

雾霾真相

京津冀地区PM_{2.5} 污染解析及减排 策略研究



报告编著者简介

关大博 博士

英国利兹大学副教授，英国剑桥大学圣艾德蒙顿学院资深研究员、经济学教学主任。他在环境、经济、地理方向的优质期刊杂志发表过近 50 篇学术论文，并在《自然》、《科学》杂志多次发表通讯及受邀评论。他曾两次获得里昂惕夫奖第一名（2012，2013），《环境科学与技术》（Environmental Science & Technology）杂志年度最优文。他是联合国政府间气候变化委员会气候第五次变化报告（IPCC 5th Assessment Report）主要撰写人。

刘竹 博士

哈佛大学肯尼迪学院可持续发展科学项目 Giorgio Ruffolo 学者，致力于中国的可持续发展 and 应对气候变化的低碳发展路径研究。在《自然 - 气候变化》、《美国科学院院刊》等杂志发表多篇学术论文，曾受邀《自然》杂志发表专题评论《中国低碳发展路线图》。

目录

摘要

5

1 研究背景

11

2 主要研究方法

15

- 2.1 排放源清单建立方法
- 2.2 基准排放情景设定
- 2.3 CMAQ 空气质量模型
- 2.4 控制措施的减排效果

16

18

19

20

3 京津冀 PM_{2.5} 污染源解析结果

23

- 3.1 京津冀地区 PM_{2.5} 组分分析
- 3.2 京津冀地区 PM_{2.5} 的来源分析
- 3.3 北京地区 PM_{2.5} 的来源分析
- 3.4 天津地区 PM_{2.5} 的来源分析
- 3.5 河北地区 PM_{2.5} 的来源分析

24

25

29

32

34

4 基准情境下 PM_{2.5} 浓度趋势预测

39

- 4.1 当前 PM_{2.5} 浓度评估
- 4.2 基准情景下未来二十年浓度变化趋势

40

42

5 京津冀地区 PM_{2.5} 浓度达标应对策略

45

6 结论

53



附录

附录 1: PM_{2.5} 背景知识 55

附录 2: PM_{2.5} 化学组分其他附图及说明 56

附录 3: 分行业减排措施列表 57

参考文献 59



摘要

研究背景与目的

近年以来，中国一些重点区域的空气污染问题及其造成的巨大公众健康损失引起了广泛的关注，对以京津冀等地区为代表的重点地区的大气污染治理也成为各级政府部门主要的工作议程。2013年9月，国务院出台《大气污染防治行动计划》，提出采取综合措施减轻京津冀、长三角、珠三角重点区域大气污染状况，环保部随后也发布了《京津冀及周边地区落实大气污染防治行动计划实施细则》，力图在2017年将京津冀地区PM_{2.5}浓度降低25%并将北京市细颗粒物浓度控制在60μg/m³(微克每立方米)的水平。

如果按照PM_{2.5}浓度每五年下降25%的速度，京津冀地区估计将在2030年左右才能达到35μg/m³的国家标准。

从中央到地方已有了明确而坚决的近期目标，但公众对自身生存环境的要求日益迫切；在实际工作中，由于尚且缺乏对PM_{2.5}排放构成的部门分析，对“未来浓度趋势怎样？如何降低PM_{2.5}排放？”“减多少才能达到空气质量标准？”以及“是否能提前达标？”这样一些关键问题的回答仍然十分模糊。当前解决PM_{2.5}污染仍面临严峻挑战。不同地区PM_{2.5}污染的治理需要以该地区PM_{2.5}污染来源研究为基础。从2012年底开始，绿色和平与英国利兹大学关大博教授合作开展京津冀地区PM_{2.5}污染来源及对策研究，并在2013年供暖季结题。

本报告是国内第一份全面分析京津冀地区PM_{2.5}污染来源，并评估2022年京津冀地区空气质量达标可行性的报告。本报告的发布不仅仅为了唤醒公众和社会对京津冀地区PM_{2.5}污染状况的关注，更直接作用于决策者和利益相关方，为切实可行的降低PM_{2.5}排放提供依据和支持。

报告在收集了京津冀地区全行业排放源数据基础上，从行业类型及燃料消费种类两个方面，研究了该地区PM_{2.5}污染来源，并通过空气质量模型，从排放源分布、污染物化学组成等方面量化梳理京津冀地区重点污染行业及不同燃料对PM_{2.5}污染的贡献。在此基础上，我们以京津冀地区空气质量在2022年左右达标为情景，提出了区域减排力度建议，并针对京津冀地区各自不同的经济、工业、能源结构和污染源排放特点，分地区提出了最有效的PM_{2.5}污染治理建议。

