江苏、湖北、陕西、四川
四省大气污染防治政策
评估报告

2016 年 6 月

GREENPEACE
绿色和平

作者

姜克隽/国家发展改革委员会能源研究所

松岡譲/京都大学

刘嘉/人木咨询公司

贺晨旻/北京大学

倉田学児/京都大学

高霁/中国农业科学研究院

庄幸/国家发展改革委员会能源研究所

余碧莹/京都大学

许星晗/京都大学

橋本知明/京都大学

项目协调员

孟琦 关司琪 肖湘 董连赛 张凯 /绿色和平

目录

摘要 3
缩略词及专有名词对照表 6
1.前言 7
2.研究背景 8
2.1 国家大气污染防治现有政策 8
2.2 四省大气污染防治现有政策 8
3.研究方法 12
3.1 研究框架 12
3.2 能源和大气污染物排放情景模型及其在本研究中的应用 12
3.3 空气质量模型 13
3.4 大气污染物及其排放源 15
3.5 研究方法的有效性校验 16
3.6 研究局限性 18
4.污染物排放清单的构建以及基准年污染物排放数据 20
4.1 污染物排放清单的构建 20
4.2 2012 年目标四省主要大气污染物排放数据 22
5.《大气污染防治行动计划》时期政策效果评估 24
5.1 目标四省大气污染防治政策效果综述 24
5.2 目标四省大气污染防治政策效果分述 26
5.2.1 江苏省 26
5.2.2 湖北省 31
5.2.3 陕西省 34
5.2.4 四川省 38
6. 后《大气污染防治行动计划》时期减排效果展望 41
6.1 情景假设 41
6.2 后《大气污染防治行动计划》时期四省主要大气污染物下降情况 41
6.3 后《大气污染防治行动计划》时期的政策建议 50
7.结论 52
8.附录 52
附表一：四省大气污染防治政策及相应的量化结果 54
附表二：四省现有大气污染防治政策情景下 $PM_{2.5}$ 一次源及二次源前体物排放的模拟研究结果 62
附图一 2012 年研究区域内逐月 $PM_{2.5}$ 浓度平均值空间分布情况 64
附图二 2017 年研究区域逐月 $PM_{2.5}$ 浓度平均值空间分布的模拟情况 65
9.参考文献 66

摘要

研究背景及目的

近年来，我国大气污染问题受到社会各界的广泛关注。2013 年 9 月，国务院发布《大气污染防治行动计划》，提出了各地 2017 年的颗粒物浓度降低目标。随后，各地陆续发布了相应的行动方案和具体政策措施，提出了各自的大气污染治理目标。这些政策和措施在《大气污染防治行动计划》期间和之后的实施效果，是亟需研究和探讨的问题，以便国家和地方政府在政策措施方面做出相应调整，确保空气质量改善目标得以实现。

当前关于各地大气污染的相关研究很多，部分涵盖了源解析和政策评估等内容，但多集中于《大气污染防治行动计划》提出的京津冀、长三角和珠三角等大气污染防治重点区域，对其他地处中西部且雾霾频发的地区的关注相对较少。

为此，本研究选取了江苏省、湖北省、陕西省和四川省进行分析。除了江苏省处于长三角地区以外，其余三省皆不属于《大气污染防治行动计划》中的重点防治区域。这四个省份分布在我国不同区域，具有不同的经济和产业发展特点，且近年来 $PM_{2.5}$ 污染情况不容乐观。

研究方法学简述

为分析政策措施和行动方案的效果，本研究主要采用国家发展与改革委员会能源研究所的能源和大气污染物排放情景模型（Integrate Policy Assessment Model for China，以下简称 IPAC 模型）和日本京都大学开发的 Regional Emission inventory in Asia version 2.1 这两个模型工具。

研究首先利用 IPAC 模型得出基准年（2012 年）和 2013 年的排放清单，再将目标省份的定量化治霾相关政策输入模型，在基准年排放的基础上确定目标年（2017 和 2020 年）的排放清单，之后结合气象场数据，分析包含目标省份的研究目标区域在目标年（2017 年）的空气质量变化情况，并在前几项工作的基础上，评估目标省份的雾霾治理相关政策。

研究主要结论

- 江苏、湖北、陕西、四川为控制 $PM_{2.5}$ 污染均制订了有力的行动方案和具体措施。根据模型预测，在这些政策情景下，四省 2017 年的 $PM_{2.5}$ 年均浓度相比 2012 年[1]分别下降 15.0%、14.2%、8.5%和 24.3%，PM_{10} 浓度相比 2012 年分别下降 12.4%、12.9%、6.9%和 12.1%。从政策效果角度而言，江苏省存在无法达到其设定的 2017 年 $PM_{2.5}$ 浓度下降 20%的减排目标的风险；陕西省相比其他三省，大气污染防治政策的成果较为不足。且四省的下降幅度均未达到京津冀地区设定的 25%的下降目标。

  总体而言，道路扬尘的排放量在 2012-2017 年和 2017-2020 年两个阶段持续较大幅度上升；秸秆焚烧是主要的一次排放源，但其下降幅度

[1] 2012 年的省平均数据为模型模拟值，并在政策评价中作为基准数据。

也最大。二氧化硫和氮氧化物排放量均有下降，后者的下降幅度大于前者。四省农业导致的氨排放、化工行业的非甲烷挥发性有机物排放以及燃油带来的非甲烷碳氢化合物的排放均呈小幅度上升趋势，其中燃油带来的非甲烷碳氢化合物排放上升比例相对较高。

- **江苏省主要污染物排放量变化情况及政策建议**

  在现有治霾相关政策情景下，相较于2012年，江苏省2017年$PM_{2.5}$一次源排放下降将21.4%，燃煤导致的二氧化硫和氮氧化物排放量分别下降10.5%和26.0 %。由于燃煤电厂的超低排放改造计划的实施，来自电力行业的二氧化硫和氮氧化物减排效果显著，将分别下降17.9%和32.5%。但来自非电力能源活动的二氧化硫排放量将仅下降2.1%，成为二氧化硫的主要排放源。现有政策对化工行业排放的非甲烷挥发性有机物控制不力，2017年非甲烷挥发性有机物排放量相较于2012年不降反升，成为江苏省最主要的大气污染物。

  在现有治霾政策延续的情景下，相较于2017年，江苏省2020年$PM_{2.5}$一次源的排放量将下降13.0%；来自电力行业的二氧化硫和氮氧化物排放量将分别下降27.6%和18.3%。来自非电力能源活动的二氧化硫排放量将仅下降5.8%。化工行业排放的非甲烷挥发性有机物与2017年持平，依然是江苏省最主要的大气污染物。

  本研究建议江苏省压减煤炭消费、特别是针对非电力能源活动，如压减散煤使用，加强针对小型燃煤设施的控制；并更加重视对化工行业的非甲烷挥发性有机物排放的控制。

- **湖北省主要污染物排放量变化情况及政策建议**

  在现有治霾相关政策情景下，相较于2012年，湖北省2017年$PM_{2.5}$一次源下降26.3%，燃煤导致的二氧化硫和氮氧化物将分别下降8.1%和30.0%。由于湖北省以水电为主，用煤多集中于如散烧煤、工业锅炉等非电力能源活动领域，其二氧化硫排放标准较低，减排政策力度也宽松许多，因此非电力能源活动排放的二氧化硫成为湖北省最主要的大气污染排放源。

  在现有治霾政策延续的情景下，相较于2017年，湖北省2020年$PM_{2.5}$一次源的排放量将下降19.5%；来自电力行业燃煤的二氧化硫排放下降35.4%，而非电力能源活动燃煤排放的二氧化硫仅下降9.7%，依然是湖北省最主要的大气污染物。

  鉴于湖北省的排放清单，本研究建议湖北省轻化能源结构，减少非电力能源活动的煤炭消费量；同时重点加强工业节能减排方面的政策落实。

- **陕西省主要污染物排放量变化情况及政策建议**

  在现有治霾相关政策情景下，相较于2012年， 2017年陕西省的$PM_{2.5}$一次源将下降19.3%。燃煤导致的二氧化硫和氮氧化物的排放量将分别下降19.2%和35.0%，前者将成为陕西省最主要的大气污染排放物。

在现有治霾政策延续的情景下，相较于 2017 年，陕西省 2020 年 $PM_{2.5}$ 一次源的排放量将下降 14.2%；燃煤产生的二氧化硫依然是该省最主要的大气污染排放物。

陕西是煤炭生产和消费大省， 根据其排放清单，本研究建议其以压减和控制煤炭消费总量以及加强散煤燃烧的控制等政策为主。

- **四川省主要污染物排放量变化情况及政策建议**

  在现有治霾相关政策情景下，相较于 2012 年，2017 年四川省的 $PM_{2.5}$ 一次源排放量将下降 24.6%，燃煤导致的二氧化硫和氮氧化物的排放量将分别下降 21.0%和 22.0%。非电力能源活动燃煤产生的二氧化硫占二氧化硫总排放量的 85.5%，成为四川省最主要大气污染源。农业氨排放将上升 8.7%。

  在现有治霾政策延续的情景下，相较于 2017 年，四川省 2020 年 $PM_{2.5}$ 一次源的排放量将下降 13.1%；来自非电力能源活动燃煤的二氧化硫在二氧化硫排放总量中的占比进一步上升，达到 87.4%。而农业氨排放将上升 5.6%，成为四川省最主要的大气污染物排放源。

  四川作为农业大省，当前的治霾相关政策没有包含对农业氨的排放控制。本研究建议四川省出台控制农业排放源的配套治霾政策，尤其是加强对农业氨的排放控制；并进一步加大对燃煤小锅炉的整治和散煤清洁化治理，并合理控制煤炭消费总量。

更多政策建议：

- 考虑到目前《大气污染防治行动计划》仅对京津冀、长三角和珠三角地区提出了 $PM_{2.5}$ 下降目标。但同样面临 $PM_{2.5}$ 污染问题的湖北省、陕西省和四川省目前都没有设定省级的 $PM_{2.5}$ 改善目标，缺少量化的考核目标，不利于各省在 2017 年后出台进一步的治霾政策。因此建议三省在《大气污染防治行动计划》中期评估后，尽快出台以 2015 年为基准的 2020 年 $PM_{2.5}$ 浓度下降目标。

- 当前雾霾治理取得的效果部分由于煤炭相关的高耗能、高污染行业发展放缓，如果未来煤炭消费量回升，空气质量可能再度恶化。本研究建议四省应把调整能源结构、压减煤炭消费量作为长期的大气污染防治的核心政策，尽快出台明确的煤炭总量控制目标。

- 多数治霾政策在《大气污染防治行动计划》实行初期对削减大气污染物的效果十分明显，但随着大气污染防治进入“攻坚期”，若想实现同样的减排效果或达成更积极的减排目标，则需要更严格、细致的政策以及更高的执行力度。 2017 年后的大气污染防治计划需要进一步的升级措施来确保 2030 年或之前全国的 $PM_{2.5}$ 浓度达到国家标准。

- 江苏省化工行业排放的非甲烷挥发性有机物、湖北省的非电力能源活动排放的二氧化硫、陕西省的燃煤导致的二氧化硫、四川省的农业氨是 2020 年后四省的主要大气污染物，建议各个省份尽快制定本省的排放源清单，并据此有的放矢地出台进一步的大气污染防治政策。

缩略词及专有名词对照表

- **IPAC**：Integrate Policy Assessment Model for China，能源和大气污染物排放情景模型
- **REAS**：京都大学的 Regional Emission inventory in Asia version 2.1 模型
- **$PM_{2.5}$**：细颗粒物
- **PM_{10}**：可吸入颗粒物
- **SO_2**：二氧化硫
- **NO_x**：氮氧化物
- **VOCs**：挥发性有机物
- **HC**：碳氢化合物
- **NH_3**：氨
- **NMVOC**：非甲烷挥发性有机物
- **NMHC**：非甲烷碳氢化合物
- **一次源排放**：指人为造成的 $PM_{2.5}$ 一次颗粒物排放。主要来自燃烧过程，如化石燃料和生物质燃烧以及垃圾焚烧等产生的黑炭（BC 或 EC）以及一次有机碳等。其它排放来源还包括道路扬尘、建筑施工扬尘、工业粉尘、厨房及户外商业活动等产生的烟尘等。
- **二次源排放前体物**：指人为造成的 $PM_{2.5}$ 二次颗粒物的前体排放物，主要包括二氧化硫、氮氧化物、农业排放为主的氨、挥发性有机物和碳氢化合物等。这些污染气体被大气氧化剂（O_3 和 ·OH 等）氧化，发生光化学反应，将生成包括硫酸盐颗粒物、硝酸盐颗粒物、铵盐颗粒物、臭氧、二次有机颗粒物（过氧乙酰硝酸酯、甲醛和酮类）等污染物。
- **排放清单**：指各种排放源在一定的时间跨度和空间区域内向大气中排放的大气污染物的量的集合。

1. 前言

近年来，我国大气污染问题受到社会各界的广泛关注。为了回应各方关切，切实推动空气质量的改善，2013 年 9 月，国务院发布《大气污染防治行动计划》(即《大气十条》)，提出各地 2017 年的颗粒物浓度降低目标。随后，各地陆续发布了相应的行动方案和具体政策措施，提出了各自的大气污染治理目标。这些政策和措施在《大气污染防治行动计划》期间和之后的实施效果，是亟需研究和探讨的问题，以便国家和地方政府在政策措施方面做出相应调整，确保空气质量改善目标。

当前关于各地大气污染的研究很多，部分涵盖了源解析和政策评估等内容，但多集中于《大气污染防治行动计划》提出的京津冀、长三角和珠三角等大气污染防治重点区域，对其他地处中西部且雾霾频发的地区的关注相对较少。

为此，本研究选取了江苏省、湖北省、陕西省和四川省进行分析。除了江苏省处于长三角地区以外，其余三省皆不属于《大气污染防治行动计划》中的重点防治区域。这四个省份（以下简称目标四省）分布在我国不同区域，具有不同的经济和产业发展特点。另外，根据绿色和平发布的自 2013 年至 2016 年第一季度全国城市 $PM_{2.5}$ 年均浓度排名，目标四省的 $PM_{2.5}$ 污染情况不容乐观。2015 年，目标四省江苏、湖北、陕西、四川的平均 $PM_{2.5}$ 浓度分别排在 31 个省份的第 7、6、16 和 18 位（浓度由高到低排列），平均浓度分别为 56.6 微克/立方米、65.9 微克/立方米、52.0 微克/立方米和 46.7 微克/立方米[2]。2016 年第一季度，目标四省的平均 $PM_{2.5}$ 浓度分别排在 31 个省份的 8、3、6 和 14 位，平均浓度分别为 71.8 微克/立方米、80.3 微克/立方米、74.5 微克/立方米和 63.6 微克/立方米。与 2015 年第一季度相比，陕西省的 $PM_{2.5}$ 浓度有小幅上升。

在此背景下，本研究主要基于国家发展和改革委员会能源研究所的能源和大气污染物排放情景模型以及日本京都大学的 Regional Emission inventory in Asia version 2.1 模型，建立目标四省的基准年（2012 年）和 2013 年的污染物排放清单，通过将四省的政策措施定量化并输入模型，得出目标年（2017 年和 2020 年）的排放清单，结合气象场数据分析 2017 年的污染物排放和空气质量变化情况以及 2020 年的污染物排放情况，并以此为依据评估政策措施对空气质量改善目标的作用，从而为《大气污染防治行动计划》期间及之后的四省治霾政策提出相应的建议。

[2] 绿色和平发布的 2015 年省市雾霾浓度排名，请点击链接：http://www.greenpeace.org.cn/pm25-city-ranking-2015/。

2.研究背景

为了改善大气质量，各地陆续开展了相关的科学研究工作，中央及地方政府也制定了一系列的行动计划和政策举措，并设定了具体目标。本研究考察了自 2013 年至 2015 年 6 月发布的国家和目标四省的空气质量改善相关政策措施。

2.1 国家大气污染防治现有政策

我国 2012 年新修订的 GB3095—2012《环境空气质量标准》新增 $PM_{2.5}$作为监测指标，制定了我国空气质量标准中 $PM_{2.5}$的标准，并提高了 PM_{10}等污染物的限值要求。

2013 年，国务院发布《大气污染防治行动计划》,提出到 2017 年，全国地级及以上城市 PM_{10}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 $PM_{2.5}$浓度分别下降 25%、20%、15%左右。

2014 年环保部与全国 31 个省（区、市）签署了《大气污染防治目标责任书》。同年 7 月，环境保护部和国家发展与改革委员会等六部委联合印发了《大气污染防治行动计划实施情况考核办法（试行）实施细则》，进一步明确了空气质量改善的考核要求。为贯彻落实该《大气污染防治行动计划》，全国各地纷纷出台相应大气污染防治方案，并以前所未有的力度开展大气污染防治工作。

经十二届全国人大常委会第十六次会议修订通过的《中华人民共和国大气污染防治法》（以下简称《大气污染防治法》）已于 2016 年 1 月 1 日起施行。新修订的《大气污染防治法》主要是以改善大气环境质量为目标，强化地方政府的责任，加强对地方政府的监督，对控制燃煤和机动车排放造成的大气污染、重点区域联合防治和重污染天气应对等都做出了具体的规定。《大气污染防治法》将考核的对象从全国重点城市扩展到省、自治区、直辖市，逐级细化目标、落实责任，使得地方考核办法的出台有了法律依据，并将大气污染防治的责任落实到地方政府主要负责领导身上，使政府真正担起治理大气污染的责任。此外，新的《大气污染防治法》还加大了对造成大气污染事故的地方政府和相应责任人的处罚力度。

2.2 四省大气污染防治现有政策

目前，本研究所涉及的政策和行动方案（自 2013 年至 2015 年 6 月）参见表 2-1。部分城市（尤其是省会城市）在省级大气污染防治行动政策框架下也提出了地方实施方案。尽管这些市级政策提出的地方空气质量改善目标与省级政策文件中的目标基本一致，所列出的实施细则仍在省级政策划定的范围内，本研究也仍将其与省级政策同时纳入模型参数设置的考虑范围。

表 2-1 环保部及目标四省空气质量改善相关政策和行动方案

单位	政策和行动方案	发布时间
环保部	建设项目主要污染物排放总量指标审核及管理暂行办法	2014 年 12 月
江苏	江苏省大气污染防治行动计划实施方案	2014 年 1 月
	江苏省控制能源消费总量工作方案的通知	2014 年 9 月
	江苏省煤炭消费总量控制和目标责任管理实施方案	2014 年 9 月
	江苏省 2014—2015 年节能减排低碳发展行动实施方案	2014 年 9 月
	江苏省大气污染防治条例	2015 年 2 月
湖北	关于贯彻落实国务院大气污染防治行动计划的实施意见	2014 年 1 月
	省人民政府关于贯彻落实国务院大气污染防治行动计划的实施意见	2014 年 1 月
	武汉市改善空气质量行动计划（2013-2017 年）	2014 年 02 月
	关于做好 2014 年大气污染防治有关工作的通知	2014 年 3 月
	湖北省大气污染防治行动计划实施情况考核办法	2014 年 11 月
	湖北省机动车排气污染防治管理办法[3]	2015 年
四川	四川省大气污染防治目标责任书	2013 年 12 月
	四川省灰霾污染防治实施方案	2013 年 6 月
	四川省大气污染防治行动计划实施细则	2014 年 9 月
	四川省大气污染防治行动计划实施细则 2014 年度实施计划	2014 年 9 月
	四川省大气污染防治行动计划实施细则 2015 年度实施计划	2015 年 3 月
	四川省灰霾污染防治办法	2015 年 2 月
陕西	“气化陕西”二期方案	2013 年
	陕西省“治污降霾•保卫蓝天”五年行动计划（2013-2017 年）	2013 年 12 月
	陕西省能源行业加强大气污染防治工作实施方案	2014 年 7 月
	陕西省 2014 年度主要污染物总量减排实施方案	2014 年 7 月
	关于在关中地区执行大气污染物特别排放限值的公告	2014 年 9 月
	西安市治污减霾工作实施方案（2015 年）	2015 年 4 月
	陕西省 2015 年度主要污染物总量减排实施方案	2015 年 5 月
	陕西省大气污染重点防治区域联动机制改革方案	2015 年 4 月
	关中地区 2015-2017 年燃煤消费减量替代工作实施方案	2015 年 6 月

[3] 截至 2015 年 6 月该项政策措施尚未有公开发布的正式文件。

本研究对比归纳了相关政策和行动方案，见下表。

表 2-2 四省政策和行动方案对比

类别	政策	江苏	湖北	陕西	四川
改善目标	$PM_{2.5}$	*			
	PM_{10}		*	*	*
产业结构		*	*	*	*
能源行业	能源总量控制	*		*	*
	煤炭总量控制	*		*	*
	煤炭比例控制	*	*	*	*
	行业煤炭控制	*	*		
	煤炭质量控制	*		*	*
	火电机组高效发展	*			*
	清洁能源	*		*	*
	外调电	*			
	散煤控制	*	*	*	*
	集中供热	*		*	*
部门发展	绿色建筑	*			
	公共交通	*	*	*	*
脱硫脱硝		*	*	*	*
挥发性有机物污染防治		*	*	*	*
有机溶剂产品		*	*	*	*
交通污染防治	交通综合政策	*	*	*	*
	淘汰黄标车	*	*	*	*
	机动车排放标准和油品升级	*	*	*	*
道路扬尘		*	*	*	*
工地扬尘		*	*	*	*
油烟控制		*	*	*	*
秸秆露天焚烧		*	*	*	*
农业氨排放		*	*	*	

（*表示该省相关政策和行动方案中含有该项目标或治理措施）

目标四省2017年空气质量改善目标，总结如下表：

表2-3 目标四省2017年空气质量改善目标[4]

省份	2017年$PM_{2.5}$下降率目标	2017年PM_{10}下降率目标
江苏	20%	无省级目标
湖北	无省级目标	12%
陕西	无省级目标	15%
四川	无省级目标	10%

[4]参见环境保护部与31省(区、市)签大气污染防治责任书 http://www.gov.cn/gzdt/2014-01/07/content_2561650.htm 以及四省空气污染治理相关政策。

3.研究方法

3.1 研究框架

为分析政策措施和行动方案的效果，本研究主要采用国家发展与改革委员会能源研究所的能源和大气污染物排放情景模型（Integrate Policy Assessment Model for China，以下简称 IPAC 模型）和日本京都大学开发的 Regional Emission inventory in Asia version 2.1（以下简称 REASv2.1 ）这两个模型工具。首先利用 IPAC 模型得出基准年（2012 年）和 2013 年的排放清单，再将目标省份的定量化治霾相关政策输入模型，在基准年排放的基础上确定目标年（2017 和 2020 年）的排放清单，之后结合气象场数据，分析包含目标省份的研究目标区域在目标年（2017 年）的空气质量情况，并在前几项工作的基础上，定量评估目标省份的治霾政策及行业排放政策。另外，本研究还将 2013 年的排放清单输入模型，再将模拟得出的空气质量结果与 2013 年的实际监测数据进行了对比验证。

需要说明的是，上述提到的排放清单不仅是本研究根据 IPAC-AIM/技术模型计算得到目标四省省级清单，还有结合社会经济属性、将各省的总排放分配到各市，从而建立的市级排放清单。

3.2 能源和大气污染物排放情景模型及其在本研究中的应用

为实现研究目标，本研究利用 IPAC 模型对目标四省的污染物排放情况进行了排放源的分析，并在此基础上评估了四省的大气污染防治相关政策，进行情景分析。本研究所应用的 IPAC 模型的主要子模型是 IPAC-AIM/技术模型[5]。

IPAC-AIM/是一种自下而上的技术模型。它以 AIM 技术模型为基础，通过详尽分析各个部门各种终端能源利用技术，从而实现对整个能源系统的情景分析。它主要通过计算未来各种情景下各终端能源部门的分品种能源需求量，进而计算出二氧化碳的排放量。该模型能够分析各目标研究对象未来能源消费的情景，详细描述能源需求和供应技术，以及污染物排放处理技术的应用比例以及未来可能的发展趋势[6]。为了能够分析省级能源情景，我们也构建了分省的模型，包括了本研究中的四省模型。

由于原有的 IPAC-AIM/技术模型是一个能源系统模型，为了适用于 $PM_{2.5}$ 相关排放的分析，构建从 2012 年到 2020 年的目标四省能源系统分析及大气污染物排放分析模型，需要对其进行扩展，纳入部分非能源系统的排放源，包括工业生产过程、炊事活动、农业活动、秸秆焚烧和农村居民炊事燃烧薪柴的排放以及其他无组织排放等。这也是本研究的主要工作内容。

IPAC-AIM/技术能源模型扩展包括：

[5] 胡秀莲 姜克隽.2001.中国温室气体减排技术选择及对策评价[M]. 北京：中国环境科学出版社.

[6] IPAC-AIM/技术模型采用最小成本法进行分析，即设定各种成本最小的技术能够被选中以提供能源服务。模型中采用了线性规划方法，使模型能够分析一些复杂能源使用过程，从工艺系统的观点而不是单个的技术进行分析。在模型分析中，各种参数的设置可以采取不同的标准与方法，使分析涵盖的范围扩大。如技术运行过程中的各种投入组成了技术的运行成本，这种投入可以根据不同情况包括能源投入、原料投入以及劳动力投入等其他投入，使技术成本分析更接近实际情况。该模型也包括了污染物控制技术，如脱硫、脱销、低氮燃烧、除尘、污水处理、汞去除技术等。

- 家庭炊事油烟排放[7]：分析每户做饭的次数，乘以每次做饭的排放系数。
- 餐饮业排放[8]：估算餐馆的个数，乘以排放系数。
- 烧烤排放[9]：估算烧烤摊位，乘以排放系数。
- 工地扬尘[10]：按照模型中建筑施工面积估算，乘以排放系数。
- 道路扬尘[11]：按照模型中上路的机动车旅行距离，乘以排放系数。
- 加油站排放[1213]：依据模型中的汽柴油消费量，乘以逃逸系数。
- 化工排放[14]：基准年排放依据 Kaiqiong Qiu 等的研究；未来排放依据模型中对化工行业的设置以及政策力度。
- 农业、畜牧业以及秸秆焚烧：分析依据来自于多个研究，见高霁等[15]的研究报告。
- 农村居民炊事薪柴燃烧活动：增加了不同的炉具，以及排放系数。

模型扩展完成后，还需要将目标省份的政策定量化，并输入到 IPAC-AIM/技术模型中，从而分析 2013、2017 以及 2020 年的能源和排放情景。这一步旨在利用 IPAC 模型分析治霾政策对能源消费以及颗粒物的主要一次源和二次源前体物排放所产生的影响，即使用模型分析各种大气雾霾控制政策和行动方案的效果。IPAC-AIM/技术模型可以将政策（特别是针对技术发展的政策）参数量化做到极为精细，因此该模型能够较好地分析本研究涉及政策所带来的影响。

3.3 空气质量模型

在各省市的主要大气污染物源排放情况确定之后，本研究将采用空气质量模型对目标四省能否实现《大气污染防治计划》设定的 2017 年目标以及 2020 年污染物减排情况进行分析。

用于此研究的空质量模型主要由三部分组成（如图 3-1 和表 3-1 所示），分别是 WRF 模型（Weather Research and Forecast Model），SMOKE-Asia（Sparse Matrix Operator Kernel Emissions-Asia），和 CMAQ 模型（Community Multi-scale Air Quality Model）。WRF 模型主要用于计算基准年气象场和目标年的气象场数据，在此基础上，SMOKE-Asia 对排放清单进行时空分配，将中国各省的排放按时间和空间维度分布到格点上，最终以再分析气象场为背景，以 SMOKE 分配排放为输入，CMAQ 模型将描述各种污染排放物的传输及化学反应，从而输出大气污染物的浓度分布。

---

[7]肖涵.2014.炊事、餐饮业 $PM_{2.5}$ 排放.研究报告
[8]同上
[9]同上
[10]翟绍岩.2008.上海市道路、建筑工地扬尘（PM_{10}）排放估算方法研究.硕士论文.华东师范大学.
[11]同上
[12]陈家庆 王建宏 曹建树 朱玲.2007.加油站的烃类 VOCs 污染及其治理技术,环境工程学报,第 1 卷 第 3 期,84-91.
[13]沈嘉,郝吉明,王丽涛.2006.中国加油站 VOC 排放污染现状及控制环境科学,第 27 卷第 8 期.第 1473-1478 页
[14]Kaiqiong Qiu, Lixian Yang, Junmin Lin, Peitao Wang, Yi Yang, Daiqi Ye, Liming Wang.2014.Atmospheric Environment 86(2014).P102-112
[15]高霁.2015.大气雾霾之农业源的排放预测.研究报告

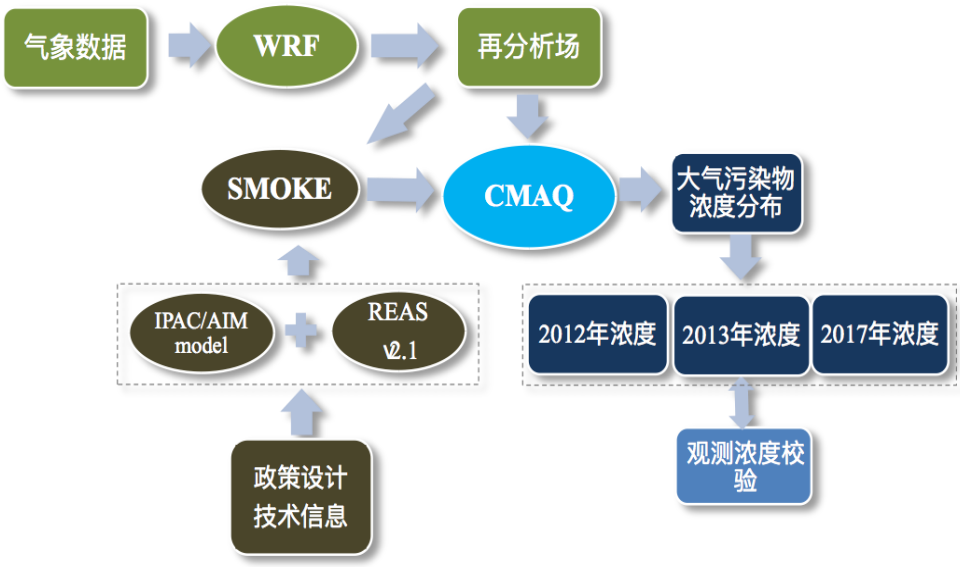


图 3-1 大气扩散模型研究框架

表 3-1 大气质量模型相关信息及参数设定

类目	模型选择或数据源
WRF	Version 3.4.1
Meteorological Input	NCEP-FNL （1cal Inputmission inventor
Cloud Physics	Simple ice scheme
Cumulus Parameterization	Kain-Fritsch Scheme
Land Surface	Noah land-surface model
CMAQ	Version 5.0.1
Chemistry	CB05 Aero5
Boundary condition	Profile → （GEOS-Chem: in future）

