

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



CAAC政策报告

CAAC Policy Report

“CAAC政策报告”专注于对中国大气污染防治政策及管理机制进行解读、分析，提出建议，以支持清洁空气工作的开展。“CAAC政策报告”由中国清洁空气联盟秘书处联合联盟成员与专家共同编制。

作者

清华大学

贺克斌，张强，洪朝鹏

中国清洁空气联盟秘书处：

解洪兴，白愈，杜娟

能源基金会：

赵立建，才婧婧，蔺苑，周嵘

鸣谢

雷宇（环保部环境规划院）

姜克隽（国家发改委能源研究所）

龚慧明（能源基金会）



能源基金会（EF）是本次报告的支持机构。

免责声明：本报告仅代表作者个人观点，不代表作者所在机构、支持机构、以及中国清洁空气联盟成员的观点。中国清洁空气联盟不保证本书中所含数据的精确性，而且对使用这些数据所产生的任何后果不承担责任。在注明来源的前提下中国清洁空气联盟鼓励出于个人和出于非商业目的对本报告所含信息进行印刷或复制。未经联盟秘书处书面同意，使用者不得出于商业目的销售、传播或制作相关衍生作品。

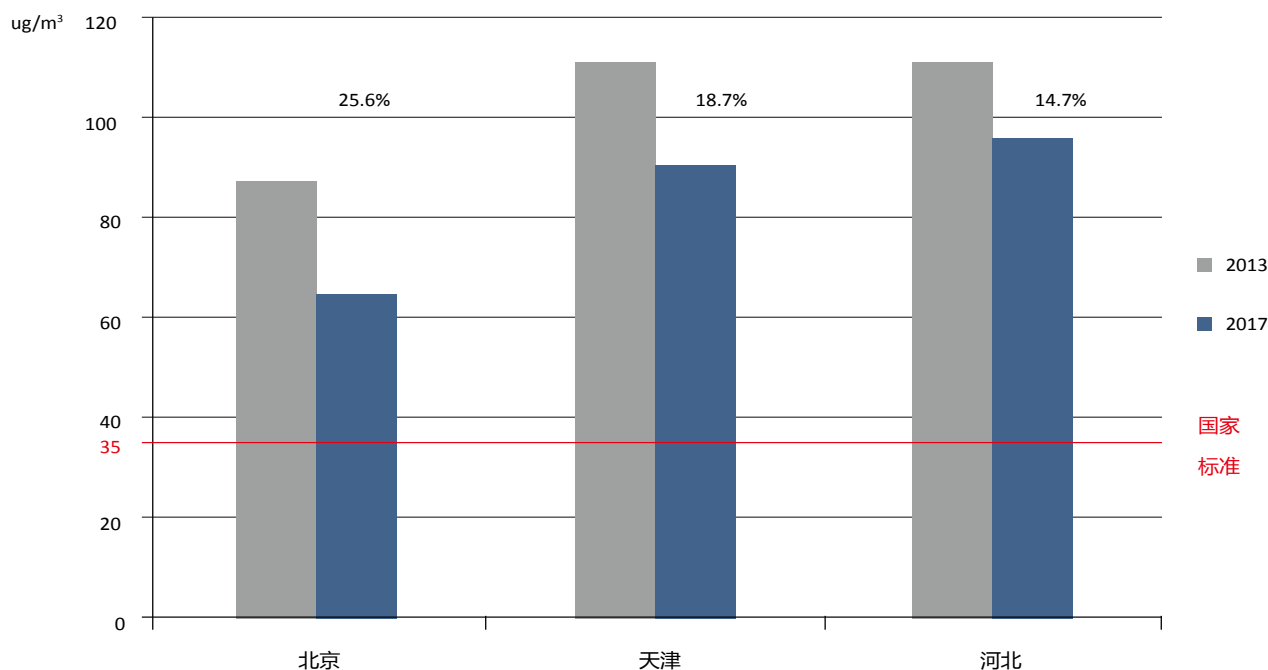
主要结论

为了确保京津冀地区能够达到国务院《大气污染防治行动计划（2013 - 2017）》（“大气十条”）里提出的PM_{2.5}改善目标（京津冀地区2017年PM_{2.5}浓度比2012年下降25%，北京市PM_{2.5}年均浓度控制在60 μg/m³左右），天津、河北尚需在已出台的地方行动方案基础上，进一步削减氮氧化物（NO_x）、氨（NH₃）、可挥发有机物（VOCs）等污染物的排放。

本研究结合国务院《大气污染防治行动计划》，以及京津冀地区地方发布的大气污染防治行动计划，将

具体治理措施参数化，构建了2012年以及2017年京津冀地区大气污染排放清单，并运用CMAQ空气质量模型，定量评估了现有的大气污染防治措施实施对京津冀地区PM_{2.5}浓度的削减效果。

模拟结果表明¹，北京市、天津市和河北省PM_{2.5}年均浓度将由2013年的88.3 μg/m³、112.7 μg/m³、112.9 μg/m³分别降至2017年的65.8 μg/m³、91.6 μg/m³、96.3 μg/m³，相应降幅分别为25.6%、18.7%、14.7%。²



以上数据表明，如果在2017年全面落实现有的减排政策，将对京津冀地区带来明显的PM_{2.5}浓度改善。同时需指出，虽然北京、天津、河北的行动措施的落实将带来明显的减排效果，但依然存在北京PM_{2.5}年均浓度达不到60 μg/m³的风险，天津市与河北省的部分地区也存在2017年PM_{2.5}浓度不能降低25%的风险。因此需要制定更加强化的措施以进一步削减

1. 本研究依据现行可明确量化措施，对改善效果的评估是偏于保守的估计。现有行动方案针对民用部门减排、VOC减排和NH₃减排减排的措施较难量化，这些措施还有待细化明确。

2. 《大气污染防治行动计划实施情况考核办法（试行）实施细则》中明确PM_{2.5}目标年下降比例考核基数为2013年PM_{2.5}年均浓度。本报告对比的模拟结果是2012年与2017年的排放在相同气象条件下模拟的PM_{2.5}浓度下降情况，重点考察减排的效果。由于2012年PM_{2.5}监测数据缺失，模拟时采用2013年气象场，便于基准年模拟结果与2013年监测数据对比校验，气象的影响将在后续讨论。

排放。现有措施能使一次污染物SO₂、NO_x、PM_{2.5}和VOCs在2017年比2012年分别削减32%、21%、24%、6%，而要实现“国十条”设定的PM_{2.5}浓度降低目标，一次污染物SO₂、NO_x、PM_{2.5}、NH₃和VOCs削减比例应该分别达到40%、40%、35%、20%和30%。（图2）

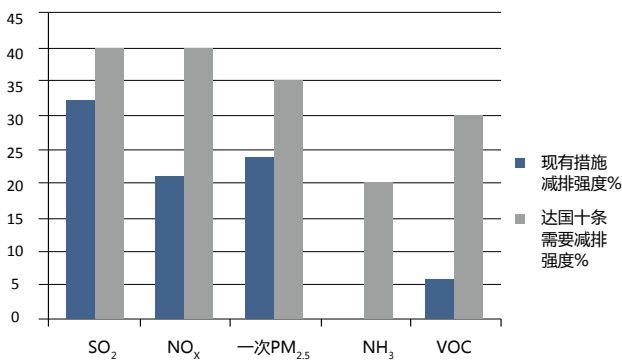


图2 现有政策一次污染物减排比例与2017年达标需要减排比例%

为了支持京津冀地区达到国家设定的目标，针对以上目标，本报告选取推荐了十项强化措施，并进行了空气质量改善效果模拟分析：

- 1.京津冀地区实现工业煤炭100%洗选，同时禁止使用硫含量高于0.6%的煤炭；
- 2.京津冀地区对在用柴油车加装柴油机颗粒物捕集器（DPF）；
- 3.河北省应该削减钢铁产量，从而保证煤炭削减总量从4000万吨提高至6000万吨；
- 4.河北、天津钢铁企业全面升级改造安装高效除尘，比如电除尘、袋式除尘器等；
- 5.河北、天津应对水泥窑进行全面升级改造成袋式除尘器，其中河北对水泥行业全部开展脱硝治理；
- 6.河北对现有炼焦行业除尘进行升级改造；
- 7.河北、天津燃煤供热锅炉安装脱硝设施，其中天津的脱硝安装比率提高到50%；
- 8.河北、天津应对欧三柴油车进行限制，将重型载

货欧三柴油车柴油消耗量占比降至20%；

9.天津、河北对炼焦、涂料、制药等行业的VOC排放实行重点控制，将VOCs的排放减少30% - 40%；

10.天津、河北将畜牧养殖业集约化比例提高到30%，并推广施用缓释肥料；

在施行以上措施之后，根据模拟结果，北京、天津、河北均可达到“国十条”中设定的空气质量改善目标，具体改善效果见图3。

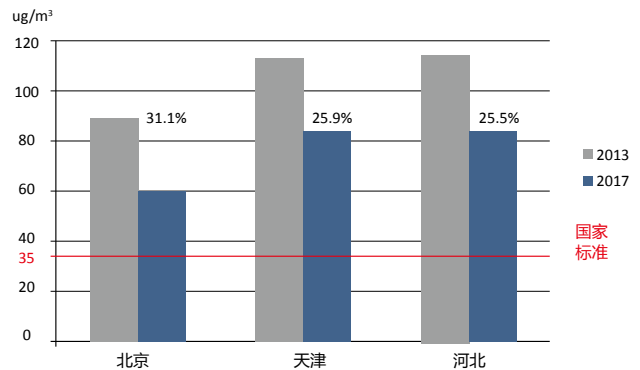


图3 模拟实施强化大气污染防治措施带来的空气质量改善 ug/m³

其它发现与建议：

1.京津冀地区PM_{2.5}来源分析。本研究首先系统构建了京津冀区域的大气污染源排放清单，并在此基础上结合CMAQ模型模拟分析了PM_{2.5}来源。工业过程和民用部门是京津冀地区一次PM_{2.5}的主要来源，分别贡献了54%和29%，其中工业过程排放主要来自于钢铁、水泥、炼焦等行业，民用部门排放主要来自于民用燃煤和生物质燃烧；此外，电力、供热、工业锅炉和交通部门分别贡献了4%、3%、6%和4%。二次PM_{2.5}污染的前体物主要是SO₂、NO_x、VOCs、NH₃。工业锅炉、工业过程（主要是钢铁烧结和工业窑炉）、电力、民用和供热部门分别贡献了区域SO₂排放的39%、19%、17%、15%和8%；交通、工业锅炉、电力、供热和工业过程（主要是水泥行业）是NO_x排放的主要来源，分别贡献了28%、27%、24%、10%和7%；VOCs排放的40%、26%、17%和9%分别来自于溶剂使用、工业

