



京津冀雾霾治理政策评估报告



中国人民大学首都发展与战略研究院
中国人民大学中国绿色经济研究中心*

2017年1月，北京

*执笔人：石敏俊（中国人民大学经济学院），参与执笔：李娜（中国科学院虚拟经济与数据科学研究中心、中国科学院大数据挖掘与知识管理重点实验室）、李元杰（中国科学院大学经济与管理学院）、相楠（北京工业大学经济与管理学院）。本研究受到国家社会科学基金重大项目“中国经济绿色发展的理论内涵、实现路径与政策创新”（15ZDC006）的资助。

摘要

雾霾污染已成为全社会最为关注的环境问题。京津冀地区是雾霾污染的重灾区，雾霾治理已成为刻不容缓的环境政策课题。“大气国十条”明确提出了 PM_{2.5} 浓度目标，也确定了污染物减排行动计划，但既定的污染物减排行动计划能否实现 PM_{2.5} 浓度目标，存在着不确定性。本报告基于大数据技术和统计分析方法，构建了大气污染物排放量、气象条件和 PM_{2.5} 浓度之间关系的数据模型，对依据“大气国十条”制定的污染物减排行动计划的政策效果和既定的浓度目标的达成可能性进行了科学评估，测算了雾霾治理政策的经济成本，分析了京津冀地区雾霾治理政策目标的合理性，建议基于环境质量目标确定相应的污染物允许排放量，制定相应的污染物减排行动计划。

本报告的主要结论和观点有以下几点：

(1) 大气“国十条”实施以来，2013-2016 年京津冀地区 PM_{2.5} 年均浓度出现了明显的下降，2015 年的降幅尤为显著。但 2015 年 PM_{2.5} 年均浓度的下降，“天帮忙”的因素起到了很大的作用，“人努力”的效果主要体现在风速偏大的天气，对于低风速的静稳天气下 PM_{2.5} 浓度的下降，“人努力”的效果尚不显著。

(2) 如果气象条件没有发生显著变化，对于京津冀的大部分区域来说，即使是在周边区域同时减排的前提下，依据“大气国十条”制定的污染物减排行动计划难以实现“大气国十条”要求的浓度目标（天津和河北的 PM_{2.5} 年均浓度下降 25%，北京的 PM_{2.5} 年均浓度达到 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）；如果周边区域不同时减排的话，几乎所有区域都难以实现“大气国十条”要求的浓度目标。

(3) 如果要想实现“大气国十条”要求的浓度目标，在气象条件没有发生显著变化的条件下，天津和河北需要进一步加大污染物减排力度。也就是说，如果没有“天帮忙”，就需要付出更多的“人努力”。石家庄、保定、唐山、邯郸、邢台、衡水等地不能满足于 PM_{2.5} 年均浓度下降 25% 的目标，这些区域 PM_{2.5} 年均浓度即使下降了 25%，仍然超过 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 甚至 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，应当减少更多的污染物排放量，把 PM_{2.5} 年均浓度降得更低。

(4) 北京市的减排行动计划拟减少污染物排放量 63%，这是一个相当艰巨的

减排任务。即便能够实现，北京市也只能使得 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度下降到 $68.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，离 $60\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的既定浓度目标仍有差距。如果要把 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度从 $66\mu\text{g}/\text{m}^3$ 降到 $60\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，北京市需要把污染物减排率从 63% 提高到 78%，雾霾治理的边际成本将越来越高。北京市可以考虑调整雾霾治理的政策目标。

(5) 随着 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度降低，重污染天气发生频率也将相应降低，但两者不是线性关系。降低 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度仍然可以作为雾霾治理的政策目标，但雾霾治理的政策重点应转向如何减少重污染天气的发生频率，尤其是冬季静稳天气条件下的污染物排放控制。本报告建议把 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度 $70\mu\text{g}/\text{m}^3$ 作为京津冀地区雾霾治理的过渡目标。如果以 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度 $70\mu\text{g}/\text{m}^3$ 作为过渡目标，京津冀地区需要减少约 57% 的大气污染物排放量。 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度达到 $60\mu\text{g}/\text{m}^3$ 可以作为京津冀地区雾霾治理的中远期目标。

(6) 雾霾治理政策的实施必将给京津冀地区经济增长带来一定的损失，GDP 损失程度将随着污染物减排力度加大而增大。大气“国十条”和京津冀大气污染防治强化措施的实施导致的京津冀地区 GDP 总量损失 2017 年为 8.45%，2020 年为 16.05%。如果考虑雾霾污染导致的健康损失，也许雾霾污染治理的真实经济成本并没有那么大。地方政府必须正视雾霾治理给区域经济增长和民生保障带来的短期冲击，多管齐下，尽量减轻雾霾治理给区域经济增长和民生保障带来的负面影响。

(7) 由于污染物减排行动涉及到区域经济发展和民生保障，雾霾治理不可能一蹴而就，治理大气污染将是一个长期过程。能源和产业结构调整是导致 GDP 损失的主要原因，但产业转型是京津冀地区可持续发展的必经之路，必须坚定不移地推进产业转型，降低资源环境负荷，控制污染物排放量。

为了使得雾霾治理的政策目标更加科学、更具可操作性，应该将浓度目标转换为排放量管理目标，在科学确定环境容量的基础上，制定现实可行的污染物减排计划，使得 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度目标的实现具有科学的保障。在推进产业转型，减少污染物排放量的同时，还应积极探索污染物减排措施的科学化和精细化，切实控制和减少冬季静稳天气条件下的污染物排放。

目录

一、引言	1
二、雾霾污染的科学知识	3
三、环境空气质量标准	6
四、京津冀地区大气环境污染特征	10
五、大气环境污染的影响因素：统计分析与数学建模	20
六、大气国十条的政策效果评估	38
七、雾霾治理政策目标：从年均浓度到重污染天气发生频率	43
八、雾霾治理政策的成本分析	48
九、结语	53

一、引言

清洁空气是人类健康和福祉的基本条件，然而，工业化与城市化导致深刻的空气污染，给人们的健康带来了严重的危害。中国已成为全球气溶胶污染最为严重的地区。2013年1月份发生的雾霾污染，覆盖了我国整个华北及华东大部分地区，涉及的区域超过130万平方公里，影响人口8.5亿，其中受到严重污染影响的人口2.5亿人（王跃思等，2013）。京津冀地区是雾霾污染最严重的区域。2013年和2014年年均PM_{2.5}浓度最高的10座城市中，有7个位于河北省，其中邢台和石家庄的PM_{2.5}年均浓度高达155.2ug/m³和148.5ug/m³，是国家标准的4倍多。

雾霾污染治理刻不容缓。2013年9月，国务院发布了《大气污染防治行动计划》（以下简称“大气十条”），明确提出，到2017年，全国地级及以上城市可吸入颗粒物浓度比2012年下降10%以上，优良天数逐年提高；京津冀、长三角、珠三角等区域细颗粒物浓度分别下降25%、20%、15%左右，其中北京市细颗粒物年均浓度控制在60ug/m³左右。依据大气十条的要求，京津冀地区制定了具体的减排行动计划。北京市要求到2017年二氧化硫（SO₂）排放量减少6.37万吨，从当前的9.38万吨减少到3万吨；氮氧化物（NO_x）排放量减少10.29万吨，从当前的22.45万吨减少到12.16万吨。天津市要求2017年二氧化硫排放量减少13.44万吨，从当前的22.45万吨减少到9万吨；氮氧化物排放量减少7.27万吨，从33.42万吨减少到26.15万吨。河北省要求到2017年二氧化硫排放量减少46.15万吨，从当前的134.12万吨减少到87.97万吨；氮氧化物排放量减少42.37万吨，从176.11万吨减少到133.74万吨（中国清洁空气联盟，2014）。这些减排目标被落实到具体的产业部门，制定了详细的减排措施，包括能源结构调整、产业结构调整等措施。

PM_{2.5}浓度是向大气排放的污染物在一定的气象条件下在大气中累积、并经过复杂的大气化学过程形成的结果。PM_{2.5}浓度不仅与二氧化硫、氮氧化物、烟（粉）尘、挥发性有机化合物（VOC）、氨等大气污染物的排放量息息相关，也受到气象条件的影响；不仅受到当地的污染物排放和气象条件的影响，还受到周边区域的污染物排放和天气过程的影响。因此，PM_{2.5}浓度的影响因素较多，不确定性较大。大气十条制定的减排行动计划，是否能够达到大气十条确定的PM_{2.5}浓度目标，也存在较大的不确定性。一个可能并可行的解决办法是，科学认识并量化

大气污染物排放量、气象因素和 PM2.5 浓度之间的关系，基于大气污染物排放量、气象因素和 PM2.5 浓度之间关系的科学认识，来判断 PM2.5 浓度目标以及实现浓度目标所需的减排措施，从而以大气污染物排放量为抓手，推进雾霾污染防治防控。

尽管雾霾污染治理已成为全社会的普遍共识，但雾霾污染治理措施会对区域经济发展和民生改善产生直接的影响，我们仍然不得不权衡雾霾污染治理目标和民生目标、经济发展目标之间的关系，合理确定现实可行的雾霾污染治理目标。本报告的目的是对依据大气国十条制定的京津冀地区雾霾治理政策进行科学评估，在对大气污染物排放量、气象因素和 PM2.5 浓度之间的关系进行数据建模的基础上，预测当前的污染物减排行动计划可能达到的 PM2.5 浓度，以及实现大气国十条确定的 PM2.5 浓度目标所需的污染物减排力度，进而分析京津冀地区应当如何制定现实可行的 PM2.5 浓度目标和污染物减排行动计划。

本报告共分为 10 节：第一节为引言；第二节介绍关于雾霾污染的科学知识；第三节介绍环境空气质量标准；第四节为京津冀地区雾霾污染的统计分析；第五节为京津冀地区 PM2.5 浓度与大气污染物排放量之间的数据建模；第六节是对大气国十条的政策效果进行科学评估；第七节分析现实可行的雾霾污染治理政策目标；第八节分析雾霾治理政策的经济成本；第九节为结语。



图 1 京津冀地区行政区划图

二、雾霾污染的科学知识

1、雾霾污染的概念

雾霾是指各种源排放的污染物在特定的大气流场条件下，经过一系列物理化学过程，形成的细颗粒物，并与水汽相互作用导致的大气消光现象，主要是空气中的PM2.5（直径小于2.5微米的细颗粒物）超标。雾霾的本质是大气中PM2.5浓度超标，PM2.5超标使得消光作用增强，空气能见度降低。PM2.5是直径小于2.5微米的细颗粒物。PM2.5的成分很复杂，主要取决于其来源。PM2.5的排放源主要有自然源和人为源两种，后者的危害较大。在学术界，分为一次气溶胶（Primary aerosol）和二次气溶胶（Secondary aerosol）两种。

2013年发生的大范围雾霾污染事件，使得空气中PM2.5浓度成为我国城市居民最为关心的环境质量指标。国家环保部于2012年2月29日发布了新的《环境空气质量标准》（GB3095-2012），增设了环境空气中PM2.5的浓度限值。按照《环境空气质量标准》，PM2.5年均浓度小于35微克/立方米时，才算达到二级标准。这是中国首次制定PM2.5的国家环境空气质量标准，并在主要区域建立了PM2.5监测网络，实时发布空气质量监测数据。

PM2.5（直径小于2.5微米的细颗粒物）主要来源于能源燃烧过程，包括燃烧木材垃圾烟草等生物物质和煤炭柴油汽油等化石燃料。直径在2.5到10微米之间的颗粒物则主要产生于机械过程，例如建筑施工、道路扬尘和风。尽管小于10微米的颗粒物就可以穿透呼吸道的纤毛，到达肺部的支气管和肺泡，但是小于等于2.5微米的细颗粒物具有更强的穿透力，更不容易被呼吸道的粘膜所吸附经由咳嗽排出体外。PM2.5会对呼吸系统和心血管系统带来更大的危害，包括动脉斑块沉积，引发血管炎症和动脉粥样硬化等。

我国重点地区PM2.5年均浓度超过70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，超过国家二级标准的2倍以上，高于世界卫生组织指导值的7倍以上。京津冀地区更是全国雾霾污染问题最突出的区域。2013年和2014年PM2.5年均浓度最高的10座城市中，有7个位于河北省。河北省邢台市连续两年为PM2.5年均浓度最高的城市。2013年，河北省邢台和石家庄的PM2.5年均浓度排在全国前两位，分别高达155.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和148.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，

是国家标准的 4 倍以上。2014 年，我国超过九成的城市，PM2.5 年均浓度未达到国家二级标准。

2、雾霾污染产生的原因：污染物排放来源

PM2.5 的成分很复杂，分为一次气溶胶（Primary aerosol）和二次气溶胶（Secondary aerosol）两种。PM2.5 的组成由大气污染物质前体排放物及其经过化学反应后的二次粒子组成，因此，PM2.5 与大气污染物质（二氧化硫、氮氧化物、烟（粉）尘、挥发性有机物（VOC）和氨）等一次性污染物排放粒子具有重要关系。其中，大气污染物质又以二氧化硫、氮氧化物和烟（粉）尘为主。

根据 Tucker（2000）对美国 PM2.5 来源和相关政策法规的综述，美国自 1987 年将 PM10 列入环境空气质量标准之后，用了将近 10 年的时间基本解决雾霾污染问题。美国南海岸针对 PM2.5 治理法案确定了 PM2.5 的排放总量等于前体污染物质和二次粒子的总和，其中前体污染物质就包括二氧化硫、氮氧化物、直接 PM2.5，二次粒子包括基于前体污染物质所生成的各种物质（Air Division U.S., 2010; Almeida, 2006; Vallius, 2005）。PM2.5 是复合型污染，在美国制定的 PM2.5 控制目标的技术报告中，将 PM2.5 控制指标主要限定为二氧化硫、氮氧化物、烟（粉）尘、挥发性有机物（VOC）和氨的控制。国内对于 PM2.5 化学成分的源分析也都认可雾霾污染的主体 PM2.5 与大气污染物二氧化硫、氮氧化物、烟（粉）尘有着紧密联系（张小曳等，2012；王跃思等，2013；Wang 等，2015；Zhao 等，2012）。

基于前述关于 PM2.5 构成的国内外研究，PM2.5 构成可总结为图 2 所示。

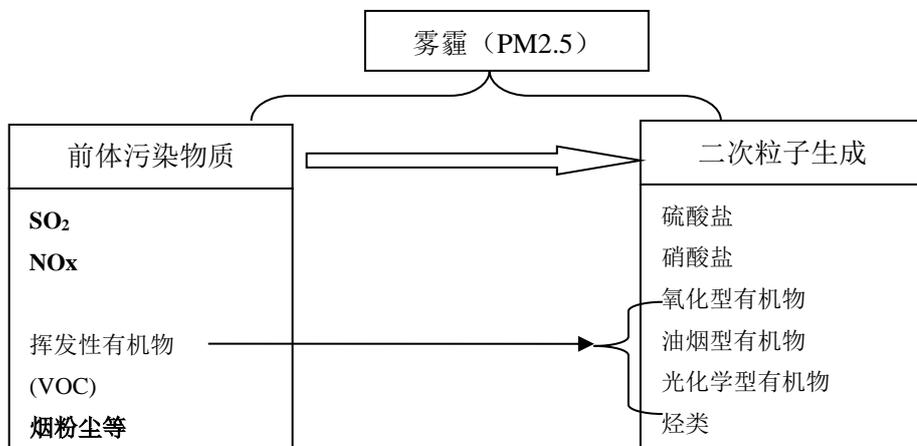


图 2 PM2.5 的组成分解

PM2.5 浓度严重超标是多种污染物集中排放，并长期积累到一定阶段的必然产物。就京津冀地区而言，燃煤发电是最大的 PM2.5 颗粒物排放单一工业源，燃煤电厂占一次 PM2.5 颗粒物排放的 9%，占二氧化硫排放的 69%，氮氧化物排量的 47%。包括钢铁、水泥和制砖在内的工业生产是京津冀地区另一大污染物排放源，合计占区一次 PM2.5 颗粒物排放的 49%，分别占二氧化硫和氮氧化物排量的 12% 和 17%。就北京而言，交通运输业对 PM2.5 污染的影响比天津和河北更加明显，交通运输业占北京地区氮氧化物排放的 45%，是最大的氮氧化物排放源，也是发电行业以外北京市最大的单一污染源行业（关大博等，2013）。

我国的大气污染已经从上世纪的煤烟型污染演变为区域性、复合型污染，区域联动特征显著。北京市的 PM2.5 源解析结果表明，机动车和燃煤因素分别占 25% 和 19%，而外来的区域传输占 19%。北京地区当地的 PM2.5 主要排放源已经从工业生产转为交通和扬尘等生活行为，以及外来的大气污染物质传输，天津和河北的大气污染物排放也会对北京的空气质量产生影响。京津冀地区的雾霾治理必须加强区域联防联控，把京津冀作为整体进行大气污染防治，才是有效的治理途径。

三、环境空气质量标准

中国的空气质量标准和国际标准有明显的差别，这与发展阶段有一定的关联。

1、WHO 的 PM2.5 标准

联合国世界卫生组织（WHO）欧洲区域办事处于 1987 年和 1997 年先后制定与修订了《欧洲空气质量准则》。2005 年 10 月，WHO 根据关于空气污染对健康影响的大量科学文献，包括在一些空气污染极其严重的发展中国家进行的重要研究所积累的科学证据，对《欧洲空气质量准则》中部分空气污染物的准则值作了修订，制定了《空气质量准则》，使之适用于 WHO 覆盖的各个区域，为世界各地制定适合当地的目标和政策提供信息和选择。

WHO2005 年发布的《空气质量准则》（以下简称“准则”）列举了四种常见空气污染物——即颗粒物(PM)、臭氧(O₃)、二氧化氮(NO₂)和二氧化硫(SO₂)——影响健康的最新证据，依据它们对健康影响的相对重要性，提出相应的限度准则。WHO 还给出上述污染物指导值和过渡期目标值，明确各国的空气质量标准是依据各自权衡健康风险的方法、技术可行性、经济方面的考虑以及其他各种政治和社会因素等来制定的。

表 1 2005 年 WHO 发布的空气质量指导值和过渡期目标(单位:μg/m³)

	PM10		PM2.5		臭氧	二氧化硫	二氧化氮		
	年平均	24h 平均	年平均	24h 平均	日最高 8h 平均	24h 平均	10 分钟平均	年平均	1h 平均
过渡期目标-1	70	150	35	70	160	125			
过渡期目标-2	50	100	25	50	-	50			
过渡期目标-3	30	75	15	37.5					
指导值 (AQG)	20	50	10	25	100	20	500	40	200