参数	取值
Projection	Lambert Conformal
Center Latitude	21nt
Center Longitude	112te
Grid distance	80 km （Domain1）， 26.66km （Domein2）
Grid Numbers	120 x 105 （Domain 1），91 x 61 （Domain 2）

图 3-2 展示了本研究的 $PM_{2.5}$研究范围设定，选定本区域是考虑了目标四省的地理位置较为分散、大气质量受到周边区域的气象条件等因素的共同影响。另外值得注意的是，在分析四省的大气浓度的时候，本研究对周边省份采用了一些简化假设，保守假定其他省份能够实现各自的大气浓度目标。而研究目标区域内其他省份的排放清单则使用了 REASv2.1 模型的调整数据。

在上述几项研究工作结束之后，本研究将总结分析 CMAQ 大气污染物浓度以及 IPAC 模型大气污染物排放源清单的结果，并在此基础上提出针对性的政策建议。

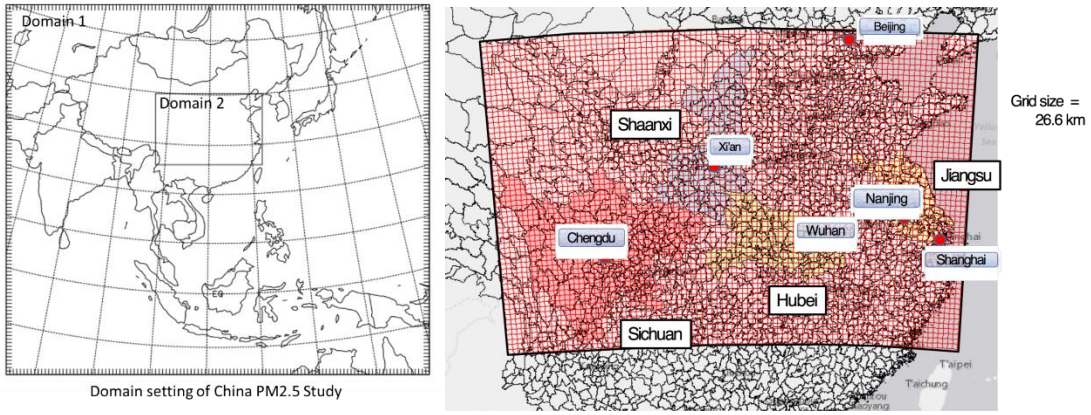


图 3-2 $PM_{2.5}$研究范围设定

3.4 大气污染物及其排放源

$PM_{2.5}$是多种污染物的合计，分为自然和人为排放两个来源。自然来源包括风扬尘土、火山灰、森林火灾、漂浮的海盐、花粉、真菌孢子以及细菌等。人为排放是 $PM_{2.5}$的主要排放源，分为一次生成的 $PM_{2.5}$（一次源）以及二次生成的 $PM_{2.5}$（二次源）。其中，一次源（即直接排放）主要来自燃烧过程，比如化石燃料（煤、汽油和柴油）和生物质（秸秆和木柴）燃烧和垃圾焚烧等产生的黑炭（BC 或 EC）以及一次有机碳等。其它的人为直接排放来源包括，道路扬尘、建筑施工扬尘、工业粉尘、厨房及户外商业活动等产生的烟尘等。

二次源是由各种人为排放的污染气体——主要包括二氧化硫（SO_2）、氮氧化物（NO_X）、农业排放为主的氨（NH_3）、挥发性有机物（VOCs）和碳氢化合物（HC）等，被大气氧化剂（O_3和 $\cdot OH$ 等）氧化，发生光化学反应，生成的包括硫酸盐颗粒物、硝酸盐颗粒物、铵盐颗粒物、臭氧和二次有机颗粒物（过氧乙酰硝酸酯、甲醛和酮类）等污染物，因此 SO_2、NO_X、NH_3和 HC 也称为二次源的前体污染物（简称前体物）。

大气氧化剂主要是由 SO_2、NO_X与多种 VOCs 生成，其对二次源的产生具有关键作用。SO_2和 NO_X的来源主要是化石燃料（包括煤和汽车中的汽油等）的燃烧，易于集中控制。而 VOCs 的来源包括化工业、汽车尾气、洗衣房、民用炊事及秸秆燃烧等，属于面源，远比 NO_X排放源分散，难以控制。

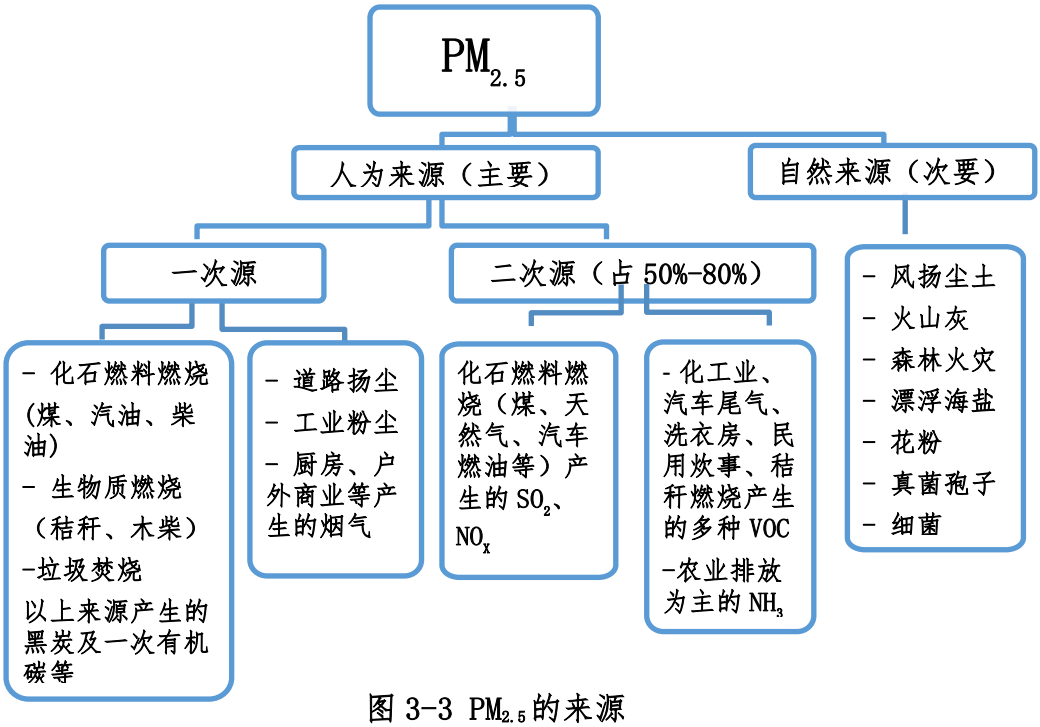


图 3-3 $PM_{2.5}$的来源

雾霾的发生是一次生成 $PM_{2.5}$和二次生成 $PM_{2.5}$综合作用的结果，甚至二次 $PM_{2.5}$附着在一次 $PM_{2.5}$上。在有霾、雾的天气情况下，大气层结构较稳定，不利于空气污染物扩散和稀释，并且如前所述排放到大气中的 SO_2和 NO_X等二次源的前体物可经过均相或非均相成核作用形成硫酸盐气溶胶和硝酸盐气溶胶，形成二次污染物。另外，大气中燃煤飞灰等一次 $PM_{2.5}$和经气粒转化形成的二次 $PM_{2.5}$均具有一定的吸湿性，在较高湿度时会吸收水分形成湿气溶胶，但无法达到湿沉降的临界直径，因此增大了大气颗粒物浓度[16]。此时，二次 $PM_{2.5}$占 $PM_{2.5}$总量的比例还会明显增加。相比一次生成 $PM_{2.5}$，二次 $PM_{2.5}$一般占 $PM_{2.5}$总量的 50%-80%左右，是严重灰霾天气时的主要污染成分，因此也是本研究主要分析的污染源。

3.5 研究方法的有效性校验

鉴于 $PM_{2.5}$的监测从 2013 年才开始在全国广泛开展，因此本研究选取了 2013 年 $PM_{2.5}$和 PM_{10}的逐月和全年实际监测值与本研究所得的模拟值进行比较。由于四省观测点覆盖面有限，若将各观测点 $PM_{2.5}$平均浓度作为省年平均浓度将产生较大误差，因此此处仅使用四省省会城市数值。

首先将 2013 年的排放清单输入大气质量模型，采用 2013 年气象场，模拟得出 2013 年四省省会城市的 $PM_{2.5}$和 PM_{10}浓度数据，再将结果与 2013 年的监测数据进行对比验证，对比结果见图 3-4、3-5 和 3-6。

16冯曙艳等，南京市东郊大气颗粒物污染特征．中国粉体技术，2015（04）．第 30-35 页．

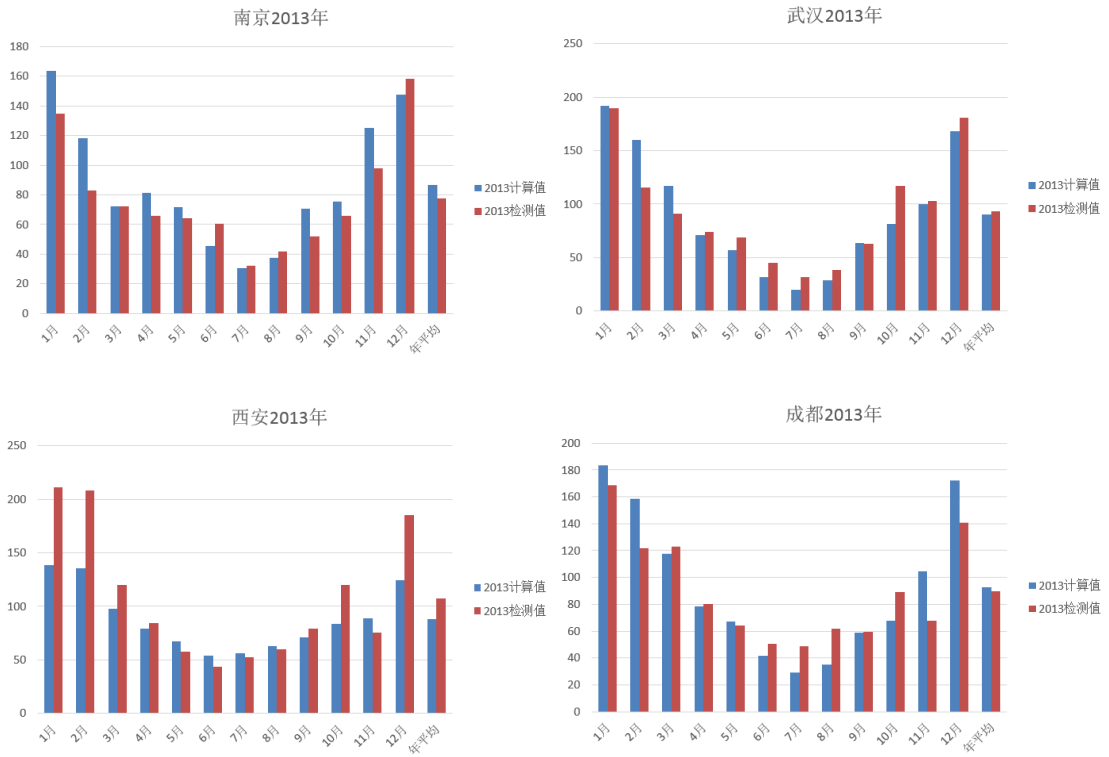


图 3-4 本研究模拟四省省会逐月 $PM_{2.5}$ 浓度值与实际监测值比较图
（2013 年，微克/立方米）

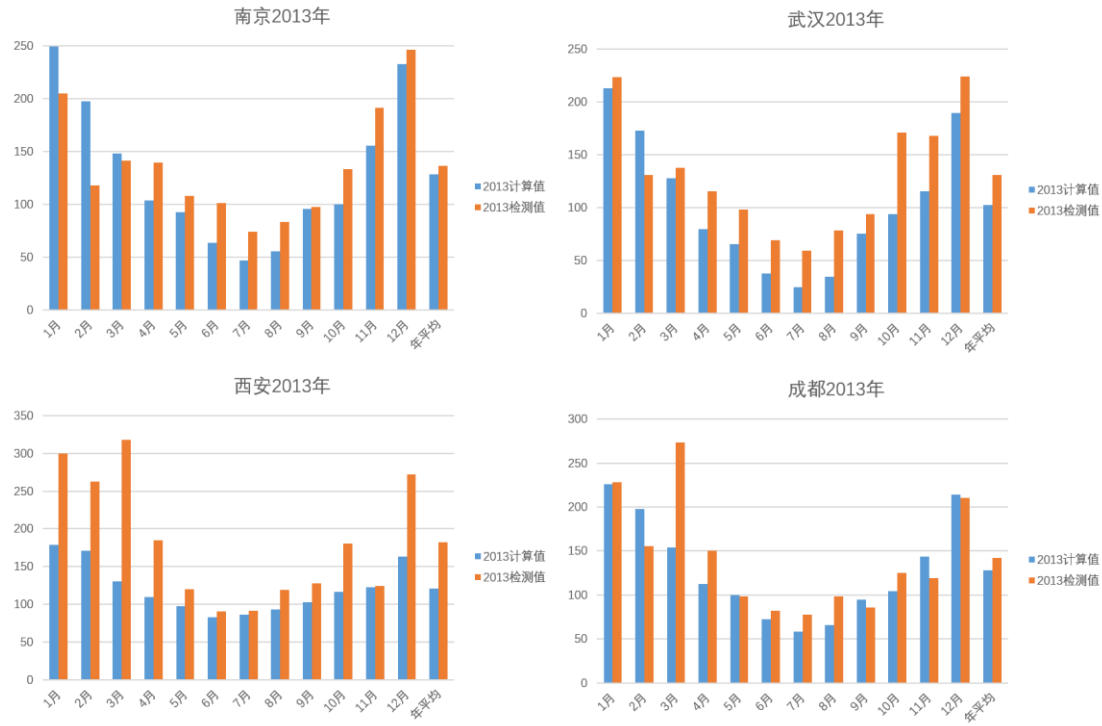


图 3-5 本研究模拟四省省会逐月 PM_{10} 浓度值与实际监测值比较图
（2013 年，微克/立方米）

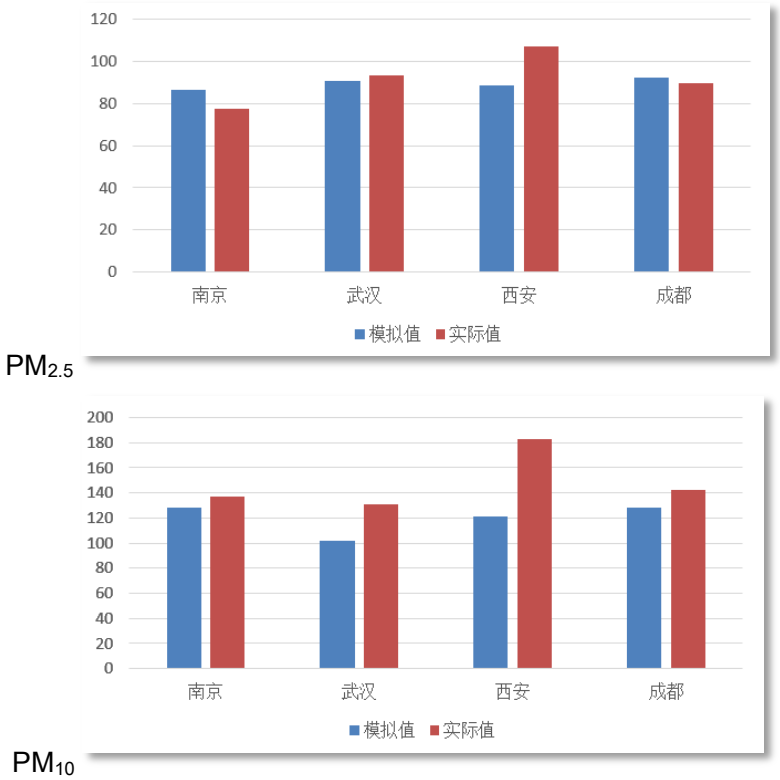


图 3-6 本研究模型模拟四省省会城市年平均 $PM_{2.5}$ 及 PM_{10} 浓度值与实际监测值比较图 （2013 年，微克/立方米）

从逐月数据上来看，虽然个别月份存在绝对值的差异，但整体趋势较为一致。一方面由于排放清单与实际情况的差别难以避免；另一方面也存在大气扩散模型结果的不确定性，难以做到模型的输出和实际情况完全一致；再者因为本研究采用了 2013 年的气象场，气象场以及模拟的过程也不会完全与现实情况相同，而气象因素对 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的影响较大，因此大气扩散模型的模拟值很难和实际值相一致，但趋势一致基本就可以满足对大气质量改善评估的需求。由图可见，根据现有方法已经能反映出污染物排放与空气质量之间趋势性的联系，所以个别月份的绝对值差异被认为是在可以接受范围内。

总体而言，除了个别城市的个别月份的浓度值与实际差异较大，模型能够较为准确地模拟 $PM_{2.5}$ 浓度及 PM_{10} 浓度的绝对值及时空分布差异（空间分布请见附图二的浓度分布图）。本研究所用大气质量模型的精度可以达到 25kmX25km 的网格，可作为大气污染控制措施效果的评价工具。在未来研究中，可以通过尽量将模拟值和检测数据一致化，来改进大气扩散模型组。

3.6 研究局限性

需要说明的是，目前目标四省的政策除少量明确的量化目标以外，多数是没有具体指标的定性描述的方向性政策，这给本研究的政策定量并通过模型进一步分析政策的效果带来了困难。针对上述情况，本研究通过参考国家的整体

目标并结合其他省市的定量政策类比，从而定量描述了四省的一部分定性政策[17]。由于研究时间和范围的限制，再加上各省政策制定的基础工作还有待进一步细化，政策与行动的定量化存在一定的不确定性。另外由于目前各地方政府根据各自的情况也在向有经验的省市充分交流大气污染防治的相关经验与政策，各地的政策也正在逐步细化，因此所涉及的政策会在未来有一定的变动。

本研究的排放活动水平数据主要来自于模型的能源需求技术分析结果，由于数据计算的方法学不同，且统计覆盖的工业排放源、居民排放源等口径上也存在差异，另外针对减排技术现状及发展趋势的考量不尽相同，因此可能与部分历史数据有一定差异。

另外，本研究的 PM_{10} 的计算部分采用了简化的方式，将 $PM_{2.5}$ 排放的变化作为 PM_{10} 的变化的主要参考，将大气扩散模型中的 PM_{10} 的一次源的排放量进行同比例变化，进而分析 PM_{10} 浓度的变化。

[17]本研究中各省政策和行动定量化参见附表一。

4.污染物排放清单的构建以及基准年污染物排放数据

4.1 污染物排放清单的构建

为了揭示 $PM_{2.5}$的主要来源，众多科研机构开展了相应的源解析工作。目前，颗粒物来源解析通常采用的方法包括受体模型法、源清单法和扩散模式模拟法。本研究综合运用了后两种方法。源清单法通过调查和统计不同源类的排放因子和活动水平，确定其贡献率。扩散模式模拟法则是将气象条件、污染源排放状况以及化学过程结合起来评估不同源类在三维空间的分布和贡献。

根据上述的相关研究结果以及图 4-1 所示的建立大气污染物排放清单的技术流程，结合 IPAC 模型已有的研究基础，除 $PM_{2.5}$一次源外，本研究还对四省 SO_2、NO_x、农业源 NH_3、化工行业排放的 NMVOC、加油站排放的 NMHC 以及燃油排放的 HC 等 $PM_{2.5}$的二次源前体物进行了分析。

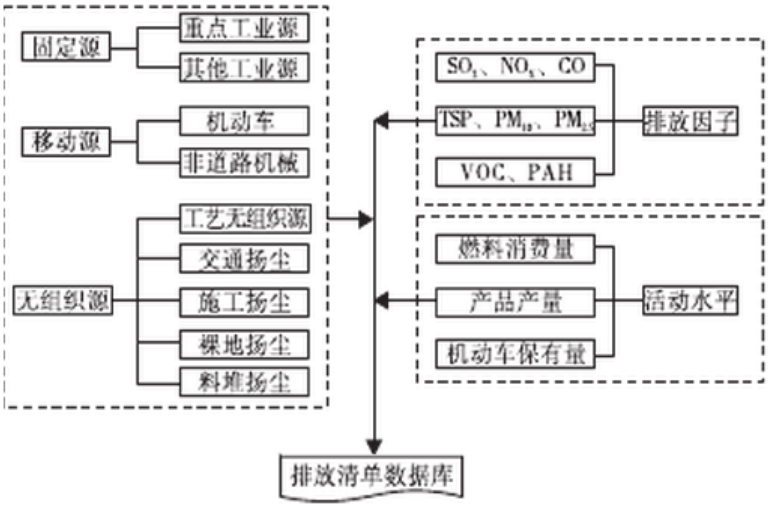


图 4-1 建立大气污染物排放清单的技术流程[18]

[18]薛亦峰等，大气污染物排放清单的建立及不确定性．城市环境与城市生态，2012（02）：第 31-33 页.

以此确立的本研究所用排放清单结构如下表：

表 4-1 本研究包含的污染物排放源[19]

污染物		污染物排放源细化	排放源说明
$PM_{2.5}$ 一次源		建筑工地	建筑工地产生的扬尘
		道路扬尘	道路产生的扬尘
		炊事	家庭餐饮和烧烤
		能源活动	能源活动中的化石燃料（包括燃煤、燃油和天然气）的燃烧
		农村炊事薪柴燃烧	生物质（包括秸秆和木柴）燃烧
		秸秆燃烧	农村地区季节性排放
$PM_{2.5}$ 二次源前体物	前体物 SO_2	能源活动	能源活动中化石燃料（包括燃煤、燃油和天然气）燃烧产生的二氧化硫排放
	前体物 NO_X		能源活动中化石燃料（包括燃煤、燃油和天然气）燃烧产生的氮氧化物排放
	其他前体物	农业源（NH_3）	化肥施用来源为主的氨排放
		化工行业（NMVOC）	化工行业的非甲烷挥发性有机物排放
		加油站（NMHC）	逃逸的汽油柴油和其他挥发性碳氢化合物排放
		燃油（HC）	机动车排放的碳氢化合物

[19]表中的排放源分类方式是后文展示不同时间点目标四省排放情况的结构基础。但本研究采用的能源和大气污染物排放情景模型的排放源分类有多种方式，根据不同的需要，可以按照品种、行业地区等不同角度分类。本研究的第五章就单独列出了在电力活动和其他能源活动中的燃煤导致的 NOx 的排放数据。

4.2 2012 年目标四省主要大气污染物排放数据

本节按照本研究建立的排放清单框架（表 4-1）从 $PM_{2.5}$ 的一次源、二次源前体物的顺序，分别展示了目标四省 2012 年污染物排放情况的模拟结果（各省详细排放模拟数据请参见附表二）。

通过扩展后的 IPAC-AIM/模型对 $PM_{2.5}$ 一次源进行的分析结果如图 4-2 所示。其中，秸秆燃烧、能源活动以及道路扬尘为四省主要的 $PM_{2.5}$ 一次源。

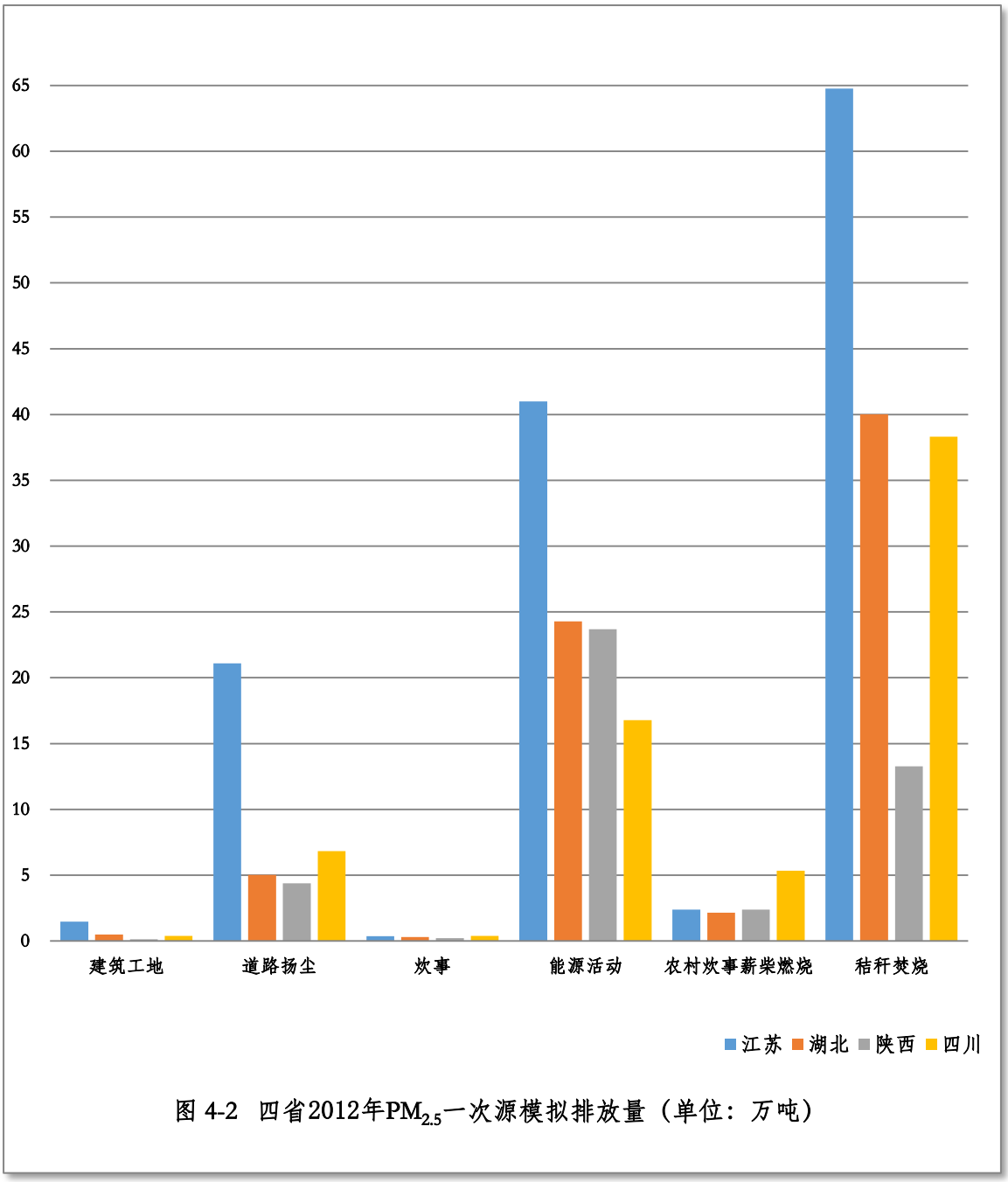


图 4-2 四省2012年$PM_{2.5}$一次源模拟排放量（单位：万吨）

针对目标四省 2012 年的 $PM_{2.5}$ 二次源前体物的排放情况如图 4-3 所示。其中，SO_2 和 NO_x 的排放量相对较大。

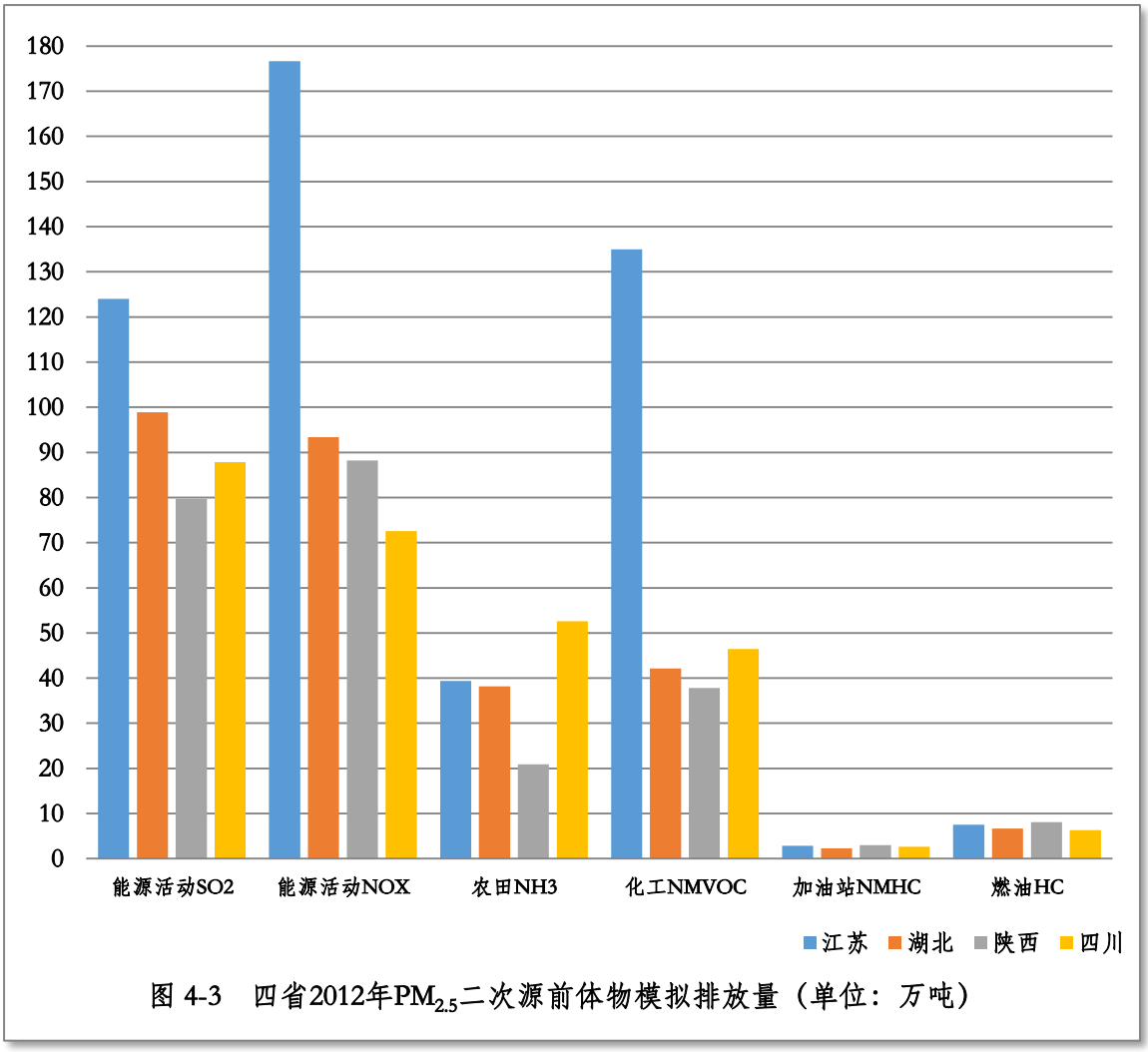


图 4-3　四省2012年$PM_{2.5}$二次源前体物模拟排放量（单位：万吨）

根据 2012 年四省污染物排放量比较情况（图 4-4），江苏省的绝对排放量最大，陕西最小。从不同污染物排放量比较，2012 年目标四省的情况类似，占比最大的都是二次源前体污染物，特别是 NO_x 和 SO_2，因此控制二次前体物的排放是大气污染防治的关键。