过程、民用和交通部门； NH_3 主要来自于农业部门的化肥施用和畜禽养殖的化肥施用和畜禽养殖。

2.治理 $\text{PM}_{2.5}$ 必须结构调整与末端治理并重。在京津冀地区，北京由于末端治理技术的普及率比较高，未来的减排效果主要依靠结构调整。而河北、天津末端治理带来的减排效应还没有充分实现，减排潜力较大，如能进一步加强末端治理，同时推进结构调整，则能有更好的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染改善效果。

3.京津冀地区大气污染治理可以同时带来温室气体的减排，有利于应对气候变化。全面实施京津冀三地大气污染防治行动计划中的措施可以带来明显的温室气体减排效应，京津冀地区2017年二氧化碳和黑碳(BC)排放量与2012年相比可分别削减5100万吨和3.0万吨，相比2012年分别减排5%和17%。其中，煤改气，发展非化石能源、钢铁产能削减等措施对二氧化碳减排贡献最大。

4.区域联合减排有助区域空气质量改善。本报告发现，天津、河北的强化减排不仅可以实现自身空气质量改善目标，也可以有助于北京市空气质量的进一步改善。而京津冀周边减排目标的实现，将使得京津冀区域的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降约3%。本报告假定京津冀周边区域（如

山东、山西、内蒙）能达到“大气十条”规定的减排目标，如果这些区域达不到目标，京津冀区域空气改善将更困难。

5.现有措施的落实。本研究假设所有现有的措施将全部落实，但执行和落实现有措施在一些地方仍然面临着挑战。京津冀各地应更加重视当前已有的各项措施的落实，这是京津冀区域空气质量改善的关键前提。

6.气象因素。由于气象条件的年际变化对空气质量造成较大的影响，因此各地在制订大气污染防治措施的时候，应该考虑气象条件的影响，确保在不利气象条件下，也能达到“国十条”要求的空气质量达标。

7.京津冀地区各地应尽快开展空气质量达标规划工作。本研究建立了区域尺度的大气污染源排放清单，京津冀各地（包括区县、地级市）应尽快建立更符合本地情况的更精细化的污染源排放清单，并在此基础上开展空气质量达标规划工作，对污染减排措施进行量化分析，应用空气质量模型分析现有的措施能否达到本地2017年空气质量改善目标，同时对下一步如何实现空气质量国家标准进行分析并制定策略。

目录

主要结论.....	01
1. 研究方法.....	06
2. 京津冀大气污染防治措施及减排效果评估	07
2.1 结构调整措施.....	07
2.2 末端控制措施	07
2.3 2017年排放量及减排效果分析	08
3. “行动方案” 的空气质量改善效果分析	12
3.1 模拟2017年PM _{2.5} 浓度	12
3.2 京津冀地区PM _{2.5} 组分浓度下降分析	14
3.3 不能达到国十条目标的原因分析.....	15
4. 强化减排情景.....	16
4.1 达到国十条目标需要的减排强度.....	16
4.2 模拟结果对政策的启示.....	17
4.3 措施建议.....	17
5. 不确定性分析	18
5.1 气象年际变化的影响.....	18
5.2 周边区域减排的影响.....	18
5.3 VOCs和NH ₃ 的措施较难量化	18

附 录	19
表1 地方“行动方案”中主要结构调整措施及其参数化方案（万吨）	19
表2 地方“行动方案”中主要结构调整措施及其参数化方案（万吨）：北京市	20
表3 地方“行动方案”中主要结构调整措施及其参数化方案（万吨）：天津市	21
表4 地方“行动方案”中主要结构调整措施及其参数化方案（万吨）：河北省	22
表5 地方“行动方案”中主要末端控制措施及其参数化方案（%）：固定燃烧源	23
表6 地方“行动方案”中主要末端控制措施及其参数化方案（%）：工业过程	24
表7 地方“行动方案”中主要末端控制措施及其参数化方案（%）：VOCs排放源	25
表8 地方“行动方案”中主要末端控制措施及其参数化方案（%）：移动源	26
表9 地方“行动方案”中主要控制措施及其减排量（万吨）	27
表10 强化减排达标情景中加严的控制措施及相应增加的减排量（万吨）	28

1. 研究方法

首先基于基准年排放清单和区域空气质量模型（CMAQ）³进行基准年空气质量模拟并验证模拟结果；然后对“行动计划”系列措施进行参数化，并评估其减排效果，总结减排的关键措施；最后进行目标年空气质量模拟，评估“行动计划”的空气质量改善效果。

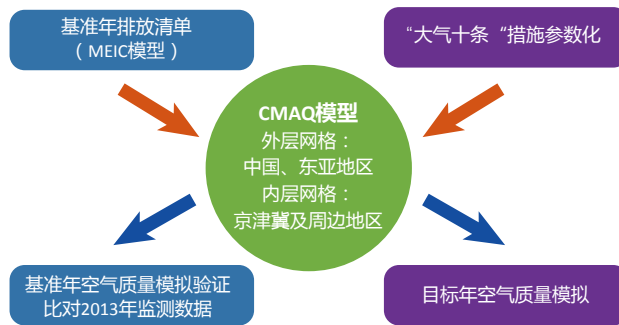


图1-1 研究方法

我们将基准年（2012年）排放清单⁴输入区域空气质量模型（CMAQ）模拟出2013年京津冀地区空气质量。模拟时采用2013年气象场，并将结果与2013年的监测资料进行对比验证⁵，如图1-2所示。总体而言，模型能够较为准确地模拟PM_{2.5}浓度的绝对值及其空间分布差异，可作为大气污染控制措施效果的评价工具。

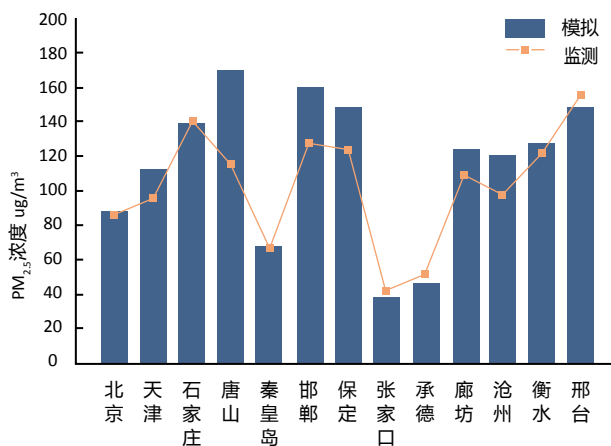


图1-2 京津冀地区主要城市PM_{2.5}年均浓度模拟值与监测值比较

3. 公共多尺度空气质量模式(CommunityMultiscaleAirQuality,CMAQ)是由美国环保署发展的欧拉型空气质量模式。它主要关注对流层臭氧、酸沉降、能见度和颗粒物等污染物，描述这些污染物在区域和城市尺度中的化学反应和输送。

4. 来自于清华大学开发的中國多尺度排放清单模型 (Multi-resolution Emission Inventory for China, MEIC, 数据库访问地址: <http://www.meicmodel.org>)。

5. 数据来源于国家环境空气质量监测网中的城市空气质量评价点位监测数据。

2. 京津冀大气污染防治措施及减排效果评估

国务院颁布《大气污染防治行动计划》之后，各级政府也相继公布了各自的实施细则。就京津冀地区而言，主要有《京津冀及周边地区落实大气污染防治行动计划实施细则》⁶、《北京市2013-2017年清洁空气行动计划》⁷、《天津市清新空气行动方案》⁸、《河北省大气污染防治行动计划实施方案》⁹。我们将这些措施划分为两大类：结构调整措施和末端控制措施。

为定量分析京津冀地区大气污染防治具体措施对未来大气污染物排放的控制效果，我们在基础年排放清单的基础上，依据地方各级政府具体行动计划措施进行能源消费等活动水平和控制技术分布的预测，建立了目标年排放清单。

2.1 结构调整措施

产业结构调整与能源结构调整是结构调整的两个立足点，是可以从源头削减排放的措施。《行动计划》涉及到的结构调整措施主要有：

a. 调整优化产业结构，严控“两高”行业新增产能，加快淘汰落后产能。一方面，京津冀及周边地区未来不会有任何钢铁、水泥、电解铝、平板玻璃、船舶等产能严重过剩行业新增产能项目；炼焦、有色、电石、铁合金等新增产能项目也在京津冀及周边地区有了明确限制；另一方面，现有落后产能进入淘汰阶段。这将实现高耗能产业的产能逐渐下降；

b. 控制煤炭消费总量。以煤为主的能源消费结构是我国大气污染严重的主要原因，“国十条”明确提出要控制煤炭消费总量。京津冀地区在各自的“行动方案”

中共压减煤炭消费总量6300万吨，其中北京市、天津市和河北省分别净削减1300、1000和4000万吨，相应削减比例分别为61%、20%和19%；

c. 清洁能源替代。京津冀地区新增天然气500亿立方米，其中北京市、天津市和河北省分别为130、120和250亿立方米；

d. 机动车总量限制。北京实施了机动车总量控制后，柴油与汽油消费在2017年有望下降；

为量化其影响，我们在能源消费总量预测的基础上，结合能源结构调整措施，建立了2017年能源平衡表，得到分部门分燃料类型的能源消费量，见附表1。

具体结构削减的量化参数参考附表2，3，4。

2.2 末端控制措施

“行动计划”中主要末端控制措施有：

a. 2017年所有燃煤电厂都要安装脱硫设施，预计燃煤电厂综合脱硫效率将从2012年的80%提高到90%以上；到2017年燃煤机组均应全面应用烟气脱硝；

b. 工业锅炉脱硫在2017年达到70%以上，淘汰机械式除尘，升级改造现有除尘设施；

c. 水泥行业脱硝比例从2012年的16%增加至2017年的100%；

d. 钢铁烧结机脱硫比例从2012年的35%提高到100%；

e. 2015年京津冀地区全面实施机动车排放“国5”标准，北京市2016年实施“国6”标准；

6. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201309/t20130918_260414.htm