数据来源：中国环境科学研究院环境标准研究所

由于颗粒物对人体的危害最为直接和严重，所以准则讨论的第一项污染物就是空气中漂浮的颗粒物(PM)。直径小于 10 微米的颗粒物会被人吸入，所有人群的健康都会受到颗粒物的影响。最主要的影响见于呼吸系统和心血管系统，可能导致的病症包括：哮喘、肺癌等肺部疾病；血栓、动脉硬化、心肌梗死和中风等心脏疾病；以及新生儿出生缺陷与过早死亡等。不论是发达国家还是发展中国家，空气颗

颗粒物及其对公众健康影响的证据都是一致的，即目前城市人群所暴露的颗粒物浓度水平，会对健康产生有害效应。

尽管小于 10 微米的颗粒物就可以穿透呼吸道的纤毛，到达肺部的支气管和肺泡，但是小于等于 2.5 微米的细颗粒物具有更强的穿透力，更不容易被呼吸道的粘膜所吸附经由咳嗽排出体外。而且同样重量的细颗粒物表面总面积远远大于较大的颗粒物，例如比重相同的球状颗粒，同等重量的直径 2.5 微米颗粒总表面积是直径 10 微米的颗粒表面积的 4 倍，因此可以吸附更多的有毒气体，对呼吸系统和心血管系统带来更大的危害，包括动脉斑块沉积，引发血管炎症和动脉粥样硬化等。此外 PM_{2.5} 极易吸附多环芳烃等有机污染物和重金属，使得致癌和基因突变的几率明显升高。而小于 0.1 微米（100 纳米）的颗粒，例如柴油发动机的废气中含有的微粒，更可以直接穿透细胞膜，进入人体对其他器官造成伤害。

基于颗粒物对于健康的威胁，WHO 依据健康风险制定了各个阶段的颗粒物准则值，列出了制定准则的依据。

表 2 WHO 对于颗粒物的空气质量准则值和过渡时期目标：年平均浓度

	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	选择浓度的依据
过渡时期目标-1 (IT-1)	70	35	相对于 AQG 水平而言，在这些水平的长期暴露会增加大约 15% 的死亡风险
过渡时期目标-2 (IT-2)	50	25	除了其它健康利益外，与过渡时期目标-1 相比，在这个水平的暴露会降低大约 6% [2%~11%] 的死亡风险
过渡时期目标-3 (IT-3)	30	15	除了其它健康利益外，与过渡时期目标-2 相比，在这个水平的暴露会降低大约 6% [2%~11%] 的死亡风险
空气质量准则值 (AQG)	20	10	对于 PM _{2.5} 的长期暴露，这是一个最低水平，在这个水平，总死亡率、心肺疾病死亡率和肺癌的死亡率会增加（95% 以上可信度）

表 3 WHO 对于颗粒物的空气质量准则和过渡时期目标：24 小时浓度

	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	选择浓度的基础
过渡时期目标-1 (IT-1)	150	75	以已发表的多中心研究和 Meta 分析中得出的危险度系数为基础（超过 AQG 值的短期暴露会增加 5% 的死亡率）
过渡时期目标-2 (IT-2)	100	50	以已发表的多中心研究和 Meta 分析中得出的危险度系数为基础（超过 AQG 值的短期暴露会增加 2.5% 的死亡率）
过渡时期目标-3 (IT-3) *	75	37.5	以已发表的多中心研究和 Meta 分析中得出的危险度系数为基础（超过 AQG 值的短期暴露会增加 1.2% 的死亡率）
空气质量准则值 (AQG)	50	25	建立在 24 小时和年均暴露的基础上

a:应优先选择 PM_{2.5} 指导值(AQG); b:第 99 百分位数(3 天/年)。

数据来源：中国环境科学研究院环境标准研究所

2、中国的 PM2.5 标准

随着中国经济高速发展，大气环境污染特征已由煤烟型向复合型转变，区域性大气细颗粒物和臭氧污染不断加重，一些城市经常出现长时间雾霾天气，空气污染对公众健康产生了严重威胁。

2012 年 2 月，国务院发布新的《环境空气质量标准》（GB 3095—2012），新修订的标准调整了污染物项目及限值，增设了 PM2.5 平均浓度限值和臭氧 8 小时平均浓度限值，收紧了 PM10、二氧化氮等污染物的浓度限值，增加了 PM2.5 值监测要求。

表 4 环境污染物各项目浓度限值

序号	污染物项目	平均时间	浓度限值		单位
			一级	二级	
基本项目	1 二氧化硫 (SO ₂)	年平均	20	60	μg/m ³
		24 小时平均	50	150	
		1 小时平均	150	500	
	2 二氧化氮 (NO ₂)	年平均	40	40	
		24 小时平均	82	80	
		1 小时平均	200	200	
	3 一氧化碳 (CO)	24 小时平均	4	4	mg/m ³
		1 小时平均	10	10	
	4 臭氧 (O ₃)	日最大 8 小时平均	100	160	μg/m ³
		1 小时平均	160	200	
	5 颗粒物 (粒径小于 10μm)	年平均	40	70	
		24 小时平均	50	150	
6 颗粒物 (粒径小于 2.5μm)	年平均	15	35		
	24 小时平均	35	75		
其他项目	1 总悬浮颗粒物 (TSP)	年平均	80	200	μg/m ³
		24 小时平均	120	300	
	2 氮氧化物(NO _x)	年平均	50	50	
		24 小时平均	100	100	
		1 小时平均	250	250	
	3 铅(Pb)	年平均	0.5	0.5	
		季平均	1	1	
	4 苯并(a)芘(BaP)	年平均	0.001	0.001	
		24 小时平均	0.0025	0.0025	

数据来源：《环境空气质量标准》（GB 3095—2012）

环境空气质量标准规定了环境空气质量功能区划分、标准分级、污染物项目、取值时间及浓度限值，采样与分析方法及数据统计的有效性规定。

我国的环境空气质量标准与 WHO 制定的准则仍有较大差距。以 PM2.5 的年均浓度和日均浓度为例，我国环境空气质量标准的二级限值为 35μg/m³ 和 75μg/m³，

而 WHO 的过渡期三级标准为 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $37.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。由于我国各区域的年均浓度均在 $70\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之上，尤其是京津冀地区，雾霾污染十分严重。2013 年和 2014 年，京津冀地区 PM2.5 年均浓度达到 $104\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $93\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，超过我国环境空气质量二级标准的 2 倍以上，更是远超过 WHO 的宽松标准。

四、京津冀地区大气环境污染特征

1、PM2.5 浓度的空间分布

京津冀地区大部分区域 PM2.5 年均浓度远超过国家二级标准，对人体健康和生活构成了威胁。但由于污染物排放量和气象条件的地域差异，京津冀地区内部各区域的雾霾污染程度有较大差别。具体来说，具有以下特征：

- 张家口地区：气象条件利于扩散，全年风力大于三级的天数接近 70%，尽管大气污染物排放量较高，但空气质量较优。2013 年 PM2.5 年均浓度为 43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，是京津冀地区空气质量最好的区域，但仍高于国家二级标准。
- 承德和秦皇岛地区：污染物排放量较少，且气象条件易于扩散，PM2.5 年均浓度较低，约为 50-60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。
- 石家庄、邢台、邯郸、衡水、保定、唐山：这些区域污染物排放量高，气象条件不易于扩散的地区，PM2.5 年均浓度均超过 110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，属于严重污染区域。
- 北京、天津、廊坊、沧州：日均浓度在 90-100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右。

表 5 2013-2014 年京津冀地区 PM2.5 年均浓度单位： $\mu\text{g}/\text{m}^3$

区域	2013 年	2014 年
北京	85.0	83.2
天津	95.6	85.8
保定	127.9	127.2
廊坊	113.8	99.3
张家口	43.1	34.3
唐山	114.2	98.4
承德	51.5	53.5
石家庄	148.5	122.6
秦皇岛	65.2	59
沧州	93.6	88
衡水	120.6	107.6
邢台	155.2	131.4
邯郸	127.8	114.2

数据来源：绿色和平组织

从日均浓度看，2013 年京津冀地区 PM2.5 日均浓度与二氧化硫、二氧化氮（NO₂）和 PM10 三种污染物的日均浓度之间具有显著的相关性（表 6）。PM2.5 浓度偏高的区域，往往是其它大气污染物浓度也较高的区域。例如，保定、石家庄、唐山、衡水、邢台、邯郸等地。进一步看，各区域的污染物排放结构有所差别。北

北京市的二氧化氮浓度高于二氧化硫浓度，而保定、唐山等地的二氧化硫浓度普遍高于二氧化氮浓度。

表 6 2013 年京津冀地区 PM2.5 浓度及大气污染物浓度的空间差异

区域	年均浓度 (ug/m ³)				PM2.5/PM10
	PM2.5	SO ₂	NO ₂	PM10	
北京	85.07	22.36	45.97	110.49	76.99%
天津	92.34	48.86	47.26	154.03	59.95%
保定	120.19	55.55	50.33	212.43	56.58%
廊坊	101.7	37.37	43.72	171.45	59.32%
张家口	40.3	41.02	27.17	94.79	42.52%
唐山	110.42	92.65	63.1	181.41	60.87%
承德	50.93	31.22	31.78	99.84	51.01%
石家庄	142.43	93.73	60.91	287.63	49.52%
秦皇岛	63.8	53.87	45.5	125.47	50.85%
沧州	92.12	49.29	31.22	127.63	72.18%
衡水	112.68	56.55	40.88	203.13	55.47%
邢台	140.13	67.48	47.2	209.39	66.92%
邯郸	126.59	84.85	55.49	226.13	55.98%
合计	96.94	54.66	44.83	164.64	58.88%

注：数据为绿色和平组织提供，时间尺度为 2013 年 1 月 18 日至 2013 年 12 月 31 日。

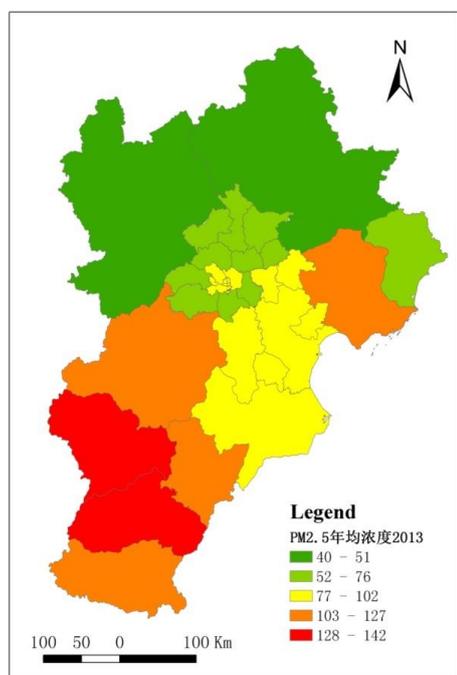


图 3 2013 年京津冀 PM2.5 年均浓度分布

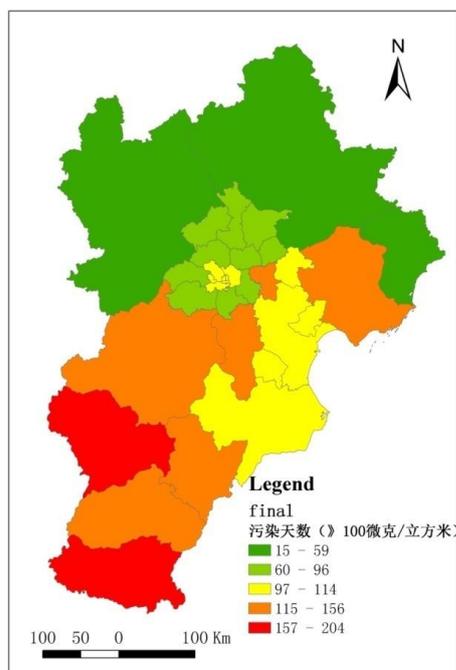


图 4 京津冀地区污染天数分布

图 3 和图 4 显示，京津冀地区的雾霾污染程度自南向北逐渐趋于减轻。河北省南部和唐山为雾霾污染的重点区域，这些区域 PM_{2.5} 浓度严重超标，污染天数（日均浓度高于 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）超过 100 天以上。雾霾污染程度严重的区域，大气污染物浓度也普遍较高。这说明，大气污染物排放量过大是雾霾污染的主要原因。河北北部的张家口、承德、秦皇岛地区空气质量相对较好。

表 7 2013 年京津冀地区 PM_{2.5} 日均浓度区间及频数分布

区域	2013 年 PM _{2.5} 浓度区间的出现频率($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				
	<35	35-75	75-150	150-200	>200
北京	69	116	101	23	26
	21%	35%	30%	7%	8%
天津	34	111	144	30	16
	10%	33%	43%	9%	5%
保定	21	92	132	39	51
	6%	27%	39%	12%	15%
廊坊	52	96	135	27	36
	16%	25%	40%	8%	11%
张家口	179	125	26	4	1
	53%	37%	8%	1%	1%
唐山	25	91	151	34	34
	7%	27%	45%	10%	10%
承德	144	126	58	7	-
	43%	38%	17%	2%	-
石家庄	25	72	123	48	67
	7%	21%	37%	14%	20%
秦皇岛	108	127	84	10	6
	32%	38%	25%	3%	2%
沧州	38	121	135	24	17
	11%	36%	40%	7%	5%
衡水	17	98	154	33	33
	5%	29%	46%	10%	10%
邢台	83	54	116	39	43
	25%	16%	35%	12%	13%
邯郸	16	81	150	35	53
	5%	24%	45%	10%	16%

从各区域 PM_{2.5} 日均浓度区间及频数分布可以看出，京津冀地区 PM_{2.5} 日均浓度区间为 35-150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的出现频率最高，大多数区域超过 50%。中度和重度污染天气出现频率较高的是石家庄、唐山、邢台、邯郸、衡水等地，这些区域大气污染

物排放量较高，且风力条件难以实现有效的污染物扩散。可见污染物超标排放是雾霾污染的根本原因，治理雾霾污染，减少污染物排放量是根本。

从 2013 年京津冀地区 PM2.5 日均浓度变化来看，各个区域 PM2.5 日均浓度的变化趋势具有显著的趋同性。这表明，尽管京津冀地区各区域之间雾霾污染程度存在差异，但雾霾污染存在高度的区域联动性，雾霾污染治理需要各个区域协调行动，联防联控。

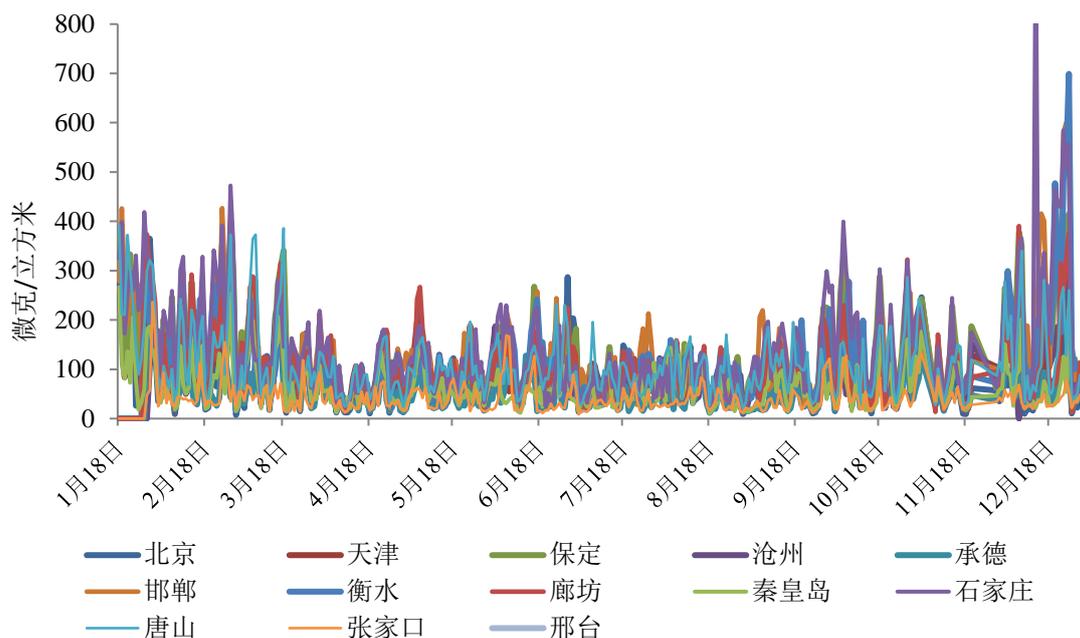


图 5 PM2.5 浓度与大气污染物质浓度数据趋势相同

2、PM2.5 浓度的季节变化

从 PM2.5 浓度的季节分布看，京津冀地区 PM2.5 浓度达到国家一级标准的天数频率为 19.32%，平均浓度为 20.64 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；达到二级标准的天数频率为 29.89%，平均浓度为 54.38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；空气质量不达标天数占 50.79%，大部分日子处于轻度和中度污染。

表 8 2013 年京津冀地区 PM2.5 日均浓度频率分布

PM2.5 浓度区间	PM2.5 平均浓度	频率	累积频率
达一级标准 (<35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	20.64	19.32%	19.32%
达二级标准 (35-75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	54.38	29.89%	49.21%
轻度污染 (75-150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	105.86	34.18%	83.39%
中度污染 (150-200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	172.48	8.08%	91.47%
重度污染 (>200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	280.63	8.53%	100.00%

京津冀地处北方，受到供暖季燃料消费的影响明显，加上冬季污染物扩散条件不利的影 响，供暖季和非供暖季的 PM2.5 日均浓度存在显著差异。2013 年京津冀地区供暖季的 PM2.5 浓度普遍超过国家标准，也明显高于非供暖季水平。PM2.5 年均浓度、以及供暖季和非供暖季的差异表明，雾霾污染严重的区域多为污染物排放量大、扩散条件差的区域，如石家庄、邢台、保定和邯郸，供暖季 PM2.5 浓度超标问题尤为显著。污染物扩散条件相对较好的张家口、承德、唐山、沧州等地，雾霾污染相对较轻。

表 9 京津冀地区供暖季和非供暖季 PM2.5 浓度差异

PM2.5 日均浓度	年均 PM2.5 浓度		
	供暖季	非供暖季	
北京	100.64	79.39	85.0
天津	110.47	80.75	92.34
保定	177.96	94.28	120.19
廊坊	139.47	87.72	101.7
张家口	60.03	34.48	40.3
唐山	138.13	94.72	110.42
承德	70.69	45.98	50.93
石家庄	211.63	108.08	142.43
秦皇岛	80.46	55.78	63.8
沧州	123.02	78.39	92.12
衡水	162.66	89.52	112.68
邢台	198.21	115.27	140.13
邯郸	184.9	95.3	126.59
平均值	135.25	81.51	98.36