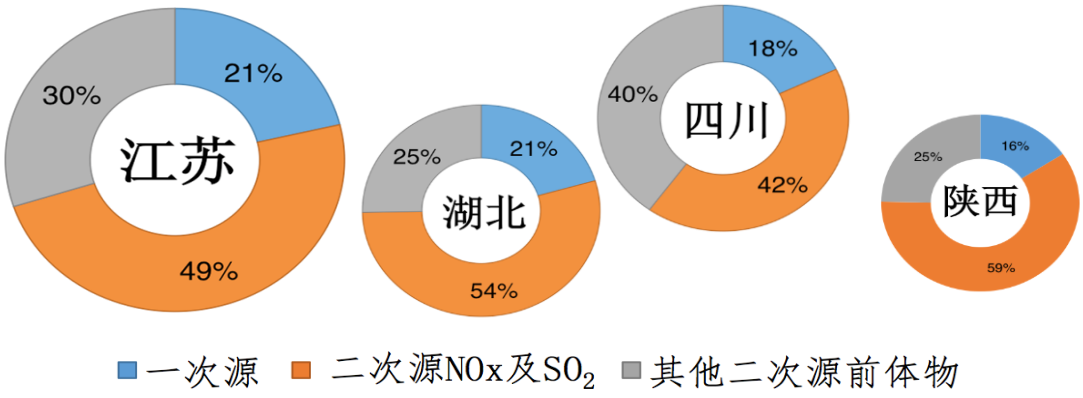


图 4-4 2012 年四省污染物排放量比较情况

5.《大气污染防治行动计划》时期政策效果评估

鉴于目标四省情况各异，本章首先结合模型分析结果，对各省当前的大气污染治理政策效果进行综述，随后列出四省在现有大气污染防治政策之下2012以及2017年的污染源排放情况和政策治理效果，再基于各省现有大气污染治理政策与模拟结果之间的关联，结合各省特点提出针对性的政策建议。

5.1 目标四省大气污染防治政策效果综述

主要污染物排放量变化情况

总结归纳本研究模拟所得的排放清单，发现在现有的大气污染防治政策情景下，目标四省在《大气污染防治计划》实施期间的污染物排放变化趋势存在较强的一致性。

$PM_{2.5}$一次源排放方面，除了道路扬尘排放在四省范围内均有明显上升以外，其他来源的排放均有不同程度的下降。从排放绝对值来看，下降幅度最大的排放源是秸秆燃烧，其次是能源活动。

$PM_{2.5}$二次源的前体物排放方面，SO_2和NO_X排放均有下降，NO_X的下降程度大于SO_2。这一方面是由于电力行业的脱硫工作开展较早，进一步减排的空间不大。更重要的原因是来自非电力能源活动带来的SO_2排放没有得到有效的控制，这在江苏、湖北两省显得尤为突出，两省2017年非电力能源活动的SO_2排放量仅比2012年下降了2.1%和3.7%。四省农业导致的NH_3排放、化工行业的NMVOC排放以及燃油带来的HC排放均呈小幅度上升趋势，其中燃油带来的HC排放方面上升比例相对较高。

目标四省空气质量改善效果

根据本研究的排放清单，在相关政策实施的情景下，江苏、湖北、陕西和四川2017年$PM_{2.5}$年均浓度相比2012年分别下降了15.0%、14.2%、8.5%以及24.3%。其中，江苏省存在无法达到2017年$PM_{2.5}$浓度下降20%的大气污染控制目标的风险；陕西省相比其他三省，其大气污染防治政策所带来的$PM_{2.5}$污染改善效果较为不足。

江苏、湖北、陕西和四川四省2017年的PM_{10}浓度相比2012年分别下降12.4%、12.9%、6.9%和12.1%。其中，陕西省存在难以完成其15%下降目标的风险。

目标四省政策及其减排效果综述

总体看来，目前目标四省的政策内容已经比较完善，只是力度有所不同。这些政策行动一般都包括产业结构调整、控制燃煤总量、控制散煤使用、发展天然气替代煤炭、高效清洁燃煤发电、提升除尘脱硫脱硝设施水平、发展可再生能源、强化节能、发展公共交通、淘汰黄标车、挥发性有机物污染防治、提升油品质量、控制秸秆焚烧，加油站有机物挥发，炊事餐饮排放控制，道路扬尘控制、工地扬尘控制等方面。

根据IPAC小组前期研究分析，由于经济形势变化、产业结构转型以及大气雾霾控制措施的实行等原因，我国的煤炭消费已经达到峰值，到2020年将会明

显下降[20]。本研究也将这一能源情景纳入模型分析，发现其在一定程度上减缓了空气污染治理的压力。但从当前控制煤炭消费的政策角度来看，四省的控煤政策力度还有加强的空间。一是要考虑到目标四省前期新建的燃煤设施陆续投入使用，新建燃煤电厂还可能导致煤炭消费的进一步增长。二是从 2015 年发生的雾霾来看，散煤燃烧已经成为最主要的污染物排放源之一[21]。本研究模型结果显示无法达到其 2017 年雾霾治理目标的江苏省以及治霾政策效果较弱的陕西省，都是煤炭消费大户，特别是散烧煤的量很大。四省均对工业散煤和小型燃煤设施采取了包括集中化、煤改气等相对容易实施的措施，但相较而言，针对大面积民用散煤和小型燃煤设施的控制政策实施困难大、成本也较高。以北京市为例，随着当地燃煤电厂改燃气以及污染工业退出本地等政策的落实，北京市的燃煤问题集中到了民用散烧煤上。由于这部分用煤煤质差、用户分散，尽管北京市政府已经推出了优质煤补贴等措施，仍然需要巨大的人力和财力投入以及较长的时间才能逐步推进[22]。总体而言，四省中目前已经出台的治理散煤的政策措施在整体大气污染治理措施中的优先级还较低，实施难度大，具体实施的效果还有待观察。

增加可再生能源在一次能源结构中所占的比例毫无疑问对压缩煤炭消费的潜在增量、改善能源结构以及减少由能源利用带来的大气污染物排放具有重要意义。在推广可再生能源方面，进一步在农村地区替代分散的煤炭使用会有更好的效果。

四省 2017 年的农业 NH_3 排放比 2012 年有小幅度上升，这部分排放目前基本没有受到有力的措施的控制，需要被纳入下一步政策和行动方案中。除四川省外，其他三省均提出了控制农业 NH_3 排放的相关政策。农业部也在 2015 年 2 月宣布争取在 2020 年减少氮肥施用量[23]。但农业面源的排放控制与农村发展和农村管理政策相关，因此将是一个长期艰巨的任务。

农村秸秆焚烧仍然是一个局部地区特定时间段出现大气雾霾的重要原因之一。目前主要通过集中式的行政手段进行控制，但长期来看还需要为秸秆的处理寻找更具持续性和可行性的解决方案。部分省市已经开始在其行动方案中考虑秸秆的利用和处理，这些措施的效果需要审慎地观察，在考虑当地实际情况的条件下推广。

尽管道路扬尘、炊事和薪柴燃烧绝对量并不大，但是其排放距离地面较近、与居民生活环境关系密切、且人们在此类排放中的暴露性较强，因此这些排放源的治理也十分必要，这也是本研究对这些排放源进行单独分析的重要原因。值得注意的是，道路扬尘导致的一次源排放以及燃油导致的重要前体物 HC 的排放均与交通行业有重要关系，因此未来交通行业的大气污染物防治政策需进一步加强。

模型结果显示，到 2017 年，当前政策措施带来的效果会比较明显。然而我

[20] 姜克隽，庄幸，贺晨旻.2012.全球升温 2 度目标下中国能源与排放情景研究.中国能源 2012 年第二期.
[21] 陈吉宁.2016. 保护环境既是发展需要也是发展目的——环保部部长陈吉宁在十二届全国人大四次会议记者会上答记者问摘录.环境影响评价. 2016 年 02 期.
[22] 北京市人民政府.2014.北京市人民政府 2013-2017 年清洁空气行动计划重点任务分解 2014 年工作措施.http://govfile.beijing.gov.cn/Govfile/ShowNewPageServlet?id=6203
[23] 农业部。《农业部关于印发《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》和《到 2020 年农药使用量零增长行动方案》的通知》2015 年 2 月，http://www.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201503/t20150318_4444765.htm）

们需要认识到，这部分是由大气雾霾控制政策的实施以及我国相关产业发展放缓带来的效果。这种行业发展放缓的情形在部分省份表现得尤为明显——2015年我国煤炭消费相比 2014 年下降了 6%，在四省、特别是陕西省的下降十分明显[24]。本研究认为，一旦相关产业回弹，煤炭消费会有所上升。这意味着我国特别是目标四省的大气雾霾控制的效果存在明显的不确定性，且考虑到未来可能重复出现不利于污染物扩散的气象条件，建议各省在进一步加大压减煤炭消费的政策力度的同时，从现有的政策缺口入手，针对当地的污染物排放具体情况，进一步加强雾霾防控政策，开展 2016 年后的治霾攻坚战。

另外，如上文提到，目标四省的政策多集中于控制煤炭消费、黄标车、挥发性有机物（包括化工厂、加油站的污染控制）、秸秆焚烧以及工地扬尘等方面。这些都是在第一阶段初期比较容易进行、且效果比较容易显现的措施。本研究认为 2016 年后的大气雾霾控制政策将进入攻坚期，政策的落地将更为艰难和高成本。由于相对容易实施的政策在 2016 年之前已经被实施，2016-2017 年则必须要尽快推进下一步政策，并加强政策措施的执行力度。特别是对于当前没有提出本省具体减排目标的省份，应当根据目前减排成果，尽快提出明确的减排目标和针对性的减排措施。

下文将分省对 $PM_{2.5}$和 PM_{10}的政策减排效果及建议进行分述。

5.2 目标四省大气污染防治政策效果分述

5.2.1 江苏省

$PM_{2.5}$一次源排放清单

根据江苏省的 $PM_{2.5}$一次源排放情景（图 5-1），2012 年该省最主要的一次源是秸秆燃烧，排放 $PM_{2.5}$一次颗粒物 647,590 吨，占一次源总排放量的 49.4%；其他主要一次源为能源活动和道路扬尘，分别占一次源总排放量的 31.3%和 16.1%。

如果本研究中纳入的江苏省空气污染治理相关政策得到充分执行，模型结果显示，2017 年江苏省的 $PM_{2.5}$一次源排放总量将比 2012 年下降 21.4%，届时最主要的一次源依次是能源活动、秸秆燃烧和道路扬尘，分别占一次源总排放量的 37.2%、30.2%和 29.5%。其中，秸秆燃烧的排放量比 2012 年下降 52.0%；而道路扬尘的排放量将上升 44.0%。能源活动的排放下降了 6.6%，但其占一次源排放总量的比例有小幅上升。

[24] 基于模型前期研究结果。

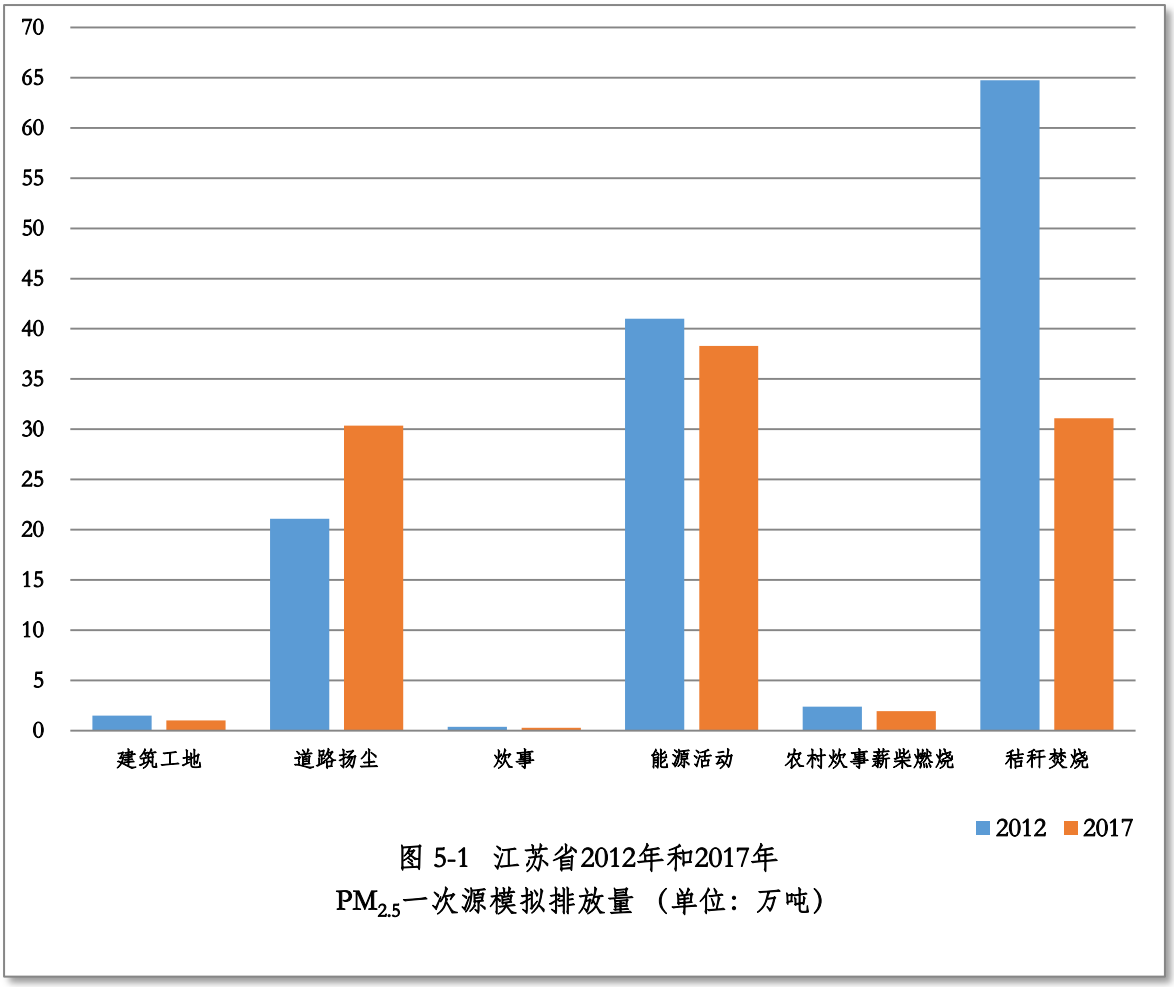


图 5-1 江苏省2012年和2017年
$PM_{2.5}$一次源模拟排放量（单位：万吨）

$PM_{2.5}$二次源前体物排放清单

根据江苏省 $PM_{2.5}$ 二次源前体物排放情景（图 5-2 和图 5-3 分别展示了江苏省 2012 年和 2017 年 $PM_{2.5}$ 二次源前体物模拟排放量，以及能源活动产生的 SO_2 和 NO_x 中电力行业与非电力能源活动的模拟排放量），2012 年的主要二次源前体物包括化工行业排放的 NMVOC 以及能源活动产生的 SO_2 及 NO_x。其中，电力行业的 SO_2 和 NO_x 排放分别占 SO_2 和 NO_x 排放总量的 53.2%和 59.8%。

模型结果显示，如果现有政策得到充分执行，2017 年燃煤导致的 SO_2 和 NO_x 的排放量将分别下降 10.5%和 26.0%。其中，由于燃煤电厂的超低排放改造计划的实施，来自电力行业的 SO_2 和 NO_x 的减排效果显著，将分别下降 17.9%和 32.5%。但来自非电力能源活动燃煤的 SO_2 排放量将仅下降 2.1%，排放量超过电力燃煤，成为 SO_2 的主要排放源。

农业 NH_3 排放、化工行业的 NMVOC 排放以及燃油的 HC 排放均呈上升趋势，上升率分别为 5.4%、1.0%和 15.1%；仅排放量绝对值最小的加油站 NMHC 在 2017 年有所降低。其中，尽管化工 NMVOC 的排放上升幅度仅有 1.0%，但其在 2012 年的排放量达到 1,350,000 吨，2017 年排放量达到 1,363,176 吨，届时将成为江苏省排放量最大的大气污染物。

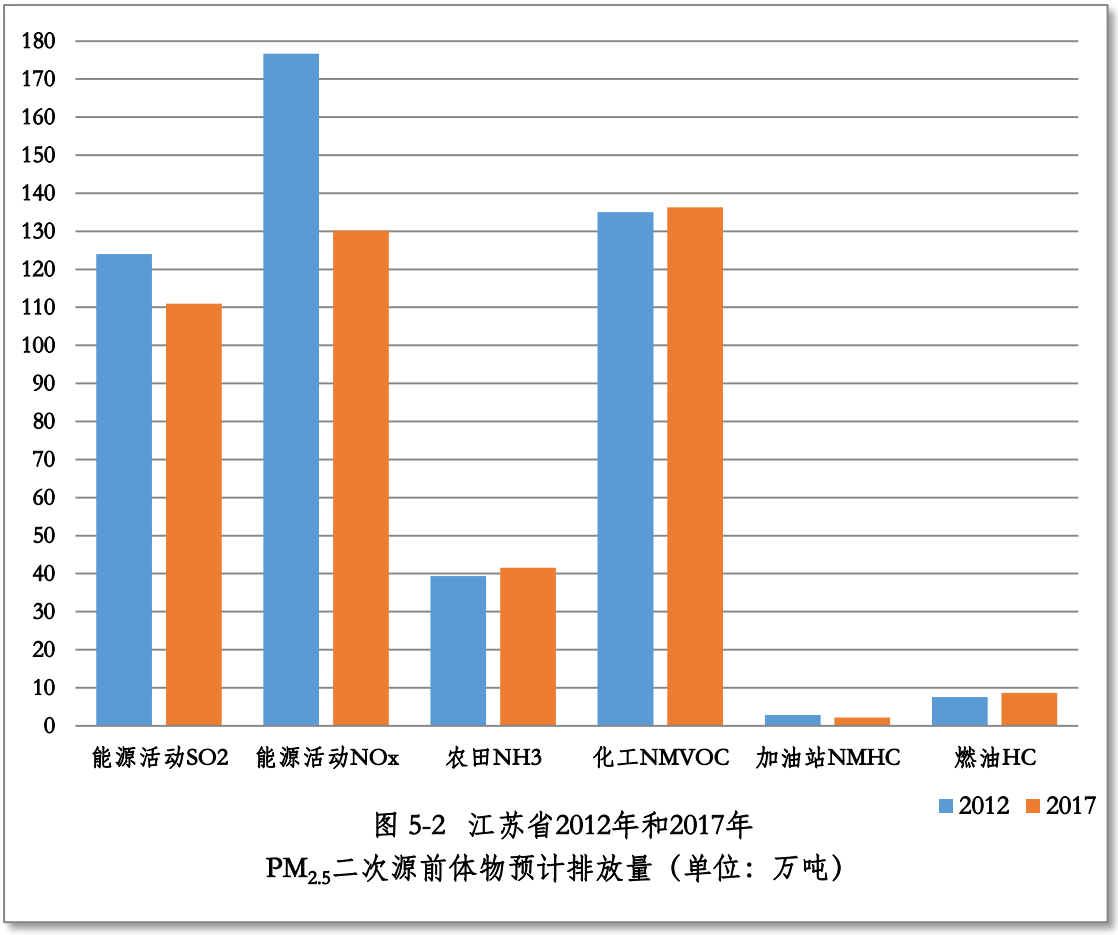
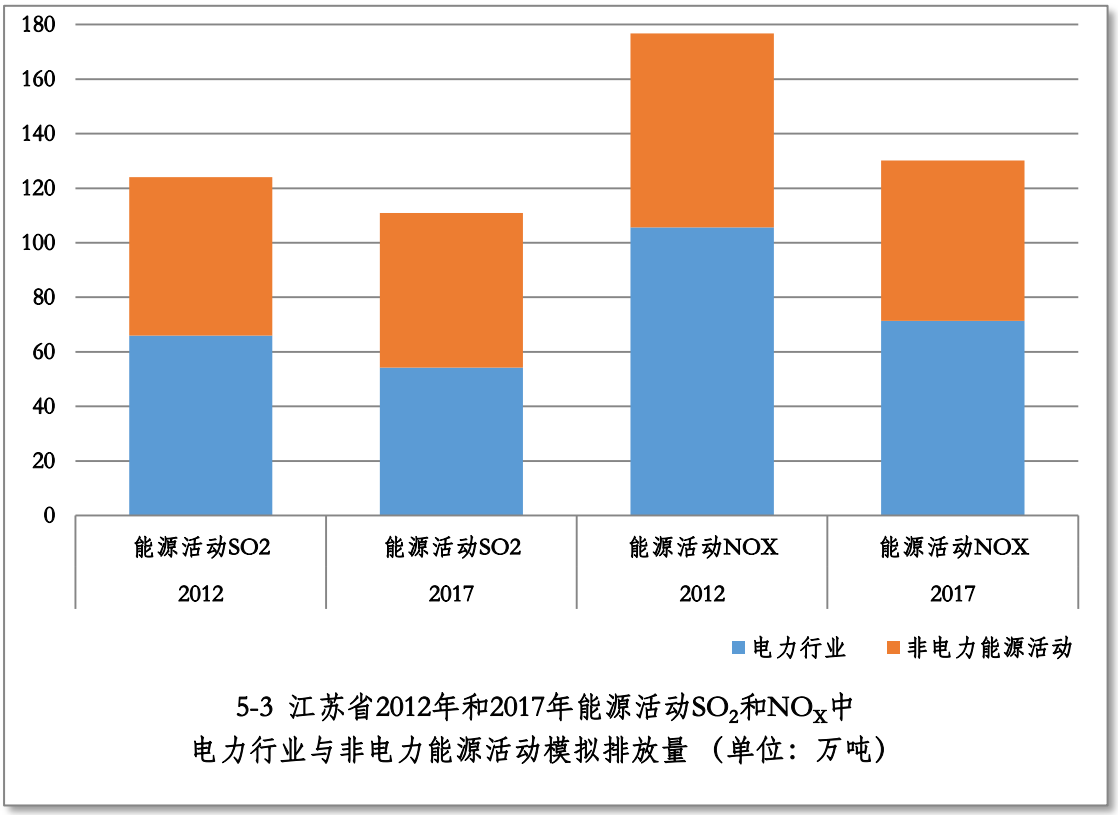


图 5-2 江苏省2012年和2017年
$PM_{2.5}$二次源前体物预计排放量（单位：万吨）



5-3 江苏省2012年和2017年能源活动SO_2和NO_X中
电力行业与非电力能源活动模拟排放量（单位：万吨）

江苏省雾霾治理政策效果

基于江苏省的排放清单，本研究计算出了相应年份的空气质量减排率，并与本省目标减排率进行了比较。

表 5-1：江苏省 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度下降率

江苏省	计算下降率	目标下降率
$PM_{2.5}$	15.0%	20%
PM_{10}	12.4%	N/A

在当前的政策情景下，模型分析江苏省 2017 年的 $PM_{2.5}$ 浓度改善效果与 2014 年环境保护部签署的《大气污染防治目标责任书》中 $PM_{2.5}$ 浓度下降 20%的目标还有一定差距，说明江苏省可能无法实现其设立的 2017 年空气质量改善目标。由于江苏省的 PM_{10} 浓度没有具体目标，因而在此不做比较。

江苏省雾霾治理政策建议

根据江苏省排放清单，该省实现其空气质量改善目标的主要困难在于控制燃煤和化工 NMVOC 排放的政策力度较弱。

江苏是全国经济最发达的省份之一，也是煤炭消费大省。2013 年全省火电装机量达到 7,555 万千瓦，是 31 个省市自治区中火电装机数量最多的省份，同年电力消费量也是全国之首；其钢铁和水泥产业也在全国占有重要地位。从模型数据看，燃煤在 SO_2 和 NO_X 的排放源中占比很高，且当前政策情景下，到 2017 年来自非电力能源活动用煤的 SO_2 排放量下降较少。因此，压减煤炭消费、特别是压减散煤的使用，是其实现大气污染减排目标的关键。目前已经在建的燃煤电站，以及未来规划中江苏作为长江三角洲的工业腹地将继续发展重工业，都可能导致煤炭需求的进一步增长。在这种情况下，江苏若不尽快实施大幅减少煤炭消费的政策，将难以有效改善其大气污染状况。尽管现有政策已经针对电力生产的一次源排放有比较严格的管控措施，模型结果显示电力带来的一次和二次源排放在 2017 年均有下降趋势，但江苏省仍需要继续在国家的推动下加强本地对已有煤炭项目的清洁改造，特别是建立配套的监管体系。江苏省人民政府 2014 年 1 月发布的《江苏省大气污染防治行动计划实施方案》中第十四条和第十五条涉及到了对于散煤和小型燃煤设施的控制措施，但是从排序来看这些措施的优先级较弱。

江苏省的化工行业在全国名列前茅。为了实现其大气污染治理目标，江苏省对在化工行业的 NMVOC、农业 NH_3 以及机动车的排放控制也需要更加重视。模型数据显示，江苏省化工行业的 NMVOC 排放总量的绝对值远超其他各省，而现有的政策对这项排放的控制力度有限，这与江苏省作为化工大省的经济结构有重要的关系。在经济发展结构性调整难以迅速转型的情况下，加强行业末端治理则成为重要的政策选项，应特别加强其排放的具体控制。可以选择的重点控制措施包括，在农村推广气体燃料，完善机动车排放法规，采用水性溶剂、低

NMVOC 低毒溶剂，制订合理的工业、特别是化工行业 NMVOC 排放标准，加大管道建设，以及实行油气回收等。

另外，秸秆焚烧和道路扬尘在一次源排放中的占比较高，也应是政策治理的重点。特别是在秸秆集中焚烧等特定时期以及不利于扩散的气候条件下，对农村秸秆燃烧的严格控制对于迅速改善特定季节以及不利大气条件下的空气质量有重要意义。

5.2.2 湖北省

$PM_{2.5}$一次源排放清单

根据湖北省的$PM_{2.5}$一次源排放情景（图 5-4），2012 年$PM_{2.5}$的最主要一次源是秸秆燃烧，排放$PM_{2.5}$一次颗粒物 400,090 吨，占一次源总排放量的 55.4%。其他主要一次源为能源活动和道路扬尘，分别占排放总量的 33.6%和 6.9%。

根据模型结果分析，在其现有政策的作用下，2017 年湖北省$PM_{2.5}$一次源排放总量下降了 26.3%，届时最主要的一次源依次是能源活动、秸秆焚烧和道路扬尘，占比分别为 41.1%、36.1%和 18.5%。其中秸秆焚烧虽然占比依然很大，但其排放控制的效果最佳，排放量下降超过 50%；而由道路扬尘的排放量却急速上升了 96%；能源活动的排放减幅不大，仅有 9.9%。