7. <http://zhengwu.beijing.gov.cn/gzdt/gggs/t1324560.htm>

8. http://www.tj.gov.cn/zwgk/wjgz/szfwj/201310/t20131009_223397.htm

9. http://www.gov.cn/gzdt/2013-09/12/content_2486904.htm

f.到2017年京津冀地区的200万辆黄标车、“国2”及“国2”以前的汽油车和柴油车全部淘汰；

g.通过综合整治削减重点行业20%的VOCs排放量；

h.加油站安装一级油气回收系统和二级油气回收系统。

具体的末端控制措施及其参数化方案见附表5,6,7,8。

2.3 2017年排放量及减排效果分析

2.3.1 京津冀地区主要污染物来源

工业过程和民用部门是京津冀地区一次PM_{2.5}的主要来源，分别贡献了54%和29%，其中工业过程排放主要来自于钢铁、水泥、炼焦等行业，民用部门排放主要来自于民用燃煤和生物质燃烧；此外，电力、供热、工业锅炉和交通部门分别贡献了4%、3%、6%和4%。

二次PM_{2.5}污染的前体物主要是SO₂、NO_x、VOCs、NH₃。

工业锅炉、工业过程（主要是钢铁烧结和工业窑炉）、电力、民用和供热部门分别贡献了区域SO₂排放的39%、19%、17%、15%和8%；交通、工业锅炉、电力、供热和工业过程（主要是水泥行业）是NO_x排放的主要来源，分别贡献了28%、27%、24%、10%和7%；VOC排放的40%、26%、17%和9%分别来自于溶剂使用、工业过程、民用和交通部门；NH₃主要来自于农业部门的化肥施用和畜禽养殖。

2.3.2 京津冀地区污染物总量减排

京津冀地区2017年主要污染物SO₂、NO_x、PM_{2.5}、BC、OC、VOCs的排放量分别为139.5、221.2、90.2、14.7、23.6、199.9万吨，相比2012年分别下降32%、21%、24%、17%、

14%、6%。在三个省份中，河北省由于排放量远高于其它两个直辖市，对京津冀地区污染物减排的贡献最大，贡献了京津冀地区SO₂、NO_x、一次PM_{2.5}、VOCs减排量的71%、71%、74%、45%；北京市的减排幅度最大，因为推行相对较严的控制措施。

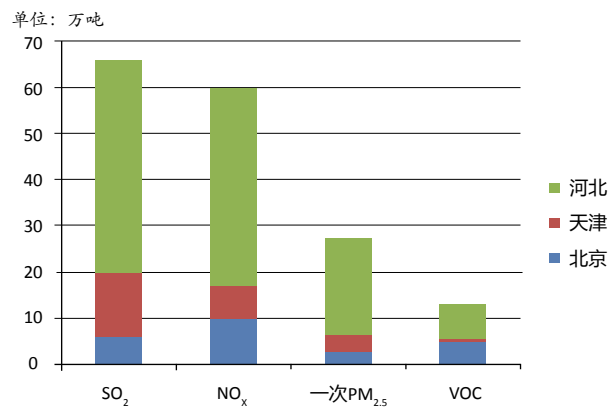


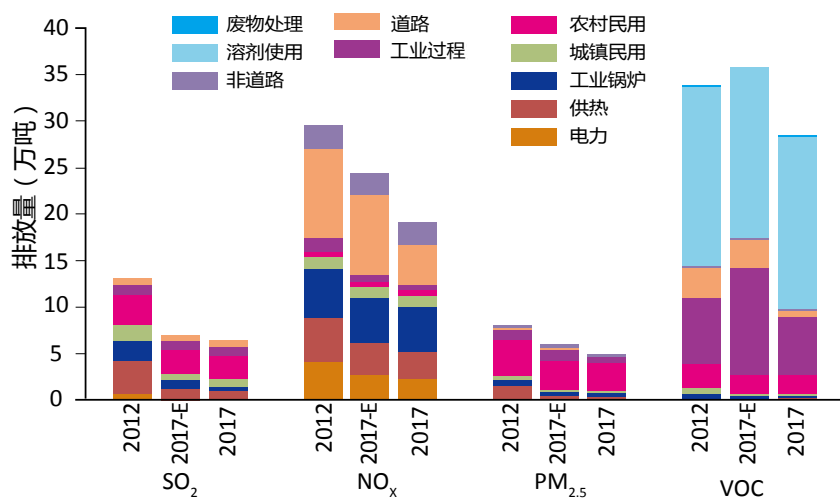
图2-1 京津冀区域污染总量减排贡献图

2.3.3 分地区污染物下降幅度

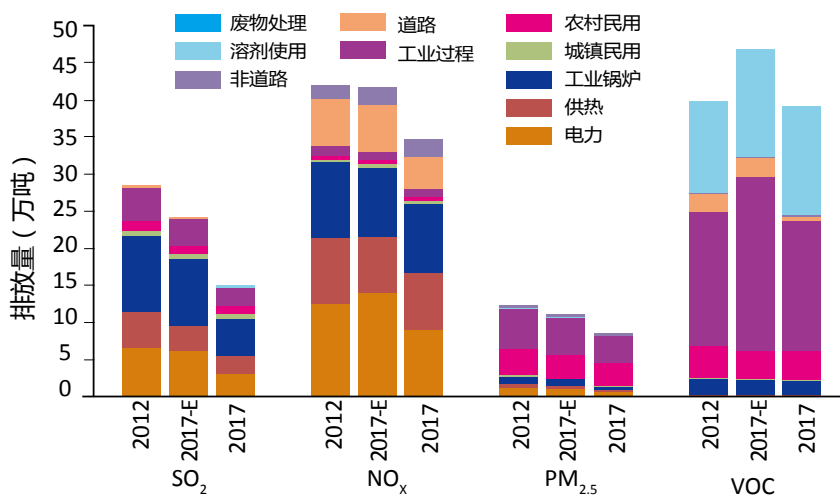
我们重点关注SO₂、NO_x、NH₃、PM_{2.5}、BC、OC和VOCs的排放变化。图2-2分别给出了北京、天津、河北地区主要污染物分行业排放变化情况。为了分别体现结构减排与末端治理措施带来的污染物减排效果，我们分别设定了只进行结构减排的情景（2017 - E）以及进一步进行末端治理情景（2017）。北京、天津、河北“行动方案”中结构减排措施以及末端控制措施对应的减排量见附表9。

从图2 - 2可以看到，已出台的各项措施对北京、天津的二氧化硫的削减幅度接近一半，而河北的二氧化硫削减幅度稍弱；三地的氮氧化物、一次PM_{2.5}也有一定的削减幅度，而VOC的减排幅度较低，其中河北、天津的VOCs污染削减幅度更是低于5%。

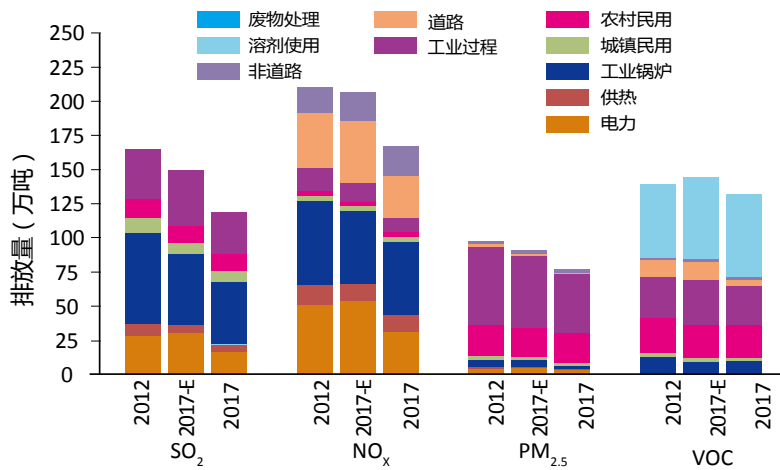
10.二次PM_{2.5}，主要包括硫酸盐、硝酸盐、铵盐等无机粒子和二次有机气溶胶。二次PM_{2.5}是由各种气态污染物（前体物），如SO₂、NO_x、VOC、NH₃等，经过复杂的大气化学反应转变成的颗粒物。



(a) 北京



(b) 天津



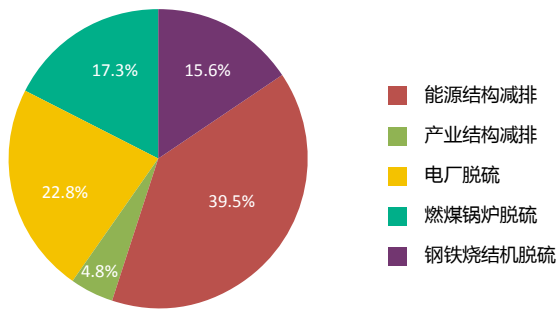
(c) 河北

图2-2 北京、天津、河北地区主要污染物排放变化

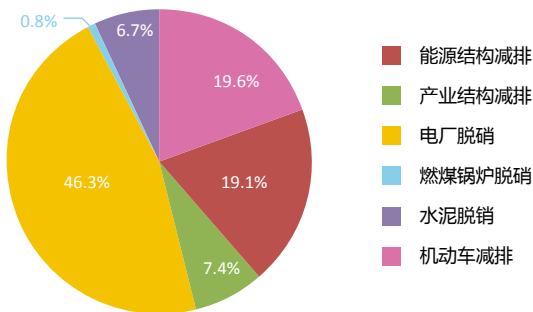
同时可以看到，结构减排对SO₂的减排效果比较明显，对NO_x的减排效果则天津、河北不如北京。这主要是因为产业结构调整、能源替代方面天津与河北的挑战更大。如能进一步削减高耗能产业产能、提高清洁能源比重，将会有更明显的减排效果。结构减排对VOC的控制效果尚不明显。

