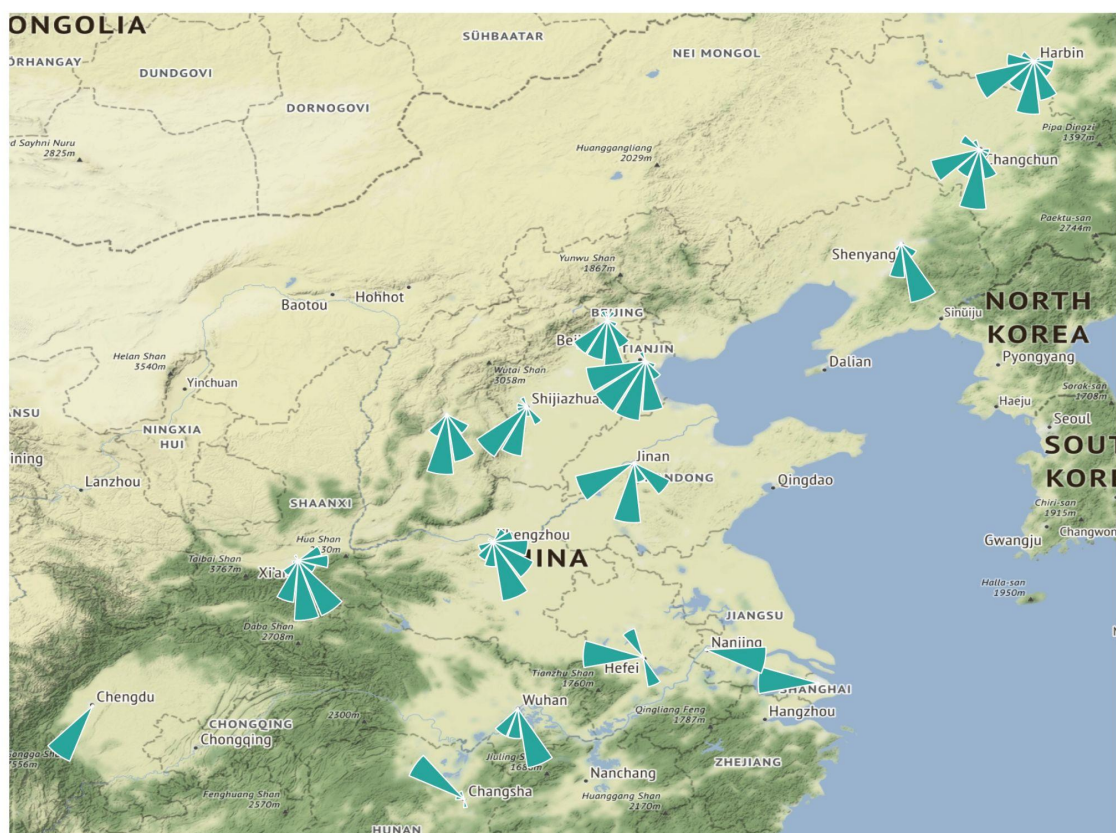


图6. 2020-2021年秋冬季重污染天气发生时到达北京、上海、石家庄、哈尔滨和西安的污染气流的路径。气流途径地区的污染会影响所到达的对应城市重污染天气发生时的空气质量。

1) 到达北京的气流路径



2) 到达上海的气流路径



3) 到达石家庄的气流路径



4) 到达哈尔滨的气流路径



5) 到达西安的气流路径



免责声明：本报告中所使用的名称和地图并不代表对任何国家、领土、城市或地区或其当局的法律地位，以及其边界或边界的划定表达任何意见。

附录

- 沙尘天气

本研究剔除了沙尘天气对PM_{2.5}浓度和重污染天数的影响，沙尘暴并没有被计入“重污染”天数。由于未能获取沙尘暴天数官方数据，我们采用了以下标准：

- PM₁₀ > 400 µg/m³
- PM_{2.5} / PM₁₀ < 0.8

也就是说，我们将沙尘天气定义为PM₁₀水平非常高，但PM_{2.5}水平相对较低的天数，此时污染水平是由相对较粗的颗粒主导的。

Occurrence of sandstorms in key regions

Number of sandstorm days in winter