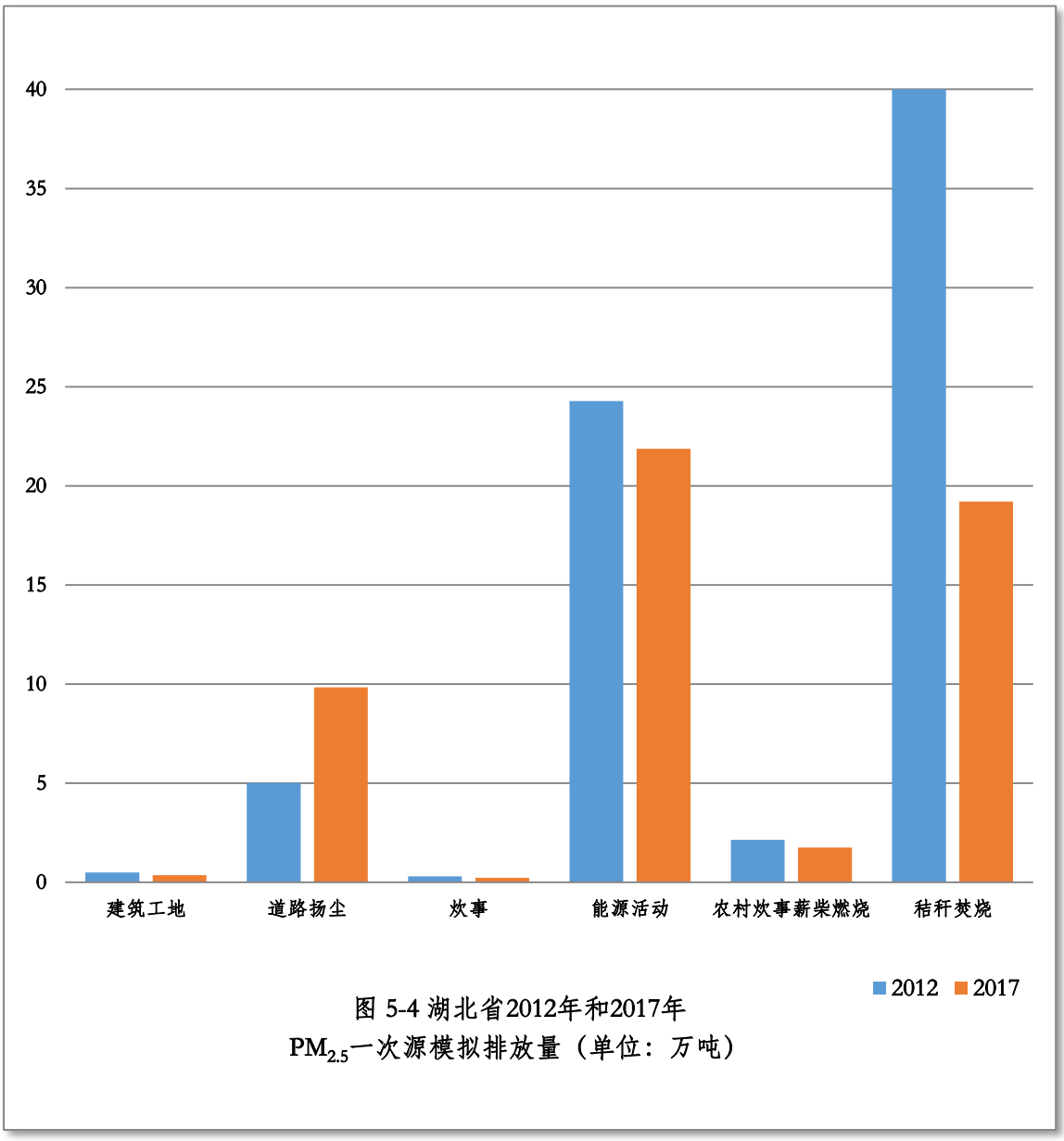


图 5-4 湖北省2012年和2017年
$PM_{2.5}$一次源模拟排放量（单位：万吨）

$PM_{2.5}$二次源排放清单

根据湖北省的$PM_{2.5}$二次源的前体物排放情景（图 5-5 和图 5-6 分别展示了），2012 年湖北省主要二次源来自于非电力能源活动产生的SO_2和NO_X，其中非电力能源活动燃煤排放的SO_2占全部SO_2排放量的 77.7%。

模型结果显示，如果现有政策得到充分执行，2017 年，燃煤导致的SO_2仅下降 8.1%，其中非电力能源活动燃煤排放的SO_2排放量将达到 740,405 吨，在SO_2总排放量中的占比从 77.7%上升到 81.5%，成为湖北省最主要的大气污染排放源；燃煤导致NO_X的排放量下降较多，下降率达到 30.0%。SO_2的减排效果弱于NO_X的主要原因是，湖北省以水电为主，用煤多集中于非电力能源活动，而相比电力行业，非电力能源活动涉及的领域，如散烧煤、工业锅炉等领域的SO_2污染控制政策力度明显不足。这一点也反应在相较于 2012 年，湖北省来自电力行业的SO_2排放量将下降 23.6%，而非电力能源活动SO_2排放量将仅下降 3.7%。

湖北省农业方面的NH_3排放、化工行业的 NMVOC 排放、燃油带来的 HC 排放均呈小幅度上升趋势，仅排放量绝对值最小的加油站 NMHC 在 2017 年期间有所降低。

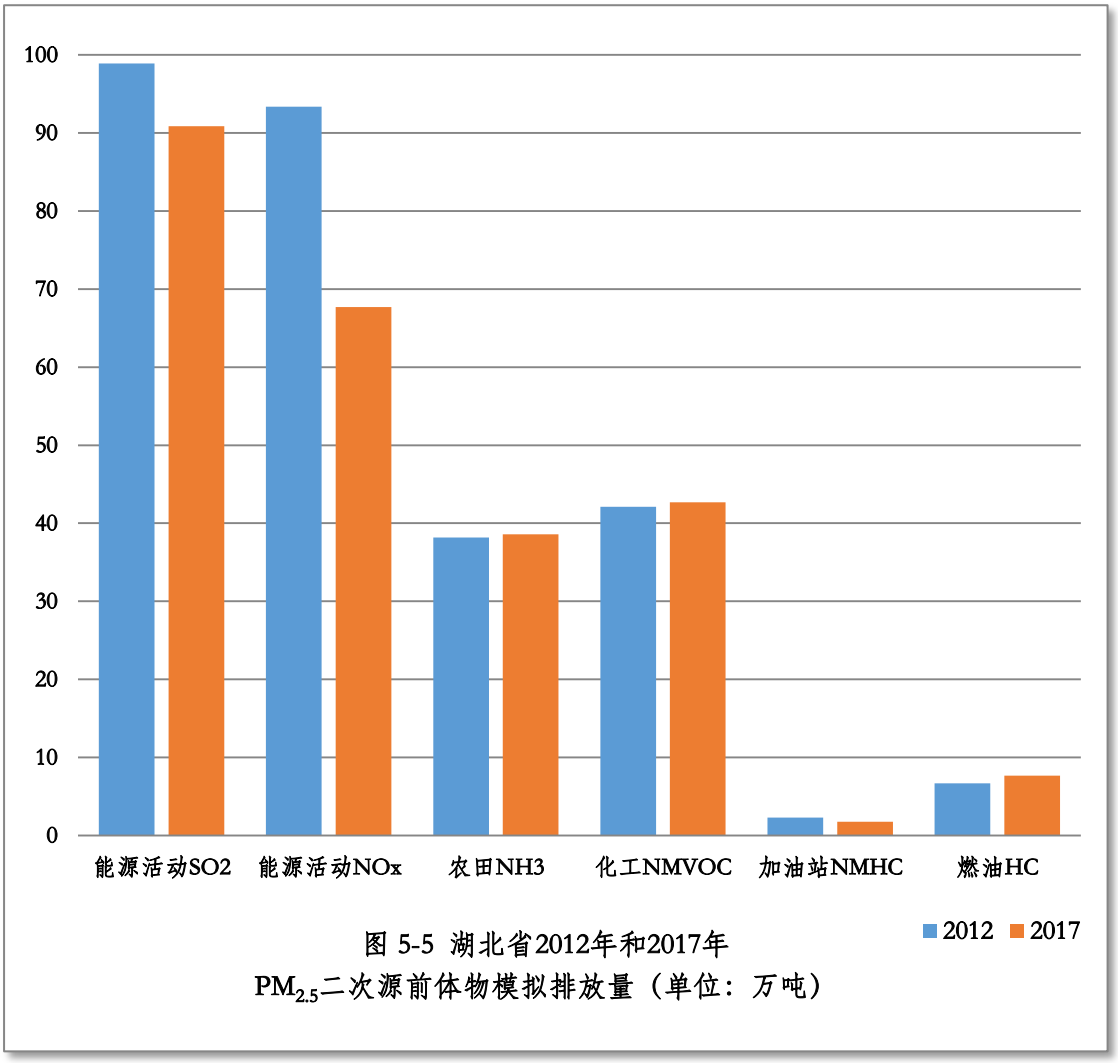


图 5-5 湖北省2012年和2017年
$PM_{2.5}$二次源前体物模拟排放量（单位：万吨）

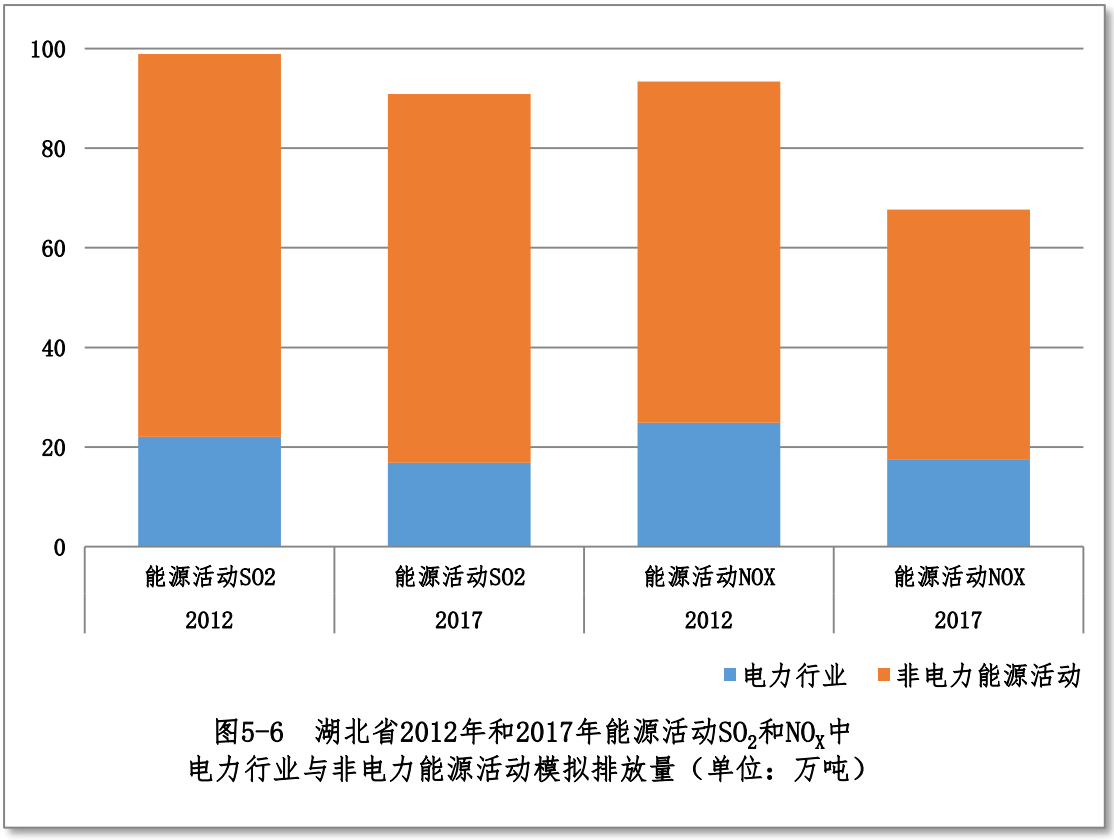


图5-6　湖北省2012年和2017年能源活动SO_2和NO_X中
电力行业与非电力能源活动模拟排放量（单位：万吨）

湖北省雾霾治理政策效果：

表 5-2：湖北省 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度下降率

湖北省	计算下降率	目标下降率
$PM_{2.5}$	14.2%	N/A
PM_{10}	12.9%	12%

湖北省没有设定其 $PM_{2.5}$ 浓度下降目标，与其他三省对比来看，当前政策情景下的 $PM_{2.5}$ 治理效果较好；设定的 PM_{10} 浓度下降目标也可以完成。

湖北省雾霾治理建议：

根据本研究的大气污染排放清单，由于湖北省的用煤主要集中于非电力能源活动，且现有政策对于非电力能源活动排放的 SO_2 的减排效果很弱，导致了非电力能源活动排放的 SO_2 将成为湖北省 2017 年最主要的大气污染物。因此建议湖北省轻化能源结构，有针对性地减少非电力能源活动的煤炭消费量，并重点加强工业节能减排方面的政策落实。

湖北省道路扬尘的排放占比在 2017 年比 2012 年有所上升，需要加强防控措施。另外，在秸秆焚烧集中等特定时期以及不利于扩散的气候条件下对农村秸秆燃烧的严格控制对于迅速改善特定季节以及不利大气条件下的空气质量有重要意义。

本研究建议湖北省结合中期评估结果，尽快制定更积极明确的 2017 年后减排目标；同时根据本省排放清单的特点，制定更为积极和具体的减排措施。

5.2.3 陕西省

$PM_{2.5}$一次源排放清单

根据陕西省的一次源排放情景（图 5-7），2012 年该省最主要的一次排放源是能源活动，排放量为 236,955 吨，占一次源总排放量的 53.7%，其他主要一次源为秸秆焚烧和道路扬尘，分别占一次源总排放量的 30.1%和 10.0%。

如果本研究中纳入的政策得到充分执行，根据模型结果，2017 年陕西省一次源排放总量比 2012 年下降了 19.3%，届时最主要的一次源依次为能源活动、道路扬尘和秸秆焚烧，分别占一次源排放总量的 54.2%、21.7%和 17.9%。其中，秸秆焚烧的治理效果最好，下降了 52.0%。能源活动的排放下降了 18.6%，其中电力的一次源排放只下降了 8.6%。而道路扬尘的治理效果最差，排放上升了 76.4%。

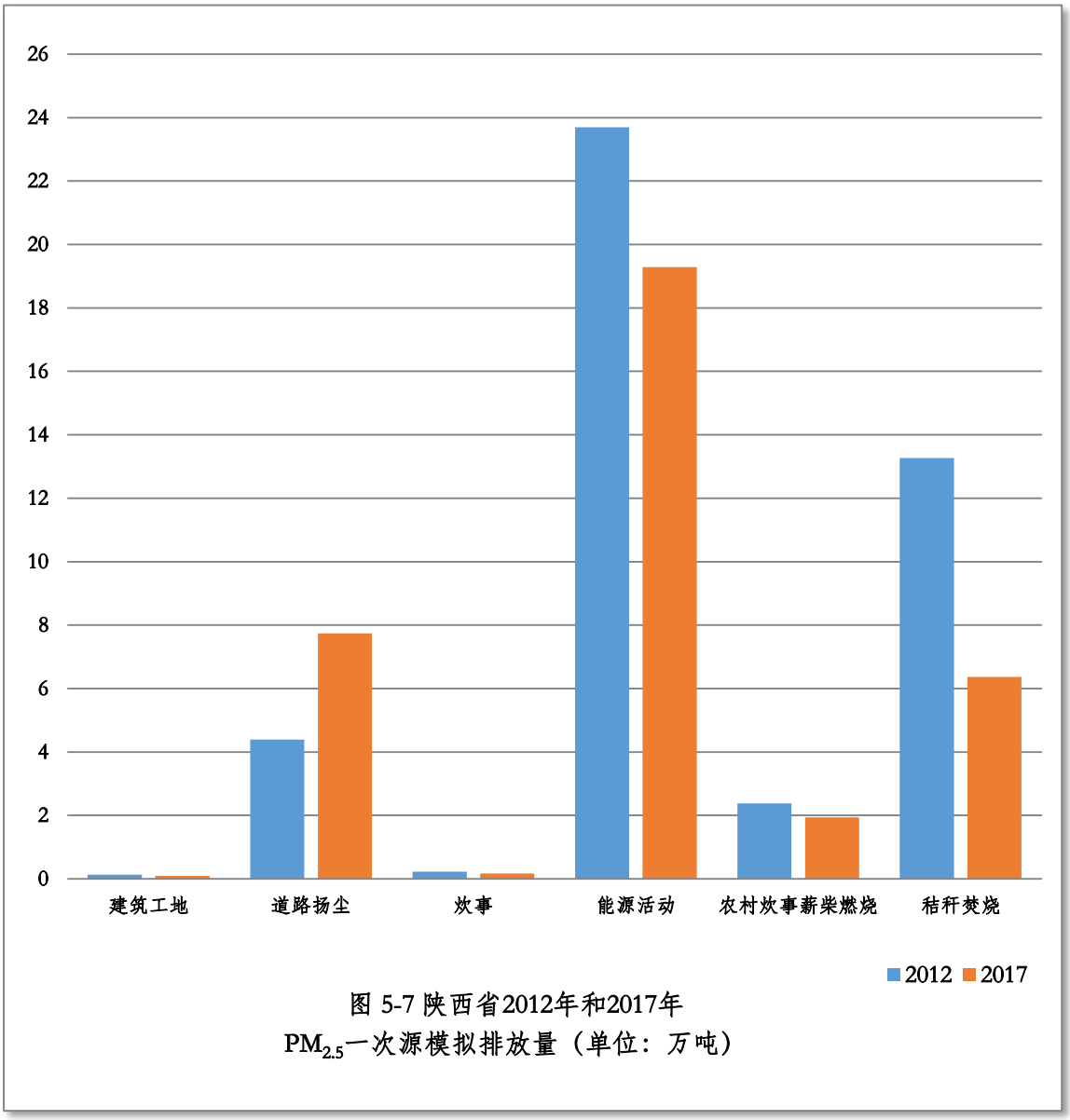


图 5-7 陕西省2012年和2017年
$PM_{2.5}$一次源模拟排放量（单位：万吨）

$PM_{2.5}$二次源排放清单

根据陕西省的二次源的前体物排放情景（图 5-8 和图 5-9），2012 年的主要排放源是 SO_2 和 NO_X，排放量分别为 797,161 吨和 882,034 吨。其中，来自非电力能源活动的 SO_2 和 NO_X 占比较高，分别占这两种污染物排放量的 72.3%和 62.0%。

如果现有政策得到充分的执行，2017 年，来自非电力能源活动排放的 SO_2 和 NO_X 将分别下降 12.7%和 39.8%；来自电力行业排放的 SO_2 和 NO_X 将分别下降 36.1%和 23.6%。燃煤导致的 SO_2 和 NO_X 将分别下降 19.2%和 35.0%。2017 年燃煤导致的 SO_2 的排放量为 644,174 吨，届时将超过 NO_X 成为陕西省最主要的大气污染排放物。

该省农业 NH_3 排放、化工行业的 NMVOC 排放以及燃油带来的 HC 排放量均呈小幅度上升趋势，仅有加油站的 NMHC 排放下降了 24.4%。

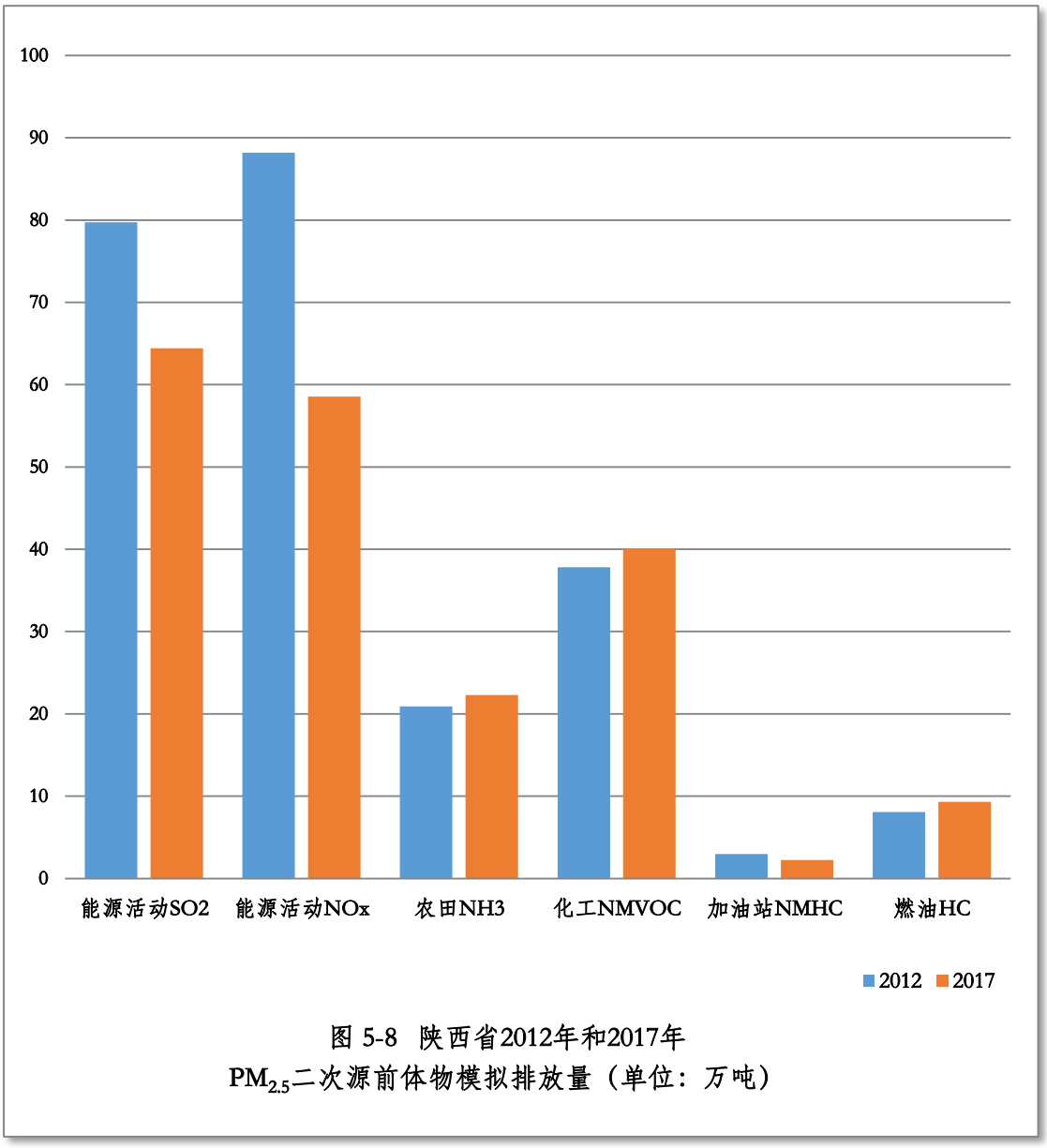


图 5-8 陕西省2012年和2017年
$PM_{2.5}$二次源前体物模拟排放量（单位：万吨）

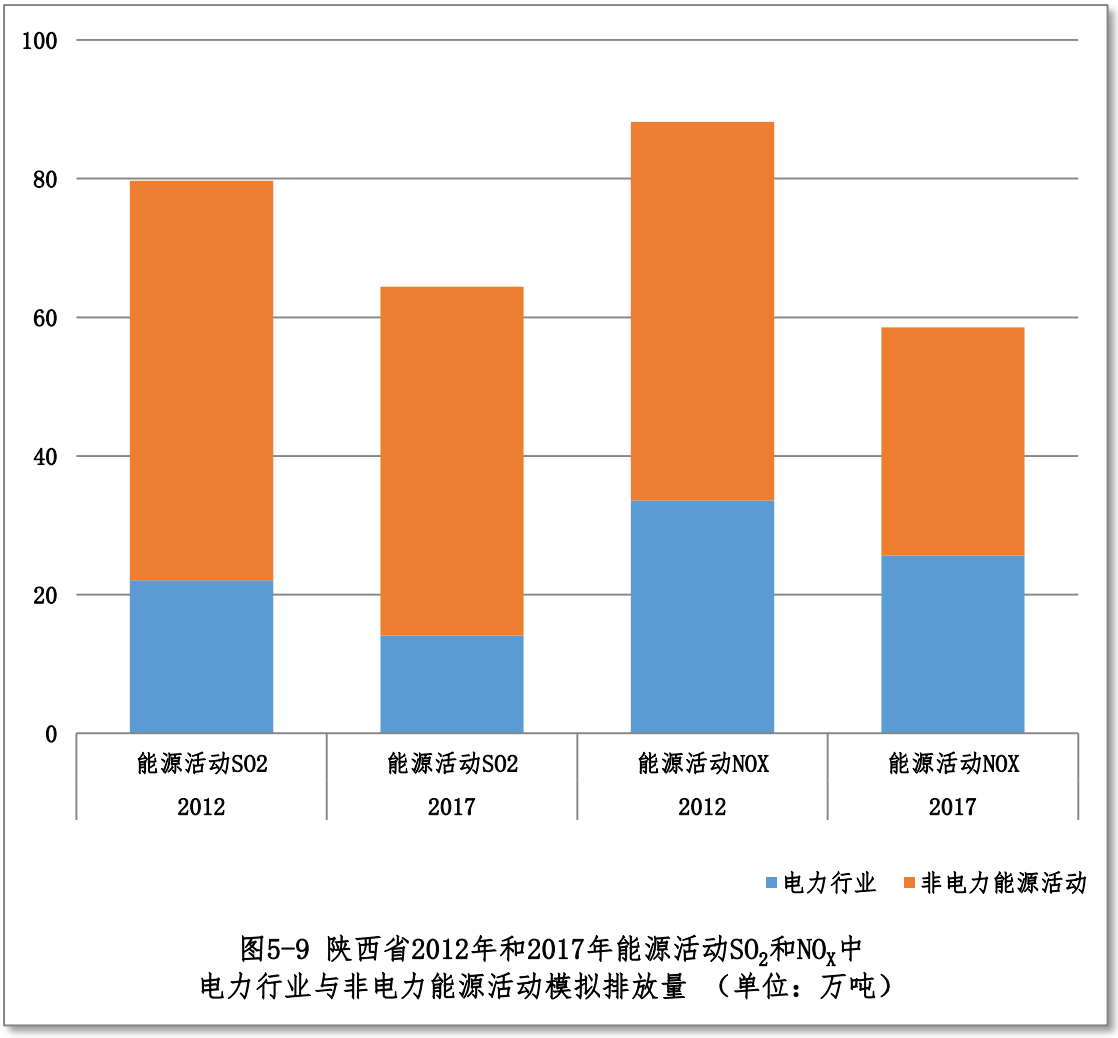


图5-9 陕西省2012年和2017年能源活动SO_2和NO_X中
电力行业与非电力能源活动模拟排放量 （单位：万吨）

陕西省雾霾治理政策效果

表 5-3：陕西省 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度下降率

陕西省	计算下降率	目标下降率
$PM_{2.5}$	8.5%	N/A
PM_{10}	6.9%	15%

从模型分析结果可以看出，在现有的政策实施情景下，陕西省 PM_{10} 浓度的改善效果与其设立的目标存在一定差距。

另外尽管没有明确的省级 $PM_{2.5}$ 改善目标作为参考，但模型分析结果显示，陕西省与其他三省对比，其下降比例在目标四省中最低。

陕西省雾霾治理政策建议

陕西是煤炭生产消费大省，且陕北是中国的九大煤电基地之一，未来该省的燃煤机组可能进一步的扩张。压减煤炭消费量、特别是压减散煤的使用，是实现大气污染减排目标的关键。虽然陕西提出了明确的控制煤炭消费总量的目

标，即到 2017 年煤炭消费量控制在 1.38 亿吨[25]，但这个消费量目标与往年相比还是处于上升势态。

建议陕西省以压减和控制煤炭消费总量以及加强散煤燃烧的控制政策为主。由于之前该省的燃煤电站和大型焦炉已经采取了除尘、脱硫设施，且由于天然气价格远高于煤炭，推广天然气替代难度也很大，因此未来要特别注意减少小火电机组和焦炭制造以及替代城市的燃煤锅炉等。另外建议陕西提高可再生能源比例，积极消纳临近可再生能源丰富省份的可再生能源电力。

另外，农业 NH_3 以及化工 NMVOC 的排放量都有小幅上升，鉴于其排放量绝对值较大，建议加强排放源控制。在特定时期以及气候条件下，对农村秸秆燃烧继续严格控制。

总体而言，陕西省并未设定 $PM_{2.5}$ 减排目标，且当前政策情景下 2017 年 $PM_{2.5}$ 改善程度是四省中最低的。基于此，本研究建议陕西省结合中期评估结果，尽快制定更积极明确的 2017 年后减排目标；同时根据本省排放清单的特点，制定更为积极和具体的减排措施。

[25] 详见附件一。

5.2.4 四川省

$PM_{2.5}$一次源排放清单

根据四川省的$PM_{2.5}$一次源排放情景（图 5-10），2012 年该省最主要的一次排放源是秸秆燃烧，排放$PM_{2.5}$一次颗粒物 383,080 吨，占一次源总排放量的 56.3%。其他主要排放源包括能源活动、道路扬尘以及农村炊事薪柴燃烧，分别占一次源总排放量的 24.7%、10%和 7.9%。与其他三个目标省份的一次源相比，四川省的农村炊事薪柴燃烧带来的排放量比较高，达到 53,503 吨。

如果本研究中纳入的政策措施充分执行，根据模型分析结果，2017 年该省一次源排放总量将比 2012 年下降 24.6%。届时最主要的一次排放源依次是秸秆焚烧、道路扬尘、能源活动以及农村炊事薪柴燃烧，分别占一次源总排放量的 39.4%、26.1%、24.9%和 8.5%。其中，与其他三省一样，秸秆燃烧的减排比例最大，达到 47.2%；能源活动排放下降 24%，但其中电力的排放仅下降了 10.6%；农村炊事薪柴燃烧排放下降 18.7%；但道路扬尘排放增加了 96%。