从 2013 年京津冀地区 PM2.5 日均浓度的变化也可以看出，供暖季出现雾霾天气的概率明显大于非供暖季（图 6）。严重雾霾天气一般都出现在供暖季。PM2.5 日均浓度的最高值，大多数区域超过 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，部分区域甚至达到 800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

从 PM2.5 日均浓度的变化趋势看，首先，PM2.5 日均浓度与大气污染物浓度显著相关，PM2.5 超标一般出现在大气污染物浓度高的时候，这再次表明大气污染物排放量过大是造成雾霾污染的根本原因。第二，PM2.5 日均浓度与大气污染物浓度的关系存在明显的区域联动性，各个区域均在同一时间段出现雾霾天气。进一步分析可以发现，PM2.5 日均浓度与风速呈现显著的相关性，雾霾污染往往出现在连续的低风速天气和静风天气，由于风速低，使得大气污染物质不断累积，PM2.5 浓度增高。随着风力加大，污染物扩散能力增强，污染物浓度趋于降低（图 6）。

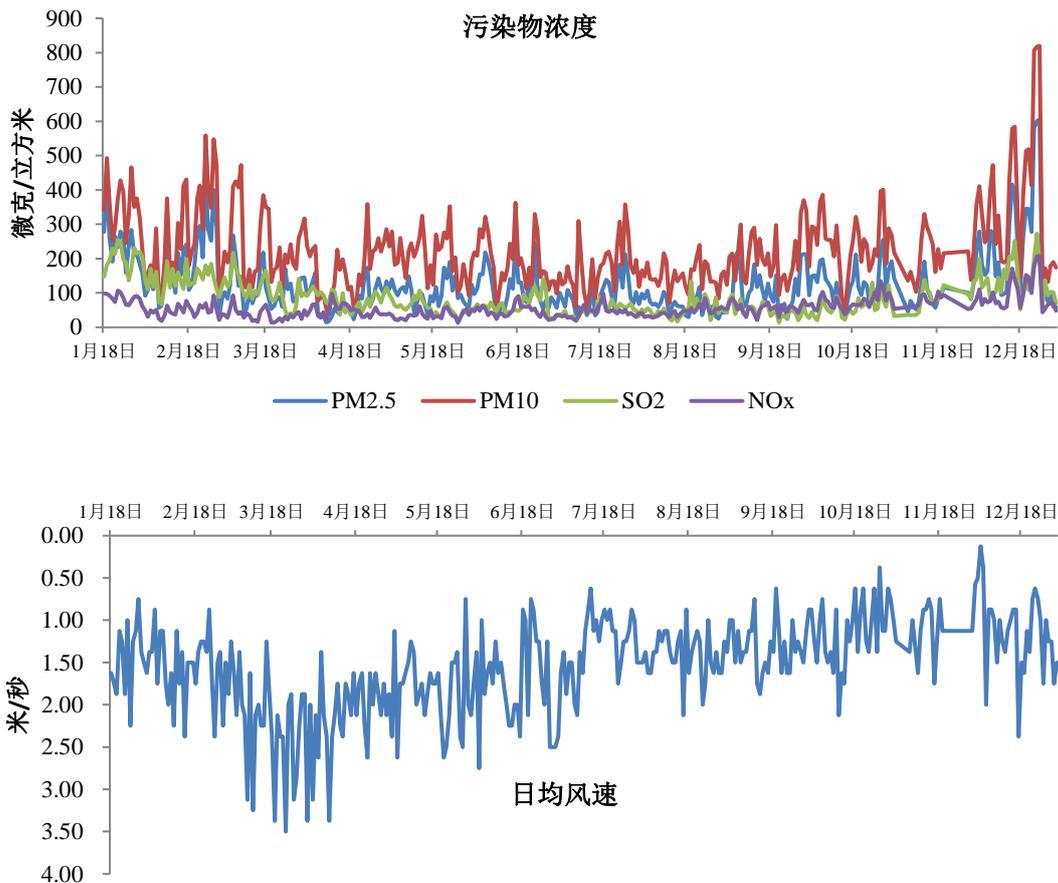


图6 2013年北京市三大污染物浓度与风速的相关性（北京）

3、风力是驱散雾霾污染的主要力量

当前京津冀地区污染物排放量较大，各个区域 PM2.5 浓度的变化主要依赖于气象条件的作用。一般来说，大风和降雨可能有效地降低 PM2.5 浓度，京津冀地区由于降雨较少，污染物扩散能力主要依靠风力因素。

表 10 不同风速条件下的 PM2.5 浓度分布情况

2013年日均风速	PM2.5 平均浓度(ug/m ³)	频率	PM2.5/PM10
<1m/s	145.17	8.49%	63.43%
1m/s-1.5m/s	121.22	21.58%	59.48%
1.5m/s-2m/s	98.41	23.98%	57.01%
2m/s-2.5m/s	85.11	18.00%	54.12%
2.5m/s-3.5m/s	81.21	18.55%	52.29%
>3.5m/s	59.41	9.40%	43.90%

考虑到风力作用具有滞后性，我们对滞后一期的日均风速与 PM2.5 日均浓度进行了统计分析（表 10）。结果显示，风力对 PM2.5 浓度降低具有显著的作用。

当日均风速为 1.5m/s 以下时，PM_{2.5} 浓度高于 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，但日均风速大于 2.5m/s 时，PM_{2.5} 浓度可降至 81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右，如果日均风速达到 3.5m/s 时，PM_{2.5} 浓度能够降到 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

区分城市来看，在污染物排放量较小的地区，日均风速达到 2m/s 时即可有效扩散空气中污染物质；对于污染物排放量大的地区（例如，唐山、邯郸、邢台、衡水、沧州、石家庄），只有当日均风速大于 2m/s 时，才能对空气质量改善产生显著作用（表 11）。

表 11 2013 年各区域不同日均风速情况下的 PM_{2.5} 平均浓度

区域	PM _{2.5} 浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)					
	<1m/s	1m/s-1.5m/s	1.5m/s-2m/s	2m/s-2.5m/s	2.5m/s-3.5m/s	>3.5m/s
北京	143.78	114.96	91.6	71.28	63.12	48.21
天津	150.24	141.5	117.02	93.19	88.99	68.9
保定	194.09	156.81	122.57	103.38	110.27	93.72
廊坊	175.71	142.27	102.5	88.12	86.51	69.15
张家口	80.13	61.08	49.55	35.94	40.45	37.94
唐山	122.42	148.7	104.01	96.4	105.14	106.87
承德	55.51	53.35	47.37	54.66	51.94	63.95
石家庄	230.11	211.88	139.77	122.48	109.25	57.35
秦皇岛	83.61	67.33	66.87	63.86	59.74	50.39
沧州	135.31	95.29	91.61	88.71	70.46	89.18
衡水	187.31	121.99	111.6	100.67	80.92	91.81
邢台	193.62	138.38	107.25	113.08	121.55	
邯郸	164.74	129.15	107.41	111.43	99.62	

风力等级与 PM_{2.5} 平均浓度的关系表明，风力是当前影响京津冀地区雾霾污染程度的主要影响因素。由于污染物排放量过大，只能依赖风力驱散污染物质。对于污染物排放量过高的区域，一般的风力也难以带来 PM_{2.5} 浓度的降低，例如唐山、石家庄、沧州和邯郸。靠风吹不是治理雾霾污染的根本途径。雾霾污染治理的出路在于减少大气污染物排放量，从源头上减少 PM_{2.5} 的来源。

由于各个区域的风力等级频率分布存在差异，不同区域的污染物扩散条件是有差异的。在考虑大气环境容量和产业布局时，必须充分认识污染物扩散条件的区域差异。

表 12 2013 年京津冀地区风力等级频率分布

区域	1m/s-		2m/s-		2.5m/s-	
	<1m/s	1.5m/s	1.5m/s-2m/s	2.5m/s	3.5m/s	>3.5m/s
北京	3.29%	22.74%	26.03%	22.47%	19.45%	6.03%
天津	0.82%	6.85%	17.81%	16.16%	31.23%	27.12%
保定	6.85%	12.33%	26.85%	15.34%	24.93%	13.70%
廊坊	4.93%	22.19%	25.75%	22.47%	18.63%	6.03%
张家口	1.92%	6.58%	10.96%	19.45%	29.86%	31.23%
唐山	4.11%	16.99%	22.47%	19.18%	23.56%	13.70%
承德	17.26%	29.86%	26.03%	13.42%	9.04%	4.38%
石家庄	4.38%	19.45%	31.78%	19.73%	19.73%	4.93%
秦皇岛	6.58%	15.89%	25.75%	15.89%	26.85%	9.04%
沧州	9.86%	27.12%	23.29%	21.92%	14.79%	3.01%
衡水	8.77%	27.12%	24.11%	21.64%	15.34%	3.01%
邢台	20.82%	36.71%	25.48%	13.15%	3.84%	0.00%
邯郸	20.82%	36.71%	25.48%	13.15%	3.84%	0.00%
平均	8.49%	21.58%	23.98%	18.00%	18.55%	9.40%

4、2013年-2016年PM2.5浓度变化

2013年-2016年，京津冀各地的PM2.5年均浓度趋于下降，尤其是2015年的下降幅度尤为明显（表13）。可见大气十条的实施取得了显著的成效。但是我们也要清醒地看到，PM2.5年均浓度下降的背后，既有全社会做出的减排努力的贡献，也有自然因素带来的污染物扩散条件变化的贡献。

表13 2013-2016年京津冀地区PM2.5年均浓度的变化

	2013年	2014年	2015年	2016年
北京	85.48	84.54	73.44	72.63
天津	92.34	86.52	64.59	68.57
保定	120.19	126.59	96.33	92.06
廊坊	104.51	98.24	77.04	65.48
张家口	41.54	34.82	33.32	31.54
唐山	110.42	100.23	79.34	73.83
承德	52.50	53.50	38.89	39.52
石家庄	142.43	122.98	81.08	98.51
秦皇岛	63.80	59.30	44.69	45.97
沧州	92.12	87.71	63.55	68.11
衡水	112.68	106.67	88.77	87.02
邢台	107.50	130.46	91.95	86.46
邯郸	126.59	112.84	83.14	80.78
平均值	96.32	92.64	70.47	70.04

相同风速下 PM_{2.5} 平均浓度的变化可以准确地反映“人努力”的效果，日均风速发生频率的变化则可以反映“天帮忙”的作用。从京津冀整体来看，在低风速区间（1m/s 和 1-1.5m/s），2013-2015 年间 PM_{2.5} 平均浓度并未出现明显的下降，2015 年与 2014 年相比，在中风速区间（1.5-2m/s 和 2-2.5m/s）以及高风速区间（>3.5m/s），PM_{2.5} 平均浓度有明显的下降。与此相对照的是，2015 年与 2014 年相比，高风速区间（2.5-3m/s 和 >3.5m/s）的发生频率有明显的增加，低风速区间（1m/s 和 1-1.5m/s）的发生频率则明显下降，中风速区间有升有降，1.5-2m/s 区间的发生频率有所下降，2-2.5m/s 区间的发生频率有所上升。总体来看，2015 年风速偏大的天数比 2014 年有明显的增加。因此，2015 年 PM_{2.5} 年均浓度的下降，“天帮忙”起到了很大的作用，“人努力”的效果主要体现在风速偏大的天气，对于低风速的静稳天气下 PM_{2.5} 浓度的下降，目前“人努力”的效果尚不显著。

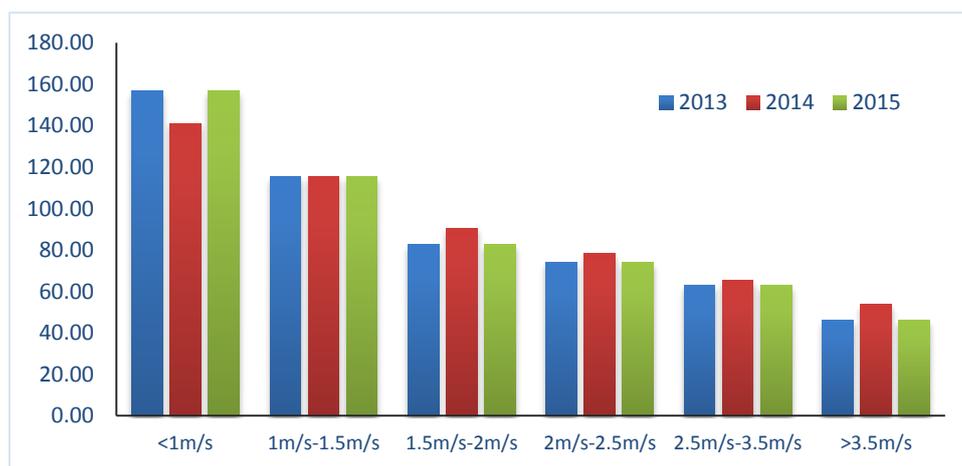


图 7 2013-2015 年京津冀地区相同风速下 PM_{2.5} 平均浓度的变化

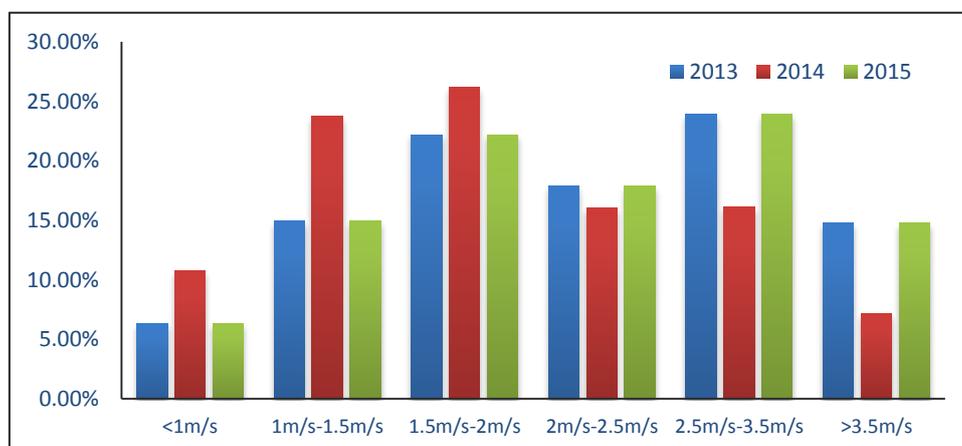


图 8 2013-2015 年京津冀地区日均风速发生频率的变化

如果分区域看，2015 年与 2013-2014 年相比，北京市低风速区间（1m/s 和 1-1.5m/s）的 PM2.5 平均浓度不降反升（图 9），PM2.5 平均浓度的下降主要出现在中等风速区间（1.5-2m/s 和 2-2.5m/s）；石家庄市各个风速区间的 PM2.5 平均浓度均出现明显下降（图 10），各个风速区间的 PM2.5 平均浓度已降至北京的同等水平。数据显示，石家庄市的减排努力取得了明显成效，但由于原先的污染物排放量过大，PM2.5 浓度过高，即使 PM2.5 浓度降幅显著，但仍处于较高的水平，雾霾污染治理尚未成功，污染物减排仍需继续努力。

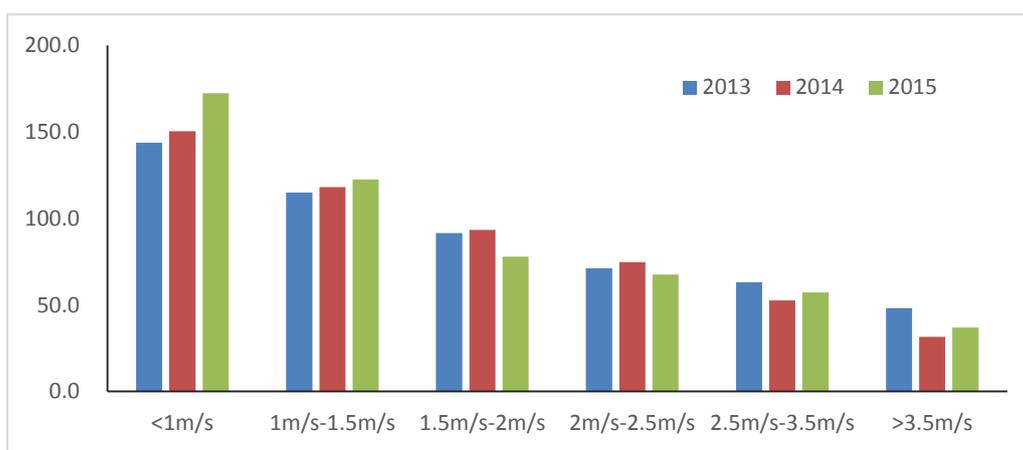


图 9 2013-2015 年北京市相同风速下 PM2.5 平均浓度变化

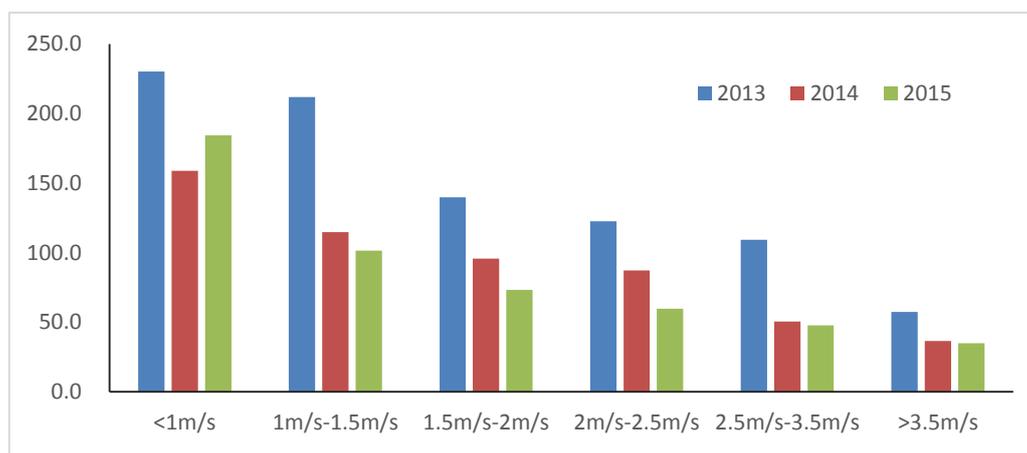


图 10 2013-2015 年石家庄市相同风速下 PM2.5 平均浓度变化

五、大气环境污染的影响因素：统计分析 with 数学建模

1、大气环境污染的影响因素

前述京津冀地区雾霾污染和污染物排放量的描述性统计分析表明，京津冀地区的雾霾污染具有以下几个特征：

(1) PM_{2.5} 浓度主要受大气污染物排放量的影响，京津冀地区大气污染物浓度与 PM_{2.5} 浓度呈现出时间和空间上的高度趋同性，污染物排放量（排放密度）高的区域往往是雾霾污染的严重区域。因此，大气污染物排放量过大是雾霾污染的根本原因。