2.3.4 各项措施的减排贡献

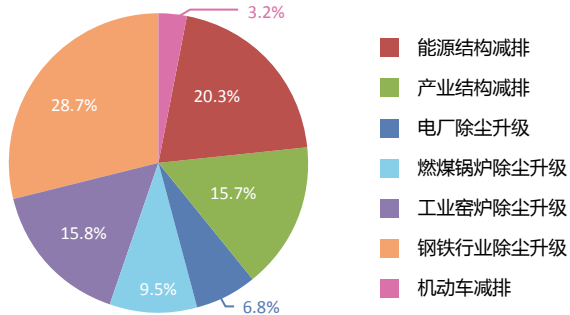
从图2-3可以看到，在京津冀地区，能源结构减排对二氧化硫减排贡献最大（39.5%），电厂脱硫次之（22.8%）；电厂脱硝对氮氧化物减排贡献最大（46.3%），其次是机动车减排（19.6%）、能源替代（19.1%）。对一次PM_{2.5}减排贡献最大的是钢铁行业除尘升级（28.7%），其次是能源结构减排(20.3%)。



(a) SO₂



(b) NO_x

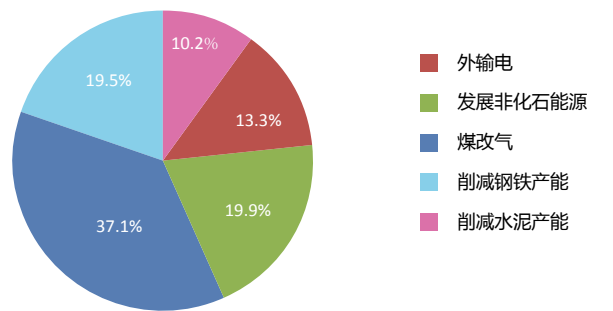


(c) 一次PM_{2.5}

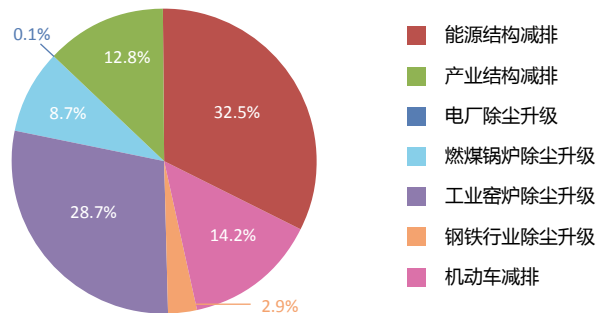
图2-3 各项措施对污染物减排的贡献

2.3.5 温室气体减排协同效应分析

京津冀地区大气污染治理同时可以带来温室气体的减排。执行大气十条政策后，2017年京津冀将在2012年排放基础上减排5100万吨二氧化碳和3.0万吨黑碳，比2012年分别减少5%、17%。能源结构减排措施（包括“煤改气”、外输电、发展非化石能源等）和产业结构减排措施（包括削减钢铁和水泥产能等）对京津冀CO₂减排的贡献分别为70%、30%。结构减排措施、各行业除尘升级改造、机动车减排对京津冀BC减排的贡献分别为45%、41%、14%。



(1) CO₂



(2) BC

图2-4 各项措施对温室气体CO₂减排的贡献



3. “行动方案” 的空气质量改善效果分析

3.1 模拟2017年PM_{2.5}浓度

基于2012年和2017年排放清单，我们用CMAQ模型模拟2017年京津冀地区细颗粒物污染状况（图3-1）。考虑到PM_{2.5}污染的区域特征，京津冀周边省份的浓度变化也将对京津冀地区的空气质量带来影响。我们在模型中假设京津冀周边省能够达到“国十条”中的减排目标，其中山东、山西和内蒙古的PM_{2.5}年均浓度下降目标分别为20%、20%和10%，目标年采用和基准年采用相同的气象条件（2013年气象场）。

为获得各行政区的模拟浓度值，我们进一步采用监测站点所在网格平均的方法对模拟结果进行空间统计。模拟后的统计结果显示，北京市、天津市和河北省PM_{2.5}年均浓度将由2013年的88.3 μg/m³、112.7 μg/m³、112.9 μg/m³降至2017年的65.8 μg/m³、91.6 μg/m³、96.3 μg/m³，相应降幅分别为25.6%、18.7%、14.7%（图3-1）。

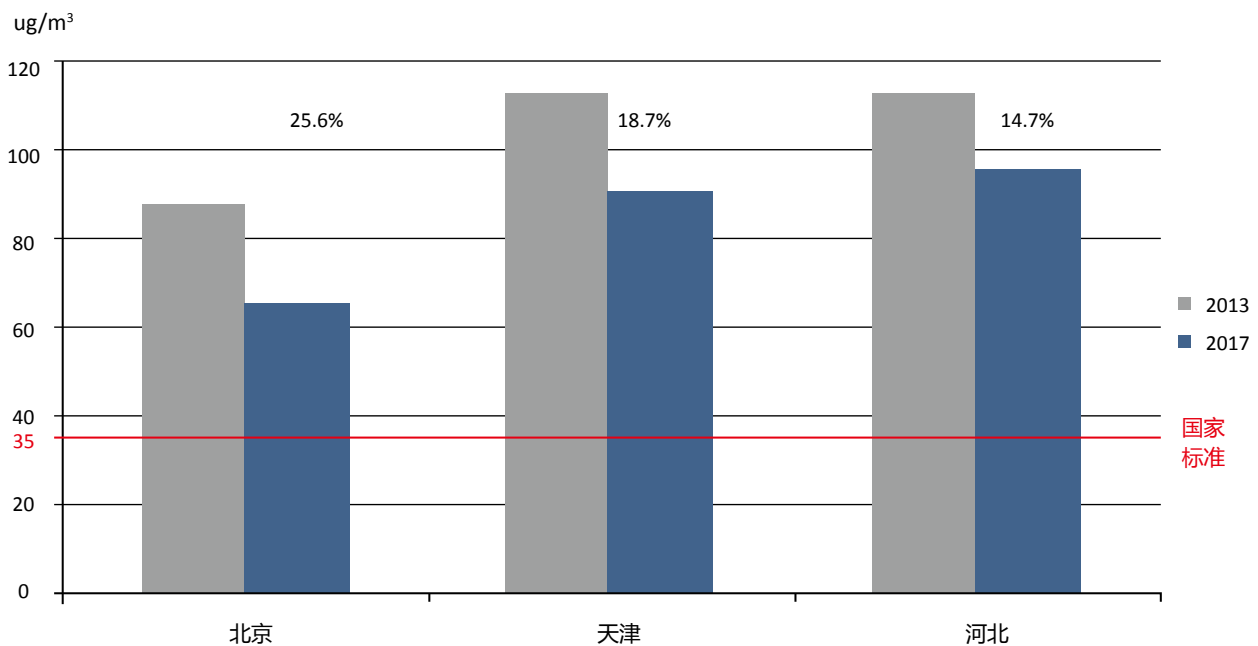


图3-1 京津冀地区实施“行动方案”带来的PM_{2.5}浓度改善

模拟结果显示，如果全方面实施行动方案，京津冀地区PM_{2.5}浓度降幅显著，特别是北京市市辖区，这与北京市城六区推行无煤化政策有关。但北京市仍存在达不到60 μg/m³浓度目标的风险，天津市和河北省的部分地区仍存在达不到2017年浓度降低25%的风险。

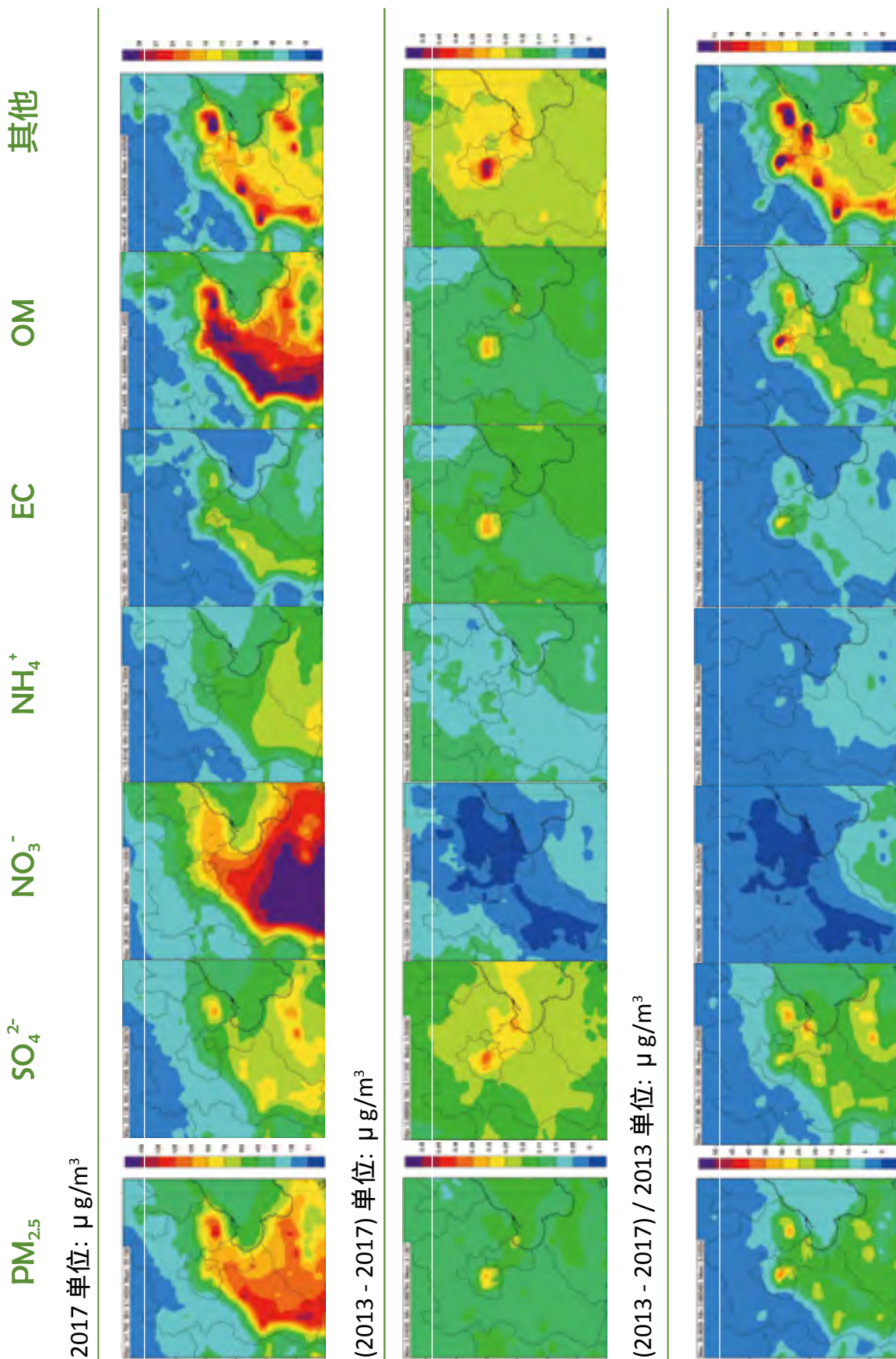


图3-2 2017年模型模拟京津冀地区PM_{2.5}各组分年均浓度的空间分布及其与2013年的绝对变化

3.2 京津冀地区PM_{2.5}组分浓度下降分析

从图3-3可以看到，京津冀三个省份PM_{2.5}浓度的下降中，硫酸盐和其他组分的贡献较大，硝酸盐的贡献相对较小，北京市黑碳（BC）、有机组分浓度的下降也较为明显。