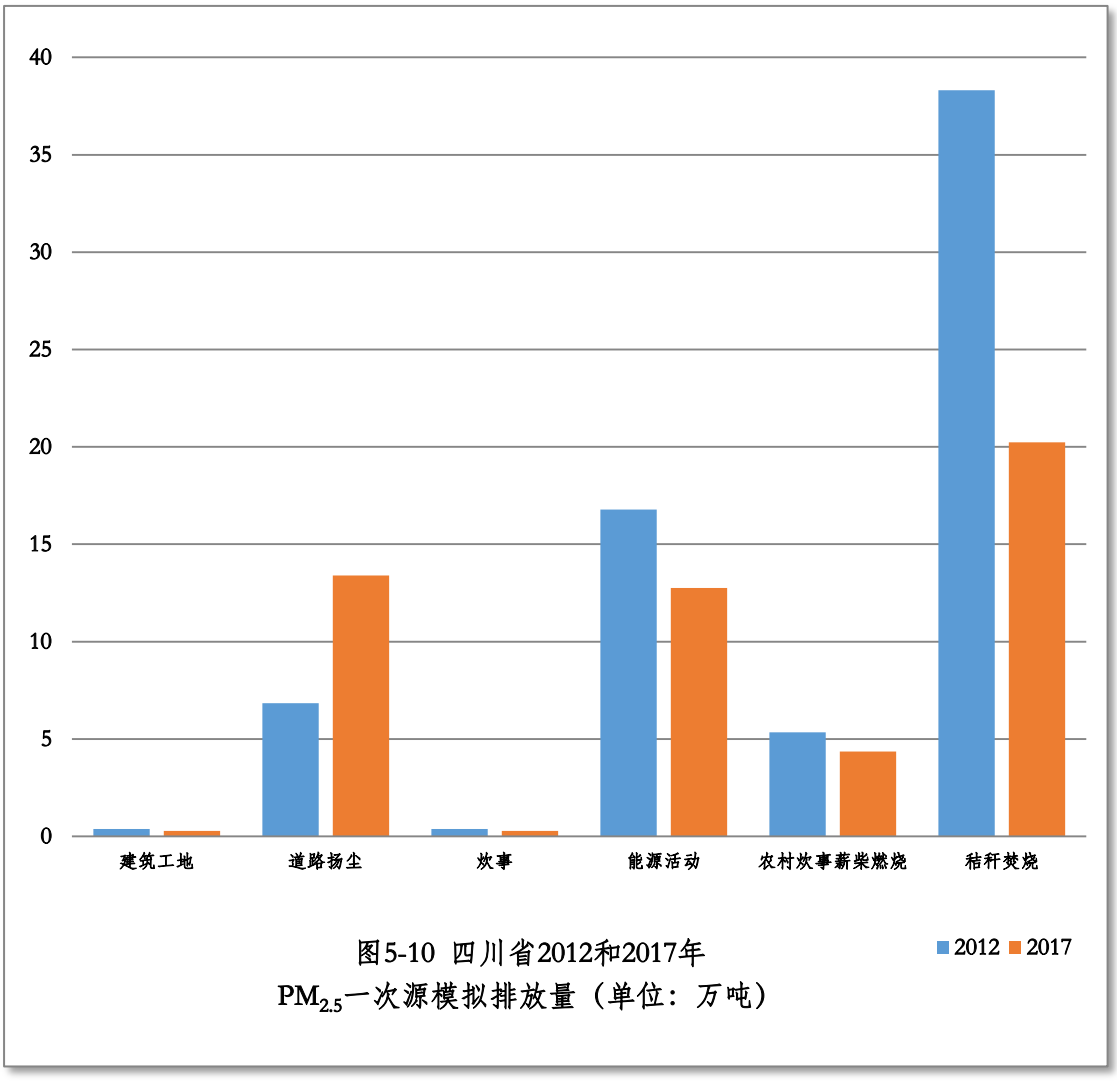


图5-10 四川省2012和2017年
$PM_{2.5}$一次源模拟排放量（单位：万吨）

$PM_{2.5}$二次源排放清单

根据四川省的$PM_{2.5}$二次源的前体物排放情景（图 5-11 和图 5-12），2012 年的主要二次源前体物为非电力能源活动的SO_2和NO_X以及农业NH_3，排放量分别为 740,469 吨、586,799 吨和 526,000 吨。其中非电力能源活动燃煤排放的SO_2占SO_2排放总量的 84.3%。

模型结果显示，通过实施现有政策，2017 年四川省燃煤导致的SO_2和NO_X的排放量将分别下降 21.0%和 22.0%。电力行业的SO_2和NO_X的排放量分别下降 26.8%和 14.5%。来自非电力能源活动的SO_2和NO_X分别下降 19.9%和 31.1%。非电力能源活动燃煤产生的SO_2在 2017 年将达到 593,189 吨，占SO_2总排放量的 85.5%，排放量达到 593,189 吨，成为届时四川省最主要大气污染源。

2017 年农业NH_3排放上升了 8.7%，达到 572,000 吨。化工行业的 NMVOC 排放以及燃油带来的 HC 排放量也均呈小幅度上升趋势，仅占比最低的加油站 NMHC 排放有所下降。

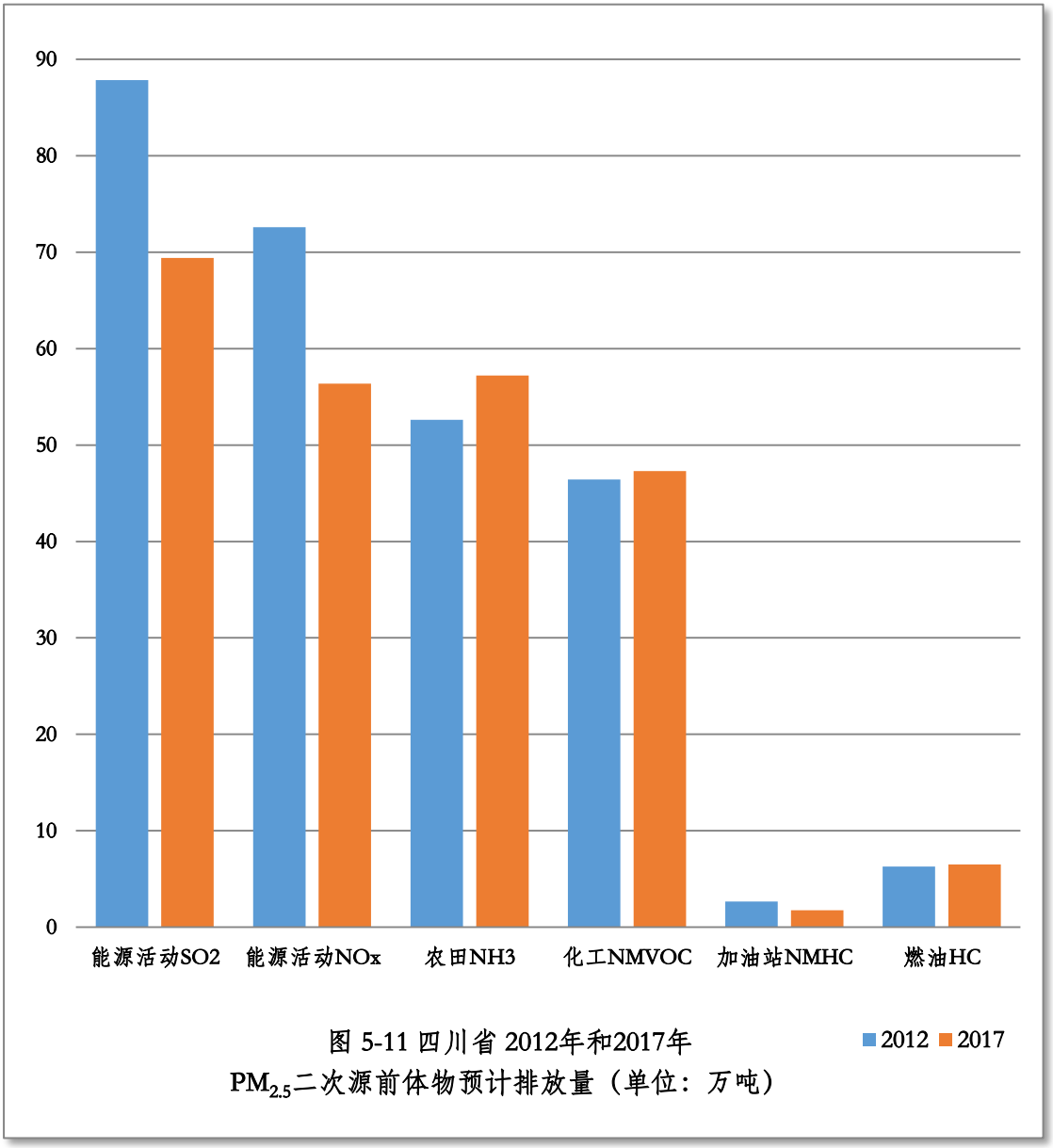


图 5-11 四川省 2012年和2017年
$PM_{2.5}$二次源前体物预计排放量（单位：万吨）

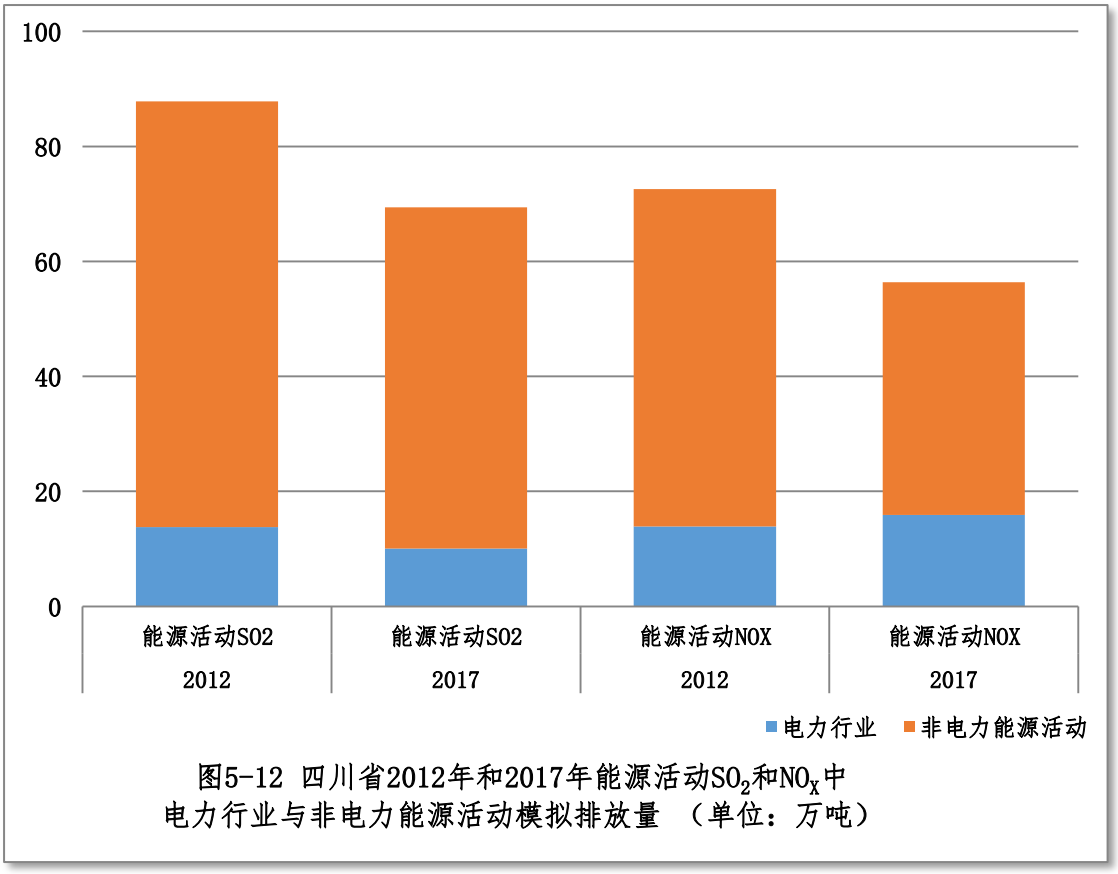


图5-12 四川省2012年和2017年能源活动SO_2和NO_X中
电力行业与非电力能源活动模拟排放量 （单位：万吨）

四川省雾霾治理政策效果

表 5-4：四川省 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度下降率

四川省	计算下降率	目标下降率
$PM_{2.5}$	24.3%	N/A
PM_{10}	12.1%	10%

根据模型分析结果，从全省范围来看，四川省的现有政策的空气改善效果比较理想，是目标四省里 $PM_{2.5}$ 下降幅度最大的；其 PM_{10} 的浓度下降幅度也超过了设定的目标。

四川省雾霾治理政策建议

四川作为农业大省， 2015 年粮食作物播种面积 645.4 万公顷。但是当前大气污染防治相关政策中并未包含控制农业 NH_3 的排放，排放量一直居高不下。因此本研究建议四川应加强对农业排放源的控制。

四川省的秸秆焚烧排放量在一次源中占比较高，因此在特定时期以及气候条件下对农村秸秆燃烧的严格控制对于迅速改善特定季节以及不利大气条件下的空气质量有重要意义。

四川是水电较为发达的省份，相对燃煤发电，非电力能源活动燃煤产生的 SO_2 较高，因此建议四川进一步加大燃煤小锅炉整治和散煤清洁化治理，并合理控制煤炭消费总量。

6. 后《大气污染防治行动计划》时期减排效果展望

6.1 情景假设

假设在现有政策继续实施的情景下，即全国包括四省将持续控制雾霾，并以最迟在 2030 年 $PM_{2.5}$ 浓度达到年均 35 微克/立方米排放标准为目标。具体而言，这种政策情景主要包括：

- 我国能源结构持续清洁低碳化
- 原有的大气雾霾控制政策中的措施继续实施和强化
- 部分政策措施的减排效果开始下降：如秸秆焚烧、黄标车淘汰、建筑工地扬尘控制、化工有机物排放控制等
- 地方政府对减少煤炭消费（包括散煤）给予更多关注

据此，本章对《大气污染防治行动计划》实施之后——即 2017 至 2020 年，四省主要 $PM_{2.5}$ 一次源和二次源前体物排放进行了分析。

6.2 后《大气污染防治行动计划》时期四省主要大气污染物下降情况

四省情况综述

在前述的情景假设之下，本节列出了 $PM_{2.5}$ 一次源以及二次源前体物排放的数据及发展趋势。

根据一次源排放情景（图 6-1 至图 6-4），2020 年道路扬尘排放量相比 2017 年仍然会有提升，除此以外的其他主要一次源在《大气污染防治行动计划》结束后基本保持继续下降的趋势，尤其是秸秆燃烧显现出持续的政策效果，尽管年均下降幅度不如 2012-2017 年阶段。由非电力能源活动带来的排放也将下降超过一半。电力行业的一次源排放下降不多，除江苏外的其他三省的电力排放甚至还有小幅上升。

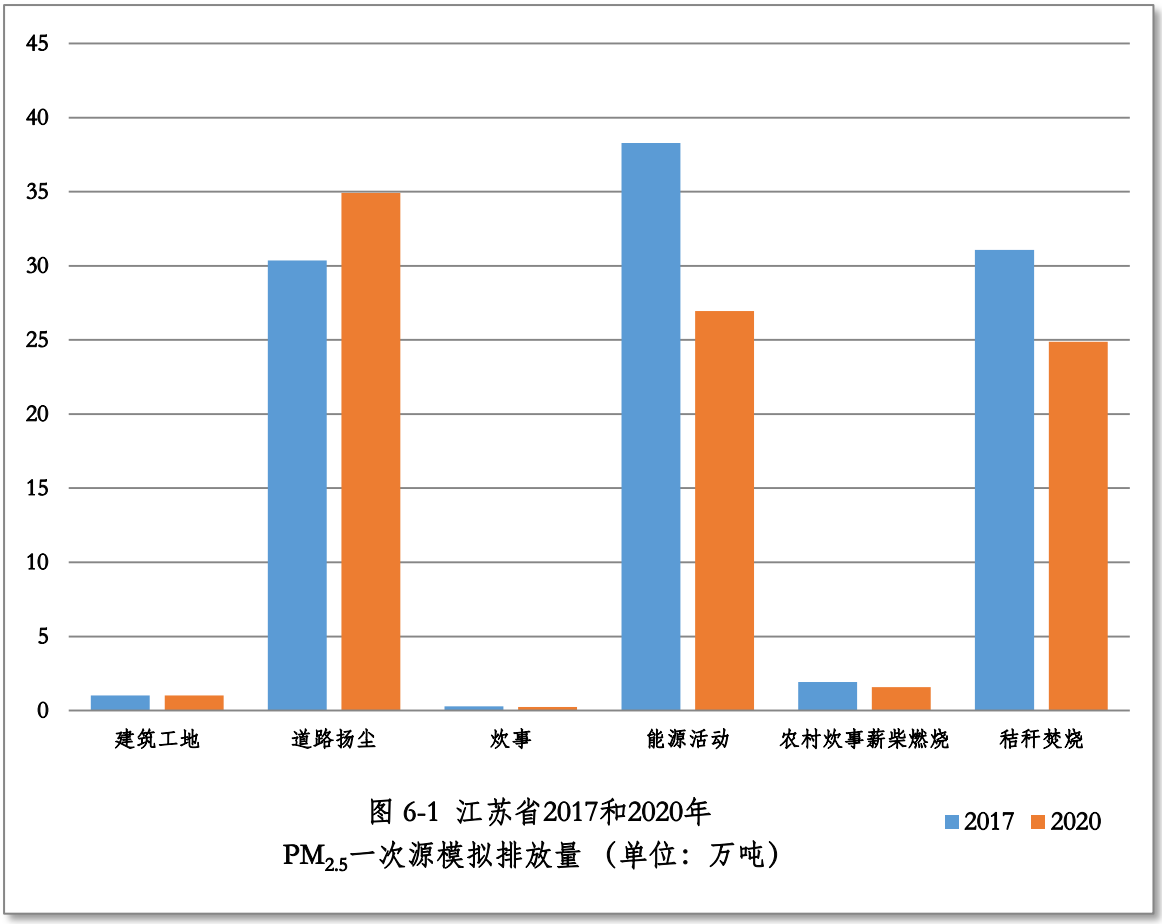


图 6-1 江苏省2017和2020年
$PM_{2.5}$一次源模拟排放量 （单位：万吨）

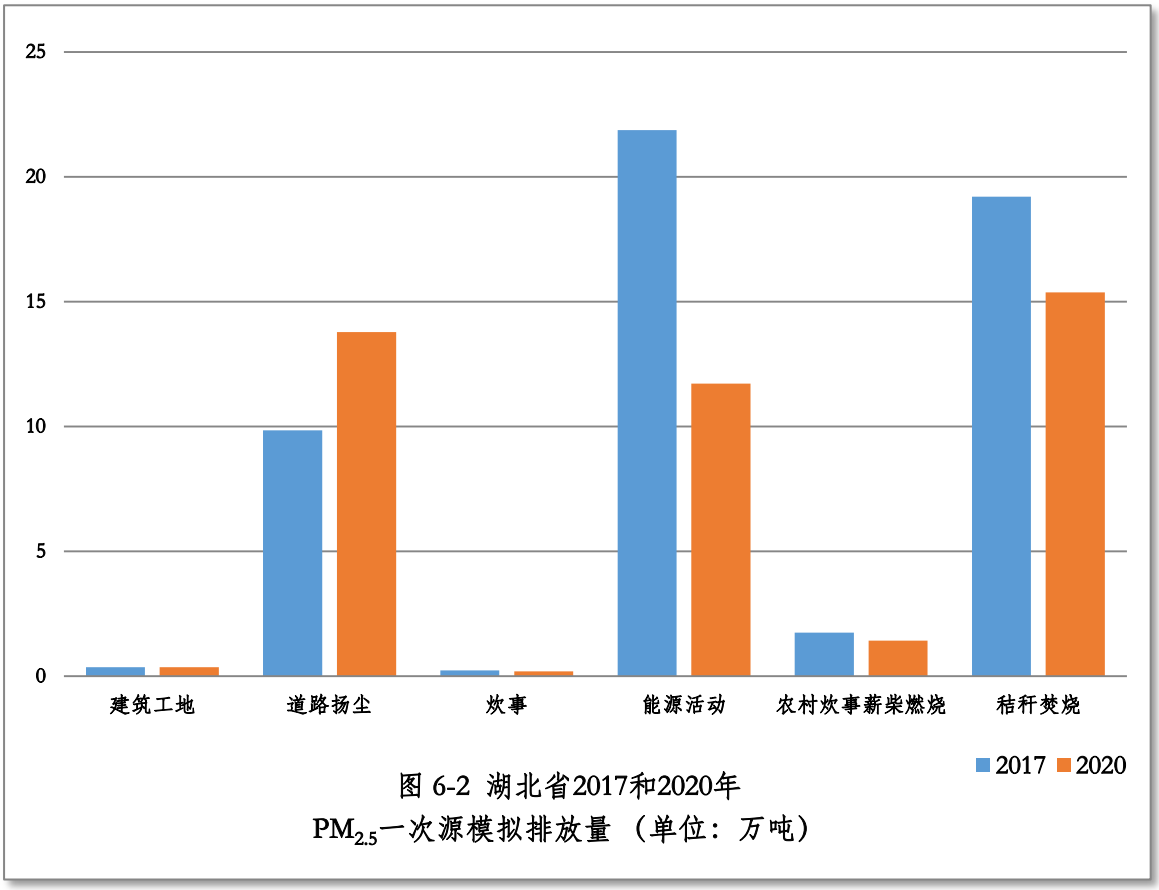


图 6-2 湖北省2017和2020年
$PM_{2.5}$一次源模拟排放量 （单位：万吨）

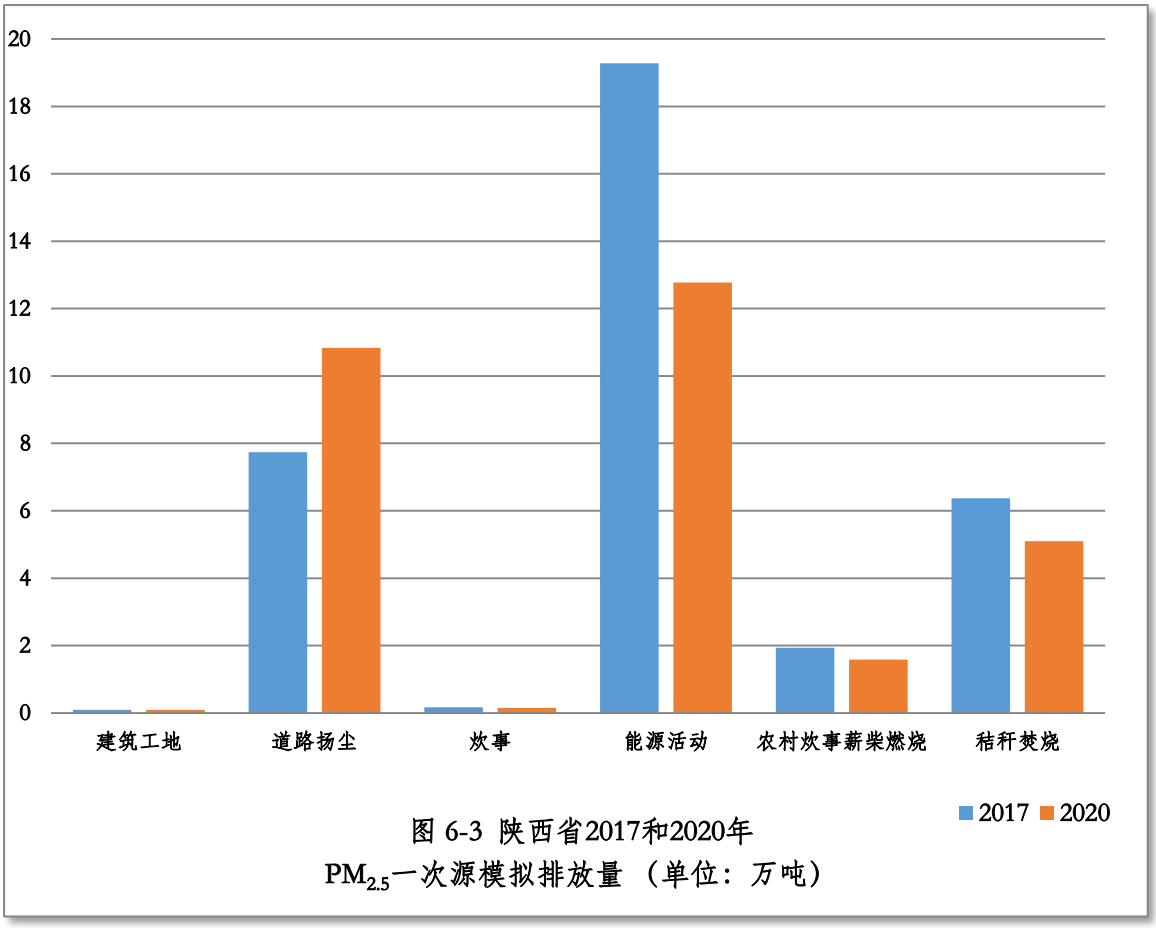


图 6-3 陕西省2017和2020年
$PM_{2.5}$一次源模拟排放量（单位：万吨）

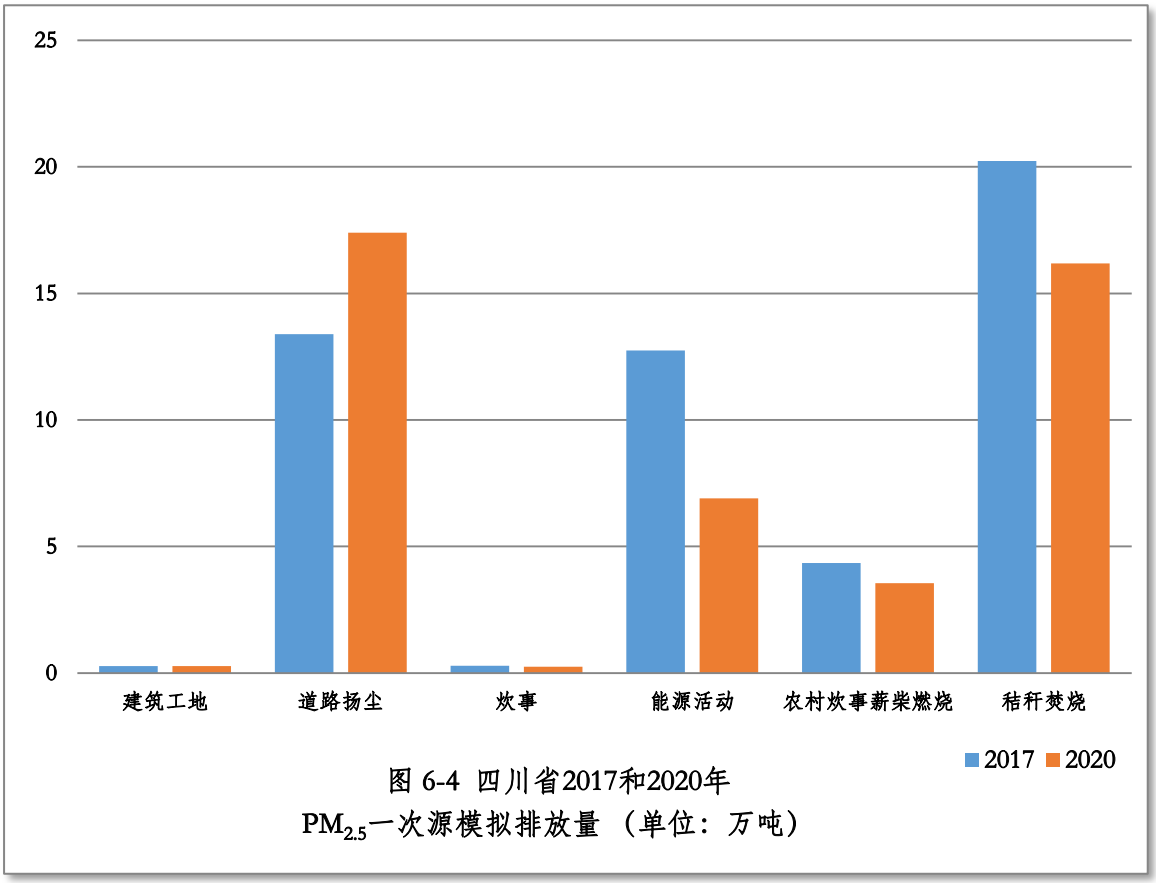


图 6-4 四川省2017和2020年
$PM_{2.5}$一次源模拟排放量（单位：万吨）

根据二次源前体物排放情景（图 6-5 至图 6-12 分别展示了各省 2017 年和 2020 年 $PM_{2.5}$ 二次源前体物模拟排放量以及能源活动产生的 SO_2 和 NO_X 中电力行业与非电力能源活动的模拟排放量），SO_2 和 NO_X 的排放量在 2017-2020 年持续下降。其中，四省在 2017-2020 年 SO_2 和 NO_X 的年均减排率均比 2012-2017 年略高。综合考察能源活动，通过煤炭消费总量的控制、能源消费结构的调整以及燃煤电厂的超低排放改造带来的燃煤排放 NO_X 将大幅度下降，降幅普遍超过一半；燃煤产生的 SO_2 减排率在 20%左右，相对 NO_X 减排率较低。电力行业排放的 SO_2 和 NO_X 也呈继续下降趋势，但湖北省的电力排放 NO_X 降幅较小，仅有 8.2%。

与 2012-2017 年期间相同，2020 年相比 2017 年，除加油站源 NMHC 外，其它三种前体物的排放几乎均呈小幅度上升趋势，不同的是燃油源 HC 的增排幅度略有降低。