(2) PM_{2.5} 浓度受到风力等污染物扩散条件的影响十分显著。由于污染物排放量过大，不得不依赖风力等污染物扩散能力。前述分析表明，大部分区域只有在日均风速大于 2m/s 甚至 3.5m/s 的情况下，PM_{2.5} 浓度才有显著降低。在当前大气污染物排放过大的情况下，风力是减轻雾霾污染的主要因素。然而，风力是不可控的外在因素，雾霾污染治理不能只是依靠天帮忙，而是要立足于人努力，从减少污染物排放量着手，才能从根本上解决雾霾污染问题。

(3) 区域差异显著。各个区域的大气污染物排放结构不同，地理环境和气象条件也有较大差别，需要考虑各个区域的实际情况，分别进行 PM_{2.5} 浓度影响因素的数学建模。

(4) 雾霾污染的季节性特征显著，供暖季和非供暖季的空气质量差距明显。由于京津冀地区冬季供暖的能源消费量较大，而且冬季降水少、空气干燥，污染物扩散不利，因此冬季雾霾污染的出现频率高、污染程度重。

可以认为，当地的大气污染物排放量及其在大气中的累积程度、风力等级、周边区域的污染物排放以及区域传输等因素对 PM_{2.5} 浓度具有显著的影响。

2、大气污染物排放量的估算

前述分析表明，大气污染物排放量过大是导致雾霾污染的根本原因，有必要对京津冀地区大气污染物排放量的逐日变化进行深入的分析。大气污染物的日排放量，也是 PM_{2.5} 浓度影响因素数学建模的数据基础。本报告重点对 PM_{2.5} 的主要

来源、也是雾霾污染的前体物质——二氧化硫、氮氧化物和烟（粉）尘这三种大气污染物的日排放量进行估算。大气污染物排放量估算的过程是将 2013 年大气污染物的年排放量细分到日排放量，进而分析污染物日排放量的时空分布。

(1) 大气污染物排放量和排放密度

2003 年以来，京津冀地区大气污染物排放总量呈下降趋势（表 14）。2011 年由于国家增加了氮氧化物的统计，并修订了污染物的统计口径，烟（粉）尘的排放量出现上升趋势。

表 14 历年京津冀地区大气污染物质排放量

		排放总量（吨）			排放密度（吨/平方公里）		
		二氧化硫	氮氧化物	烟（粉）尘	二氧化硫	氮氧化物	烟（粉）尘
北京	2003	183000		70783	11.15		4.31
	2004	191000		70000	11.64		4.27
	2005	191000		58000	11.64		3.53
	2006	176000		50000	10.72		3.05
	2007	152000		48000	9.26		2.92
	2008	123000		48000	7.50		2.92
	2009	119000		44000	7.25		2.68
	2010	115000		48757	7.01		2.97
	2011	97883	188325	65848	5.96	11.48	4.01
	2012	93849	177495	66829	5.72	10.82	4.07
	2013	87045	176479	--	5.31	10.14	--
		二氧化硫	氮氧化物	烟（粉）尘	二氧化硫	氮氧化物	烟（粉）尘
天津	2003	201000		102646	16.82		8.59
	2004	200000		84000	16.74		7.03
	2005	240000		91000	20.09		7.62
	2006	230000		80000	19.25		6.70
	2007	244700		73792	20.48		6.18
	2008	240100		70202	20.10		5.88
	2009	236700		71923	19.81		6.02
	2010	235150		71915	19.68		6.02
	2011	230900	358900	75923	19.33	30.04	6.36
	2012	224521	334223	84064	18.79	27.98	7.04
	2013	216820	311663	--	18.15	26.09	--
		二氧化硫	氮氧化物	烟（粉）尘	二氧化硫	氮氧化物	烟（粉）尘
河北	2003	1093300		699,473	5.80		3.71
	2004	1412129		723,000	7.49		3.84
	2005	1233780		732,000	6.55		3.88
	2006	1253463		723,000	6.65		3.84
	2007	1345000		623,000	7.14		3.31

2008	1492480		568,000	7.92		3.01
2009	1545000		519,000	8.20		2.75
2010	1495000		500,000	7.93		2.65
2011	1412129	1801138	1,322,477	7.49	9.56	7.02
2012	1341201	1761110	1,235,877	7.12	9.34	6.56
2013	1284871	1652450	--	6.82	9.18	--

从单位国土面积的污染物排放量（排放密度）的历史变化来看，各个区域的二氧化硫排放密度都呈下降趋势。从排放密度的区域比较看，天津的排放密度高于北京和河北。北京市虽然工业排放源较少，但面积较小，使得排放密度也较高。河北省的污染物排放量较大，但面积较大，使得排放密度要低于天津。河北省内不同区域的污染物排放密度和污染物排放结构也有较大的差别。

（2）大气污染物日排放量的估算

各地区 2013 年环境统计年鉴和环境公报提供了京津冀地区 13 个地级市的二氧化硫、氮氧化物、烟（粉）尘的年排放量，据此进行大气污染物日排放量的估算。本报告将京津冀地区分为北京、天津以及河北省 11 个地级市共 13 个区域。

大气污染物日排放量估算的具体步骤如下：

步骤一：区分供暖季和非供暖季的大气污染物排放量。依据各个区域冬季供暖用的能源消费量，测算各个区域供暖能源消费带来的大气污染物排放量，将大气污染物年排放量数据按供暖季和非供暖季进行区分。

步骤二：参考工业生产景气指标，估算各个区域的月度社会经济活动波动情况，据此推算各个区域大气污染物质的月排放量，从而将大气污染物年排放量分解为月排放量。

步骤三：依据工作日和非工作日的社会经济运营情况，将污染物月排放量分解为日排放量。基于社会经济活动的日常指标（区分为双休日、工作日和法定节假日），将双休日和法定节假日按全社会用电量折算成若干单位的标准工作日。参考国泰君安提供的经验值，双休日约等于 0.92 个工作日，法定节假日约等于 0.75 个工作日。由此，可以将污染物月排放量数据细分到日排放量，从而得到工作日、双休日和法定节假日的污染物日排放量数据。

步骤四：对污染物日排放量数据进行矫正。北京城区作为大都市，机动车带来的大气污染物排放量占比较高，并由于北京城区的交通拥堵严重，交通拥堵导致的

车辆低速行驶会使得车用燃料燃烧不充分，造成更多的污染物排放。因此，针对北京城区，利用 2013 年北京城区的交通拥堵系数，区分平日和周末、中小学假日等，对污染物日排放量进行矫正。

(3) 大气污染物日排放量的统计分析

京津冀地区大气污染物日排放量与大气污染物浓度之间存在显著的相关性。大气污染物日排放量高的区域，大气污染物浓度也较高。反之亦然（表 15）。

唐山、天津、石家庄、保定等地的大气污染物日均排放量（排放密度）较高，但天津的污染物扩散条件较好，PM2.5 浓度要相对低于其他区域。张家口日均排放密度虽然也相对较高，由于风力扩散条件好，较少出现雾霾天气。北京市虽然污染物排放总量并不大，但面积较小，排放密度较大，且易受到周边区域污染物传输的影响，雾霾天气的出现频率较高。保定市的污染物排放量主要集中在城区，考虑到地形因素，采用城区面积代替整个地市面积计算排放密度，因此污染物排放密度明显高于其他城市。

表 15 2013 年京津冀地区大气污染物日均排放量和排放密度

	日均排放量（吨）			日均排放密度（吨/万平方公里）			PM2.5 年均浓度
	二氧化硫	氮氧化物	烟（粉）尘	二氧化硫	氮氧化物	烟（粉）尘	
北京	238.36	455.62	158.92	145.25	277.64	96.84	85.50
天津	596.94	853.78	230.49	499.66	714.65	192.93	92.34
保定	285.96	377.21	145.79	1129.81	1490.35	576.01	120.19
廊坊	154.31	247.89	94.49	240.03	385.58	146.98	101.70
张家口	235.93	328.75	134.67	64.06	89.26	36.57	40.30
唐山	800.69	969.99	1298.77	594.34	720.00	964.05	110.42
承德	218.96	154.09	106.52	55.41	38.99	26.95	50.93
石家庄	526.16	757.93	325.38	332.01	478.25	205.31	142.43
秦皇岛	220.24	328.75	134.56	281.92	420.80	172.24	63.80
沧州	136.78	321.22	189.86	101.93	239.37	141.49	92.12
衡水	103.00	124.83	57.46	116.84	141.62	65.18	112.68
邢台	290.23	352.62	289.99	232.45	282.41	232.26	140.13
邯郸	547.44	638.73	618.36	452.92	528.44	511.59	126.59

区分供暖季和非供暖季来看，供暖季的污染物日均排放量要高于非供暖季，尤其是二氧化硫作为燃煤的主要污染物质，供暖季的排放量明显更多（表 16）。

表 16 2013 年京津冀地区供暖季和非供暖季污染物日均排放量

	二氧化硫		氮氧化物		烟(粉)尘	
	非供暖季	供暖季	非供暖季	供暖季	非供暖季	供暖季
北京	177.74	361.91	438.84	489.39	151.95	172.90
天津	496.01	802.77	816.15	930.23	205.55	281.30
保定	194.62	472.00	323.41	486.34	74.16	291.82
廊坊	121.05	222.29	231.74	280.97	67.67	149.25
张家口	204.31	300.36	313.58	359.50	108.35	188.30
唐山	765.81	872.17	966.78	976.85	1284.32	1328.16
承德	190.71	276.58	136.61	189.75	83.75	152.96
石家庄	456.63	667.74	730.73	812.86	266.46	445.31
秦皇岛	197.49	266.52	309.73	367.30	106.81	191.08
沧州	82.55	247.47	305.76	352.62	153.59	263.77
衡水	67.87	174.64	104.21	166.80	29.85	113.76
邢台	244.76	383.08	335.05	388.51	256.97	357.32
邯郸	479.16	686.77	601.94	713.75	588.85	678.29
合计	3678.72	5734.29	5614.53	6514.88	3378.28	4614.23

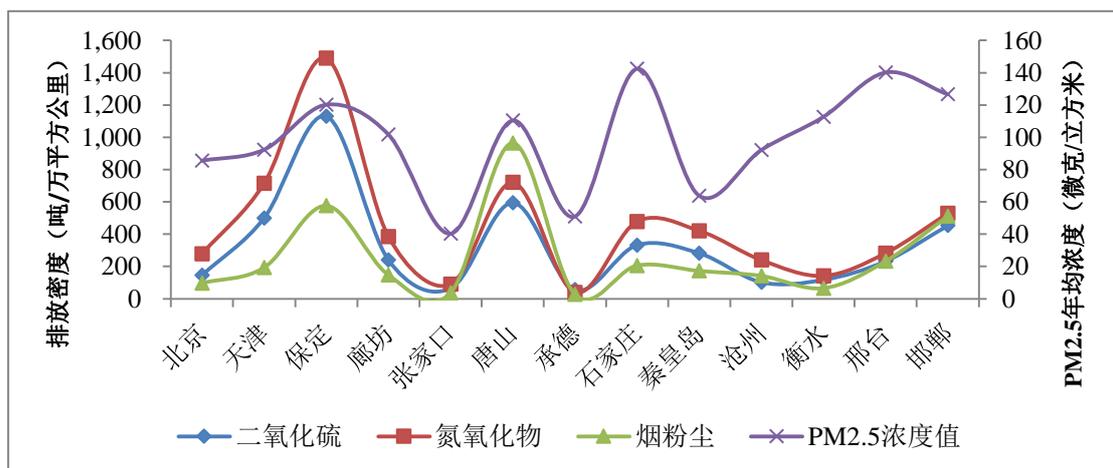


图 11 污染物日排放量（排放密度）与 PM2.5 浓度的关联

总体上看，京津冀各个区域大气污染物日均排放量与 PM2.5 年均浓度具有显著的正相关关系。污染物排放密度高的北京、保定、唐山、石家庄、邢台等地 PM2.5 年均浓度普遍高于其他地区（图 11）。

京津冀各区域的大气污染物物质日排放量与 PM2.5 的浓度相关性明显，大气污染物质排放量高的地区浓度也会较高；排放量低的地区往往污染物浓度较低。在当前情况下，风力是扩散雾霾的最有力的因素。这说明大气污染物质排放量超标严重，治理雾霾需要从根本入手，减少大气污染物质排放量。

3、数学建模及模型估计结果

基于前述的 PM2.5 浓度的主要影响因素分析，构建了线性方程式，就污染物排放量、风力、周边区域污染物传输效应等因素对 PM2.5 浓度的影响进行数学建模（Wang et al., 2015; Zhou et al., 2012）。

$$Y = f(X, LY, lNY, W)$$

其中， Y 为各个区域的 PM2.5 日均浓度；

X 为二氧化硫、氮氧化物和烟（粉）尘三种污染物的日排放量，为了便于区域之间的比较，转换为单位面积的排放量，也即排放密度。

由于二氧化硫、氮氧化物、烟（粉）尘的排放源都来自化石燃料的燃烧，同一个区域的二氧化硫、氮氧化物、烟（粉）尘的日排放量之间存在共生关系，如果二氧化硫、氮氧化物和烟粉尘的排放量变量同时放入模型会引起多重共线性，因此，我们对二氧化硫、氮氧化物、烟（粉）尘的日排放量变量进行降维处理，采用因子分析，对三种污染物排放量数据提取出主成分，作为一个新的变量放入模型，进行模型估计。

lY 为滞后一期的 PM2.5 日均浓度值，表征污染物在空气中的累积效应。

lNY 为区域 i 北部相邻地区的滞后一期的 PM2.5 日均浓度值，表征相邻区域之间污染物传输作用的影响。基于京津冀地区的温带季风气候因素，在雾霾多发的冬春季节，北部地区 PM2.5 的浓度受偏北风的影响对于南部地区有较为显著的影响，而南部相邻地区对于北部地区的影响并不显著，因此，本研究只考虑北部相邻地区对于南部地区的传输效应。

W 为各地区日均风速。本研究将各地区的日均风速作为风力变量引入到模型中，其中数据来源于中国气象数据网。

考虑到每个区域的污染物排放量和排放结构均有不同，各个区域的气象条件和污染物扩散能力也有很大区别，因此，对 13 个区域分别进行数学建模。考虑到根据不同区域受周边区域影响有所差异，各个区域将采用不同的模型进行数学建模。例如张家口，由于自身的风力扩散条件好，周边地区的影响较弱，因此模型里将忽略来自周边地区的污染物传输的影响。

数据来源为 2013 年 1 月 18 日至 2013 年 12 月 31 日期间的每日数据。PM2.5 日均浓度、风速等来自环境监测数据和气象资料，污染物日排放量数据为本报告估算而得。二氧化硫、氮氧化物、烟（粉）尘的日排放量经过降维处理合成为一个新的变量后，各个区域的模型估计均通过 DW 检验。污染物排放密度、风力、周边地区污染物传输等因素对 PM2.5 日均浓度的影响的模型估计结果如表 17 所示。

第一，当地的污染物排放量对 PM2.5 浓度具有显著的影响，减少污染物排放量可以有效减轻空气污染程度。如果每平方公里的污染物日排放量（因子分析合成的新变量）减少 1 吨，各区域 PM2.5 日均浓度下降幅度约为 0.03-0.21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

表 17 污染物排放因子和风力对 PM2.5 浓度的影响

变量	北京		天津		保定		唐山		石家庄	
自身滞后一期	0.492	***	0.433	***	0.399	***	0.275	**	0.224	***
北部滞后一期					0.269	***	0.439	***	0.340	***
日平均风速	-26.897	***	-13.650	***	-17.839	***	-16.999	***	-29.756	***
排放因子	0.575		0.740	**	0.287	***	0.316		2.157	***
常数项	85.960	***	55.003	***	63.311	***	64.031	**	48.737	*
R ²	0.359		0.299		0.427		0.300		0.363	
DW 检验	1.935		1.997		1.932		1.929		1.965	
样本数	338		337		348		338		339	
变量	沧州		衡水		邢台		邯郸		秦皇岛	
自身滞后一期	0.414	***	0.216	**	0.444	***	0.619	***	0.423	***
北部滞后一期			0.455	***	0.272	**				
日平均风速	-9.076	***	-10.721	***	-23.898	***	-14.301	*	-6.981	***
排放因子	1.990	***	2.783	***	1.568	*	1.637	***	0.338	
常数项	39.368	***	28.885	**	39.087		-24.440		41.575	***
R ²	0.279		0.490		0.534		0.516		0.215	
DW 检验	1.973		2.041		1.975		1.931		1.967	
样本数	337		265		265		265		338	
变量	廊坊		张家口		承德					
自身滞后一期	0.505	**	0.508	***	0.467	***				
北部滞后一期										
日平均风速	-12.454	***	-3.960	***	-8.739	***				
排放因子	1.190	**	1.128		3.769	**				
常数项	42.242	***	25.273	***	28.794	***				
R ²	0.294		0.279		0.313					
DW 检验	1.903		1.848		1.893					
样本数	338		338		338					

t statistics in parentheses="** p<0.10 ** p<0.05 *** p<0.01"

第二，当地的滞后一期 PM2.5 浓度的系数显著为正，反映出大气中污染物累积效应对 PM2.5 浓度有显著的影响。经过数据分析，发现滞后一期以上的 PM2.5 浓度的影响并不显著，这可能是由于滞后一期的 PM2.5 浓度已经包含了前几天排放的污染物在大气中的累积效应。

第三，相邻区域的滞后一期 PM2.5 浓度的系数统计显著，表明来自周边地区的污染物传输效应对 PM2.5 浓度具有显著的影响。由于各个区域的地理位置各异，气象条件不同，各个区域的 PM2.5 浓度受到周边区域污染物排放的影响有所不同。

第四，日平均风速显著为负，且系数的绝对值较大。这说明，在当前的污染物排放量条件下，风力条件是影响雾霾污染程度的关键因素。南部区域的平均风速系数的绝对值明显高于北部地区，表明南部区域对风力的依赖更深。

4、模型拟合和模型矫正

基于上述模型估计结果进行 PM2.5 日均浓度的预测，预测值与 2013 年实际值在逐日变化趋势上具有很好的一致性。但是，北京、天津、保定、廊坊、唐山、秦皇岛、沧州、邯郸、石家庄等地，PM2.5 日均浓度超过 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上的重污染天，预测值与实际值之间有明显的偏差，PM2.5 日均浓度低于 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的预测值的出现频率也偏低。这种偏差反映出模型对于 PM2.5 日均浓度极值（包括极大和极小）的捕捉效果较差。因此，需要采用分位数回归模型，基于不同分位的回归结果，对上述区域 PM2.5 日均浓度极值预测的系数进行矫正。具体来说，根据各地区的回归预测结果与实际值之间的实际情况，确定各地区的 PM2.5 日均浓度极值范围，进而采用不同分位的回归结果进行校正，详见表 18 和表 19。