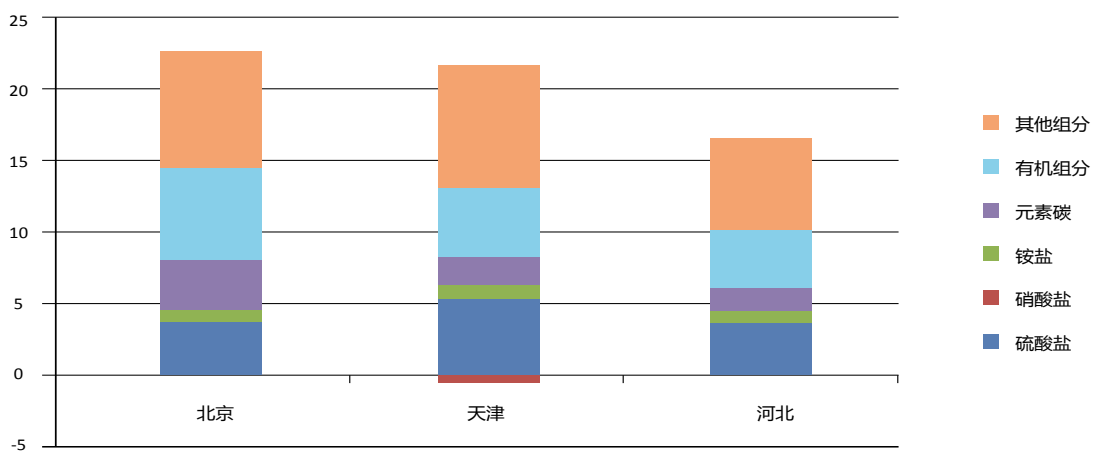


图3-3 实施“行动方案”对京津冀地区PM_{2.5}各组分浓度下降的贡献 (ug/m³)

上述结果显示，SO₂和一次PM_{2.5}减排措施对京津冀地区PM_{2.5}浓度削减的作用较大，北京市主要是大幅削减燃煤；天津市和河北省主要是削减燃煤、末端脱硫以及钢铁水泥行业的颗粒物减排。

我们进一步分析对比了主要污染物减排比例与空气质量改善的比例，发现：

——硫酸盐在三个省份的降幅均较为显著，分别下降33.3%、29.5%、23.1%，但明显小于SO₂排放的降幅51.4%、47.3%、28.1%。

——硝酸盐浓度的变化较小，北京市和河北省的硝酸盐浓度基本不变，天津市则增加了2.9%，与NO_x的减排幅度不相符。

——北京市有机组分的下降幅度为27.5%，高于天津市的17.4%和河北省的14.0%。



3.3 不能达到国十条目标的原因分析

从主要前体物的减排来看，现有政策对 SO_2 的控制效果较明显，但对 NO_x 和一次 $\text{PM}_{2.5}$ 的减排效果不及 SO_2 ，对VOC和 NH_3 的控制较为薄弱。北京市大部分前体物的削减力度在25%以上，因此浓度的降幅较为明显；河北省的削减力度要小于北京和天津， NO_x 和一次 $\text{PM}_{2.5}$ 的减排比例分别为20.2%和21.4%，小于浓度下降目标25%。

由于大气化学反应过程是非线性的， $\text{PM}_{2.5}$ 组分（特别是硝酸盐）的浓度削减幅度与前体物的减排幅度并不完全一致。如北京、天津和河北 NO_x 的减排幅度分别达到34.9%、17.3%和20.2%，硝酸盐浓度却基本不变甚至略有上升。我们通过分析以往的研究有关技术指标^{11,12,13}，发现京津冀地区处于富氮地区（ $\text{GR}>1$ ）¹⁴。在富氮的条件下，二次 $\text{PM}_{2.5}$ 生成对大气氧化性更敏感。由于京津冀地区处于VOCs控制区^{10,12}， NO_x 减排导致大气氧化性的增强¹⁵，造成氧化剂（如 O_3 ）浓度的增加，从而促进各种大气污染前体物生成二次 $\text{PM}_{2.5}$ 。此外，周边区域的减排幅度小于京津冀地区以及天然源的VOCs排放维持不变也是空气质量浓度降幅小于人为源污染物减排幅度的原因。

11. Liu, X. H., et al. (2010), Understanding of regional air pollution over China using CMAQ, part II. Process analysis and sensitivity of ozone and particulate matter to precursor emissions, *Atmos. Environ.*, 44, 3719–3727.

12. Wang et al. Sulfate-nitrate-ammonium aerosols over China: response to 2000–2015 emission changes of sulfur dioxide, nitrogen oxides, and ammonia, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 2635–2652, 2013

13. Zhao et al. Impact of national NO_x and SO_2 control policies on particulate matter pollution in China, *Atmos Environ*, 2013, 77: 453–463.

14. GR的定义参见Zhang et al. (2009)，GR>1表示处于富氮条件。Zhang et al., Probing into Regional O_3 and PM Pollution in the U.S., Part II. An Examination of Formation Mechanisms through a Process Analysis Technique and Sensitivity Study, *J. Geophys. Res.* 2009, 114(D22305), DOI: 10.1029/2009JD011900.

15. Introduction to Atmospheric Chemistry, by Daniel J. Jacob, Princeton University Press, 1999.

4. 强化减排情景

4.1 达到国十条目标需要的减排强度

为了保证达到“国十条”的空气质量改善目标，基于3.3小节分析，我们进一步设置了强化减排情景，从而研究PM_{2.5}浓度达标所需的保障措施。

强化减排情景中，SO₂、NO_x、PM_{2.5}、NH₃和VOCs削减比例应该分别达到40%、40%、35%、20%和30%。现有的“行动计划”措施中，SO₂和PM_{2.5}减排措施的效果较为明显，我们在强化情景中进一步增大了天津和河北一次PM_{2.5}的减排力度；同时，为进一步控制硝酸盐和铵盐，增大了NO_x、VOC和NH₃的减排力度。图4-1显示了实施强化情景之后带来的PM_{2.5}浓度变化。图4-2给出了达到“国十条”目标的污染物削减强度，以及由此带来的PM_{2.5}组分的变化：

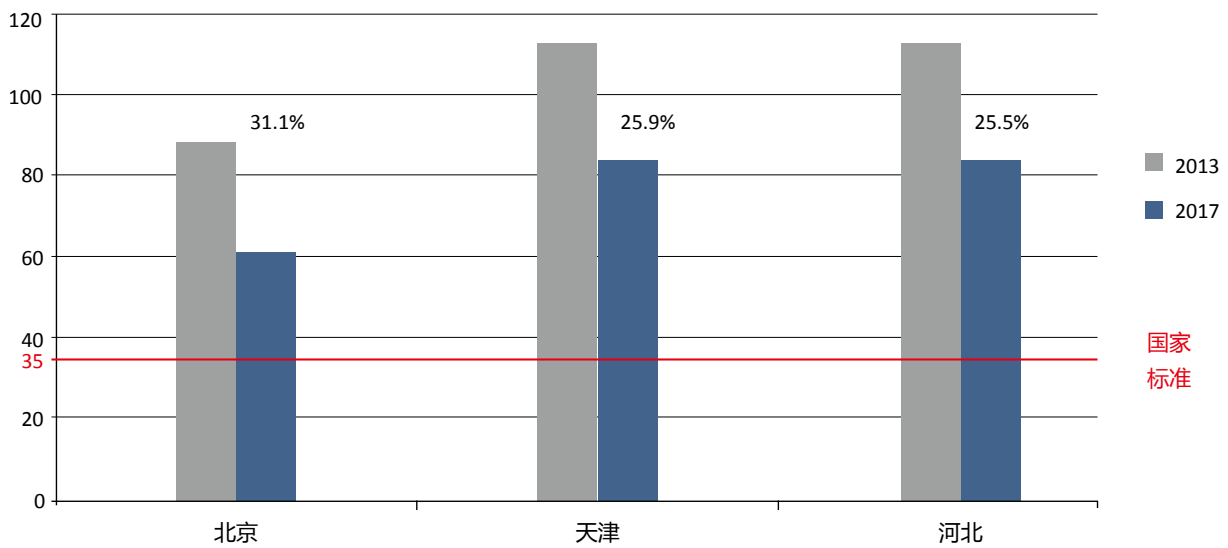


图4-1 强化达标情景对京津冀大气PM_{2.5}浓度的削减效益 (ug/m³)

通过强化减排，可以使得京津冀地区PM_{2.5}浓度的削减比例在25%以上（图4-2）。但硝酸盐和铵盐的削减比例仍达不到25%。这主要是因为京津冀地区对于NH₃的控制相对较少，即使实施强化减排措施，氨的减排比例只能达到20%，对于硝酸盐的削减效果仍较有限。