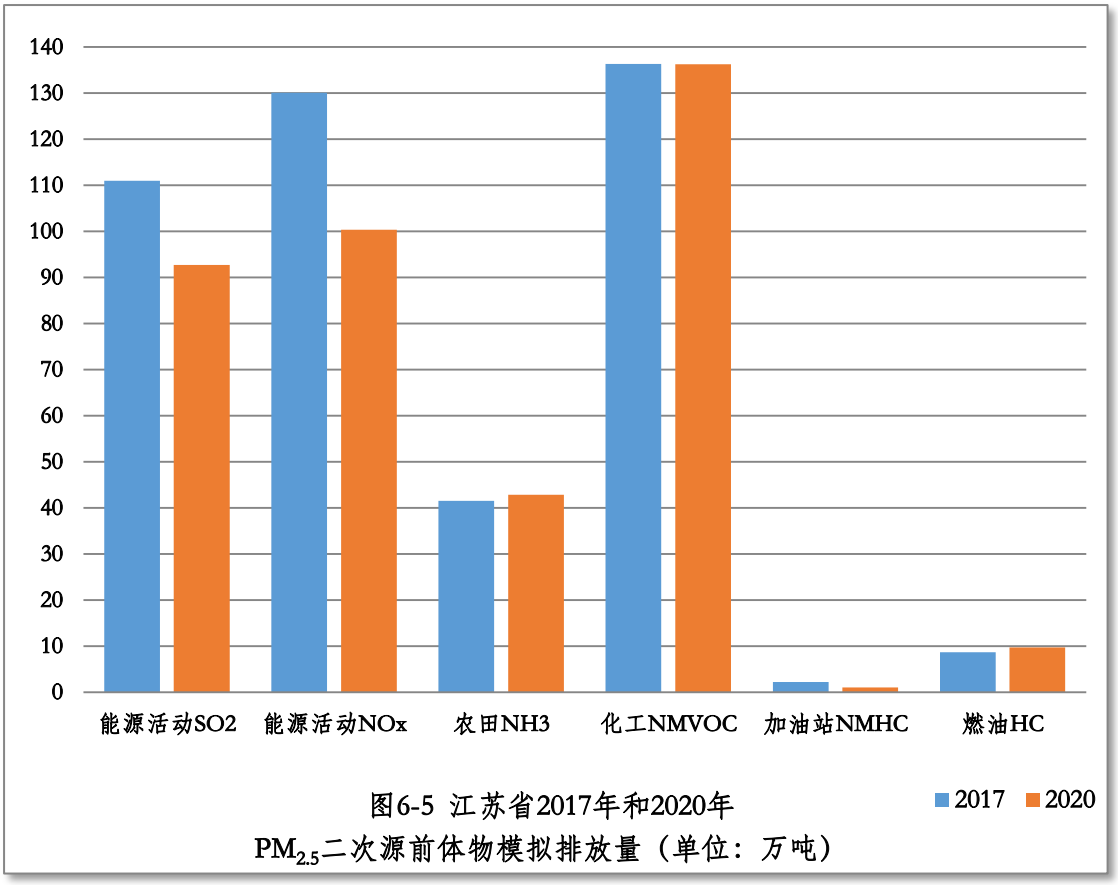


图6-5 江苏省2017年和2020年
$PM_{2.5}$二次源前体物模拟排放量（单位：万吨）

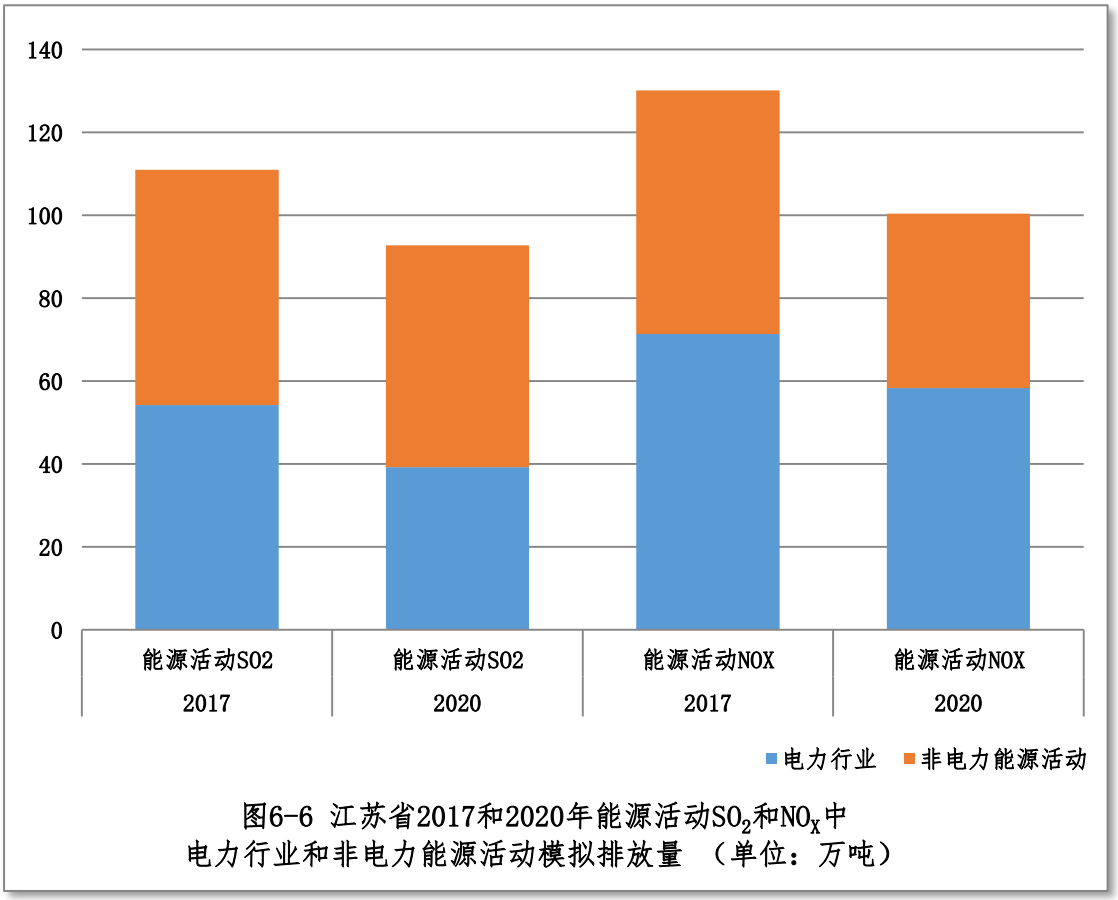


图6-6 江苏省2017和2020年能源活动SO_2和NO_X中
电力行业和非电力能源活动模拟排放量 （单位：万吨）

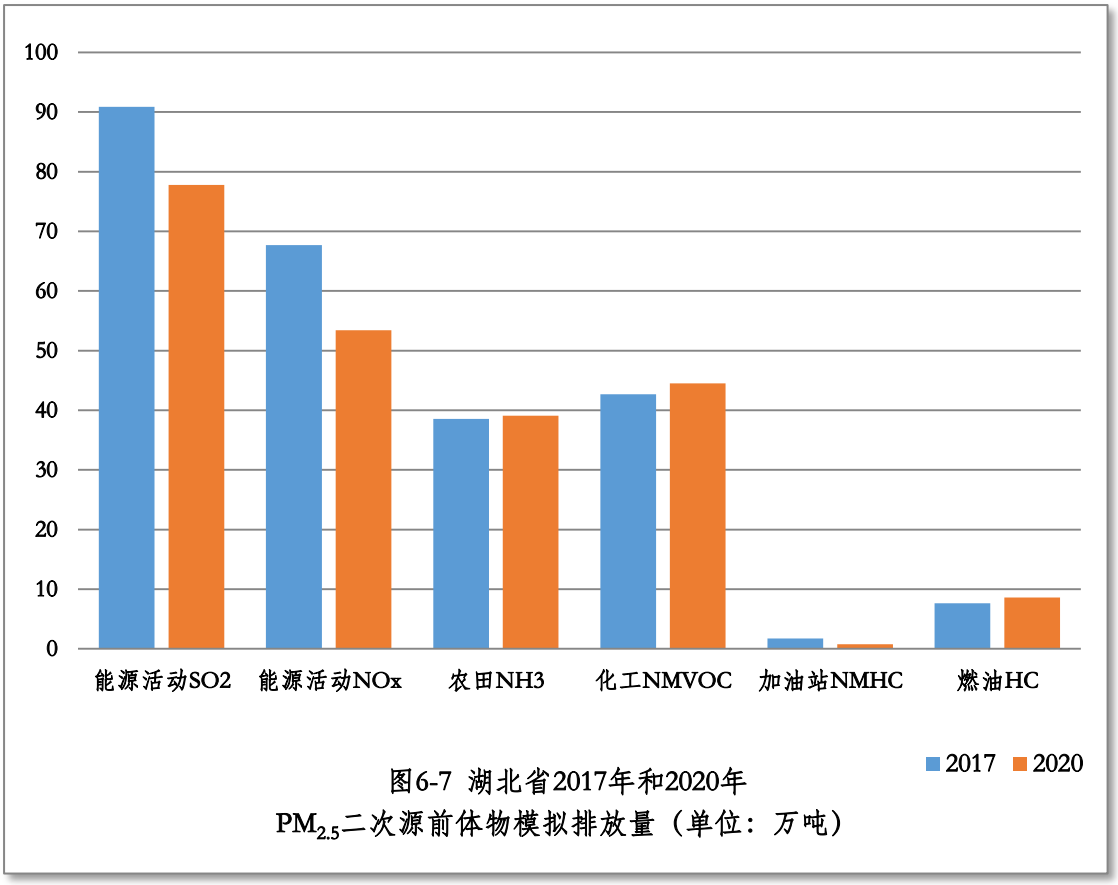


图6-7 湖北省2017年和2020年
$PM_{2.5}$二次源前体物模拟排放量（单位：万吨）

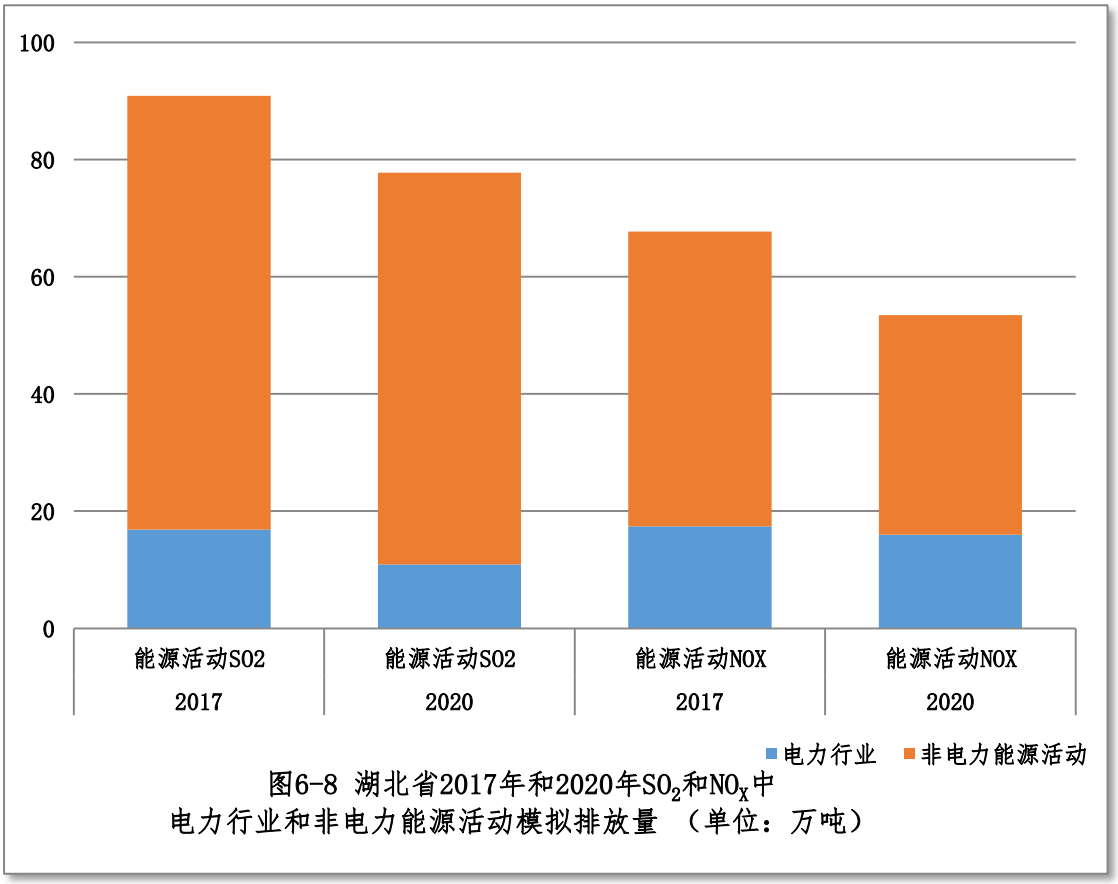


图6-8 湖北省2017年和2020年SO_2和NO_X中
电力行业和非电力能源活动模拟排放量 （单位：万吨）

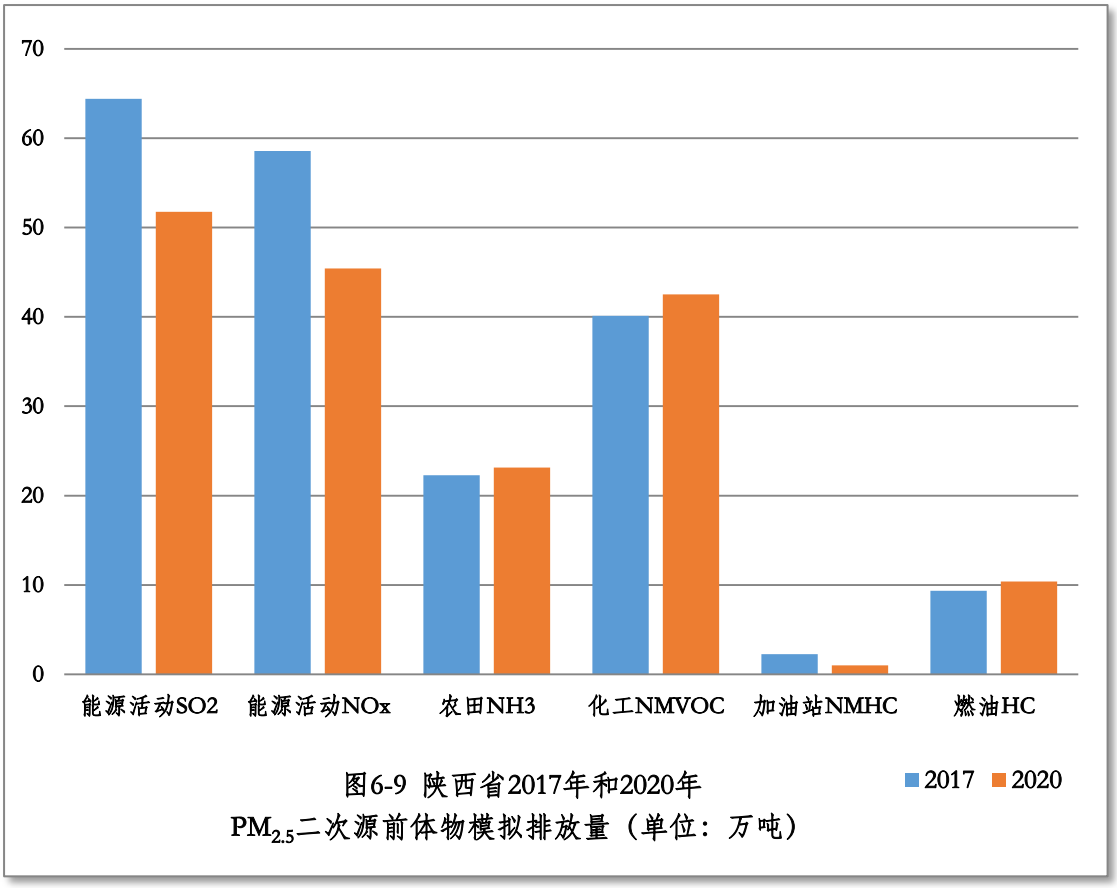


图6-9 陕西省2017年和2020年
$PM_{2.5}$二次源前体物模拟排放量（单位：万吨）

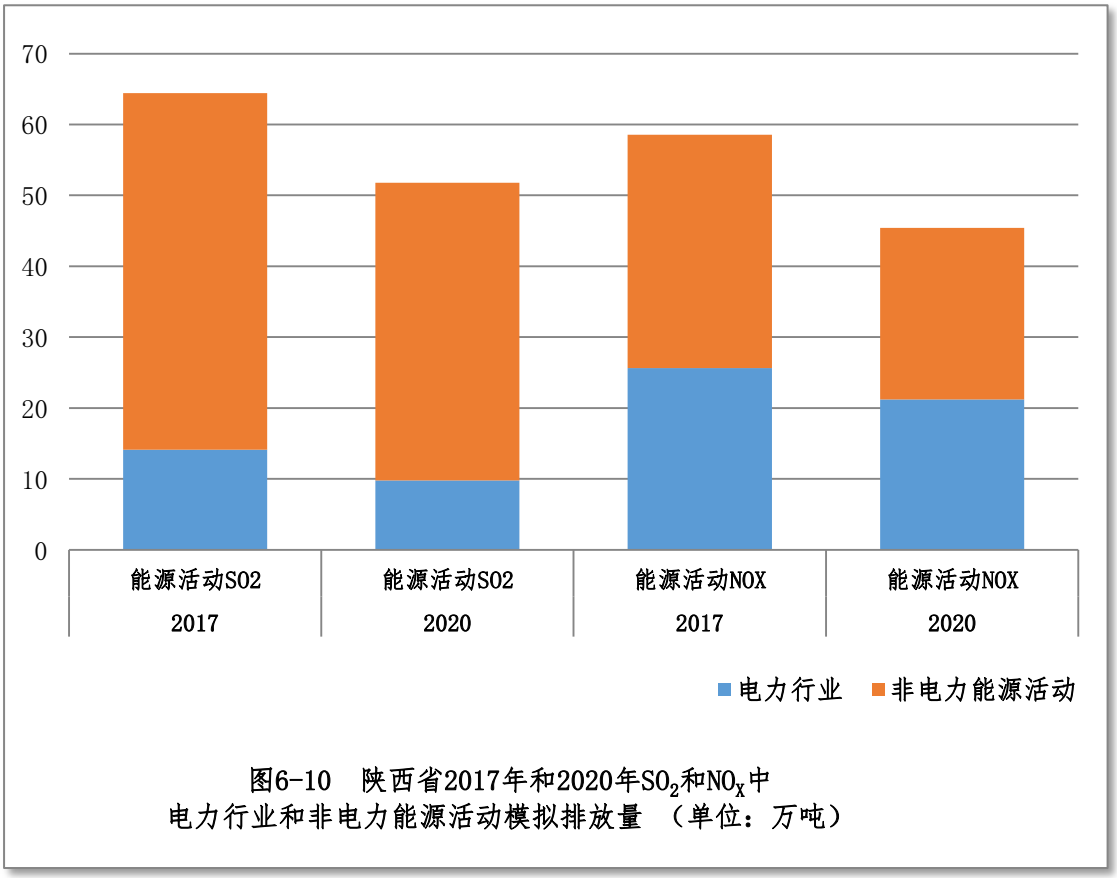


图6-10 陕西省2017年和2020年SO_2和NO_X中
电力行业和非电力能源活动模拟排放量 （单位：万吨）

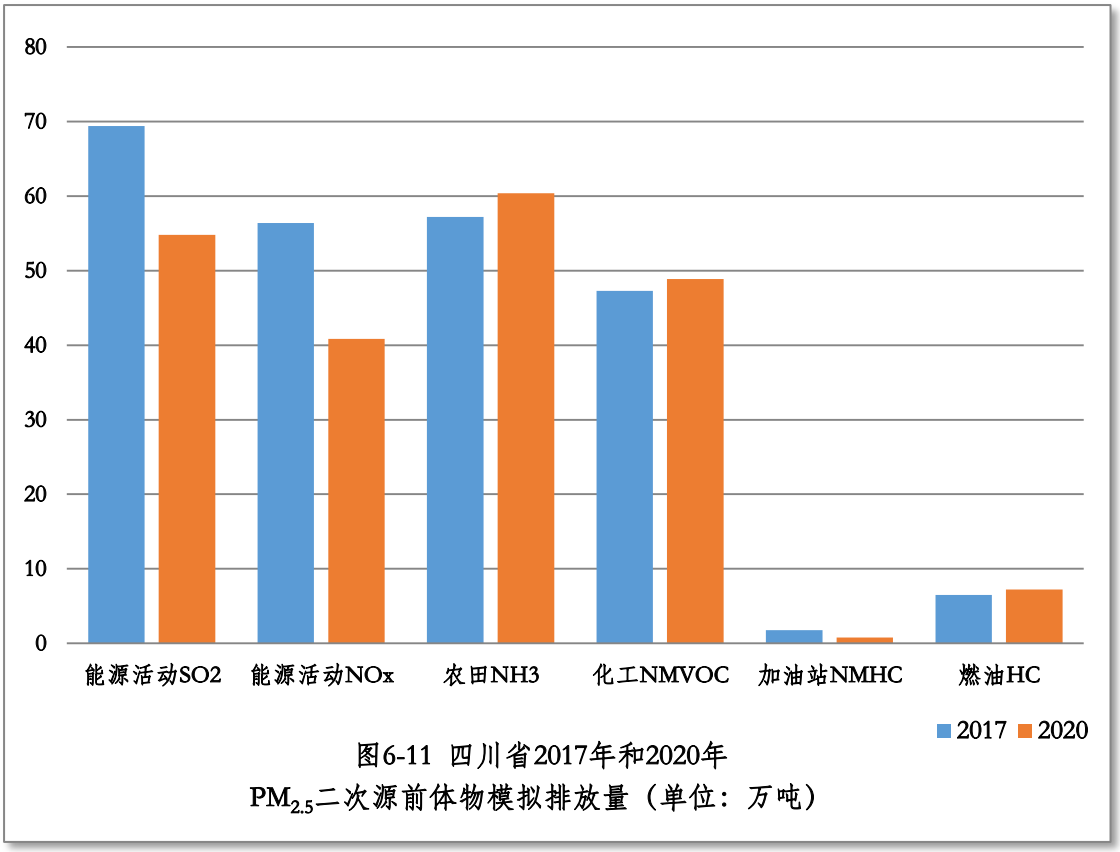


图6-11 四川省2017年和2020年
$PM_{2.5}$二次源前体物模拟排放量（单位：万吨）

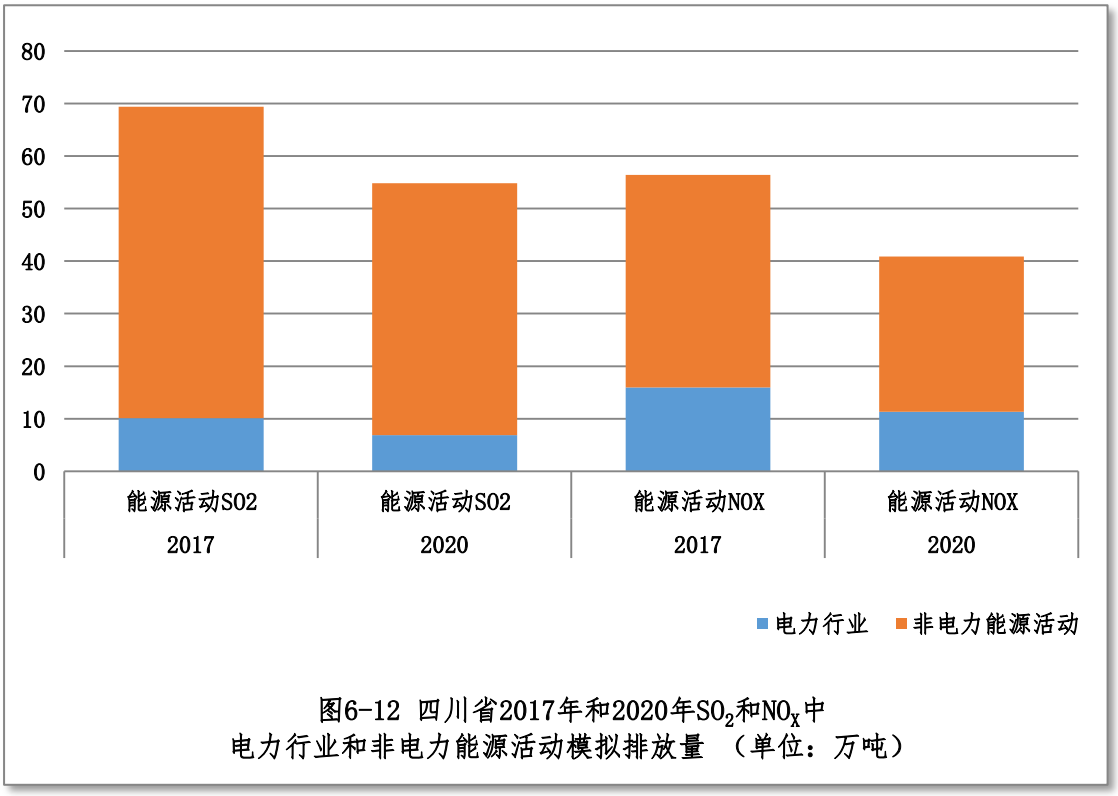


图6-12 四川省2017年和2020年SO_2和NO_X中
电力行业和非电力能源活动模拟排放量 （单位：万吨）

四省情况分述

江苏省

如果江苏省 2017 年后没有进一步的治霾政策措施出台，2020 年的 $PM_{2.5}$ 一次源排放量仅在 2017 年基础上下降了 13.0%。届时，江苏省最主要的一次排放源依次为道路扬尘、能源和秸秆燃烧，分别占总排放量的 39.0%、30.1%和 27.8%。其中，道路扬尘的排放量较 2017 年上升了 15%，其他排放均为下降趋势。

从二次源前体物排放来看，通过能源结构的进一步转变以及燃煤电厂的超低排放改造，2020 年来自电力行业的 SO_2 和 NO_x 排放量比 2017 年下降 27.6%和 18.3%。非电力能源活动燃煤排放的 SO_2 仅下降 5.8%，依然是主要的 SO_2 排放源。化工行业 NMVOC 的排放量相比 2017 年基本持平，依然是最主要的排放源。但农业 NH_3 以及燃油 HC 的排放在 2017 年后还将继续增加 3.1%和 11.8%。以上排放源的控制应作为江苏省 2017 年后出台治霾政策的重点。

湖北省

如果湖北省 2017 年后没有进一步的治霾政策措施出台，2020 年的 $PM_{2.5}$ 一次源排放量仅在 2017 年基础上下降了 19.5%。届时，湖北省最主要的一次源依次为秸秆燃烧、道路扬尘和能源活动，分别占总排放量的 35.9%、32.2%和 27.4%。其中，道路扬尘的排放量较 2017 年上升 40%，其他排放均为下降趋势。值得注意的是，尽管能源活动总体下降 46.4%，但电力的排放上升了 3.6%。

2020 年湖北省能源活动带来的 $PM_{2.5}$ 二次源前体物 SO_2 及 NO_x 排放相比 2017 年分别下降 14.4%和 21.1%。其中，电力行业排放的 SO_2 下降 35.4%，非电力能源活动燃煤产生的 SO_2 仅下降 9.7%，排放量达到 668,855 吨，占 SO_2 排放总量的 86%，依然是该省最主要的大气污染排放源。电力行业带来的 NO_x 排放降幅只有 8.2%。

除了加油站 NMHC 排放相对 2012-2017 年降幅更为明显，达到 55.0%以外，燃油 HC、农田 NH_3 和化工 NMVOC 排放均有上升，分别为 12.5%、1.3%和 4.2%。考虑到当前的政策对这些污染源还未施行有效的控制，因此 2017 年后大气污染治理方针中也不可忽视此类排放源。

陕西省

如果陕西省 2017 年后没有进一步的治霾政策措施出台，2020 年的 $PM_{2.5}$ 一次源排放量仅在 2017 年基础上下降了 14.2%。届时，陕西省最主要的一次源依次为能源活动、道路扬尘和秸秆焚烧，分别占 $PM_{2.5}$ 一次源排放的 41.8%、35.5%和 16.7%。其中，道路扬尘较 2017 年上升约 40%，其他排放均为下降趋势。但能源活动中，电力的排放上升了 8.7%。

从二次源前体物来看，陕西省 2020 年来自电力行业的 SO_2 和 NO_x 排放量分别下降 30.5%和 17.4%。届时燃煤导致的 SO_2 的排放量将下降 19.6%，达到 517,685 吨，依然是陕西省最主要的大气污染排放物，其中非电力燃煤排放的 SO_2 占 SO_2 排放总量的 81.1%。

此外，燃油 HC、农田 NH_3 和化工 NMVOC 排放将在 2020 年比 2017 年分别上

升了 11.3%、3.9%和 6.0%。但考虑到当前的政策对这些污染源还未施行有效的控制，因此 2017 年后大气污染治理方针中也不可忽视这两个排放源。

四川省

如果四川省 2017 年后没有进一步的治霾政策措施出台，2020 年的 $PM_{2.5}$ 一次源排放量仅在 2017 年基础上下降了 13.1%。届时，四川省最主要的一次源依次为道路扬尘、秸秆燃烧、能源活动、农村炊事薪柴燃烧，分别占一次源排放总量的 39.0%、36.3%、15.5%和 8.0%。其中，道路扬尘较 2017 年上升约 30%，其他排放均为下降趋势，但能源活动中的电力排放上升了 2.7%。

2020 年，来自电力行业的 SO_2 和 NO_X 排放量分别下降 31.7%和 28.8%，来自非电力能源活动的 SO_2 和 NO_X 排放量分别下降 19.2%和 27.0%。非电力燃煤活动产生的 SO_2 在 SO_2 排放总量中的占比进一步上升，达到 87.4%。农业 NH_3 的排放上升 5.6%，达到 603,812 吨，成为届时四川省最主要的大气污染物排放源。

此外，燃油 HC、农田 NH_3 和化工 NMVOC 排放将在 2020 年比 2017 年分别上升 11.2%、5.6%和 3.3%。考虑到当前的政策对这些污染源还未施行有效的控制，因此 2017 年后大气污染治理方针中也不可忽视此类排放源。

6.3 后《大气污染防治行动计划》时期的政策建议

在 2012-2017 年第一个雾霾治理期间，相对于初级阶段的治理目标而言，政策的效果比较容易体现。但随着目标设定更加严格，对政策的深度和力度的需求也会大大加强，因此 2017 年之后，大气污染的政策治理需要更强有力且持续性的政策，才能够确保大气质量不断提升，并将已有治理效果长期化和持续化。如果四省期望在 2025 年到 2030 年达到 35 微克/立方米的浓度目标，需尽快启动下一阶段大气污染控制的行动方案，尽早传递政策信号，使各地和相关产业有所准备和预期。

本节根据目标四省的后《大气污染防治行动计划》时代（2017-2020 年）的模型评估结果，针对其中主要的排放源及其涉及的部门，提出针对四省该阶段大气污染治理工作的政策建议。

首先，就空气质量改善目标设定而言，目前部分省份仅提出了省会城市或部分城市地区的 $PM_{2.5}$ 控制目标，缺少本省的量化考核目标，本研究建议四省应根据当前 $PM_{2.5}$ 的治理效果，在制定政策措施的同时，考虑提出更为严格和细致的本省 $PM_{2.5}$ 控制目标。

其次，从具体的治理政策角度分析，有以下几点建议。

从能源消耗的部门结构来看，目前我国包括目标四省工业产能普遍过剩，未来工业能耗增长可能比较缓慢。在此情景下，四省在 2017 年之后需要调整能源结构，进一步加大对煤炭的控制力度，大力发展可再生能源，切实做到能源清洁化利用。同时从长期来看，减少散煤使用是一个艰巨的任务，需要政府和公众的大力支持。

从能源利用的角度来看，未来电力在终端能源消耗中的比例不断提升将是大势所趋；而且从长期来看，电力总需求也将呈持续增长的趋势。对于由于电力生产带来的大气污染物排放，从减少存量的方面来看，需要不断提高既有电厂的改造，大力度推进超低排放技术和后期监管，确保超低排放切实运行。从

避免增量的方面看，建议基本上不再新建煤电机组，用可再生能源电力来满足新增电力的需求，并替代一部分淘汰的煤电。

由于经济水平的发展以及人民生活水平的不断提高，建筑能耗（包括服务业建筑和居民生活建筑）以及以机动车为主要来源的交通部门的能耗还有较大的增长空间，这两个部门将是未来能源增量的主要来源部门，也是长期政策的重要着力点。

由前一节展示的定量结果来看，四省与机动车联系紧密的道路一次源排放以及燃油带来的HC排放在2017-2020年阶段增长的幅度十分明显，尤其是前者。这就要求各省在控制机动车总量提高油品质量和加强车辆末端治理等交通政策方面提前布置，削弱交通部门污染物排放增长对于完成大气污染防治目标的负面影响。另外，鉴于电动汽车技术发展迅速，四省可以考虑进一步加大普及电动汽车的力度，从基础设施、优先通行、停车优先等方面提供有力的政策支持。同时在中小城市，大力发展慢行交通，把步行、自行车、公交车等慢速出行方式作为城市交通的一个重要主体，全力发展绿色出行。

另外，为了尽早推进国家层面上完整的大气污染物排放清单建设，本研究建议在各地建立地方清单工作过程中实现标准化，使清单具有可比性和可推广性。建议按照季节甚至是更高时间精度的污染物变化建立排放清单，并且考虑人口加权的大气污染暴露。目前，已有相关的研究成果包括“北京 $PM_{2.5}$ 化学组成及源解析季节变化”[26]。一些研究机构和高校也建立了较高时间精度的大气污染预报以及污染后来源快速分析的系统，但是这方面研究总体而言数量还较少，并且主要集中于北京和上海等大气污染防治重点区域。本研究的污染物排放清单也将会在后续研究中进一步的细化，以期对未来研究工作和政策制定提供更多支持。

[26] 中科院大气物理研究所研究，Zhang, R., Jing, J., Tao, J., Hsu, S. C., Wang, G., Cao, J., Lee, C. S. L., Zhu, L., Chen, Z., Zhao, Y., and Shen, Z.: Chemical characterization and source apportionment of $PM_{2.5}$ in Beijing: seasonal perspective, Atmos. Chem. Phys., 13, 7053–7074, 2013, doi:10.5194/acp-13-7053-2013.