表 18 分位数回归矫正标准

地区	北京		天津		保定		唐山		石家庄	
浓度极值范围($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	<20	>200	<35	>160	<50	>250	<45	>160	<50	>250
分位数模型（分位）	10%	90%	10%	80%	10%	80%	10%	80%	10%	80%
地区	沧州		衡水		邢台		邯郸		秦皇岛	
浓度极值范围($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	<40	>145	<50	>200	<70	>200	<50	>250	<25	>125
分位数模型（分位）	10%	70%	10%	70%	10%	70%	10%	70%	10%	90%
地区	廊坊		张家口		承德					
浓度极值范围($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	<30	>140	<20	>90	<25	>100				
分位数模型（分位）	10%	70%	10%	90%	10%	90%				

表 19 各区域分位数回归结果

变量	北京		天津				保定	
	10%	90%	10%	80%	10%	80%		
自身滞后一期	0.200 ***	0.711 ***	0.070	0.641 ***	0.011	0.619 ***		
北部滞后一期					0.329 ***	0.272		
日平均风速	-15.693 ***	-27.524 ***	-8.457 ***	-10.640 ***	-4.458 *	-19.140 ***		
排放因子	0.219	1.864	0.235	1.283 ***	0.192 ***	0.375 **		
常数项	51.795 ***	118.008 **	69.122 ***	36.075 *	19.577 **	75.329 ***		
Pseudo R-squared	0.093	0.312	0.061	0.255	0.065	0.356		
样本数	338	338	337	337	348	348		
城市	唐山		石家庄		沧州			
变量	10%	80%	10%	80%	10%	70%		
自身滞后一期	-0.003	0.465 ***	0.132 ***	0.651 ***	0.016	0.723 ***		
北部滞后一期	0.180	0.614 *	0.102	0.069				
日平均风速	-9.966 ***	-15.019 ***	-10.014 **	-25.408 ***	-0.556	-5.296		
排放因子	0.186	0.978 *	0.564	2.683 **	0.962 *	2.057 *		
常数项	73.231 ***	14.261	26.011	41.791	23.081 *	27.476		
Pseudo R-squared	0.051	0.260	0.079	0.384	0.021	0.199		
样本数	338	338	339	339	337	337		
城市	衡水		邢台		邯郸			
变量	10%	70%	10%	70%	10%	70%		
自身滞后一期	0.001	0.281	0.004	0.693 ***	0.266 *	0.868 ***		
北部滞后一期	0.210	0.573 ***	0.298	0.238 ***				
日平均风速	1.368	-6.774 *	-6.479	-21.321 ***	-8.333	-6.457		
排放因子	1.760 ***	0.643	1.171	0.555	0.848 *	0.975		
常数项	10.944	42.795 ***	12.154	56.935 *	-3.995	-7.195		
Pseudo R-squared	0.116	0.270	0.088	0.377	0.109	0.331		
样本数	265	265	265	265	265	265		
城市	秦皇岛		廊坊		张家口			
变量	10%	90%	10%	70%	10%	90%		
自身滞后一期	0.101 *	0.738 ***	0.186 **	0.673 ***	0.104 *	0.822 ***		
北部滞后一期								
日平均风速	-3.459 *	-10.720 ***	-8.738 **	-6.786	-1.578 **	-2.214		
排放因子	0.137	0.748	0.270	2.118 **	1.242 **	0.273		
常数项	20.633 **	67.664	38.136 **	17.931	11.760 ***	44.979		
Pseudo R-squared	0.021	0.195	0.045	0.194	0.045	0.285		
样本数	338	338	338	338	338	338		
城市	承德							
变量	10%	90%						
自身滞后一期	0.119 **	0.918 ***						
北部滞后一期								

日平均风速	-3.336	***	-8.029	**
排放因子	4.757	***	0.181	
常数项	4.165		57.824	**
Pseudo R-squared	0.079		0.281	
样本数	338		338	

注：t statistics in parentheses=“* p<0.10 ** p<0.05 *** p<0.01”

由于部分地区的极值拟合度较低，采用分位数回归结果，对京津冀 13 个地市地的 PM2.5 日均浓度预测值进行矫正后，矫正后的预测值与 2013 年 PM2.5 日均浓度的实测值的拟合效果如图 12-图 24 所示。