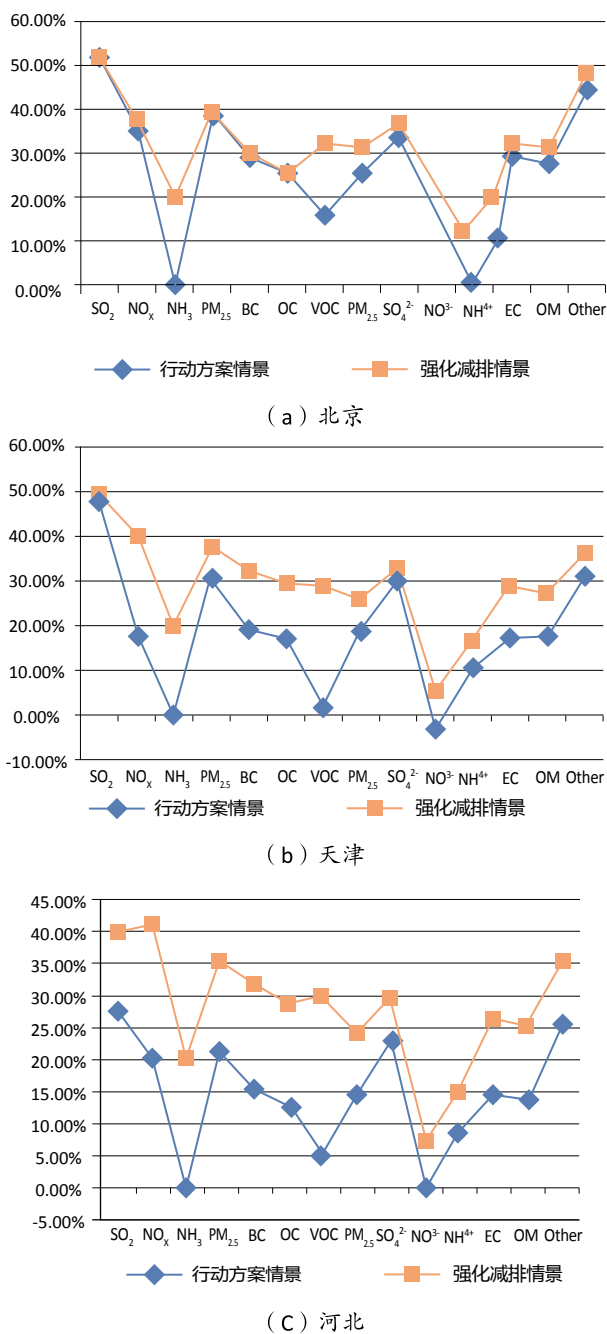


图4-2 达标情景中各项污染物的削减比例与 $PM_{2.5}$ 各组分浓度的削减比例

4.2 模拟结果对政策的启示

SO_2 和一次 $PM_{2.5}$ 减排措施对京津冀地区 $PM_{2.5}$ 浓度

削减效果较明显。天津市和河北省应特别进一步控制一次 $PM_{2.5}$ 的排放量，以保证达到“国十条”制定的环境目标。

应注意同时控制 NO_x 、 $VOCs$ 和 NH_3 的排放，才能更有效地降低 $PM_{2.5}$ 组分中二次无机气溶胶（特别是硝酸盐）的浓度。

“行动计划”针对民用部门以及 $VOCs$ 和 NH_3 的措施较难量化，这些措施还有待细化明确。民用部门和工业过程（钢铁、水泥、炼焦等）对一次 $PM_{2.5}$ 排放的贡献较大，工业过程和溶剂使用是 VOC 的主要来源，化肥施用和畜禽养殖是 NH_3 排放的重要来源¹⁶。

4.3 措施建议

基于强化情景设定的污染物减排目标，因此本报告建议强化以下措施：

- 1.京津冀地区实现工业煤炭100%洗选，同时禁止使用硫含量高于0.6%的煤炭；
- 2.京津冀地区对在用柴油车加装柴油机颗粒物捕集器（DPF）；
- 3.河北省应该削减钢铁产量，从而保证煤炭削减总量从4000万吨提高至6000万吨；
- 4.河北、天津钢铁企业全面升级改造安装高效除尘，比如电除尘、袋式除尘器等；
- 5.河北、天津应对水泥窑进行全面升级改造为袋式除尘器，其中河北对水泥行业全部开展脱硝治理；
- 6.河北对现有炼焦行业除尘进行升级改造；
- 7.河北、天津燃煤供热锅炉安装脱硝设施，其中天津的脱硝安装比率提高到50%；
- 8.河北、天津应对欧三柴油车进行限制，把重型载货欧三柴油车柴油消耗占比降至20%；
- 9.天津、河北对炼焦、涂料、制药等行业的 VOC 排放实行重点控制，将 $VOCs$ 的排放减少30%—40%；
- 10.天津、河北把畜牧养殖业集约化比例提高到30%，并推广施用缓释肥料。

16. Huang et al. A high-resolution ammonia emission inventory in China, Global Biogeochem. Cycles, 2012, 26, GB1030, doi:10.1029/2011GB004161

5. 不确定性分析

本研究依据现行可明确量化措施，对改善效果的评估是偏于保守的估计。为鉴别影响京津冀地区细颗粒污染的其他重要因素，本研究进行了不确定性分析，主要有：

5.1 气象条件年际变化的影响

本研究模拟时采用了2013年气象条件，已有研究表明2013年的气象条件较为极端。建议在进行目标考核时增加气象条件的修正系数，或者借鉴国际经验采用三年空气质量平均值作为考核依据，以更客观地反映污染物减排程度。

5.2 周边区域减排的影响

本研究假设周边区域能达到国家设定的20%（山东、山西）和10%（内蒙古）的改善目标。但若周边地区维持2012年的排放水平，将使北京、天津、河北的PM_{2.5}年均浓度分别增加1.9 μg/m³，3.9 μg/m³，3.5 μg/m³，相应地，2017年北京、天津和河北PM_{2.5}下降幅度减少2~4个百分点。其中硫酸盐和铵盐的下降幅度将减少6~8和4~5个百分点。因此，区域协同控制对于削减二次无机气溶胶浓度有重要作用。

5.3 VOC和NH₃的措施较难量化

“国十条”针对民用部门以及VOC和NH₃的措施较难量化，这些措施还有待细化明确。应当加大对NO_x、VOCs和NH₃的控制力度，以达到PM_{2.5}浓度显著下降的环境目标。



附表

表1 地方“行动方案”中主要结构调整措施及其参数化方案(万吨)

部门	能源/产品	2012			2017		
		北京	天津	河北	北京	天津	河北
电力	煤炭	651	2746	9666	0	2346	9390
	天然气 ^a	21	1	0	64	49	15
供热	煤炭	606	1016	1469	217	738	1065
	天然气	14	0	1	40	26	33
工业	煤炭	424	1791	15561	224	1495	12595
	天然气	14	16	25	29	35	139
	钢铁	2.6	2124	18048	3	1700	16299
	水泥	875	784	12810	360	676	9615
城镇民用	煤炭	218	78	908	98	62	668
	天然气	38	12	15	59	18	47
	液化气	27	7	77	48	12	114
农村民用	煤炭	371	115	1140	291	104	1026
	天然气	0.3	0	0	5.02	0	0
	液化气	9	5	6	34	26	153
	秸秆	59	313	1677	47	282	1593
	薪柴	160	90	724	128	81	688
道路	汽油	399	128	456	370	160	563
	柴油	211	108	743	194	108	853
非道路	柴油	46	37	348	47	46	415

a.天然气的单位为亿立方米。

表2 地方“行动方案”中主要结构调整措施及其参数化方案(万吨): 北京市

部门	能源/产品	2012	2017	数据说明	主要相关政策
总计	煤炭	2270	830		控制煤炭消费总量: 到2017年, 全市燃煤总量比2012年削减1300万吨, 控制在1000万吨以内。
电力	煤炭	651	0	全面关停燃煤机组, 预计2017年电力燃煤为零。	全面关停燃煤机组, 削减燃煤920万吨; 电力生产燃气化, 清洁能源发电比例达到100%。
供热	煤炭	606	217	关停燃煤热电厂, 估算削减供热燃煤269万吨。 集中改造采暖锅炉削减220万吨, 估算集中供热燃煤削减120万吨。	集中改造采暖锅炉, 削减燃煤220万吨; 其中, 城六区137座约4900蒸吨锅炉“煤改气”, 削减燃煤120万吨; 远郊新城和重点镇区域内20蒸吨以下燃煤采暖锅炉全面实施清洁能源改造, 新城区域外商业服务业单位实施清洁能源改造, 削减燃煤100万吨。
工业	煤炭	424	224	大幅压减工业用煤, 削减工业用煤200万吨。	大幅压减工业用煤, 削减工业用煤200万吨。
其中	工业锅炉	218	80		其中, 19个市级以上工业园区约2100蒸吨锅炉“煤改气”, 削减燃煤50万吨; 基本完成全市规模以上工业企业锅炉“煤改气”, 市级以下工业园区燃煤设施清洁能源改造, 削减燃煤55万吨;
	工业窑炉	206	144	水泥产能削减至400万吨, 估算削减水泥燃煤62万吨。	水泥产能削减至400万吨、炼油规模控制在1000万吨, 淘汰退出1200家高污染镇村小企业, 削减燃煤95万吨。
城镇民用	煤炭	218	98	治理民用散煤100万吨, 估算其中城镇民用散煤削减20万吨; 集中改造采暖锅炉削减220万吨, 估算其中城镇分散采暖锅炉燃煤削减100万吨。共计削减120万吨城镇民用燃煤	多措并举治理散煤, 削减燃煤200万吨。 其中, 东城和西城区实现无煤化。完成4.4万户平房“煤改电”; 削减剩余2.1万户平房采暖用煤; 加快城乡结合部城市化建设进程, 努力削减朝阳、海淀、丰台和石景山区民用散煤;
农村民用	煤炭	371	291	治理民用散煤100万吨, 估算其中农村民用散煤削减80万吨	逐步减少农村用煤。2016年基本实现农村炊事气化, 完成25万户电力、燃气和可再生能源清洁改造。
工业	水泥	875	360	水泥产能削减至400万吨, 估算产能利用率从2012年的88%提高至2017年的90%。	压缩水泥产能: 到2017年, 产能由“十二五”初期的1000万吨压缩至400万吨左右。
工业	钢铁	2.6	2.6		
城镇民用	液化气	27	48	根据增长量外推。	
农村民用	天然气	0.27	5.02	根据技术部门测算, 本市1906个村庄, 全部实现天然气、液化石油气供气后, 天然气年用气量为5.02亿立方米。	
	秸秆	59	47	按削减20%估算。	
	薪柴	160	128	按削减20%估算。	