7.结论

本研究根据目标四省在2013年《大气污染防治行动计划》出台之后分别制定的雾霾治理相关政策，基于扩展后的 IPAC-AIM/技术模型和日本京都大学的REASv2.1 模型，建立了包括 $PM_{2.5}$一次源和二次源前体物在内的江苏、湖北、陕西、四川四省 2012、2017 和 2020 年的主要污染物排放清单，并据此评估政策的实施对目标四省大气污染治理的效果，进而提出政策建议。

本研究根据模型分析结果发现，目标四省大气污染防治政策总体上是有效的。模型显示2017年江苏、湖北、陕西、四川四省 $PM_{2.5}$的年均浓度比2012年分别下降 15.0%、14.2%、8.5%以及 24.3%。从政策效果角度而言，江苏省存在无法达到其 20%的减排目标的风险；陕西省相比其他三省，大气污染防治政策的成果较为不足。且四省的下降幅度均未达到京津冀地区设定的 25%的下降目标。

从 $PM_{2.5}$一次源减排效果分析，在《大气污染防治行动计划》期间，四省出台的政策均有效地减少了一次源的排放。模型分析结果显示，相比2012年，四省 2017 年的 $PM_{2.5}$一次源排放将分别下降 21.4%、26.3%、19.3%和 24.6%。除了道路相关的一次源排放在四省范围内均有明显上升以外，其他各种来源的排放均有不同程度的下降。从排放量绝对值角度看，目标四省排放源下降幅度最大的均为秸秆燃烧，其次是能源活动。

在《大气污染防治行动计划》结束之后，排放源的变化趋势基本类似，预期道路扬尘排放在2020年相比2017年仍然会有提升，将成为2020年四省 $PM_{2.5}$一次源最主要的排放源之一。由于电力需求还将进一步增长，尽管实施超低排放改造等措施，电力现有排放水平也已经得到一定控制，但与 2017 年相比，2020 年目标四省电力带来的一次源排放的进一步减排效果不明显。秸秆燃烧的相关政策显现出持续的减排效果。

从 $PM_{2.5}$二次源前体物减排效果分析，在《大气污染防治行动计划》期间，燃煤产生的 SO_2是目标四省的主要大气污染物。总体来看，四省的 NO_x减排效果比 SO_2要好，一方面是因为电力行业的脱硫工作开展较早，进一步减排的空间不大。但更重要的是来自非电力能源活动的 SO_2排放没有得到有效地控制，这在江苏、湖北两省显得尤为突出，两省 2017 年非电力能源活动的 SO_2排放量仅比2012年下降了 2.1%和 3.7%。

《大气污染防治行动计划》结束后，在现有治霾政策继续实施的情景下，2020 年四省主要的 $PM_{2.5}$二次源前体物包括江苏省化工行业的 NMVOC、湖北省非电力能源活动燃煤排放的 SO_2、陕西省煤炭消费排放的 SO_2以及四川省农业导致的 NH_3。针对以上排放源的分析，本研究提出以下政策建议：

首先，由于报告评估的湖北省、陕西省和四川省目前都没有设定省级的 $PM_{2.5}$改善目标，缺少量化的考核目标，不利于各省在2017年后出台进一步的治霾政策。因此本研究建议，在大气污染防治行动计划中期评估后，各个省份都应尽快出台以2015年为基准的2020年 $PM_{2.5}$浓度下降目标。

第二，当前雾霾治理取得的效果部分由于煤炭相关的高耗能、高污染行业发展放缓，如果未来煤炭消费量回升，空气质量可能再度恶化，因此本研究建议四省仍然把调整能源结构、压减煤炭消费量作为最核心的大气雾霾控制长期

政策之一，尽快出台明确的煤炭消费总量控制目标。

第三，在《大气污染防治行动计划》实行期间，多数政策能够较快显现效果，但若想在此后实现同样的减排速度或达成更积极的减排目标，则需要更严格、细致的政策以及更高的执行力度。换句话说，在更长的实施周期中，当前政策产生的短期效果会逐渐减少，雾霾治理的难度增大，因此未来还需要进一步落实并加强现有的政策及行动。

第四，四省当前政策对本省排放量突出的大气污染物的控制力度较弱。建议四省尽快制定本省排放源清单，并据此有的放矢地出台进一步的大气污染防治政策。

综上，本研究认为，2016 年后的雾霾治理进入攻坚战时期，建议四省在控制能源消费增长、调整能源结构以及控制煤炭消费的政策措施持续加强的情况下，根据各自排放清单特点，在中期评估的基础上，明确提出本省 $PM_{2.5}$ 减排目标，建立完善的排放清单，确保在 2030 年或者之前达到现有的国家二级大气质量标准。

8.附录

附表一：四省大气污染防治政策及相应的量化结果

政策	政策描述	模型定量参数
江苏省		
产业结构调整	对钢铁、水泥等高耗能高排放行业，实施行业产能等量或减量替代、能耗和污染物排放总量减量替代。新建排放二氧化硫、氮氧化物、烟粉尘、挥发性有机物的项目，实行现役源 2 倍削减量替代。	主要高耗能产品产量到 2017 年增长 3%左右。
控制煤炭消费总量	控制煤炭消费总量。把控制煤炭消费总量作为大气污染防治的关键举措，2014 年 6 月底前，制定全省煤炭消费总量控制方案和目标责任管理办法，将煤炭消费总量控制目标分解至各省辖市及重点行业。到 2017 年，煤炭占能源消费总量比重降低到 65%以下，力争实现全省煤炭消费总量负增长。严格控制电力行业煤炭消费新增量，重点削减非电行业煤炭消费总量。新建项目禁止配套建设自备燃煤电站，耗煤项目实行煤炭减量替代。除热电联产外，禁止审批新建燃煤发电项目。2015 年年底前，淘汰 30 万千瓦以下非供热燃煤火电机组；现有多台燃煤机组装机容量合计达到 30 万千瓦以上的，按照煤炭等量替代的原则建设为大容量燃煤机组。	2017 年煤炭占能源消费总量比重降低到 65%以下。
清洁能源发展	将能源结构调整、清洁能源保障纳入全省煤炭消费总量控制方案，制定清洁能源发展、利用激励政策。着力推进沿海液化天然气（LNG）基地和苏北主干输气管网等基础设施建设，鼓励发展天然气分布式能源等高效利用项目，扩大区外来电规模，大力开发利用风能、太阳能、生物质能、地热能。禁止进口高灰份、高硫份的劣质煤炭，限制进口高硫石油焦。提高洗选煤使用比例，禁止燃用高硫份高灰份煤炭。到 2017 年，天然气占一次能源比重力争达到 12%以上，基本完成燃煤锅炉、工业炉窑、自备燃煤电站的天然气等清洁能源替代改造任务，力争区外来电规模达到 1500 万千瓦，风电、光伏、生物质发电规模分别达到 600 万千瓦、200 万千瓦、100 万千瓦，非化石能源占总能源 7.3%。	到 2017 年，天然气占一次能源比重达到 12%；风电、光伏、生物质发电规模分别达到 600 万千瓦、200 万千瓦、100 万千瓦，非化石能源占总能源 7.3%。
散煤控制	制定实施全省燃煤锅炉大气污染整治工作方案，各市、县（市）人民政府结合城市高污染燃料禁燃区建设，制定和实施本辖区锅炉整治年度计划。2014 年 6 月底前，制定全省锅炉整治的财政补贴政策。加强供热基础设施建设，淘汰供热管网范围内的燃煤锅炉。供热管网外、天然气管网覆盖范围内的燃煤锅炉，实施天然气改造工程。供热管网、天然气管网覆盖范围以外的 10 蒸吨/小时及以下燃煤锅炉，采用生物质成型燃料、电等替代燃煤，10 蒸吨/小时以上的燃煤锅炉鼓励使用生物质成型燃料替代燃煤，或实施脱硫和除尘提标改造，确保达标排放。2017 年年底前，基本完成燃煤小锅炉整治任务。城市建成区禁止新建除热电联产以外的燃煤锅炉；其他地区原则上不再新建 10 蒸吨/小时及以下的燃煤锅炉。	散煤消费量下降 10%
绿色建筑	落实全省绿色建筑行动实施方案，政府投资的公共建筑、保障性住房率先执行绿色建筑标准。新建建筑严格执行强制性节能标准，推广使用太阳能热水系统、地源热泵、空气源热泵、光伏建筑一体化、“热—电—冷”三联供等技术和装备。到 2015 年，全省城镇新建建筑全部按一星及以上绿色建筑标准设计建造，新增可再生能源建筑应用面积 2 亿平方米。到 2017 年，全省建成家庭式光伏电站 10 万套，分布式光伏建筑电站规模达 20 万千瓦，20%的城镇新建建筑按二星及以上绿色建筑标准设计建造。	新建建筑单位面积能耗下降 30%（和现有建筑平均相比）

公共交通	强化公交优先战略，推行城市公共交通、自行车、步行的城市交通模式，降低公共交通出行费用，鼓励城乡居民选择公共交通工具出行。加快城市轨道交通、城市公交专用道、快速公交系统（BRT）等大容量公共交通基础设施建设，推进客运枢纽和换乘体系建设，实现市内公共交通体系与铁路、高速公路、机场等无缝衔接。加强城市步行和自行车交通系统建设，大力发展城市公共自行车网络。加大城市交通拥堵治理力度，推广智能交通管理。通过提供通勤班车、校车服务，实施出租汽车合乘、差别化停车收费政策等措施，鼓励绿色出行，减少机动车上路行驶总量。2014 年年底前，出台绿色循环低碳交通运输体系实施方案。到 2017 年，城市居民公共交通出行分担率达到 24%。	到 2017 年，城市居民公共交通出行分担率达到 24%。
集中供热	2014 年年底前，组织制定全省集中供热规划，对现有燃煤热电厂进行布局优化调整。沿江 8 个省辖市除上大压小或淘汰燃煤锅炉新增热源外，不再新建燃煤热电厂；苏北 5 个省辖市逐步扩大供热范围，适度增加热电厂布点。在现有热电企业密集地区开展综合整治，推进大型发电厂集中供热技术改造及供热管网建设，逐步减少热电企业数量。	
脱硫脱硝	2014 年 6 月底前，完成燃煤电厂脱硫和除尘设施提标改造，除循环流化床锅炉以外的燃煤机组均应安装脱硝设施。2014 年年底前，所有钢铁企业的烧结机和球团生产设备全部安装脱硫设施，完成钢铁烧结及球团、炼钢、炼铁、铁合金、轧钢、焦化等工序除尘设施的提标改造。2015 年年底前，石油炼制企业的催化裂化装置全部配套建设烟气脱硫设施，硫磺回收率达到99%以上；有色金属冶炼行业完成生产工艺设备更新改造和治理设施改造，二氧化硫含量大于 3.5%的烟气采取制酸或其他方式回收处理，低浓度烟气和排放超标的制酸尾气进行脱硫处理；现役新型干法水泥生产线全部实施低氮燃烧，其中，熟料生产规模在 4000 吨/日以上的全部实施脱硝改造，综合脱硝效率不低于 60%。2017 年年底前，所有干法水泥生产线完成脱硝改造。电子玻璃工业、陶瓷工业大气污染治理按要求完成提标改造。	60 万千瓦以上机组 100%安装脱硫和脱硝设备，2017 年脱硫率达到 90%，脱硝 60%。中小机组 100%安装脱硫和脱硝设备，2017 年脱硫率达到 70%，脱硝 50%。水泥窑、钢铁高炉和其他设备安装率脱硫和脱硝设备 85%，2017 年脱硫率达到 70%，脱硝 50%。
挥发性有机物污染防治	推进非有机溶剂型涂料和农药等产品创新，减少生产和使用过程中挥发性有机物排放。 2017 年年底前，石化、化工等行业全面推广“泄漏检测与修复”技术，完成重点化工园区（集中区）和重点企业废气排放源整治工作。按照国家规定时间和排放标准要求，开展涂料、胶粘剂等产品挥发性有机物污染控制工作。加强汽车维修、露天喷涂污染控制，推广绿色汽修技术，使用节能环保型烤漆房，配备漆雾净化装置和有害挥发物净化装置，有效过滤漆雾和有害挥发物。	化工生产有机物排放 2017 年下降 4%。
有机溶剂产品	严格执行国家涂料、胶粘剂等产品挥发性有机物限值标准。苏南 5 个省辖市率先推广使用无污染或低挥发性的水性涂料、环保型溶剂等，逐步减少高挥发性油性涂料、有机溶剂的生产、销售和使用。	下降 5%。
机动车污染防治	促进交通可持续发展。大力发展城市公交系统，优化城区路网结构；推广城市智能交通管理和节能驾驶技术；鼓励选用节能环保车型，推广使用天然气、新能源汽车，逐步完善相关基础配套设施。	大型车单车减排 35%

新能源汽车	落实江苏省“十二五”新能源汽车产业推进方案和江苏省新能源汽车推广应用示范方案，制定鼓励使用新能源汽车的补贴政策，研究制定鼓励电动汽车使用的电价政策，引导新能源汽车市场需求有序释放。在出租、公交、环卫、邮政、电力等公共服务领域和政府机关率先推广使用新能源汽车，推进公交车、出租车“油改气”或“油改电”。加快新能源汽车配套基础设施建设，各市、县（市）人民政府规划布局和建设车用加气站、标准化充换电站等公共设施。到2015年，南京、常州、苏州、南通、盐城、扬州等城市共推广使用1万辆以上新能源汽车。	2017年新能源汽车5万辆
淘汰黄标车	开展大型城市燃油汽车保有量及出行量控制研究，根据城市发展规划，适度控制燃油汽车增长速度和使用强度。2014年6月底前，全省所有省辖市划定黄标车限行区，2014年年底前，沿江8个省辖市各县（市）划定黄标车限行区。加强限行区管理，对违反限行规定的车辆，依法予以处罚。2015年年底前，淘汰2000年12月31日前注册登记的微型、轻型客车和中型、重型汽油车，淘汰2005年年底前注册营运的黄标车，以及2007年12月31日前注册登记的中型、重型柴油车。制定和完善老旧车标准、淘汰办法和老旧车提前报废的奖励及补偿政策，加快淘汰老旧车辆，到2017年，再淘汰一批老旧车。	淘汰国一车
机动车排放标准和油品升级	先于国家要求实施油品升级，制定高品质燃油供应保障方案。2014年起，苏北5个省辖市供应符合第四阶段标准的车用汽油。2014年年底前，全面供应符合第四阶段标准的车用柴油。2015年年底前，全面供应符合第五阶段标准的车用汽、柴油。定期开展油品质量监督检查活动，严厉打击非法生产、销售行为，所有加油站严禁销售不符合标准的车用汽、柴油。	每车减排90%SO_2 新增车达到国四国五排放标准。
道路扬尘	减少道路扬尘污染。积极推行城市道路机械化清扫，提高机械化清扫率。增加城市道路冲洗保洁频次，控制道路开挖面积和频次，缩短裸露时间，及时修复破损路面。加强渣土运输车辆监管。	每车减少10%道路扬尘
工地扬尘	加强城市道路清扫保洁和洒水抑尘，提高机械化作业水平，控制道路交通扬尘污染，到2017年，沿江8个省辖市城市建成区主要车行道机扫率达到90%以上，其他城市建成区主要车行道机扫率达到80%以上。加强港口、码头、车站等地装卸作业及物料堆场扬尘防治，大型煤堆、料堆要实现封闭储存或建设防风抑尘设施。积极创建扬尘污染控制区，不断扩大控制区面积。到2017年，各省辖市建成区降尘强度比2012年下降15%以上。	单位面积工地下降33%的排放
油烟控制	2014年年底前，各市、县（市）人民政府制定餐饮服务业布局规划，合理布设、调整餐饮经营点。非商用建筑内禁止建设排放油烟的餐饮经营项目。餐饮经营单位必须安装油烟净化设施；营业面积在500平方米以上或者就餐座位数在250座以上的餐饮企业，应当安装油烟在线监控设施。推广使用高效净化型家用吸油烟机。开展餐饮行业污染专项治理，重点整治学校、繁华街道、居民住宅集中区和旅游风景区等环境敏感区的餐饮企业。	家庭单位下降28%， 餐饮业单位下降32%。 烤摊下降50%。
秸秆和露天焚烧	加强秸秆综合利用和禁烧。2014年年底前，完善秸秆机械化还田、收储、成型燃料制造、利用等环节的财政补贴和价格政策，大力推进秸秆机械化还田及能源化、饲料化、基料化、工业原料化等多种形式利用。2015年年底前，编制新一轮秸秆综合利用规划，试点建立生物质电厂、秸秆利用大户承包县域内的秸秆收集、利用模式，形成秸秆利用与收集责任关联体系。到2015年，建成完善的秸秆收贮体系，秸秆综合利用率达90%，到2017年，秸秆综合利用率达92%以上。实行秸秆禁烧目标责任制，将秸秆禁烧落实情况与考核、创建等工作挂钩，建立督查巡查和跨区域联动控制工作机制。	下降65%

农业氨排放	积极开发缓释肥料、有机无机复合肥等新品种，减少化肥施用过程中气态氨的排放。	下降 8%
湖北省		
产业结构调整	结合化解过剩产能、节能减排和企业兼并重组，有序推进位于城市主城区的钢铁、石化、化工、有色金属冶炼、水泥、平板玻璃等重污染企业环保搬迁或改造，到 2017 年底前基本完成。武汉市应重点研究推进武钢集团等企业的环保搬迁或改造工作。 加强对各类产业发展规划的环境影响评价。全省城市城区严禁新改扩建除上大压小、热电联产外的燃煤电厂。城市城区不再新建重污染型企业。	主要高耗能产品产量到 2017 年增长 6%左右。
控制煤炭消费比例	到 2017 年，全省煤炭占能源消费总量比重降低到 60%以下	2017 年 60%以下
散煤控制	加强燃煤锅炉整治和改造。加快推进集中供热、“煤改气”、“煤改电”工程建设，到 2017 年，地级及以上城市建成区基本淘汰每小时 10 蒸吨及以下的燃煤锅炉，禁止新建每小时 20 蒸吨以下的燃煤锅炉；其他地区原则上不再新建每小时 10 蒸吨以下的燃煤锅炉。在供热供气管网不能覆盖的地区，改用电、新能源或洁净煤，推广应用高效节能环保型锅炉。在化工、造纸、印染、制革、制药等产业集聚区，通过集中建设热电联产机组逐步淘汰分散燃煤锅炉。	散煤消费量下降 20%
脱硫脱硝	所有燃煤电厂、钢铁企业（烧结、球团工艺）、石油炼制企业、有色金属冶炼企业都要安装脱硫设施，每小时 20 蒸吨及以上的燃煤锅炉要实施脱硫。除循环流化床锅炉以外的火电燃煤机组均应安装脱硝设施，新型干法水泥窑要实施低氮燃烧技术改造并安装脱硝设施。燃煤锅炉和工业窑炉现有除尘设施要实施升级改造。2014 年 7 月 1 日以前，全省单机装机容量 30 万千瓦（武汉地区为 20 万千瓦）以上火电燃煤机组全部建成投运烟气脱硝设施，并同步实施脱硫除尘设施改造；“十二五”期间，所有新型干法水泥熟料生产线全面完成低氮燃烧改造并建成投运脱硝设施，其中，生产能力 4000 吨/日及以上新型干法水泥熟料生产线须在 2014 年底前建成投运脱硝设施；2015 年底前，钢铁行业烧结、球团设备、石化行业催化裂化装置全部实现烟气脱硫。	60 万千瓦以上机组 100%安装脱硫和脱硝设备，2017 年脱硫率达到 90%，脱硝 60%。中小机组 100%安装脱硫和脱硝设备，2017 年脱硫率达到 70%，脱硝 50%。 水泥窑、钢铁高炉和其他设备安装率脱硫和脱硝设备 85%，2017 年脱硫率达到 70%，脱硝 50%。
挥发性有机物污染防治	在石化、有机化工、表面涂装、包装印刷等行业实施挥发性有机物综合整治，在石化行业开展“泄漏检测与修复”技术改造。全面开展加油站、储油库和油罐车油气回收治理，武汉市应于 2014 年底前完成油气污染治理工作，其他地区应于 2015 年底前完成油气污染治理工作。积极推进石化、溶剂、涂料使用类行业和精细化工等行业有机废气回收利用和治理；全面提高表面涂装工艺低挥发性有机物含量涂料的使用比例；推广使用环保和低毒原辅材料，推进溶剂使用过程的污染治理	化工有机物排放 2017 年下降 44%。
机动车污染防治	促进交通可持续发展。大力发展城市公交系统，优化城区路网结构；推广城市智能交通管理和节能驾驶技术；鼓励选用节能环保车型，推广使用天然气、新能源汽车，逐步完善相关基础配套设施。到 2015 年，武汉市城区公交车新能源和清洁能源车比例达到 65%以上。 限期淘汰黄标车。加大黄标车淘汰力度，2015 年底前基本淘汰 2005 年底前注册营运的黄标车；到 2017 年，基本淘汰黄标车。推行黄标车限行措施，	大型车单车减排 35% 每车减排 90%SO_2 新增车达到国四国五排放标准。

	扩大限行范围。充分利用城市视频监控系统，强化对机动车尾气污染的监管。武汉市要率先做好黄标车淘汰工作。 推动油品配套升级。在 2013 年底前全面供应国 IV 车用汽油的基础上，2014 年底前，全面供应国 IV 车用柴油；2017 年底前，全面供应国 V 车用汽柴油。	
道路扬尘	减少道路扬尘污染。积极推行城市道路机械化清扫，提高机械化清扫率。增加城市道路冲洗保洁频次，控制道路开挖面积和频次，缩短裸露时间，及时修复破损路面。加强渣土运输车辆监管	每车减少 10%道路扬尘
工地扬尘	强化施工扬尘监管。落实建设项目扬尘污染防治要求，加强现场执法检查，强化施工期环境监管。综合采用封闭作业、洒水降尘、渣土运输车辆进出口道路硬化、遮盖、及时清运建筑垃圾和视频监控等多种措施，推进建筑工地绿色施工。	单位面积工地下降 33%的排放
其他扬尘	强化煤堆、料堆的监督管理。大型煤堆、料堆场应建立密闭料仓与传送装置，露天堆放的应加以覆盖或建设自动喷淋装置。对长期堆放的废弃物，应采取覆绿、铺装、硬化、定期喷洒抑尘剂或稳定剂等措施。积极推进粉煤灰、炉渣、矿渣的综合利用，减少堆放量。	单位面积下降 50%排放
油烟控制	加强油烟污染防治。严格新建饮食服务经营场所的环保审批，对未通过环保审批的餐饮项目，有关部门不得发放卫生许可证、工商营业执照；推广使用管道煤气、天然气、电等清洁能源；城区饮食服务经营场所应安装高效油烟净化设施，并强化运行监管；加强对无油烟净化设施露天烧烤的监管。	家庭单位下降 28%，餐饮业单位下降 32%。烤摊下降 50%。
秸秆和露天焚烧	禁止违规露天焚烧。禁止农作物秸秆、城市清扫废物、园林废物、建筑废弃物等生物质的违规露天焚烧。全面推广秸秆还田、秸秆制肥、秸秆饲料化、秸秆能源化利用等综合利用措施。	下降 51%
有机溶剂产品	在末端建立密闭废气收集系统，实施有机溶剂回收利用。	
陕西省		
产业结构调整	对钢铁、水泥等高耗能高排放行业，实施行业产能等量或减量替代、能耗和污染物排放总量减量替代。新建排放二氧化硫、氮氧化物、烟粉尘、挥发性有机物的项目，实行现役源 2 倍削减量替代。	主要高耗能产品产量到 2017 年增长 3%左右。
能源结构调整	到 2015 年，非化石能源消费比重提高到 10%，实现天然气消费总量 120 亿方，天然气消费比重达到 10 %，煤炭消费比重降至 70 %。到 2017 年，非化石能源消费比重提高到 13%，实现天然气消费总量 160 亿方，天然气消费比重达到 12%，煤炭消费比重降至 67 %。到 2020 年，重点污染源得到全面治理，能源消费总量控制取得明显成效，可再生能源消费达到较高比重，能源生产和消费对大气污染的负面影响显著降低，矛盾得到有效缓解，绿色、低碳和可持续发展的能源生产方式和消费模式不断深化。	参考以下具体指标
能源消费总量	有效控制能源消费总量过快增长。严格执行国家分解下达的“十二五”陕西省控制能源消费总量目标任务，2015 年全省能源消费总量目标控制在 12221 万吨标准煤；全社会用电量控制在 1350 亿千瓦时。通过结构调整压能、工程改造节能、管理制度减能、总量控制限能等四大举措，切实推进我省工业、交通运输、建筑和公共机构四大领域节能减排，确保完成全省万元 GDP 能耗降低 16%的目标任务。	2017 年控制在 13000 万吨标煤
控制煤炭消费总量	加快全省能源消费结构调整，逐步降低煤炭消费比重，2017 年煤炭消费子总量控制在 13800 万吨，2014 年关中地区煤炭消费量比 2013 年减少 1000	2017 年 13800 万吨