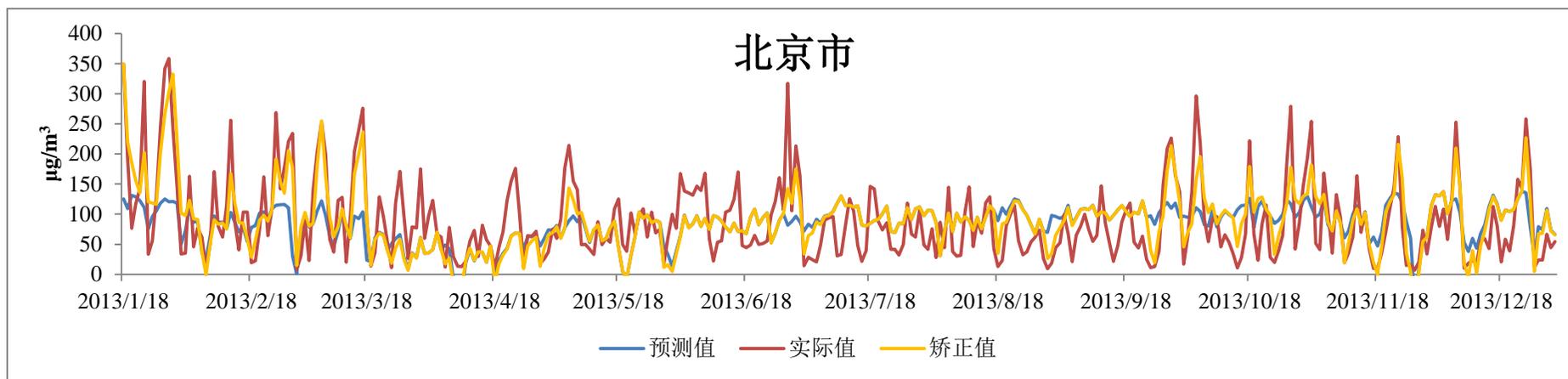


图 12 矫正前后北京城区 2013 年 PM_{2.5} 浓度实际值和预测值拟合度比较

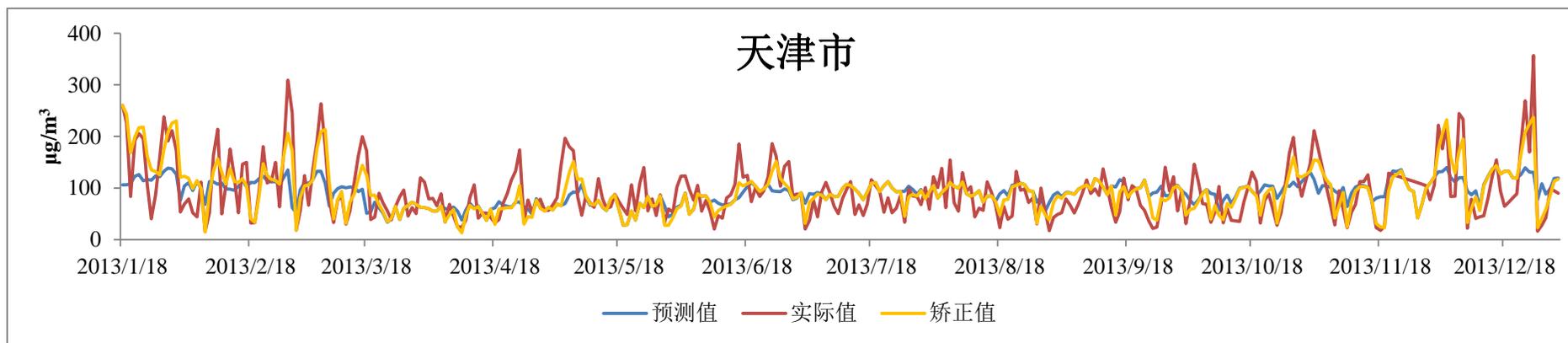


图 13 矫正前后天津 2013 年 PM_{2.5} 浓度实际值和预测值拟合度比较

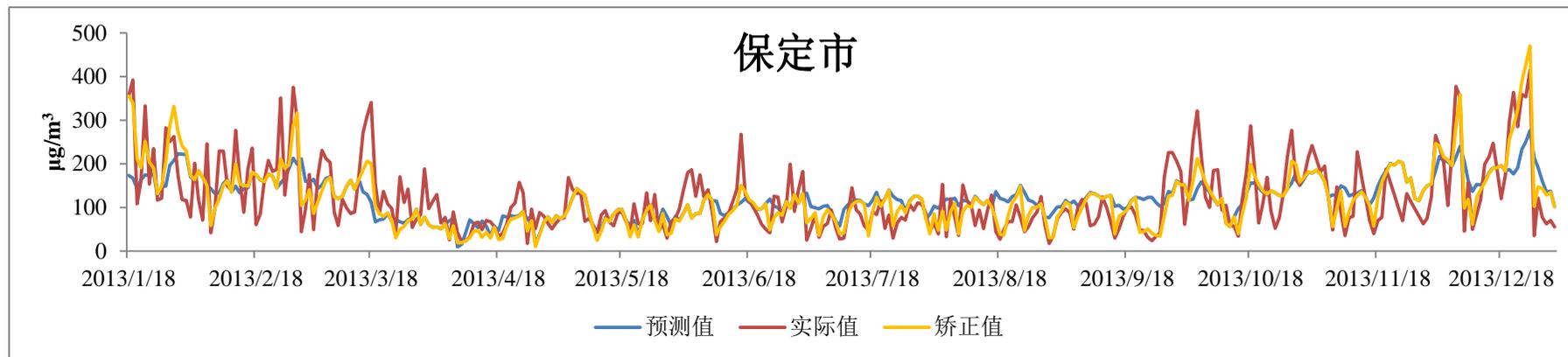


图 14 矫正前后保定 2013 年 PM2.5 浓度实际值和预测值拟合度比较

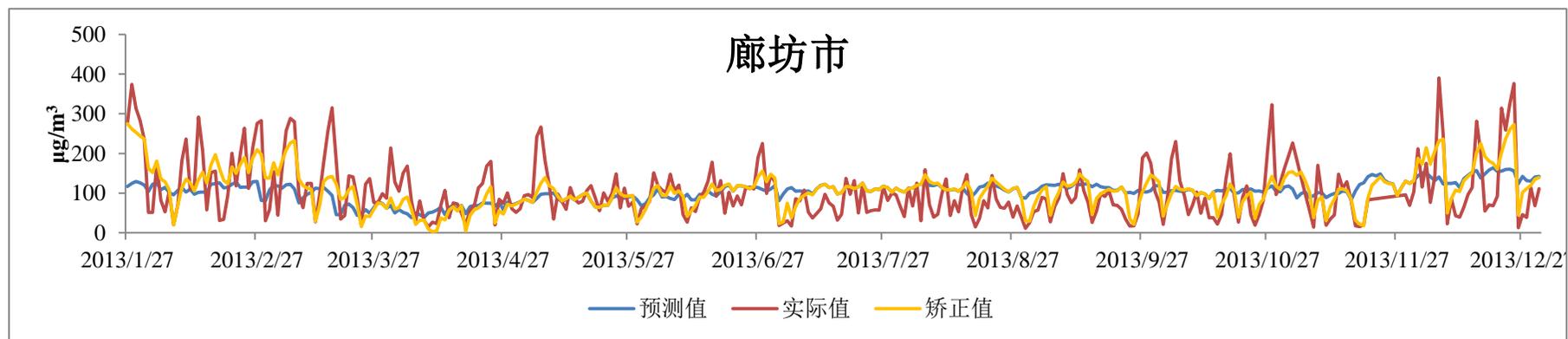


图 15 矫正前后廊坊 2013 年 PM2.5 浓度实际值和预测值拟合度比较

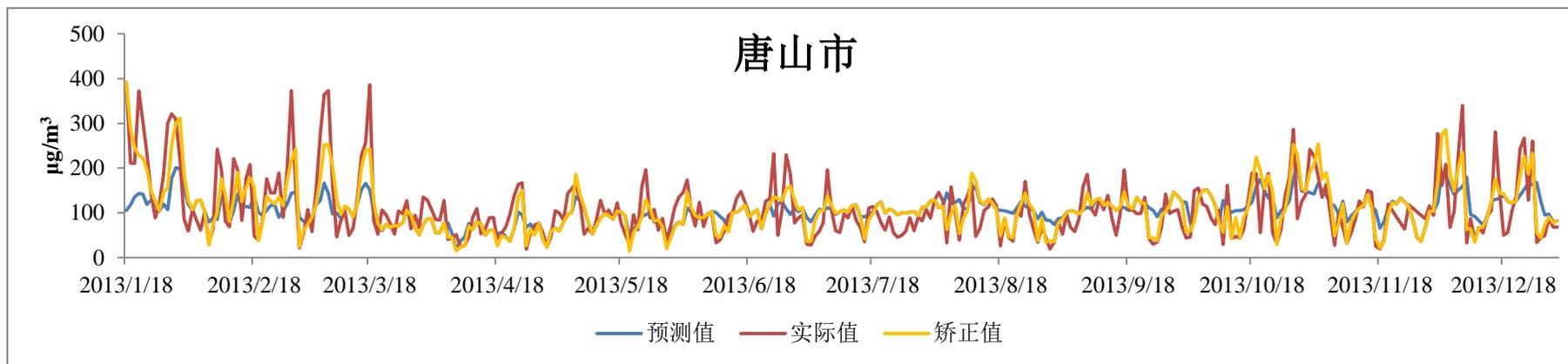


图 16 矫正前后唐山 2013 年 PM2.5 浓度实际值和预测值拟合度比较

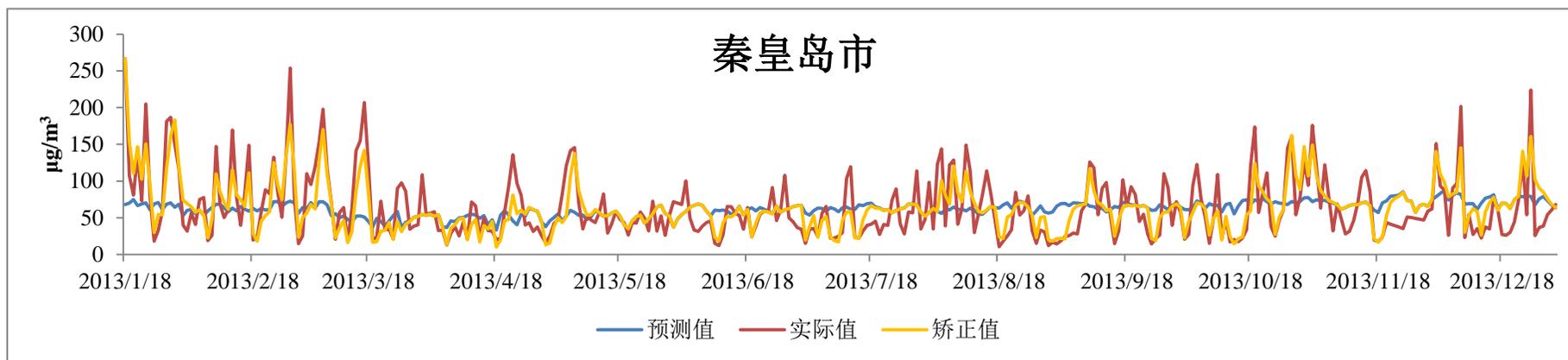


图 17 矫正前后秦皇岛 2013 年 PM2.5 浓度实际值和预测值拟合度比较

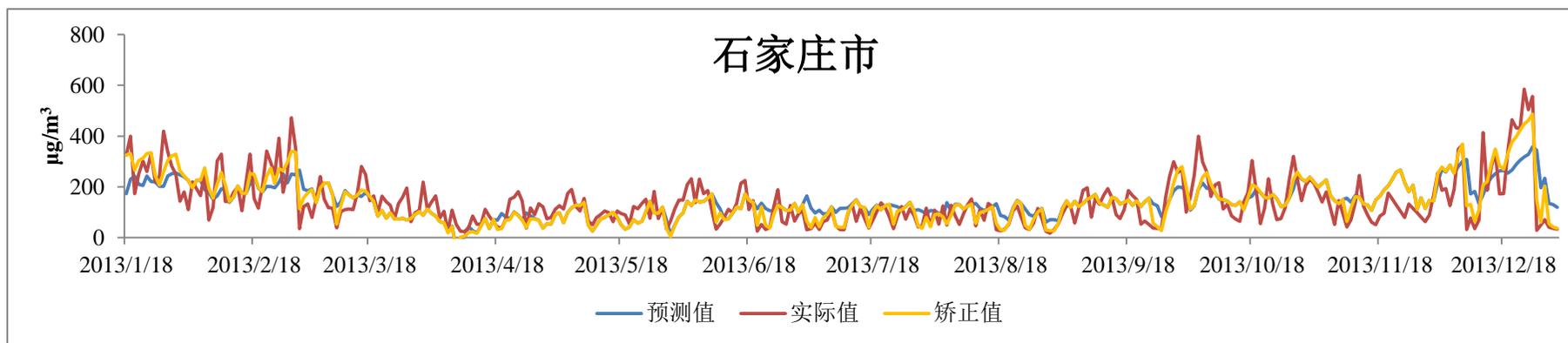


图 18 矫正前后石家庄 2013 年 PM2.5 浓度实际值和预测值拟合度比较

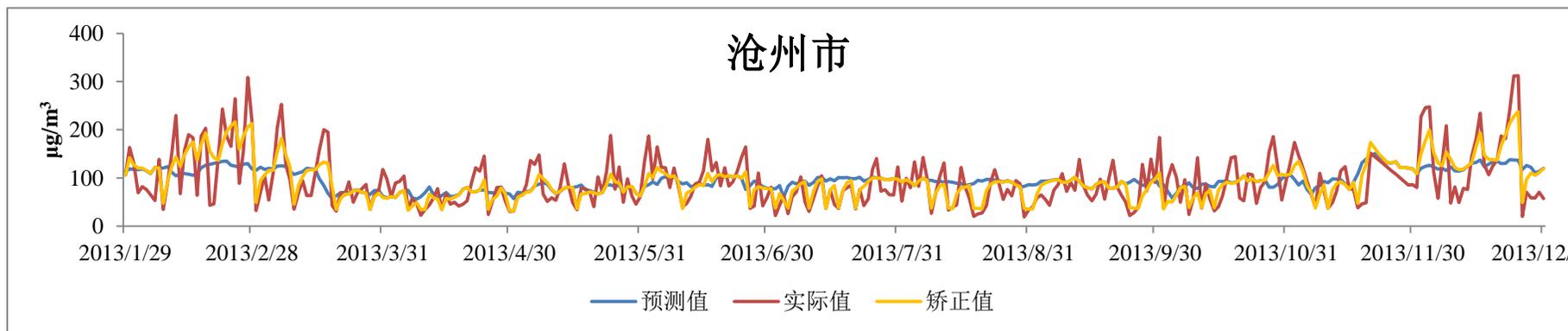


图 19 矫正前后沧州 2013 年 PM2.5 浓度实际值和预测值拟合度比较

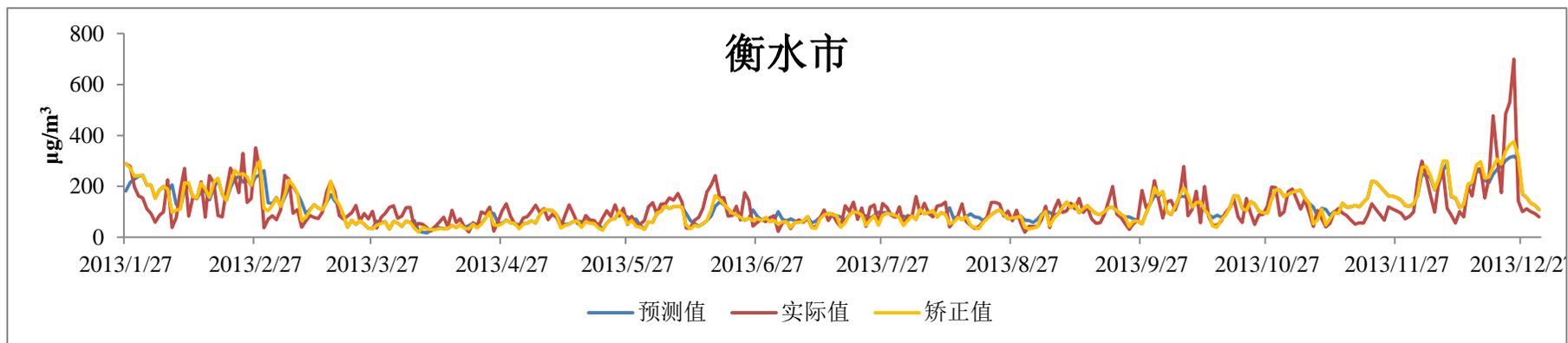


图 20 矫正前后衡水市 2013 年 PM2.5 浓度实际值和预测值拟合度比较

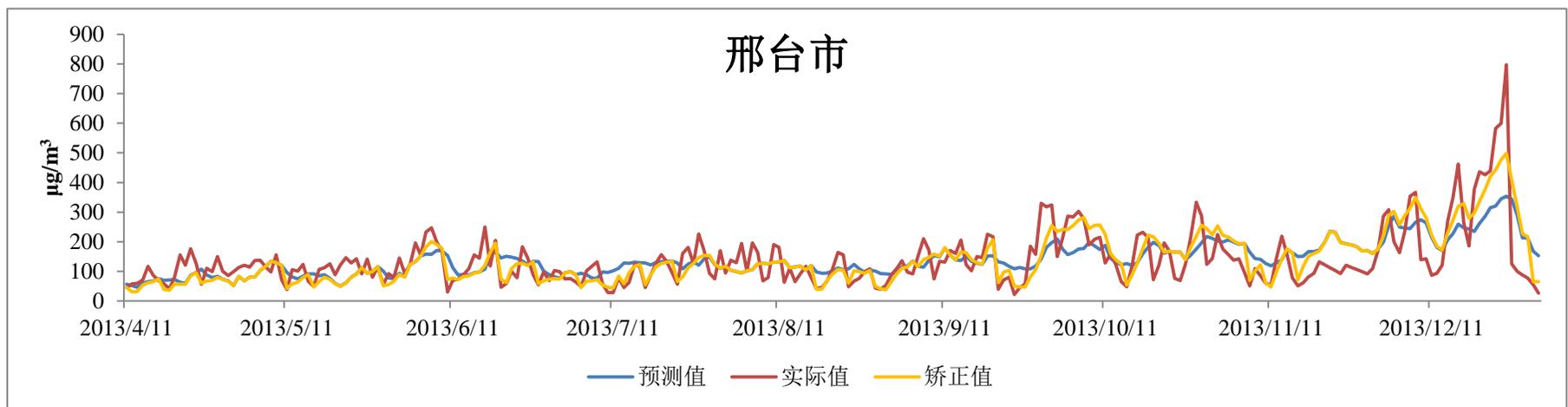


图 21 矫正前后邢台市 2013 年 PM2.5 浓度实际值和预测值拟合度比较

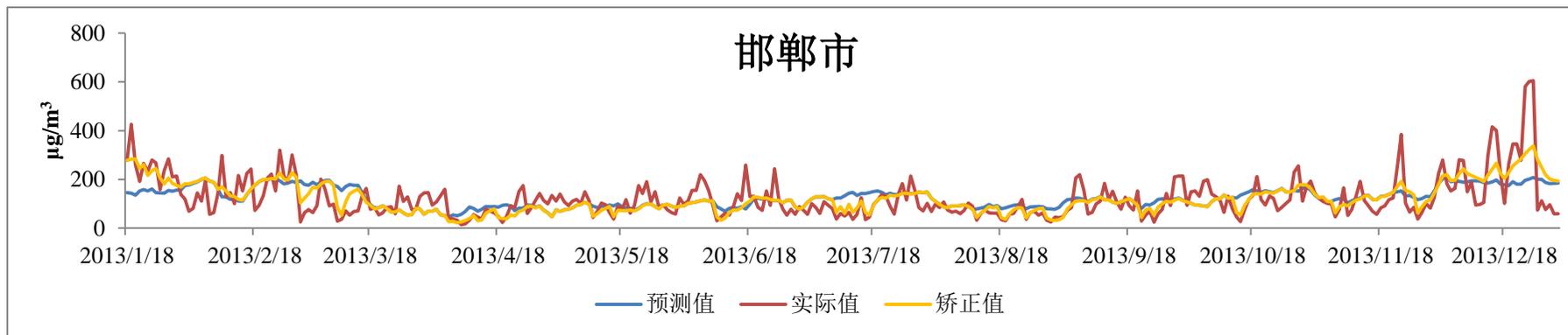


图 22 矫正前后邯郸市 2013 年 PM_{2.5} 浓度实际值和预测值拟合度比较

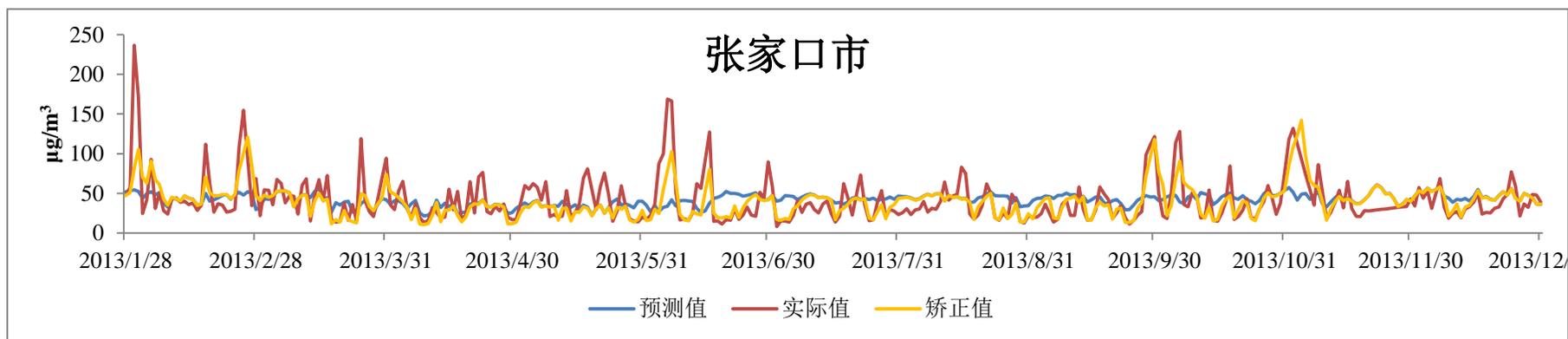


图 23 矫正前后张家口市 2013 年 PM_{2.5} 浓度实际值和预测值拟合度比较

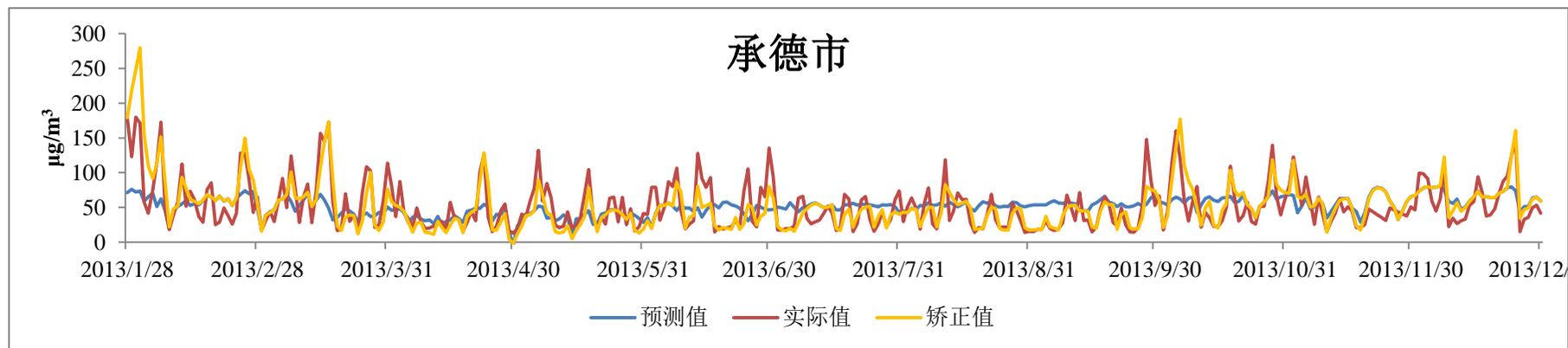


图 24 矫正前后承德市 2013 年 PM_{2.5} 浓度实际值和预测值拟合度比较

经过矫正,京津冀 13 个地市 PM2.5 日均浓度的预测值和实际值的拟合效果有明显的改进,矫正后的模型对于 PM2.5 日均浓度极值的预测具有更好的效果。通过模型预测值和实际值之间的差异比较(表 20-21),矫正后模型预测值的误差显著下降,矫正后的模型对 PM2.5 日均浓度预测的可信度明显提高。

表 20 模型的预测值和实际值的差异比较

	均值 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			标准差			均值差异($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		变异系数		
	实际	预测	矫正	实际	预测	矫正	预测-实际	矫正-实际	实际	预测	矫正
北京	89.47	89.94	90.62	67.66	31.06	53.24	0.48	1.16	0.76	0.35	0.59
天津	93.13	103.13	93.54	53.81	18.56	43.51	10.00	0.41	0.58	0.18	0.47
保定	120.52	123.11	119.49	79.09	43.95	68.49	2.59	-1.04	0.66	0.36	0.57
廊坊	104.31	103.68	108.51	71.58	24.09	48.67	-0.63	4.20	0.69	0.23	0.45
张家口	41.81	42.10	40.07	29.38	7.30	19.83	0.29	-1.74	0.70	0.17	0.49
唐山	110.33	105.95	110.67	69.97	30.37	56.64	-4.38	0.34	0.63	0.29	0.51
承德	52.44	51.83	53.11	34.58	12.86	35.44	-0.61	0.67	0.66	0.25	0.67
石家庄	139.92	143.49	142.35	97.25	64.21	87.05	3.57	2.43	0.70	0.45	0.61
秦皇岛	63.67	62.15	63.86	43.92	9.64	33.06	-1.52	0.19	0.69	0.16	0.52
沧州	92.98	94.99	93.68	53.64	23.90	46.54	2.01	0.70	0.58	0.25	0.50
衡水	112.48	115.07	113.05	77.20	60.38	70.08	2.59	0.57	0.69	0.52	0.62
邢台	139.18	139.76	139.09	97.33	57.19	84.52	0.58	-0.09	0.70	0.41	0.61
邯郸	122.67	123.37	120.98	84.76	39.92	59.57	0.70	-1.69	0.69	0.32	0.49

表 21 PM2.5 日均浓度的预测值和实际值的偏差

	偏差比例		矫正度
	(预测-实际) / 实际	(矫正-实际) / 实际	
北京	0.94	0.61	0.33
天津	0.55	0.34	0.20
保定	0.62	0.37	0.25
廊坊	0.86	0.53	0.33
张家口	0.60	0.34	0.27
唐山	0.55	0.35	0.21
承德	0.62	0.35	0.27
石家庄	0.71	0.42	0.29
秦皇岛	0.73	0.39	0.33
沧州	0.56	0.33	0.24
衡水	0.50	0.37	0.13
邢台	0.56	0.38	0.18
邯郸	0.62	0.42	0.20

注:此处采用每天的偏差比例的平均值,矫正之后的偏差降低。

六、大气国十条的政策效果评估

(1) 大气国十条的效果预测

依据 2013 年 9 月发布的《大气污染防治行动计划》(“大气国十条”), 京津冀地区提出了具体的大气污染物减排措施, 其中二氧化硫和氮氧化物被列为约束性目标, 各地必须完成, 成为政府政绩考核的一部分。假如各个区域完成了既定的减排任务, 是否可以实现“大气国十条”要求的 PM_{2.5} 浓度目标呢?

本报告基于污染物排放、气象因素和 PM_{2.5} 浓度之间关系的数据模型, 预测了各个区域在完成了既定的大气污染物减排任务时, 可以达到的 PM_{2.5} 浓度目标。预测的前提条件是, 假定风力等级频率分布等气象条件和 2013 年一样, 保持不变, 区分周边地区同时减排和不减排两种情形, 分别计算各个区域按减排要求等比例减少污染物日排放量时, PM_{2.5} 日均浓度的逐日变化。具体步骤如下:

首先, 基于 PM_{2.5} 日均浓度与污染物日排放密度、风力、周边地区污染物传输效应的数据模型, 将污染物日排放密度 X_{it} 根据既定的减排比率代入模型, 区分周边地区同时减排和不减排的情形, 通过迭代运算, 求出完成既定减排任务时能够实现的 PM_{2.5} 日均浓度的逐日变化。

其次, 采用分位数回归模型, 对于 PM_{2.5} 日均浓度极值 (200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上和 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下) 进行矫正。通过迭代计算, 确定在 2013 年相同风力等级频率分布的条件下各区域完成既定减排任务时可以实现的 PM_{2.5} 日均浓度的逐日变化。

再次, 将 PM_{2.5} 日均浓度的逐日变化汇总为 PM_{2.5} 年均浓度。

结果显示, 如果周边区域不同时减排, 几乎所有区域都难以实现“大气国十条”要求的浓度目标, 即北京的 PM_{2.5} 年均浓度达到 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 天津和河北各地市 PM_{2.5} 年均浓度下降 25%。即使是在周边区域同时减排的条件下, 大部分区域也难以实现“大气国十条”要求的浓度目标 (表 23)。能够达标的区域只有北京郊区、承德、石家庄、邯郸。承德和张家口的 PM_{2.5} 年均浓度本来就低, 实际上不需要采纳年均浓度下降 25% 的浓度目标。

表 22 京津冀地区的主要减排措施和减排量(万吨)

总计(2017 年排放变化)	北京	天津	河北
二氧化硫	6.73 (9.38)	13.44 (22.45)	46.15 (134.12)
氮氧化物	10.29 (22.45)	7.27 (33.42)	42.37 (176.11)

PM2.5	3.16	3.72	20.87
VOCs	5.39	0.72	7.13

资料来源：中国清洁空气联盟，京津冀能否实现 2017 年 PM2.5 改善目标？基于“大气国十条”的京津冀地区细颗粒物污染防治政策效果评估。

表 23 大气污染防治行动计划可能达到的 PM2.5 浓度单位： $\mu\text{g}/\text{m}^3$

区域	达标减排率	周边地区不同时减排		周边地区同时减排	
		PM _{2.5} 浓度可达值	降低比率	PM _{2.5} 浓度可达值	降低比率
北京	63%	68.71	23.74%		
天津	37%	71.98	24.69%		
保定	29%	110.11	13.91%	105.86	17.23%
廊坊	29%	93.86	17.52%		
张家口	29%	37.53	12.92%		
唐山	29%	100.32	12.15%	95.94	16.00%
承德	29%	44.44	13.71%		
石家庄	29%	112.26	24.40%	103.72	30.15%
秦皇岛	29%	59.35	8.97%		
沧州	29%	83.42	10.88%		
衡水	29%	110.65	8.25%	94.20	21.89%
邢台	29%	136.76	11.88%	117.12	24.53%
邯郸	29%	71.68	43.91%		

北京市按照减排行动计划要求，需减少污染物排放量 63%，这是一个极其艰巨的减排任务。即便如此，北京城区只能使得 PM2.5 年均浓度下降到 $68.71\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，离 $60\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的浓度目标仍有差距。石家庄和保定尽管 PM2.5 年均浓度有望下降 25%，但仍超过 $90\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。除了石家庄和保定外，PM2.5 年均浓度超过 $90\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的区域还有廊坊、唐山、衡水、邢台等地市。

上述结果表明，依据“大气国十条”的污染物减排行动计划难以实现 PM2.5 年均浓度目标。如果要实现 PM2.5 年均浓度下降 25% 的既定政策目标，天津和河北需要进一步加大污染物减排力度。进一步而言，石家庄、保定、唐山、邢台、衡水等区域不能满足于 PM2.5 年均浓度下降 25% 的目标，更重要的是尽可能把 PM2.5 年均浓度降得更低，尽可能减少重污染天气发生频率。北京的减排任务较为艰巨，但仍难以达到 $60\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的浓度目标，可能需要考虑调整浓度目标。

(2) 既定的 PM2.5 浓度目标下的污染物允许排放量

按照“大气十条”的要求，到 2017 年京津冀地区细颗粒物浓度要下降 25% 左右，其中北京市细颗粒物年均浓度控制在 $60\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右。前述分析结果表明，当前京津冀各个区域制定的减排行动计划，难以实现“大气十条”要求的 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度目标。那么，如果要实现“大气十条”要求的 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度目标，京津冀各个区域需要减少的污染物排放量究竟是多少呢？本报告基于污染物排放量、风力因素和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度之间关系的数据模型，按照设定的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度目标，模拟了各个区域的污染物允许排放量。各个区域的污染物允许排放量与当前排放量之差，就是需要减少的污染物排放量。

依据“大气十条”的政策目标(天津和河北各地市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度下降 25%、北京的 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度达到 $60\mu\text{g}/\text{m}^3$)，设定各个区域的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度目标值，具体如表 24 所示。