表3 地方“行动方案”中主要结构调整措施及其参数化方案(万吨):天津市

部门	能源/产品	2012	2017	数据说明	主要相关政策
总计	煤炭	5746	4746		控制煤炭消费总量:到2017年底,净削减煤炭消费总量1000万吨。
电力	煤炭	2746	2346	天津市部分火电机组实施改燃或关停,估算削减煤炭消费400万吨。	实施火电机组改燃或关停:完成对天津陈塘热电有限公司4台机组、静海热电厂3台机组和天津军粮城发电有限公司4台机组的煤改燃工作。完成对天津碱厂自备电厂4台锅炉的关停工作。
供热	煤炭	1016	738	实施燃煤供热锅炉改燃或并网,估算削减煤炭消费278万吨。	实施燃煤供热锅炉改燃或并网:2016年底前,对中心城区和滨海新区核心区163座465台13755蒸吨采暖供热锅炉实施煤改燃或并网。
工业	煤炭	1791	1495		
其中	工业锅炉	766	660	实施燃煤工业锅炉改燃或并网,估算削减煤炭消费106万吨。	实施燃煤工业锅炉改燃或并网:建成区全部35蒸吨及以下的燃煤工业锅炉完成改燃或并网,环城四区及滨海新区全部10蒸吨及以下的燃煤工业锅炉完成改燃或并网。实施工业园区所有自备燃煤锅炉改燃或并网。
	工业窑炉	142	129	淘汰水泥产能229万吨,估算削减煤炭消费量13万吨。	
	钢铁焦炭	883	707	钢铁产能控制在2000万吨以内,估算削减煤炭消费量176万吨。	
城镇民用	煤炭	78	62	按削减20%估算。	
农村民用	煤炭	115	104	按削减10%估算。	
工业	水泥	784	676	淘汰水泥产能229万吨,估算产能利用率80%提高至90%。	压缩水泥产能:淘汰落后水泥产能229万吨。
工业	钢铁	2124	1700	钢铁产能控制在2000万吨以内,估算2017年产能利用率为85%。	压缩钢铁产能:2017年底前,天津市行政辖区内钢铁产能控制在2000万吨以内。
城镇民用	液化气	7	12	根据增长量外推。	
	天然气	0	0		
农村民用	秸秆	313	282	按削减10%估算。	
	薪柴	90	81	按削减10%估算。	

表4 地方“行动方案”中主要结构调整措施及其参数化方案(万吨): 河北省

部门	能源/产品	2012	2017	数据说明	主要相关政策
总计	煤炭	28744	24744		控制煤炭消费总量: 到2017年, 全省煤炭消费量比2012年净削减4000万吨。
电力	煤炭	9666	9390	关停10万千瓦及以下火电机组29台(装机容量63.75万千瓦), 削减煤炭消费276万吨。	关停10万千瓦及以下小火电机组: 全省共关停10万千瓦及以下火电机组29台(装机容量63.75万千瓦), 削减煤炭消费276万吨。
供热	煤炭	1469	1065	1.4亿平方米集中供热锅炉煤改气, 估算削减煤炭消费404万吨。	集中供热锅炉煤改气: 改造面积1.4亿平方米。
工业	煤炭	15561	12595		
其中	工业锅炉	5340	3982	淘汰燃煤小锅炉11071台, 估算削减煤炭消费1358万吨。	淘汰燃煤锅炉及削减煤炭消费任务: 各设区市和省直管县(市)的城市建成区全部淘汰35蒸吨及以下燃煤锅炉, 城乡结合部和其他远郊区(市、区)基本淘汰每小时10蒸吨及以下燃煤锅炉, 全省共淘汰燃煤锅炉11071台, 削减煤炭消费1358万吨。
	工业窑炉	1856	1473	淘汰水泥落后产能6100万吨以上, 估算削减煤炭消费383万吨。	
	钢铁焦炭	8365	7141	根据河北省4000万吨煤炭削减量的要求, 扣除其他部门可能的削减量, 估算钢铁行业所需煤炭削减量1225万吨。	
洗选煤	煤炭	2168	1030	取缔外来煤炭洗选及削减煤炭损耗, 削减煤炭消费1138万吨。	取缔外来煤炭洗选及削减煤炭损耗: 全省共关闭123个规模以上外来煤洗选企业, 禁止煤炭生产企业洗选外来煤, 削减煤炭消费1138万吨。
城镇民用	煤炭	908	668	分散燃煤采暖锅炉煤改气1万蒸吨, 估算削减煤炭消费240万吨。	分散燃煤采暖锅炉煤改气: 到2017年底, 煤改气1万蒸吨。
农村民用	煤炭	1140	1026	按削减10%估算。	削减农村炊事、采暖和设施用煤。
工业	水泥	12810	9615	淘汰水泥落后产能6100万吨以上, 估算产能利用率从2012年的70%提高至2017年的80%。	压缩水泥产能: 到2017年淘汰水泥落后产能6100万吨以上。
	钢铁	18048	16299	根据钢铁行业所需煤炭削减量反推实际所需削减的钢铁产量。产能利用率从2012年的63%提高至2017年的72%。	压缩钢铁产能: 到2017年全省钢铁产能削减6000万吨。
城镇民用	液化气	77	114	根据增长量外推。	
	天然气	0	0		
农村民用	秸秆	1677	1593	按削减5%估算。	
	薪柴	724	688	按削减5%估算。	

表5 地方“行动方案”中主要末端控制措施及其参数化方案(%)：固定燃烧源

部门	技术	控制技术	2012			2017			政策
			北京	天津	河北	北京	天津	河北	
电力		FGD	100	99	100	100	100	100	大气十条：所有燃煤电厂都要安装脱硫设施。 天津：2013年底前，实施火电机组拆除脱硫旁路等脱硫升级改造。电力行业新建、改造脱硫380万千瓦。 河北：全省25家电力企业的65台约1400万千瓦燃煤机组要安装脱硫设施。
		LNB	100	61	69	100	0	0	大气十条：除循环流化床锅炉以外的燃煤机组均应安装脱硝设施。
		LNB+SCR	0	39	31	0	100	100	
	>300MW机组	LNB	1	28	45	1	10	10	天津：2014年底前，完成20万千瓦及以上火电机组脱硝治理工程并全部投入使用。电力行业新建脱硝525万千瓦。 河北：99台约2800万千瓦燃煤机组全部配套建成脱硝设施。电力行业新建脱硝2107万千瓦。
		SCR	44	0	8	44	40	40	
		LNB+SCR	46	0	0	46	50	50	
	100~300MW机组	SCR	17	0	6	17	50	61	
		SCR	17	0	6	17	50	61	
		SCR	17	0	6	17	50	61	
	<100MW机组	WET	0	1	1	0	0	0	天津：2014年底前，完成火电机组烟尘提标升级改造；2016年底前，对重点火电企业进一步实施除尘升级改造。电力行业除尘改造365万千瓦。 河北：41家88台约1200万千瓦燃煤机组现有除尘设施要实施升级改造。电力行业除尘改造351万千瓦。
ESP		100	99	99	100	74	91		
ESP2		0	0	0	0	26	9		
供热	燃气	SCR	0	0	0	25	0	0	北京：完成京丰燃气热电厂脱硝治理。
	煤粉炉	SCR	0	0	0	100	0	0	北京：2015年，各远郊区县全面完成燃煤集中供热中心烟气脱硝高效治理。
工业锅炉		FGD	0	0	0	70	70	16	大气十条：每小时20蒸吨及以上的燃煤锅炉要实施脱硫。 河北：114台约4800蒸吨燃煤锅炉(每小时20蒸吨及以上)全部实施脱硫改造。131台3813蒸吨锅炉脱硫除尘改造。
		WET	0	15	26	0	0	7	大气十条：燃煤锅炉现有除尘设施要实施升级改造。
		ESP	68	85	65	60	90	84	河北：164台约5600蒸吨燃煤锅炉现有除尘设施要实施升级改造。
	流化床炉	FAB	32	0	9	40	10	9	
		CYC	18	32	7	0	0	0	
		WET	68	60	86	80	80	81	
		ESP	14	0	0	20	20	19	
层燃炉	WET	68	60	86	80	80	81		
	ESP	14	0	0	20	20	19		

表6 地方“行动方案”中主要末端控制措施及其参数化方案(%)：工业过程

部门	技术	控制技术	2012			2017			政策
			北京	天津	河北	北京	天津	河北	
工业过程	新型干法水泥窑	LNB	0	0	0	0	0	0	大气十条：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。 北京：所有水泥生产线完成脱硝治理。水泥窑新建脱硝8000吨/日熟料规模。
		SNCR	17	0	17	100	40	63	天津：实施水泥企业水泥生产线脱硝治理。水泥窑新建脱硝6000吨/日。 河北：67条约6200万吨PC线实施低氮燃烧技术改造及脱硝设施建设。
	烧结	FGD	0	0	70	100	100	100	大气十条：钢铁企业的烧结机和球团生产设备要安装脱硫设施。 天津：完成钢铁企业烧结机脱硫治理。钢铁烧结机脱硫1275平方米。 河北：120台约18000平方米烧结机和球团生产设备要安装脱硫设施。
		ESP	3	5	17	0	0	0	大气十条：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。 河北：40条约2300万吨水泥企业现有除尘设施要实施升级改造。水泥企业除尘改造5000吨/日。
	FAB	94	38	58	94	50	60		
	新型干法水泥窑	ESP2	3	57	26	6	50	40	
		石灰窑	CYC	17	0	3	0	0	0
	WET		33	0	23	57	0	85	
	ESP		0	0	6	0	0	6	
	砖窑	FAB	43	100	9	43	100	9	
		CYC	5	0	11	0	0	0	
	烧结	WET	4	4	0	100	100	100	
		CYC	2	2	2	2	0	0	天津：完成钢铁企业除尘综合升级改造。钢铁烧结机除尘改造775平方米。
		WET	18	18	18	18	0	0	河北：64家约18000万吨钢铁企业现有除尘设施要实施升级改造。钢铁企业除尘改造1663万吨。
		ESP	67	67	67	67	46	87	
	生铁	FAB	13	13	13	13	54	13	
		FAB	100	100	100	100	100	100	
	转炉钢	ESP	27	27	27	27	17	20	
		FAB	73	73	73	73	83	80	
	电炉钢	CYC	5	5	5	5	0	0	
WET		50	50	50	50	0	0		
ESP		19	19	19	19	74	74		
FAB		26	26	26	26	26	26		