	万吨，年度煤炭消费总量控制在 6161 万吨，比上一年下降 13.9%,实现负增长。严控关中地区新增燃煤量，研究制定关中地区煤炭消费总量持续削减的管理办法。严格目标任务责任考核，实行能源消耗强度与煤炭消费总量双控制，全面完成 2017 年全省煤炭消费总量控制目标。	
火电	严格实施火电产业环保准入政策，西安、咸阳两市周边不再新建火电、热电厂，对已经取得“路条”的电厂项目要重新布局在陕北。	到 2017 年，天然气占一次能源比重达到 12%；风电、光伏、生物质发电规模分别达到 600 万千瓦、200 万千瓦、100 万千瓦，非化石能源占总能源 7.3%。
燃煤锅炉和散煤控制	燃煤锅炉要分区域参照火电机组排放标准执行。制定关中城市供热管理办法，禁止燃用劣质煤，提高采暖季城市供热用煤燃煤品质，设立区域煤炭配送中心，统一调配燃用低硫、低灰、高发热量动力煤。 制定实施全省燃煤锅炉大气污染整治工作方案，各市、县（市）人民政府结合城市高污染燃料禁燃区建设，制定和实施本辖区锅炉整治年度计划。2014 年 6 月底前，制定全省锅炉整治的财政补贴政策。加强供热基础设施建设，淘汰供热管网范围内的燃煤锅炉。供热管网外、天然气管网覆盖范围内的燃煤锅炉，实施天然气改造工程。供热管网、天然气管网覆盖范围以外的 10 蒸吨/小时及以下燃煤锅炉，采用生物质成型燃料、电等替代燃煤，10 蒸吨/小时以上的燃煤锅炉鼓励使用生物质成型燃料替代燃煤，或实施脱硫和除尘提标改造，确保达标排放。2017 年年底前，基本完成燃煤小锅炉整治任务。城市建成区禁止新建除热电联产以外的燃煤锅炉；其他地区原则上不再新建 10 蒸吨/小时及以下的燃煤锅炉。	燃煤锅炉排放下降 55% 散煤消费量下降 10%
脱硫脱硝	关中地区在建电厂要采用超净排放技术，达到燃气机组最新标准的排放限值；陕北、陕南地区新建电厂要达到重点区域特别排放限值。现役机组要加快实施脱硫脱硝除尘综合升级改造，关中地区按近零排放标准改造试点，逐步推广，到 2017 年底关中地区单机 30 万千瓦及以上机组完成改造。陕北、陕南地区机组按重点区域特别排放限值改造。同时强化实时监管和奖惩力度，定期公布火电机组污染物排放情况，对单机 30 万千瓦及以上火电机组未达到环保排放标准的，要限期整改，实施环保处罚、削减发电量，整改不达标的坚决实施关停，并对排放指标先进的机组给予资金和发电量奖励。对单机 30 万千瓦以下环保不达标的火电机组，要逐步给予关停。	60 万千瓦以上机组 100%安装脱硫和脱硝设备，2017 年脱硫率达到 90%，脱硝 60%。中小机组 100%安装脱硫和脱硝设备，2017 年脱硫率达到 70%，脱硝 50%。 水泥窑、钢铁高炉和其他设备安装率脱硫和脱硝设备 80%，2017 年脱硫率达到 70%，脱硝 50%。
挥发性有机物污染防治	开展挥发性有机物污染防治。对喷漆、印刷、服装干洗、石化、电子等企业实行挥发性有机污染物排放达标治理，削减挥发性有机物 25069 吨。禁止在城市建成区内进行平面及立体广告制作的露天喷涂作业。 完成关中地区现有 1248 个加油站，37 个油库和 270 辆油罐车的油气回收改造工作。开展石化、煤化工、涂料、喷涂、印刷、干洗、胶粘剂等重点行业挥发性有机物治理。	化工生产有机物排放 2017 年下降 4%。

有机溶剂产品	鼓励采用先进生产工艺、推广使用低毒、低挥发性的有机溶剂，支持非有机溶剂型涂料、农药、缓释肥料生产和使用，减少挥发性有机物排放。石化、有机化工、电子、装备制造、表面涂装、包装印刷、服装干洗等产生含挥发性有机物废气的生产经营单位，应当使用低挥发性有机物含量涂料或溶剂，在密闭环境中进行作业，安装使用污染治理设备和废气收集系统，保证其正常使用，记录原辅材料的挥发性有机物含量、使用量、废弃量，生产设施以及污染控制设备的主要操作参数、运行情况和保养维护等事项。（山西省大气污染防治条例）	排放下降 5%。
淘汰黄标车	全面开展机动车尾气治理工作。对经检测不符合环保技术标准，在维修治理后仍达不到标准要求的机动车，不得上路行驶。采用激励、约束并举的经济调节手段，加速淘汰“黄标车”。到 2015 年，淘汰 2005 年以前注册运营的“黄标车”标车万辆（不含摩托车），削减氮氧化物约 7 万吨。	淘汰国一车
机动车排放标准和油品升级	全省在国家规定的基础上，提前实施更高质量标准油品， 2014 年 10 月 1 日起，全省范围内加油站供应的车用汽、柴油全部达到国五标准。省内各炼油企业加快国五标准升级改造进度，延长石油集团 2014 年 9 月底前生产出符合国五标准车用汽、柴油，确保 10 月 1 日起供应满足省内需求的国五标准车用汽、柴油。加快未来能源、延长石油煤制油项目建设，加快煤焦油加氢工业示范，提高优于国标的清洁油品生产能力。总结甲醇汽油试点经验，加快推广甲醇汽油。	每车减排 90%SO_2 新增车达到国四国五排放标准。
道路扬尘	关中各市（区）快速路、主干道、次干道，其他城市快速路、主干道实施机械吸尘式清扫，城市建成区主要车行道机扫率达到 90%以上。主干道定时洒水，施工工地周边实施冲刷保洁作业，确保道路不起尘。	每车减少 10%道路扬尘
工地扬尘	加强扬尘控制，深化面源污染管理。安装视频监控设施监控堆场扬尘；各类建筑施工、道路施工、市政工程等工地和构筑物拆除场地周边必须设置围挡，湿法作业、场地覆盖；建筑工地施工现场主要道路必须进行硬化处理，禁止现场搅拌混凝土、砂浆。	单位面积工地下降 33%的排放
油烟控制	推进餐饮业油烟污染治理。饮食服务经营场所要安装高效油烟净化设施，并强化运行监管。强化无油烟净化设施露天烧烤的环境监管。	家庭单位下降 28%，餐饮业单位下降 32%。烤摊下降 50%。
秸秆和露天焚烧	加强秸秆焚烧环境监管。禁止农作物秸秆、城市清扫废物等生物质的露天焚烧。制订实施秸秆综合利用实施方案，积极推广秸秆还田、秸秆资源化等综合利用措施。	下降 50%
四川省		
产业结构调整	优化产业空间布局。按照主体功能区和城市规划要求，科学制定产业布局规划。制定重污染企业环保搬迁实施方案并推动实施，有序推进产业梯级转移、环保搬迁和退城进园，防止落后产能转移。	主要高耗能产品产量到 2017 年增长 5%左右。
能源结构调整	优化能源结构。推进清洁能源供应和消费多元化，逐步提高清洁能源消费比重。加快川东北、川中、川西天然气基地建设，提高天然气供应能力。优先发展城镇燃气，加快完善城市燃气管网、加气站等基础设施，进一步提高城市及近郊乡镇居民生活用气普及率。在做好生态保护和移民安置前提下，积极加快发展水电。因地制宜地开发利用风能，积极推进发展太阳能、生物质能、地热能。	

煤炭总量控制	2015 年全省煤炭消费总量控制在 1.25 亿吨以内	
新能源发展	2015 年天然气消费总量达到 216 亿立方米，水电装机容量 7000 万千瓦，水电发电量 2880 亿千瓦时，风机 100 万千瓦，太阳能发电装机规模 30 万千瓦，生物质能发电装机规模 28 万千瓦	同左
脱硫脱硝	2017 年除循环流化床锅炉以外均安装脱硝设施新型干法水泥窑安装脱硝设施，确保达标排放。所有 20 蒸吨以上燃煤锅炉安装脱硫设施。以国控成渝城市群（四川）14 个市为重点，突出抓好以下脱硫、脱硝、除尘、挥发性有机污染物等治理任务：火电燃煤机组 2013 年内必须全部安装脱硫设施，不能稳定达标的脱硫设施要限期升级改造，燃煤电厂综合脱硫率要达到 90%以上。单机容量 20 万千瓦及以上、投运年限 20 年内的现役燃煤机组必须于 2015 年底前全部配套脱硝设施，综合脱硝率达到 70%以上。燃煤机组 2015 年底前必须配套高效除尘设施，国控重点控制区成都市烟尘排放执行 20 毫克/立方米标准，国控一般控制区城市执行 30 毫克/立方米标准。	同左
挥发性有机物污染防治	大力削减石化行业挥发性有机物排放，积极推进有机化工等行业挥发性有机物控制，加强表面涂装工艺挥发性有机物排放控制，推进溶剂使用工艺挥发性有机物治理。	化工生产有机物排放 2017 年下降 4%。
机动车污染防治	加强环保标志管理，分阶段淘汰污染严重的大型载客汽车、重型载货汽车	大型车单车减排 35%
黄标车	到 2015 年底，各市（州）淘汰 2005 年低前注册营运的黄标车，到 2016 年底，全部淘汰国控重点控制区成都市的黄标车，2017 年基本淘汰全省的黄标车	淘汰黄标车
采用高标号油品	2017 年全面使用国五标准汽柴油	每车减排 90%SO_2 新增车达到国四国五排放标准。
道路扬尘	强化城市道路扬尘防治，推行道路机械化清扫等低尘作业方式，提高道路机械化清扫率。	每车减少 10%道路扬尘
工地扬尘	严格施工工地扬尘环境监管。强化施工工地出口设置冲洗平台、施工现场设置全封闭围挡墙、施工现场道路进行地面硬化、渣土车密闭运输等措施。	单位面积工地下降 33%的排放
其他扬尘	推进堆场扬尘综合治理，大型煤堆、料堆实现封闭存储或建设防风抑尘设施。	单位面积下降 50%排放
油烟控制	加强城市建成区餐饮油烟污染防治。	家庭单位下降 28%，餐饮业单位下降 32%。烤摊下降 50%。
秸秆和露天焚烧	结合当地实际划定秸杆禁烧重点区域。完善部门联动机制，加大对禁烧重点区域秸杆禁烧关键期巡查频次，及时制止和查处秸杆焚烧行为。充分利用气象遥感等监测手段，及时发现、制止和查处焚烧秸杆违法行为。	下降 51%

附表二：四省现有大气污染防治政策情景下 $PM_{2.5}$ 一次源及二次源前体物排放的模拟研究结果

江苏 $PM_{2.5}$ 一次源模拟排放量 （吨）

年份	建筑工地	道路	炊事	能源活动	农村炊事薪柴燃烧	秸秆燃烧
2012	14698	210864	3728	409917	23798	647590
2017	10194	303644	2771	382937	19346	310843
2020	10194	349191	2389	269518	15813	248675

江苏 $PM_{2.5}$ 二次源前体物模拟排放量 （吨）

年份	SO_2			NO_X			农业 NH_3	化工 NMVOC	加油站 NMHC	燃油 HC
	电力	非电力能源活动	小计	电力	非电力能源活动	小计				
2012	660150	579972	1240122	1056414	710438	1766852	394000	1350000	28760	75256
2017	541770	567797	1109567	713451	587689	1301140	415400	1363176	21742	86653
2020	392396	534767	927163	582930	420871	1003801	428350	1362837	9744	96871

湖北 $PM_{2.5}$ 一次源模拟排放量（吨）

年份	建筑工地	道路	炊事	能源活动	农村炊事薪柴燃烧	秸秆燃烧
2012	4895	50191	2962	242832	21434	400090
2017	3598	98374	2235	218702	17424	192043
2020	3598	137723	1936	117200	14242	153635

湖北 $PM_{2.5}$ 二次源前体物模拟排放量（吨）

年份	SO_2			NO_X			农业 NH_3	化工 NMVOC	加油站 NMHC	燃油 HC
	电力	其他能源活动	小计	电力	其他能源活动	小计				
2012	220617	768560	989177	248849	684685	933534	381800	421200	22998	66829
2017	168456	740405	908861	174017	503048	677065	385690	426907	17477	76571
2020	108796	668855	777650	159733	374735	534468	390750	445043	7858	86117

陕西 $PM_{2.5}$ 一次源模拟排放量（吨）

年份	建筑工地	道路	炊事	能源活动	农村炊事薪柴燃烧	秸秆燃烧
2012	1293	43884	2237	236955	23798	132720
2017	950	77411	1677	192862	19346	63706
2020	950	108376	1471	127788	15813	50964

陕西 $PM_{2.5}$ 二次源前体物模拟排放量 （吨）

年份	SO_2			NO_X			农业 NH_3	化工 NMVOC	加油站 NMHC	燃油 HC
	电力	非电力能源活动	小计	电力	非电力能源活动	小计				
2012	220639	576522	797161	335538	546496	882034	208980	378000	29696	80914
2017	140996	503179	644174	256458	329030	585488	222838	401224	22451	93281
2020	98019	419667	517685	211941	242175	454116	231421	425133	10062	103838

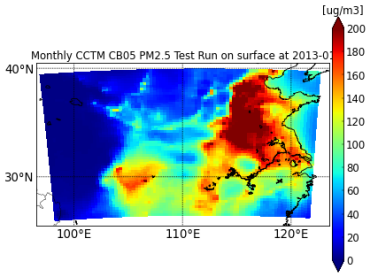
四川 $PM_{2.5}$ 一次源模拟排放量 （吨）

年份	建筑工地	道路	炊事	能源活动	农村炊事薪柴燃烧	秸秆焚烧
2012	3784	68310	3785	167784	53503	383080
2017	2781	133888	2835	127469	43493	202266
2020	2781	174054	2481	69070	35551	161813

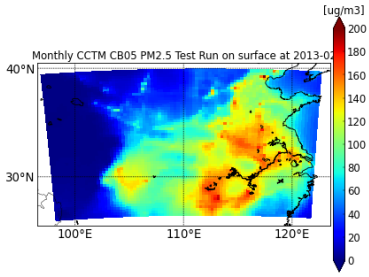
四川 $PM_{2.5}$ 二次源前体物模拟排放量 （吨）

年份	SO_2			NO_X			农业 NH_3	化工 NMVOC	加油站 NMHC	燃油 HC
	电力	非电力能源活动	小计	电力	非电力能源活动	小计				
2012	137840	740469	878309	139029	586799	725828	526000	464400	26628	62915
2017	100844	593189	694033	159246	404523	563769	572000	473100	17579	64949
2020	68827	479325	548152	113338	295108	408446	603812	488645	7844	72195

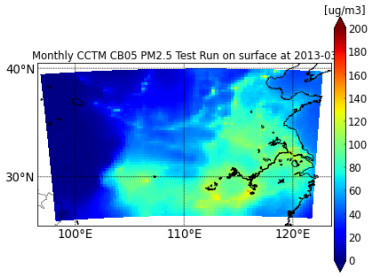
附图一 2012 年研究区域内逐月 $PM_{2.5}$浓度平均值空间分布情况



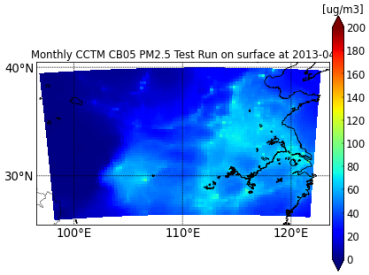
Jan. 2012



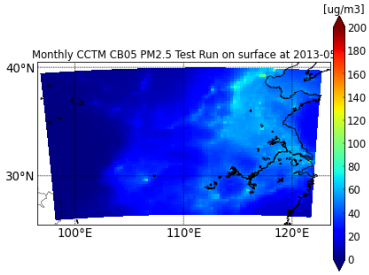
Feb. 2012



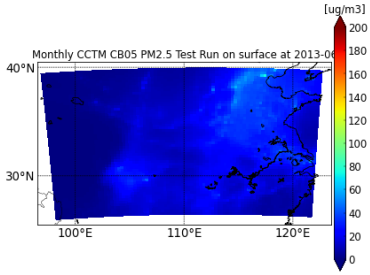
Mar. 2012



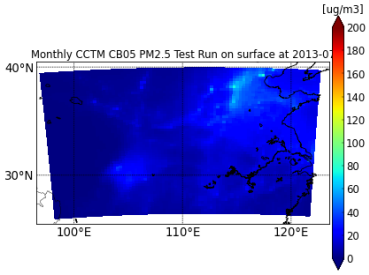
Apr. 2012



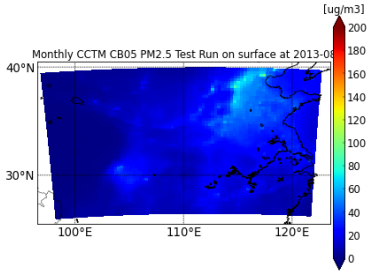
May. 2012



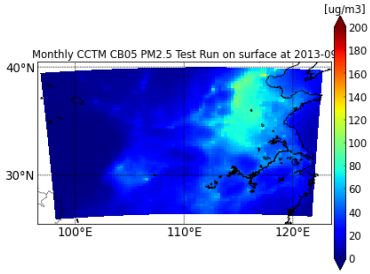
Jun. 2012



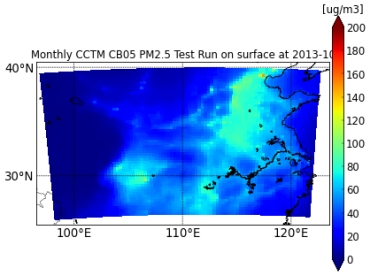
Jul. 2012



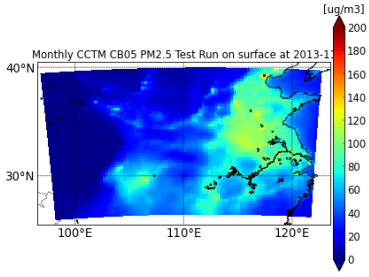
Aug. 2012



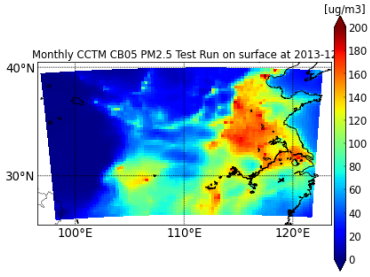
Sep. 2012



Oct. 2012

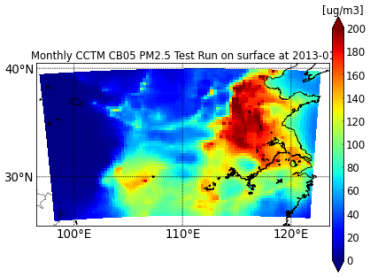


Nov. 2012

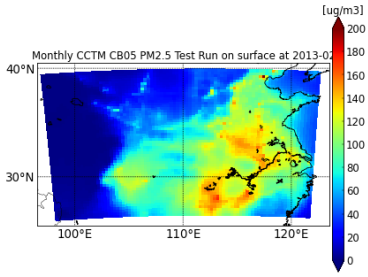


Dec. 2012

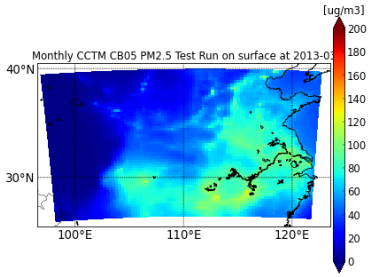
附图二 2017 年研究区域逐月 $PM_{2.5}$ 浓度平均值空间分布的模拟情况



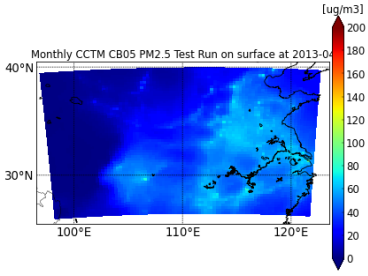
Jan. 2017



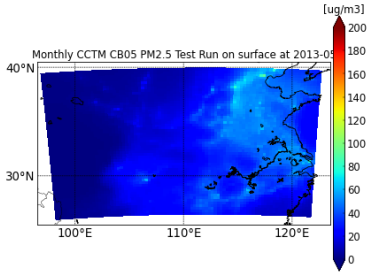
Feb. 2017



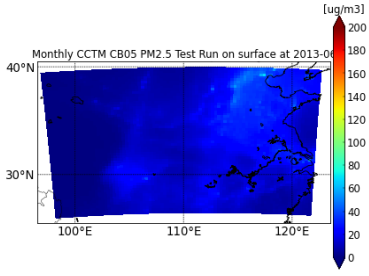
Mar. 2017



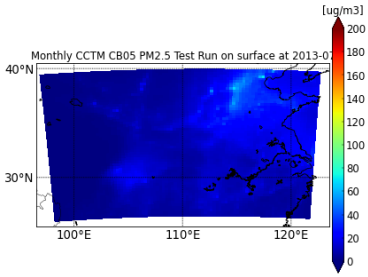
Apr. 2017



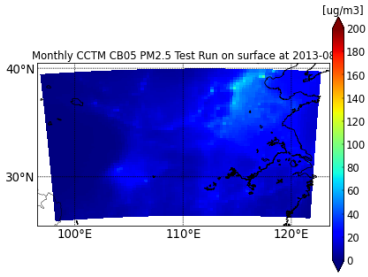
May. 2017



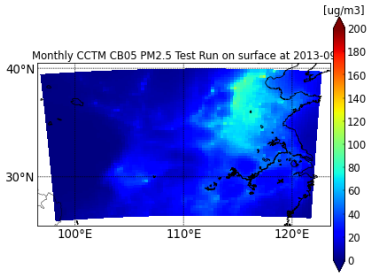
Jun. 2017



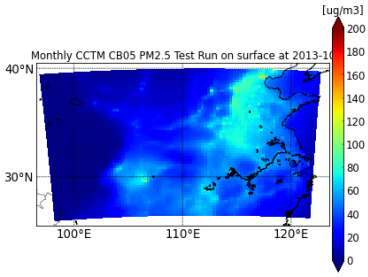
Jul. 2017



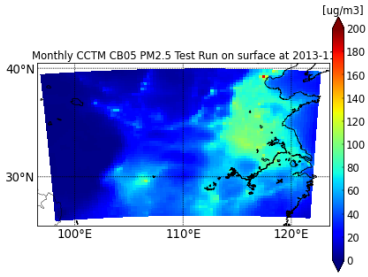
Aug. 2017



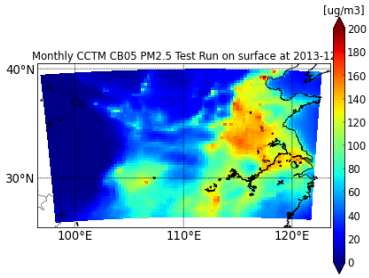
Sep. 2017



Oct. 2017



Nov. 2017



Dec. 2017

9.参考文献

- 北京市人民政府.2013.北京市人民政府 2013-2017 年清洁空气行动计划重点任务分解 2013 年工作措施.
- 北京市人民政府.2014.北京市人民政府 2013-2017 年清洁空气行动计划重点任务分解 2014 年工作措施.
- 北京市人民政府.2015.北京市人民政府 2013-2017 年清洁空气行动计划重点任务分解 2015 年工作措施.
- 北京市石景山区人民政府.2014.北京市石景山区 2013-2017 年清洁空气行动计划重点任务分解 2014 年工作措施.
- 长江证券.2013.湖北能源长期发展趋势分析.研究报告.
- 陈吉宁.2016. 保护环境既是发展需要也是发展目的——环保部部长陈吉宁在十二届全国人大四次会议记者会上答记者问摘录.环境影响评价. 2016 年 02 期.
- 陈家庆 王建宏 曹建树 朱玲.2007.加油站的烃类 VOCs 污染及其治理技术.环境工程学报.第 1 卷第 3 期.第 84-91 页.
- 陈涛.2009.成都市中心城区细粒子来源解析研究.西南交通大学.第 93 页.
- 范辞冬 王幸锐 王玉瑶 刘方 吴崇丹.2012.中国人类活动源非甲烷挥发性有机物（NMVOC）排放总量及分布. 四川环境，2012（01）：第 82-87 页.
- 冯曙艳 蒋婷梅 茆平 杨毅 李燕.2015. 南京市东郊大气颗粒物污染特征.中国粉体技术.2015（04）：第 30-35 页.
- 高霁.2015.大气雾霾之农业源的排放预测.研究报告.
- 关大博等.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
- 国家发展和改革委员会能源研究所 清华大学环境学院. 2014.大气污染防治对我国能源布局和结构的影响
- 国家统计局.2014.中国统计年鉴 2014.中国统计出版社.
- 国家统计局（2014a）中国能源统计年鉴 2013.中国统计出版社.
- 国家统计局（2014b）江苏统计年鉴 2014.中国统计出版社.
- 国家统计局（2014c）四川统计年鉴 2014.中国统计出版社.
- 国家统计局（2014d）湖北统计年鉴 2014.中国统计出版社.
- 国家统计局（2014e）陕西统计年鉴 2014.中国统计出版社.
- 国家统计局（2014f）武汉统计年鉴 2014.中国统计出版社.
- 国家统计局（2014g）西安统计年鉴 2014.中国统计出版社.
- 国家统计局（2014h）南京统计年鉴 2014.中国统计出版社.
- 国家统计局（2014i）成都统计年鉴 2014.中国统计出版社.

- 贺克斌.2013.京津冀地区 $PM_{2.5}$污染特征与控制对策.空气质量管理国际研讨会.
- 贺克斌 张强 洪朝鹏.2014.京津冀能否实现 2017 年 $PM_{2.5}$改善目标？清洁空气联盟报告.
- 胡秀莲 姜克隽.2001.中国温室气体减排技术选择及对策评价[M]. 北京：中国环境科学出版社.
- 环境保护部环境规划院.2012.区域煤炭消费总量控制技术方法与政策体系研究
- 环境保护部科技标准司.2014.轻型汽车污染物排放限值及测量方法（中国第五阶段）.
- 环境保护部与 31 省(区、市)签大气污染防治责任书.2014 年 1 月 7 日. http://www.gov.cn/gzdt/2014-01/07/content_2561650.htm
- 黄辉军 刘红年 蒋维楣 黄世鸿 张予燕.2006.南京市 $PM_{2.5}$物理化学特性及来源解析. 气候与环境研究. 2006（06）: 第 713-722 页.
- 姜克隽 庄幸 贺晨旻.2012.全球升温 2 度目标下中国能源与排放情景研究，中国能源 2012 年第二期.
- Kaiqiong Qiu, Lixian Yang, Junmin Lin, Peitao Wang, Yi Yang, Daiqi Ye, Liming Wang.2014.Atmospheric Environment 86（2014）.P102-112.
- 李富春 韩圣慧 杨俊 张旭 李如燕 2009. 川渝地区农业生态系统 NH_3排放. 环境科学, 2009（10）: 第 2823-2831 页.
- 楼狄明,温雅,王家明. 2014. 催化型连续再生颗粒捕集器对生物柴油发动机排放颗粒理化特性的影响[J]. 环境科学学报,34（8）:第 1900-1905 页.
- 楼晟荣. 2014. 中小燃煤锅炉 $PM_{2.5}$排放特征实测研究[J]. 环境科学学报.34（12）:第 3119-3125 页.
- 鲁斯唯 胡清华 吴水平 王新红 陈晓秋. 2014. 海峡西岸经济区大气污染物排放清单的初步估算[J]. 环境科学学报,34 （10）:第 2624-2634 页.
- 莫梓伟,邵敏,陆思华.2014.中国挥发性有机物（VOCs）排放源成分谱研究进展[J]. 环境科学学报.34（9）:第 2179-2189 页.
- 农业部.《农业部关于印发<到 2020 年化肥使用量零增长行动方案>和<到 2020 年农药使用量零增长行动方案>的通知》.2015 年 2 月.http://www.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201503/t20150318_4444765.htm）
- 清华大学建筑节能研究中心.2014.北京 $PM_{2.5}$与冬季采暖热源的关系及治理措施项目成果报告
- 区域煤炭消费总量控制技术方法与政策体系研究报告，环境保护部环境规划院，2012.10

- 沈嘉,郝吉明,王丽涛.2006.中国加油站 VOC 排放污染现状及控制环 境 科学.第 27 卷第 8 期.第 1473-1478 页.
- 王书伟 廖千家骅 胡玉婷 颜晓元.2009. 我国 NH_{3-N}排放量及空间分布变化初步研究. 农业环境科学学报, 2009（03）: 第 619-626 页.
- 尉鹏 苏福庆 程水源 陈良富.2010.高庆先利用卫星观测 HCHO 柱密度研究中国 NMVOC 时空分布. 环境科学研究. 2010（12）: 第 1475-1480 页.
- 吴忠标.2012.$PM_{2.5}$污染控制对策与技术.中国颗粒学会第八届年会.
- 肖涵.2014.炊事、餐饮业 $PM_{2.5}$排放.研究报告.
- 徐新华.1997. 江浙沪地区人为 NH_3排放量的估算. 农村生态环境.1997（03）: 第 51-53 页.
- 薛亦峰 闫静 宋光武 李金玉.2012.大气污染物排放清单的建立及不确定性.城市环境与城市生态, 2012（02）: 第 31-33 页.
- 严晗 吴烨 张少君 宋少洁 傅立新 郝吉明.2014.北京典型道路交通环境机动车黑碳排放与浓度特征研究[J]. 环境科学学报 34（8）:第 1891-1899 页.
- 易帆.2004.城市大气中可吸入颗粒物的来源分析.华中科技大学.第 73 页.
- Yongjie Yang, Yuesi Wang, Weiwei Huang, Bo Hu, Tianxue Wen, Ya’nan Zhao.2010. Size Distributions and Elemental Compositions of Particulate Matter on Clear,Hazy and Foggy days in Beijing,China. Advances in Atmospheric Sciences, 2010（03）: p. 663-675.
- Yu, L. and G. Wang 2013. Characterization and source apportionment of $PM_{2.5}$ in an urban environment in Beijing. Aerosol Air Qual Res. 2013（13）: P574-583.
- 翟绍岩.2008.上海市道路、建筑工地扬尘（PM_{10}）排放估算方法研究.硕士论文.华东师范大学.
- 张灿 周志恩 翟崇治 卢露.2013.重庆市主城区 NH_3排放估算及分布特征分析. 环境污染与防治. 2013（10）: 第 65-70 页.
- Zhang R., J.J.T.J.2013. Chemical characterization and source apportionment of $PM_{2.5}$ in Beijing: seasonal perspective. Atoms. Chem. Phys. 2013（13）: P9953-9974.
- 郑玫 张延君 闫才青 朱先磊 James J.Schauer 张远航.2014.中国 PM2.5 来源解析方法综述, 北京大学学报（自然科学版）. 2014 年第 6 期.第 50 卷
- 中国建筑科学院.2014.北方集中供暖地区建筑因素对 $PM_{2.5}$排放特性影响.
- 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
- 中国清洁空气联盟.2015.空气质量管理的 10 项原则

- 中国清洁空气联盟.2013.区域煤炭消费总量控制技术方法与政策体系研究
- 中国清洁空气联盟.2014.江苏省空气质量管理评估报告
- 中国清洁空气联盟.2014.“大气国十条”中煤炭总量控制政策的协同碳减排效益分析
- 朱先磊 张远航 曾立民 王 玮.2005. 北京市大气细颗粒物 $PM_{2.5}$的来源研究. 环境科学研究. 2005（05）：第 1-5 页.