表 24 既定目标下的各区域 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度单位： $\mu\text{g}/\text{m}^3$

区域	2013 年 $\text{PM}_{2.5}$ 年均值	减排目标值	降低比例
北京	90.1	60	33%
天津	92.34	69	25%
保定	120.19	90	25%
廊坊	101.7	76	25%
张家口	40.3	30	26%
唐山	110.42	83	25%
承德	50.93	38	25%
石家庄	142.43	107	25%
秦皇岛	63.8	48	25%
沧州	92.12	69	25%
衡水	112.68	85	25%
邢台	140.13	105	25%
邯郸	126.59	95	25%
合计	96.94	73	25%

按照设定的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度目标，模拟得出允许的污染物排放量。从某种意义上讲，大气污染物允许排放量就是该区域的大气环境容量。污染物允许排放量与现状的污染物排放量相比，可得到达到浓度目标所要求的污染物减排率，也就是各个区域的污染物减排要求（表 25）。将合成的污染物排放量因子还原为二氧化硫、氮氧化物、烟粉尘三种污染物，可得到三种污染物的允许排放量（表 26）。

就京津冀地区整体而言，二氧化硫、氮氧化物、烟（粉）尘的排放量需要减少50%左右，才能实现《大气污染防治行动计划》的目标。但具体到每个区域，减排要求又各不相同。

表 25 京津冀地区既定浓度目标要求的污染物减排率（PM_{2.5} 浓度单位：μg/m³）

区域	达标减排率	周边地区不同时减排		周边地区同时减排	
		PM _{2.5} 浓度可达值	降低比率	PM _{2.5} 浓度可达值	降低比率
北京	77.68%	60.17	23.74%		
天津	44.67%	68.13	24.69%		
保定	44.68%	99.28	13.91%	90.11	17.23%
廊坊	47.47%	75.86	17.52%		
张家口	80.75%	30.14	12.92%		
唐山	37.93%	93.21	12.15%	83.24	16.00%
承德	56.49%	38.12	13.71%		
石家庄	37.40%	112.26	24.40%	98.00	30.15%
秦皇岛	84.50%	48.01	8.97%		
沧州	46.89%	68.98	10.88%		
衡水	30.85%	108.16	8.25%	84.90	21.89%
邢台	35.60%	128.58	11.88%	105.07	24.53%
邯郸	12.63%	94.21	43.91%		

表 26 京津冀地区既定政策目标下的污染物允许排放量

区域	二氧化硫（吨）	氮氧化物（吨）	烟粉尘（吨）	综合减排率
北京	16239	45510	10264	77.68%
天津	94087	220213	37263	44.67%
保定	55958	63007	44391	44.68%
廊坊	29343	41140	24599	47.47%
张家口	15583	21470	12141	80.75%
唐山	168320	220190	310643	37.93%
承德	35157	28447	13384	56.49%
石家庄	132441	132441	61024	37.40%
秦皇岛	11036	17777	9891	84.50%
沧州	33231	51041	41573	46.89%
衡水	24985	26526	20576	30.85%
邢台	67450	77169	75618	35.60%
邯郸	164590	199647	219738	32.63%
合计	848419	1144579	881103	
平均减排率	50.06%	51.21%	44.98%	49.04%

张家口、承德和秦皇岛的 PM_{2.5} 浓度原本就较低、不需要下降 25%。除此之

外，河北的其余地市和天津要达到 PM2.5 年均浓度下降 25% 的目标，在周边区域同时减排的条件下，需要减少污染物排放量约 30%-78%。石家庄减少污染物排放量 15.3%，可以使 PM2.5 年均浓度下降 25%，但 PM2.5 年均浓度仍在 $106\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，离公众对环境质量的要求相差甚远。邯郸减少污染物排放量 17%，也可以使得 PM2.5 年均浓度下降 25%，但 PM2.5 年均浓度依然超过 $90\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。石家庄和邯郸不应该参考浓度下降 25% 的目标，而是应当减少更多的污染物排放量，使 PM2.5 年均浓度下降更多。

北京市要使得 PM2.5 年均浓度下降到 $60\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，需要减少的污染物排放量达到 78%。这几乎是不可能完成的任务。按照“大气十条”的减排行动计划，这意味着，如果要把 PM2.5 年均浓度从 $68.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 降到 $60\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，北京市需要把污染物减排率从 63% 提高到 78%，降低 PM2.5 年均浓度的边际成本越来越高。北京市也许需要考虑调整近期的浓度目标，制定更加现实可行的政策目标。

从各个地区的污染物减排要求来看，不同区域的减排力度应该有所不同，在当前污染较高、污染物密度高的地区，减排力度应比较大，例如北京、天津、衡水；在当前污染较轻的地区，减排力度可有所降低，例如张家口、承德和秦皇岛。

从达到既定政策目标的各地区 PM2.5 年均浓度可以看出，河北省部分地市即便 PM2.5 浓度降低 25%，年均浓度依然在 $90\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的高位，这也既不符合环境空气质量标准，也难以消除对公众健康安全的风 险。因此，京津冀地区需要确定更加科学合理的 PM2.5 浓度目标，制定现实可行的大气污染物减排行动计划。

七、雾霾治理政策目标：从年均浓度到重污染天气发生频率

依据 2013 年发布的《大气污染防治行动计划》（“大气十条”），2017 年北京市 PM2.5 年均浓度达到 60，天津和河北的 PM2.5 年均浓度比 2012 年下降 25%。依据 2016 年初发布的《京津冀协同发展生态环境保护规划》，2017 年京津冀地区 PM2.5 年平均浓度要控制在 73 微克/立方米左右；到 2020 年，PM2.5 年平均浓度要控制在 64 微克/立方米左右，比 2013 年下降 40% 左右。

污染物减排行动将对区域经济发展和民生保障产生直接的影响，在制定雾霾治理的政策目标时，往往需要在区域经济发展、民生保障和环境质量改善之间寻求一个均衡点。“大气十条”确定的浓度目标对于北京市过于严峻，对于河北的部分城市来说，即使达到了年均浓度下降 25% 的目标，PM2.5 浓度仍然超过 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。因此，北京市需要考虑调整现实可行的政策目标。河北和天津应当加大污染物减排力度，使 PM2.5 年均浓度降得更低。

本报告设定 PM2.5 年均浓度 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 两个目标情景，测算了不同目标情景下的污染物允许排放量和污染物减排率。结果显示，京津冀地区如果要想实现 PM2.5 年均浓度接近 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的浓度目标，每个城市的减排要求存在很大的差异。京津冀地区的 13 个区域中，7 个城市的减排比例要求超过 75%，北京、保定、张家口、唐山、秦皇岛、沧州、邢台的减排率超过了 80%。如此大力度的污染物减排量，近期内几乎是无法实现的。这意味着仅仅通过控制二氧化硫、氮氧化物和烟（粉）尘，难以实现这些城市的 PM2.5 浓度目标。

表 27 京津冀地区 PM2.5 年均浓度达到 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的减排要求

区域	达标减排率	周边地区不同时减排		周边地区同时减排	
		PM _{2.5} 浓度可达值	降低比率	PM _{2.5} 浓度可达值	降低比率
北京	90.03%	60.17	29.63%		
天津	59.40%	60.04	35.72%		
保定	89.03%	71.80	40.83%	60.32	50.29%
廊坊	68.04%	60.00	40.91%		
张家口	83.26%	30.14	25.08%		
唐山	88.13%	69.99	33.05%	60.02	42.59%
承德	58.20%	38.12	24.87%		
石家庄	42.60%	85.09	39.30%	60.02	57.18%
秦皇岛	87.75%	48.01	24.53%		
沧州	85.09%	60.05	34.26%		

衡水	59.24%	97.97	19.70%	60.07	50.76%
邢台	84.75%	99.94	23.00%	60.10	53.70%
邯郸	31.38%	60.06	52.83%		

表 28 京津冀地区 PM_{2.5} 年均浓度达到 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的减排要求

区域	达标减排率	周边地区不同时减排		周边地区同时减排	
		PM _{2.5} 浓度可达值	降低比率	PM _{2.5} 浓度可达值	降低比率
北京	62.83%	70.06	18.05%		
天津	45.77%	70.06	25.00%		
保定	79.03%	81.86	32.54%	70.38	42.00%
廊坊	53.31%	70.07	31.00%		
张家口	82.86%	30.14	25.08%		
唐山	75.54%	80.01	23.46%	70.04	33.00%
承德	57.62%	38.12	24.87%		
石家庄	31.11%	95.15	32.12%	70.08	50.00%
秦皇岛	87.42%	48.01	24.53%		
沧州	40.70%	70.33	23.00%		
衡水	27.29%	107.90	11.55%	70.00	42.62%
邢台	67.46%	109.93	15.30%	70.09	46.00%
邯郸	28.78%	70.03	45.00%		

如果按照 PM_{2.5} 年均浓度接近 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的目标来考虑，与依据“大气十条”制定的减排措施相比，北京市的减排压力有所降低，而河北的减排压力则会上升。北京市的大气污染物减排率为 62.8%，天津的减排率为 45.8%，河北大部分城市的减排率明显上升。如果 PM_{2.5} 年均浓度达到 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，雾霾污染对公众健康的威胁可以有效减轻。实际上，2014 年 APEC 会议期间 PM_{2.5} 平均浓度在 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右，“APEC 蓝”就是这个期间空气质量的写照。

环境空气质量改善不能仅有 PM_{2.5} 年均浓度目标，还需要考虑 PM_{2.5} 日均浓度的频率分布，尤其是重污染天气的出现频率，这是公众可以直接感知、也是公众更加关注的环境质量指标。随着 PM_{2.5} 年均浓度下降，重污染天气出现频率也会降低，但重污染天气出现频率和 PM_{2.5} 年均浓度之间并非线性的对应关系。本报告假设风力等级频率分布维持在 2013 年水平，模拟了京津冀 10 个区域不同的年均浓度目标下 PM_{2.5} 日均浓度的发生频率（表 29），以期选择现实可行的雾霾治理目标。张家口、承德、秦皇岛的 PM_{2.5} 年均浓度较低，没有进行模拟分析。

表 29 京津冀地区不同年均 PM2.5 浓度目标下 PM2.5 日均浓度频率分布（单位：天）

模拟值 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	北京					天津					保定					廊坊					唐山				
	<35	35-75	75-150	150-200	>200	<35	35-75	75-150	150-200	>200	<35	35-75	75-150	150-200	>200	<35	35-75	75-150	150-200	>200	<35	35-75	75-150	150-200	>200
60	88	165	101	9	2	59	212	93	0	1	80	138	136	7	4	61	220	81	1	2	41	221	102	1	0
65	80	147	117	16	5	48	189	127	0	1	70	126	155	9	5	52	183	127	1	2	33	211	120	1	0
70	71	138	133	17	6	37	174	148	5	1	59	125	162	12	7	43	153	165	2	2	25	190	149	1	0
75	65	123	151	18	8	32	152	167	13	1	49	115	177	15	9	37	127	194	5	2	21	163	179	2	0
80	63	106	164	20	12	28	136	186	14	1	40	115	184	16	10	34	107	216	6	2	17	141	200	6	1
85	58	93	182	14	18	26	114	206	16	3	37	108	189	17	14	32	88	231	12	2	13	122	218	11	1
90	53	82	195	12	23	22	103	213	21	6	32	101	190	27	15	26	77	238	20	4	13	103	225	22	2
模拟值 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	石家庄					沧州					衡水					邢台					邯郸				
	<35	35-75	75-150	150-200	>200	<35	35-75	75-150	150-200	>200	<35	35-75	75-150	150-200	>200	<35	35-75	75-150	150-200	>200	<35	35-75	75-150	150-200	>200
60	115	123	121	5	1	53	245	67	0	0	104	155	100	4	2	138	119	77	27	4	116	135	105	7	2
65	101	123	131	8	2	46	215	103	1	0	89	154	115	5	2	129	116	87	29	4	95	145	112	10	3
70	91	118	143	9	4	40	177	145	3	0	78	144	136	4	3	122	109	96	32	6	81	149	122	9	4
75	88	102	151	19	5	37	149	172	7	0	61	132	164	5	3	110	101	110	34	10	66	148	129	18	4
80	80	96	156	27	6	36	125	191	13	0	48	120	186	8	3	92	102	120	38	13	49	152	137	21	6
85	75	93	157	31	9	25	118	204	17	1	38	116	193	14	4	78	97	135	41	14	41	136	156	24	8
90	69	81	162	43	10	12	108	222	20	3	28	112	194	26	5	66	98	139	48	14	36	126	158	37	8

表 29 显示，总体上看，PM_{2.5} 年均浓度目标越低，重污染天气的出现概率越低。然而，当 PM_{2.5} 年均浓度由 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 上升到 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时，PM_{2.5} 日均浓度变化主要体现在小于 35、35-75 区间的天数减少，75-150 区间的天数增加；在 150-200 和大于 200 区间的变化不大（表 30）。除北京在上两区间分别上升了 8 天和 4 天外，其他地区增加的天数均不超过 5 天，廊坊、衡水等地几乎没有变化。

表 30 PM_{2.5} 年均浓度 60-70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 目标下 PM_{2.5} 日均浓度频率差异（单位：天）

地区	<35	35-75	75-150	150-200	>200
北京	-17	-27	32	8	4
天津	-22	-38	55	5	0
保定	-21	-13	26	5	3
廊坊	-18	-67	84	1	0
张家口	0	0	0	0	0
唐山	-16	-31	47	0	0
承德	0	0	0	0	0
石家庄	-24	-5	22	4	3
秦皇岛	0	0	0	0	0
沧州	-13	-68	78	3	0
衡水	-26	-11	36	0	1
邢台	-16	-10	19	5	2
邯郸	-35	14	17	2	2

注：表中负值表示各个地区在所对应的 PM_{2.5} 日均浓度范围内减少的天数，正值表示增加的天数。

上述分析表明，PM_{2.5} 年均浓度目标从 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 到 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，重污染天气发生频率的下降有限，大气污染物的减排要求却增加不少。PM_{2.5} 年均浓度 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的政策目标，虽然距离年均 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、日均 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的环境空气质量二级标准仍有一定的差距，考虑到京津冀地区雾霾污染的现状、以及区域经济发展和民生保障的现实需要，本报告认为，将 PM_{2.5} 年均浓度接近 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 设定为京津冀地区雾霾污染治理的过渡目标，是较为现实的政策选择。PM_{2.5} 年均浓度达到 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 可以作为京津冀地区雾霾污染治理的中远期目标。作为雾霾污染治理的政策目标，更为重要的是减少重污染天气的发生频率，雾霾污染治理政策重点应转向重度雾霾发生频率较高的冬季静稳天气条件下的污染物排放控制。就年均浓度目标而言，PM_{2.5} 年均浓度 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 是京津冀地区雾霾污染治理的现实可行的政策目标。

如果按照 PM_{2.5} 年均浓度接近 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 设定雾霾污染治理目标，各个区域的污染物允许排放量和减排要求如表 31 所示。

表 31 京津冀地区达到 PM2.5 浓度 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 目标时的允许排放量

区域	二氧化硫 (吨)	氮氧化物 (吨)	烟粉尘 (吨)	污染物 减排率
北京	33185.50	93005.57	20976.05	62.83%
天津	99314.41	232446.95	39332.71	45.77%
保定	20984.37	23627.57	16646.46	79.03%
廊坊	24898.23	34908.72	20872.74	53.31%
张家口	15582.85	21470.00	12140.65	
唐山	85225.38	111488.54	157287.68	75.54%
承德	35156.73	28447.21	13383.50	57.62%
石家庄	109507.95	150716.87	50457.02	31.11%
秦皇岛	11036.40	17777.02	9891.44	
沧州	35429.89	54419.19	44324.43	40.70%
衡水	24698.81	26222.33	20340.17	27.29%
邢台	35934.06	41111.97	40285.84	67.46%
邯郸	144230.49	174951.16	192556.67	28.78%
京津冀合计	675185.07	1010593.11	638495.35	
平均减排率	57.46%	56.09%	54.46%	56.90%

八、雾霾治理政策的成本分析

1. 雾霾治理政策措施

(1) 大气国十条的减排政策

依据 2013 年发布的《大气污染防治行动计划》（“大气国十条”），京津冀地区制定了大气污染物减排行动计划，包括能源和产业结构调整、污染物排放的末端治理措施、移动源排放控制和挥发性有机物（VOC）减排等。具体的减排措施可归纳为表 32 所示。

表 32 依据大气“国十条”的京津冀地区大气污染物减排措施

政策类别	具体措施	涉及部门	能源/产品/污染物	削减量（万吨）			削减率（%）		
				北京	天津	河北	北京	天津	河北
调整能源和产业结构	削减煤炭消费量	电力供热	煤炭	900	678	680	71.60	18.02	6.11
		工业	煤炭	200	296	2966	47.17	16.53	19.06
		生活	煤炭	200	27	354	33.96	13.99	17.29
	压缩产能	非金属-水泥	水泥	515	108	3195	58.86	13.78	24.94
		金属冶炼-钢铁	钢铁		424	1749		19.96	9.69
增加天然气供应	工业+电力供热	天然气	84	93	162	171.40	547.10	648.00	
		生活	天然气	25.75	5	67	67.29	71.43	87.00
末端治理	电厂脱硫	电力供热	SO ₂	0	3.02	13.73	0.00	24.80	37.40
	电厂脱硝		NO _x	0.89	4.93	22.5	10.80	22.87	30.28
	电厂除尘升级		PM _{2.5}		0.45	1.3	0.00	23.17	24.62
	燃煤锅炉脱硫	工业	SO ₂	0.65	5.07	7.01	26.82	73.15	11.09
	燃煤锅炉除尘升级		PM _{2.5}	0.02	0.38	2.05	52.90	68.76	32.82
	钢铁行业脱硫	金属冶炼-钢铁	SO ₂		1.24	10.25	0.00	28.95	28.85
	钢铁行业除尘升级		PM _{2.5}		1.17	6.23	0.00	29.65	22.50
	水泥行业脱硝	非金属-水泥	NO _x	0.26	0.16	3.61	17.42	12.79	24.02
	水泥行业除尘升级		PM _{2.5}	0.59	0.31	3.17	30.50	28.00	22.90
	机动车减排	淘汰黄标车，提高燃油与机动车排放控制标准，发展新能源汽车	交通	NO _x	5.24	1.4	5.14	41.21	18.53
			VOCs	2.58	1.69	6.29	82.38	72.31	46.95
			PM _{2.5}	0.23	0.07	0.53	42.76	17.42	13.69
VOC 减排	重点行业综合治理 油气回收 推广低 VOC 涂料溶剂	石油、化工	VOCs	0.8	2.27	0.85	10.00	12.97	3.04
		石油	VOCs	4.53	3.63	3.39	80.00	64.31	36.22
		木材、造纸、印刷、玩具；化工；非金属；机械电子；其他工业	VOCs	2.53	1.7	3.63	13.32	14.17	7.26