表7 地方“行动方案”中主要末端控制措施及其参数化方案(%)：VOC排放源

部门	技术	控制技术	2012			2017			政策
			北京	天津	河北	北京	天津	河北	
工业过程	储油库 (汽柴油)	STAGE I	100	100	30	100	100	100	天津：2014年底前，完成储油库、加油站油气回收治理。积极推进油田开采、原油成品油码头开展油气回收工作。
	加油站 (汽柴油)	STAGE II	100	100	30	100	100	100	
	原油生产 储运	STAGE I	0	0	0	0	50	0	河北：到2014年，全省完成7202个加油站、82个储油库和1500辆油罐车的油气回收治理。在原油成品油码头积极开展油气回收治理。
	原油加工	EOP	0	0	0	60	20	20	北京：不断推进石化、有机化工等行业挥发性有机物综合整治。燕山石化实施泄漏检测与修复技术改造。2016年，原油加工损失率控制在0.3%。
	原油炼制	EOP	0	0	0	60	20	20	
	石化化工	EOP	0	0	0	30	30	30	天津：2016年底前，对石化、化工、医药、表面涂装、塑料制品、包装印刷等重点行业企业全面开展综合治理或关停。推行石化、化工等重点企业实施泄漏检测与修复技术和在线监测示范项目。
	涂料生产	替代	0	0	0	50	50	50	河北：在石化、有机化工、表面涂装、包装印刷等重点行业开展挥发性有机物综合治理。在石化行业开展“泄漏检测与修复”技术改造。
	机动车 制造涂装	替代	0	0	0	70	0	0	大气十条：推广使用水性涂料，鼓励生产、销售和使用低毒、低挥发性溶剂。
	木器家具涂装	替代	0	0	0	50	0	0	北京：提高低挥发性有机物含量涂料使用比例，新建机动车制造涂装项目达到80%以上，其中小型乘用车单位涂装面积的挥发性有机物排放量控制在35克/平方米以下。家具制造及其他工业涂装项目达到50%以上。包装印刷业必须使用符合环保要求的油墨。
	其他工业涂装	替代	0	0	0	50	50	50	
溶剂使用	印刷油墨	替代	0	0	0	100	50	50	天津：2016年底前，对石化、化工、医药、表面涂装、塑料制品、包装印刷等重点行业企业全面开展综合治理或关停。
化学药品生产			0	0	0	0	30	0	河北：在石化、有机化工、表面涂装、包装印刷等重点行业开展挥发性有机物综合治理。

表8 地方“行动方案”中主要末端控制措施及其参数化方案(%)：移动源

部门	技术	控制技术	2012			2017			政策
			北京	天津	河北	北京	天津	河北	
道路机动车	小型载客	≤Euro2	8	18	18	0	0	0	推进燃油与机动车排放控制标准：到2015年，全面实施国五标准；到2016年，北京市实施国六标准。
		Euro3	10	40	40	0	11	5	
	汽油车	Euro4	82	42	42	28	34	37	加快淘汰黄标车：到2017年底，京津冀地区黄标车全部淘汰，报废黄标车约200万辆。
		Euro5	0	0	0	43	55	57	
		Euro6	0	0	0	29	0	0	
		轻型载货	≤Euro2	6	17	17	0	0	
	汽油车	Euro3	11	45	45	0	13	9	
		Euro4	83	38	38	27	34	33	
		Euro5	0	0	0	38	53	58	
		Euro6	0	0	0	35	0	0	
	重型载货	≤Euro2	7	15	15	0	0	0	
		Euro3	93	85	85	35	40	36	
		Euro4	0	0	0	11	13	13	
		Euro5	0	0	0	23	47	51	
	柴油车	Euro6	0	0	0	30	0	0	
		≤Euro2	9	20	20	0	0	0	
		Euro3	91	80	80	12	27	21	
		Euro4	0	0	0	11	15	15	
	柴油车	Euro5	0	0	0	34	58	64	
		Euro6	0	0	0	42	0	0	
轻型载货		≤Euro2	6	17	17	0	0	0	
Euro3		11	83	83	25	32	27		
柴油车	Euro4	83	0	0	11	14	14		
	Euro5	0	0	0	28	54	59		
	Euro6	0	0	0	36	0	0		

注：机动车的技术比例是基于油耗计算的。

CYC: 机械式除尘; WET: 湿式除尘; ESP: 电除尘; ESP2: 高效电除尘; FAB: 袋式除尘; FGD: 烟气脱硫; LNB: 低氮燃烧; SCR: 选择性催化还原; SNCR: 选择性非催化还原; ≤Euro2: 国2及以前; Euro3: 国3; Euro4: 国4; Euro5: 国5; Euro6: 国6; Stage I: 一级油气回收系统; Stage II: 二级油气回收系统; EOP: VOC末端控制技术; Substitution: 环保型涂料、溶剂替代。

表9 地方“行动方案”中主要控制措施及其减排量(万吨)

政策	部门	污染物	减排量(万吨)		
			北京	天津	河北
调整能源结构	电力	SO ₂	0.69	0.53	-1.74
		NO _x	1.40	-1.50	-2.98
		PM _{2.5}	0.23	0.03	-0.84
	供热	SO ₂	2.22	1.35	2.45
		NO _x	1.43	1.32	1.82
		PM _{2.5}	0.87	0.21	0.50
	工业锅炉	SO ₂	1.38	1.24	14.88
		NO _x	0.28	0.78	8.38
		PM _{2.5}	0.10	0.07	0.48
	城镇民用	SO ₂	0.94	0.13	2.75
		NO _x	0.07	-0.05	0.31
		PM _{2.5}	0.28	0.05	0.56
	农村民用	SO ₂	0.70	0.12	1.39
		NO _x	0.03	0.04	0.12
		PM _{2.5}	0.81	0.34	1.54
调整产业结构					
控制钢铁行业产能	工业过程	PM _{2.5}	0.00	0.19	0.50
控制水泥行业产能		NO _x	0.68	0.22	3.56
		PM _{2.5}	0.04	0.15	3.15
末端污染治理减排					
燃煤电厂脱硫	电力	SO ₂	0.00	3.02	13.73
燃煤电厂脱硝		NO _x	0.00	4.93	22.50
燃煤电厂除尘升级		PM _{2.5}	0.00	0.45	1.30
燃气电厂脱硝		NO _x	0.39	0.00	0.00
燃煤供热锅炉脱硝	供热	NO _x	0.50	0.00	0.00
燃煤锅炉脱硫	工业锅炉	SO ₂	0.65	5.07	7.01
燃煤锅炉除尘升级		PM _{2.5}	0.02	0.38	2.05
水泥脱硝		NO _x	0.26	0.16	3.61
钢铁烧结机脱硫	工业过程	SO ₂	0.00	1.24	10.25
工业窑炉除尘升级		PM _{2.5}	0.59	0.31	3.17
钢铁行业除尘升级		PM _{2.5}	0.00	1.17	6.23
机动车减排	交通	NO _x	5.24	1.40	5.14
		VOCs	2.58	1.69	6.26
		PM _{2.5}	0.23	0.07	0.53
VOC减排					
重点行业综合治理	工业过程	VOCs	0.80	2.27	0.85
油气回收	工业过程	VOCs	4.53	3.63	3.39
推广低VOC涂料溶剂	溶剂使用	VOCs	2.53	1.70	3.63
总计(2017年排放变化)		SO ₂	6.73	13.44	46.15
		NO _x	10.29	7.27	42.37
		PM _{2.5}	3.16	3.72	20.87
		VOCs	5.39	0.72	7.13

表10 强化减排达标情景中加严的控制措施及相应增加的减排量（万吨）

省份	加严的减排措施	污染物	增加的减排量（万吨）
河北	钢铁产量削减，保证煤炭削减总量从4000万吨增加至6000万吨。	SO ₂ /NO _x /PM _{2.5}	1.00/12.00/2.45
河北	钢铁企业除尘全面升级改造安装高效除尘（电除尘器、袋式除尘器）。	PM _{2.5}	1.43
河北	水泥窑除尘全面升级改造安装袋式除尘器。	PM _{2.5}	2.26
河北	炼焦行业除尘升级改造。	PM _{2.5}	2.28
河北	在用柴油车全部安装DPF。	PM _{2.5}	0.34
河北	燃煤供热锅炉安装脱硝设施。	NO _x	3.1
河北	水泥行业全部脱销治理。	NO _x	2.5
河北	工业煤炭洗选，禁止使用硫含量高于0.6%的煤炭。	SO ₂	16.4
河北	对欧三柴油车进行限行：其中重型载货柴油车油耗比例从基准情景的35~40%降低至20%。	NO _x /VOCs	3.04/0.52
河北	VOC重点行业减排30~40%（炼焦、涂料、制药等行业）。	VOCs	21.9
河北	畜牧养殖业集约化比例增加30%、推广施用缓释肥料品种。	NH ₃	10.70
天津	钢铁企业除尘全面升级改造安装高效除尘（电除尘器、袋式除尘器）。	PM _{2.5}	0.44
天津	水泥窑除尘全面升级改造安装袋式除尘器。	PM _{2.5}	0.15
天津	在用柴油车全部安装DPF。	PM _{2.5}	0.04
天津	燃煤供热锅炉安装脱硝设施。	NO _x	3.45
天津	对欧三柴油车进行限行：其中重型载货柴油车油耗比例从基准情景的35~40%降低至20%。	NO _x /VOC	0.43/0.08
天津	工业煤炭洗选，禁止使用硫含量高于0.6%的煤炭。	SO ₂	0.54
天津	VOC重点行业减排30~40%（涂料、制药等行业）。	VOCs	5.60
天津	畜牧养殖业集约化比例增加30%、推广施用缓释肥料品种。	NH ₃	0.82

中国清洁空气联盟

中国清洁空气联盟由十家中国清洁空气领域的核心科研院所共同发起，拟为中国的省市提供一个有效的平台，一方面以推广国内外先进的理念、经验、技术、工具；另一方面，加强省、城市以及科研机构之间的交流协作。联盟的目标是支持中国的省和城市改善空气质量，减少空气污染对公共健康的危害。联盟的参与方包括科研院所、相关省市、以及关注清洁空气的公益机构和相关企业等。

十家发起机构包括：清华大学、环保部环境规划院、环保部环境工程评估中心、复旦大学、南京大学、北京师范大学、环保部环境科学研究院、北京大学、环保部机动车排污监控中心、人民大学

发起支持机构：能源基金会



CAAC



中国清洁空气联盟秘书处

北京市朝阳区建外大街甲24号东海中心709

电 话：+86-10-65696606

电子邮箱：cleanairchina@iccs.org.cn