注：参考《京津冀能否实现 2017 年 PM_{2.5} 改善目标？--基于“大气国十条”的京津冀地区细颗粒物污染防治政策效果评估》、《中国能源统计年鉴 2013》和排放清单计算得到。

(2) 雾霾治理的强化减排政策

对大气“国十条”执行的中期评估认为，依据大气“国十条”制定的减排措施难以确保实现大气“国十条”的PM2.5浓度目标。为了进一步加大雾霾污染防治的力度，提出了《京津冀大气污染防治强化措施（2016-2017）》。《京津冀大气污染防治强化措施（2016-2017）》的具体减排措施可归纳为表 33 所示。

表 33 依据《京津冀大气污染防治强化措施（2016-2017）》制定的大气污染物减排措施

政策类别	具体措施	涉及部门	能源/产品/污染物	削减量（万吨）			削减比（%）		
				北京	天津	河北	北京	天津	河北
调整结构	散煤清洁化替代	生活	煤炭	240	127	254	40.75	65.80	12.40
	锅炉窑炉改造	工业	煤炭	143			33.73		
	关停淘汰	污染型工业	相关产品				15.00	10.00	10.00
	限时停产	非金属	水泥、砖瓦窑、玻璃				10.00	10.00	10.00
		金属冶炼-钢铁	钢铁				10.00	10.00	10.00
末端治理	燃气锅炉低氮化改造	工业	NOX	1.00			18.94		
	煤电机组超低排放改造	电力	SO2		6.47	19.51		53.15	53.15
			NOX		8.18	28.20		37.95	37.95
			PM2.5		1.07	2.91		55.10	55.10
	钢铁行业环保治理改造	钢铁	SO2		0.25	2.05		5.79	5.77
PM2.5				0.23	1.25		5.93	9.00	
机动车减排	淘汰老旧车	交通	NOX	0.10			0.82		
			VOCs	0.05			1.65		
			PM2.5	0.005			0.86		
VOC 减排	重点行业综合治理	石油、化工	VOCs	1.86	5.29	1.98	23.30	30.22	7.07
	推广低VOC涂料溶剂	木材、造纸、印刷、玩具；化工；非金属；机械电子；其他工业	VOCs	1.69		1.82	8.88		3.63

注：参考《京津冀大气污染防治强化措施（2016-2017）》、《京津冀能否实现 2017 年 PM2.5 改善目标？--基于“大气国十条”的京津冀地区细颗粒物污染防治政策效果评估》、《中国能源统计年鉴 2013》和排放清单计算得到。

2. 雾霾治理政策的污染物减排效果

依据大气“国十条”和《京津冀大气污染防治强化措施（2016-2017）》制定的污染物减排措施，预期可以实现的与 2012 年污染物排放量相比的减排率如表 34 所示。从大气“国十条”的减排效果看，对于 2017 年浓度目标，SO2 的减排力度较大，但河北的 NOx 和雾霾污染的前体物质之一——一次 PM2.5 的减排力度不足，VOC

的减排力度普遍不足；对于 2020 年浓度目标，几乎所有污染物的减排力度均不足。在大气“国十条”的基础上，增加了京津冀大气污染防治强化措施（2016-2017）后，各种污染物的减排力度进一步加大，基本上可以达到 2017 年浓度目标所需的减排要求，并接近 2020 年浓度目标所需的减排要求。

表 34 雾霾治理政策可实现的与 2012 年相比的污染物减排效果比较（单位：%）

年份	污染物	实现浓度目标的减排率	国十条				国十条+强化措施			
			北京	天津	河北	京津冀	北京	天津	河北	京津冀
2017	SO ₂	40.00	42.11	42.36	43.52	43.28	51.93	63.77	58.27	58.57
	NO _x	40.00	39.66	41.06	24.74	28.65	42.55	56.69	35.58	39.34
	一次 PM _{2.5}	35.00	30.65	36.25	28.57	29.52	36.18	54.59	35.83	37.81
	VOCs	30.00	16.42	16.62	6.68	10.14	34.84	36.76	11.43	20.01
2020	SO ₂	64.00	50.89	53.30	55.21	54.69	60.31	73.75	68.73	68.84
	NO _x	64.00	49.88	57.03	38.94	42.69	56.71	68.42	51.33	54.35
	一次 PM _{2.5}	56.00	37.80	49.10	44.84	44.78	48.30	70.30	52.04	53.68
	VOCs	48.00	23.90	23.91	19.34	20.94	53.37	52.97	26.69	35.98

注：2017 年的浓度目标所需减排率参考《京津冀能否实现 2017 年 PM_{2.5} 改善目标？--基于“大气国十条”的京津冀地区细颗粒物污染防治政策效果评估》的研究，2020 年的浓度目标所需减排率参考《京津冀协同发展生态环境保护规划》中浓度降低 40% 的目标换算。

3. 雾霾治理政策的经济成本

本报告基于多区域 CGE 模型，构建了京津冀地区能源-经济-环境政策模型，模拟了雾霾治理政策带来的经济影响。表 35 显示，依据大气“国十条”的雾霾治理政策将导致 2017 年京津冀地区的 GDP 总量损失 4.80%，2020 年的 GDP 损失 10.25%。其中，河北的 GDP 损失率高于北京和天津，2017 年和 2020 年的 GDP 损失分别为 5.10% 和 11.7%。导致 GDP 损失的原因主要是能源和产业结构调整，污染物排放的末端治理、移动源排放控制和 VOC 减排带来的经济损失程度较小。

为了确保雾霾治理目标的实现，在大气“国十条”的基础上，进一步实施京津冀大气污染防治强化措施（2016-2017），在提高大气污染物减排效果的同时，雾霾治理的经济成本也将增大。表 36 显示，依据大气“国十条”和京津冀大气污染防治强化措施制定的雾霾治理政策将导致 2017 年京津冀地区的 GDP 总量损失 8.45%，2020 年的 GDP 损失 16.05%。此时，北京的 GDP 损失上升为最大，2017 年和 2020 年的 GDP 损失分别为 9.70% 和 18.17%；河北的 GDP 损失率仍然高于天津，2017 年和 2020 年的 GDP 损失分别为 8.52% 和 17.03%。导致 GDP 损失的原因仍然主要

是能源和产业结构调整，污染物排放的末端治理、移动源排放控制和 VOC 减排带来的经济损失程度较小。

表 35 依据大气“国十条”的京津冀地区污染物减排措施的经济成本

区域	减排措施	GDP 损失（亿元）		GDP 损失率(%)		GDP 损失占比(%)	
		2017	2020	2017	2020	2017	2020
北京	合计	749.14	1902.64	4.62	9.76	100.00	100.00
	结构调整	691.64	1828.79	4.27	9.38	92.32	96.12
	末端治理	0.09	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
	机动车减排	44.15	57.13	0.27	0.29	5.89	3.00
	VOC 减排	13.26	16.72	0.08	0.09	1.77	0.88
天津	合计	635.68	1259.88	4.12	6.69	100.00	100.00
	结构调整	544.68	1145.52	3.53	6.08	85.68	90.92
	末端治理	47.58	61.07	0.31	0.32	7.48	4.85
	机动车减排	14.68	20.66	0.10	0.11	2.31	1.64
	VOC 减排	28.74	32.63	0.19	0.17	4.52	2.59
河北	合计	2200.70	6156.63	5.10	11.70	100.00	100.00
	结构调整	1914.52	5783.15	4.44	10.99	87.00	93.93
	末端治理	189.39	251.51	0.44	0.48	8.61	4.09
	机动车减排	46.92	57.48	0.11	0.11	2.13	0.93
	VOC 减排	49.87	64.49	0.12	0.12	2.27	1.05
京津冀	合计	3585.52	9319.15	4.80	10.25	100.00	100.00
	结构调整	3150.84	8757.46	4.21	9.63	87.88	93.97
	末端治理	237.06	312.58	0.32	0.34	6.61	3.35
	机动车减排	105.75	135.27	0.14	0.15	2.95	1.45
	VOC 减排	91.87	113.84	0.12	0.13	2.56	1.22

表 36 依据大气“国十条”和强化措施制定的污染物减排措施的经济成本

区域	减排措施	GDP 损失（亿元）		GDP 损失率(%)		GDP 损失占比(%)	
		2017	2020	2017	2020	2017	2020
北京	合计	1573.36	3543.53	9.70	18.17	100.00	100.00
	结构调整	1490.73	3436.27	9.19	17.62	94.75	96.97
	末端治理	14.75	19.95	0.09	0.10	0.94	0.56
	机动车减排	54.20	70.04	0.33	0.36	3.44	1.98
	VOC 减排	13.68	17.27	0.08	0.09	0.87	0.49
天津	合计	1068.33	2092.37	6.93	11.11	100.00	100.00
	结构调整	970.66	1969.92	6.30	10.46	90.86	94.15
	末端治理	50.94	65.34	0.33	0.35	4.77	3.12
	机动车减排	14.92	21.04	0.10	0.11	1.40	1.01
	VOC 减排	31.81	36.07	0.21	0.19	2.98	1.72
河北	合计	3673.65	8959.08	8.52	17.03	100.00	100.00

	结构调整	3372.36	8565.11	7.82	16.28	91.80	95.60
	末端治理	204.30	271.73	0.47	0.52	5.56	3.03
	机动车减排	46.70	57.23	0.11	0.11	1.27	0.64
	VOC 减排	50.29	65.01	0.12	0.12	1.37	0.73
	合计	6315.34	14594.98	8.45	16.05	100.00	100.00
京津冀	结构调整	5833.75	13971.30	7.80	15.36	92.37	95.73
	末端治理	269.99	357.02	0.36	0.39	4.28	2.45
	机动车减排	115.82	148.31	0.15	0.16	1.83	1.02
	VOC 减排	95.78	118.35	0.13	0.13	1.52	0.81

九、结语

我国的环境政策走过了从重视污染物减排到重视环境质量的发展历程。在重视污染物减排目标的环境政策下，环境质量目标存在不确定性，特别是当环境负荷超过环境容量时，即使环境负荷有所减轻，环境质量目标可能仍然难以达成。在重视环境质量目标的环境政策下，污染物减排的要求又存在不确定性，需要在科学把握污染物排放量和环境质量的关系，在合理确定环境质量目标的前提下界定污染物允许排放量，进而制定减排计划。

“大气国十条”明确提出了 PM_{2.5} 浓度目标，也确定了污染物减排行动计划，这在我国的环境政策发展史上是一个重要的进步，但对于 PM_{2.5} 浓度目标与污染物减排行动计划之间的关系却缺乏足够的科学论证，既定的污染物减排行动计划能否实现 PM_{2.5} 浓度目标，存在着不确定性。本报告基于大气污染物排放量、气象条件和 PM_{2.5} 浓度之间关系的数据模型，对依据“大气国十条”制定的污染物减排行动计划的政策效果和既定的浓度目标的达成可能性进行了科学评估，对雾霾治理政策的经济成本进行了分析，并提出了关于京津冀地区雾霾治理政策目标的建议。本报告的意义在于基于大数据技术和统计分析方法，厘清污染物排放量和环境质量的客观关系，依据不同的环境质量目标，确定相应的污染物允许排放量，从而制定相应的污染物减排行动计划。

本报告的主要结论可以归纳为以下几点：

(1) 大气“国十条”实施以来，2013-2016 年京津冀地区 PM_{2.5} 年均浓度出现了明显的下降，2015 年的降幅尤为显著。但 2015 年 PM_{2.5} 年均浓度的下降，“天帮忙”的因素起到了很大的作用，“人努力”的效果主要体现在风速偏大的天气，对于低风速的静稳天气下 PM_{2.5} 浓度的下降，“人努力”的效果尚不显著。

(2) 如果气象条件没有发生显著变化，对于京津冀的大部分区域来说，即使是在周边区域同时减排的前提下，依据“大气国十条”制定的污染物减排行动计划难以实现“大气国十条”要求的浓度目标（天津和河北的 PM_{2.5} 年均浓度下降 25%，北京的 PM_{2.5} 年均浓度达到 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）；如果周边区域不同时减排的话，几乎所有区域都难以实现“大气国十条”要求的浓度目标。

(3) 如果要想实现“大气国十条”要求的浓度目标，在气象条件没有发生显著变

化的条件下,天津和河北需要进一步加大污染物减排力度。也就是说,如果没有“天帮忙”,就需要付出更多的“人努力”。石家庄、保定、唐山、邯郸、邢台、衡水等地不能满足于 PM_{2.5} 年均浓度下降 25% 的目标,这些区域 PM_{2.5} 年均浓度即使下降了 25%, 仍然超过 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 甚至 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 应当减少更多的污染物排放量,把 PM_{2.5} 年均浓度降得更低。

(4) 北京市的减排行动计划拟减少污染物排放量 63%, 这是一个相当艰巨的减排任务。即便能够实现,北京市也只能使得 PM_{2.5} 年均浓度下降到 68.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 离 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的既定浓度目标仍有差距。如果要把 PM_{2.5} 年均浓度从 66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 降到 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 北京市需要把污染物减排率从 63% 提高到 78%, 雾霾治理的边际成本将越来越高。北京市可以考虑调整雾霾治理的政策目标。

(5) 随着 PM_{2.5} 年均浓度降低,重污染天气发生频率也将相应降低,但两者并非线性关系。降低 PM_{2.5} 年均浓度仍然可以作为雾霾治理的政策目标,但雾霾治理的政策重点应转向如何减少重污染天气的发生频率,尤其是冬季静稳天气条件下的污染物排放控制。本报告建议把 PM_{2.5} 年均浓度 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 作为京津冀地区雾霾治理的过渡目标。如果以 PM_{2.5} 年均浓度 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 作为过渡目标,京津冀地区需要减少约 57% 的大气污染物排放量。PM_{2.5} 年均浓度达到 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 可以作为京津冀地区雾霾治理的中远期目标。

(6) 雾霾治理政策的实施必将给京津冀地区经济增长带来一定的损失, GDP 损失程度将随着污染物减排力度加大而增大。大气“国十条”和京津冀大气污染防治强化措施的实施导致的京津冀地区 GDP 总量损失 2017 年为 8.45%, 2020 年为 16.05%。如果考虑雾霾污染导致的健康损失,也许雾霾污染治理的真实经济成本并没有那么大。地方政府必须正视雾霾治理给区域经济增长和民生保障带来的短期冲击,多管齐下,尽量减轻雾霾治理给区域经济增长和民生保障带来的负面影响。

(7) 由于污染物减排行动涉及到区域经济发展和民生保障,雾霾治理不可能一蹴而就,治理大气污染将是一个长期过程。能源和产业结构调整是导致 GDP 损失的主要原因,但产业转型是京津冀地区可持续发展的必经之路,必须坚定不移地推进产业转型,降低资源环境负荷,控制污染物排放量。

为了使得雾霾治理的政策目标更加科学、更具可操作性,应该将浓度目标转换为排放量管理目标,在科学确定环境容量的基础上,制定现实可行的污染物减排计

划，使得 PM2.5 浓度目标的实现具有科学的保障。在推进产业转型，减少污染物排放量的同时，还应积极探索污染物减排措施的科学化和精细化，切实控制和减少冬季静稳天气条件下的污染物排放。

参考文献

- Air Division U.S., 2010. Technical Support Document for the Proposed Action on the South Coast 2007 AQMP for PM_{2.5} and the South Coast Portions of the Revised 2007 State Strategy. U.S. EPA. U.S. Region 9, California.
- Almeida S.M., Pio C.A., Freitas M.C., Reis M.A., Trancoso M.A.. 2006. Approaching PM_{2.5} and PM_{2.5}-10 source apportionment by mass balance analysis, principal component analysis and particle size distribution. *Science of the Total Environment*, 368, 663-674.
- Tucker G.W., 2000. An overview of PM_{2.5} sources and control strategies. *Fuel Processing Technology*, 65-66, 379-392.
- Vallius M., Janssen N.A.H., Heinrichd J., Hoek G., Ruuskanen J., Cyrus,R. Van Grieken J., de Hartog J.J., Kreyling W.G., Pekkanen J., 2005. Sources and elemental composition of ambient PM_{2.5} in three European cities. *Science of the Total Environment*. 337, 147- 162.
- Wang G., Cheng S.H., Li J.B., Lang J.L., Wen, W., Yang X.W. and Tian L.. 2015. Source apportionment and seasonal variation of PM_{2.5} carbonaceous aerosol in the Beijing-Tianjin-Hebei Region of China. *Environmental Monitoring Assessment*, 187:143 DOI 10.1007/s10661-015-4288-x
- Xue, W.B., Wang, J.N., Niu, H., Yang, J.T., Han, B.P., Lei, Y., Chen, H.L., Jiang, C.L., 2014. Assessment of air quality improvement effect under the National Total Emission Control Program during the Twelfth National Five-Year Plan in China. *Atmospheric Environment*, 68, 74-81.
- Zhao B., Wang S.X., Wang J.D, Joshua S. Fu, Liu T.H., Xu J.Y., Fu X., Hao J.M.. 2013. Impact of national NO_x and SO₂ control policies on particulate matter pollution in China. *Atmospheric Environment*, 77, 453-463.
- Zhou, Y., Cheng, S.Y., Li, J.B., Lang, J.L., Li, L., Chen, D.S., 2012. A new statistical modeling and optimization framework for establishing high-resolution PM₁₀ emission inventory II. Integrated air quality simulation and optimization for performance improvement. *Atmospheric Environment*, 60, 623-631.
- 关大博, 刘竹等.2014. 雾霾真相—京津冀地区 PM_{2.5} 污染解析及减排策略研究. 中国环境出版社,北京, ISBN/ISSN : 978-7-5111-1656-7
- 国务院. 2013.大气污染防治行动计划,国发(2013)37号.
- 环境保护部.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][04号]. <http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201309/W020130918412886411956.pdf>, Nov. 4.
- 王跃思,姚利,刘子锐,吉东生,王莉莉,张军科, 2013. 京津冀大气霾污染及控制策略思考. 中国科学院院刊, 28(3), 353-363 DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2013.03.009.
- 薛文博,付飞,王金南,贺克斌,雷宇,杨金田,王书肖,韩宝平. 2014. 基于全国城市 PM_{2.5} 达标约束的大气环境容量模拟. *中国环境科学*, 10, 2490-2496.
- 张小曳,张养梅,曹国良,2012. 北京 PM₁ 中的化学组成及其控制对策思考. *应用气象学报*, 23(3), 257-264.
- 中国清洁空气联盟. 2014. 京津冀能否实现 2017 年 PM_{2.5} 改善目标? --基于“大气十条”的京津冀地区细颗粒物污染防治政策效果评估. 北京.