本研究力图回答以下问题：

- 京津冀地区当前PM_{2.5}每年^①排放总量是多少？各类排放源对大气细颗粒浓度的贡献是多少？哪些是重点排放行业？
- 京津冀地区若想在2022年提前实现区域空气质量达标，需要多大的减排力度？需要采取哪些重点减排措施？

①本研究中使用的是2010年的排放源清单，根据《中国能源统计年鉴2011》、《中国能源统计年鉴2012》及环保部公开信息，京津冀地区的不同燃料消费比例以及燃煤锅炉末端治理安装率等并未发生大的改变，这说明尽管该地区的能源消费总量、污染排放总量、部分工业产能等发生了改变，但本研究对燃料贡献和行业贡献的趋势分析依然有效。

研究方法：

本研究的基础是详细的京津冀地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染源。研究根据 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放结构特征，分部门行业和燃料消费类型^①，构建包括 $\text{PM}_{2.5}$ 一次源以及 $\text{PM}_{2.5}$ 主要前体物（二氧化硫 SO_2 、氮氧化物 NO_x 、氨气 NH_3 、挥发性有机物 VOCs ）的排放源清单。并在此基础上借助 CMAQ 空气质量模型和 GAINS 空气质量模型估计当前 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度、 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量，并评估各种情景下的浓度变化。具体研究方法请见如下流程图：



主要发现：

报告的主要研究结论有：

[1]

降低京津冀地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度需要同时考虑 $\text{PM}_{2.5}$ 一次源及二氧化硫、氮氧化物等多种前体污染物协同控制。在京津冀地区，由二氧化硫、氮氧化物等前体物二次生成的细颗粒物是最重要的 $\text{PM}_{2.5}$ 组分，总共占质量浓度的 50~70% 之间。北京地区一次源直接排放对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的贡献占 40%，而 $\text{PM}_{2.5}$ 前体物排放对总浓度的贡献为 60%。在天津，这一比例为 47% 和 53%，河北地区该比例分别为 41% 和 59%。

[2]

从燃料类型的污染贡献角度来看，过度依赖煤炭的能源供应结构对京津冀地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染影响巨大。煤炭是京津冀地区主导性的燃料污染来源，占京津冀地区一次 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒物 25% 的排放，二氧化硫和氮氧化物京津冀总排量的 82% 和 47%。油品在京津冀地区的一次 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒物排放、氮氧化物和挥发性有机物排放总量上的比例分别为 4%、31% 和 18%。

^①本研究燃料消费类型包括：燃煤、油品、非燃料排放（工业过程）、生物质燃料、燃气；部分行业类型包括：交通运输、工业生产过程、能源部门（燃煤发电）、居民和商业部门、农业及燃料生产和其他排放源。

[3]

从行业角度，燃煤发电是京津冀地区 $\text{PM}_{2.5}$ 排放最大的单一工业源，燃煤电厂占京津冀地区一次 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒物排放的 9%，占二氧化硫排放的 69%，氮氧化物排量的 47%。包括钢铁、水泥和制砖在内的工业生产是京津冀地区另一大污染排放源，共占该地区一次 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒物总排放的 49%，二氧化硫和氮氧化物总排量的 12% 和 17%。

[4]

交通行业对北京市的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染影响相比其他两地更明显，交通行业是北京地区最大的氮氧化物来源，占总排放的 45%，也是继发电行业后北京市最大的单一污染来源行业。

[5]

包括钢铁、水泥、制砖等行业在内的工业生产过程对天津、河北的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染贡献明显高于其对北京的贡献。尤其是河北省，工业生产过程是河北省一次细颗粒物最重要的来源，共占一次源排放总量的 50%。

[6]

研究指出，京津冀地区在 2022 年间实现 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降低至 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的必要条件是需要 2022 年实现削减当前 80% 的 $\text{PM}_{2.5}$ 直接排放、60% 的 SO_2 排放、75% 的 NO_x 排放、85% 的 NH_3 排放。

蓝天建议：

如果要在十年内达到或接近国家空气质量二级标准（ $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ ），京津冀地区需要在以下 4 个方面加大力度：

[1]

大幅度限制燃煤使用，尤其是电力行业煤炭使用，不再新建燃煤发电厂，最大程度发掘区域及周边可再生能源潜力，用可再生能源发电替代燃煤发电。

[2]

关停、整治水泥厂、炼钢厂等高污染高能耗行业，大力推广燃气锅炉替代燃煤锅炉。

[3]

全面改造民用和小规模商业炉灶，使民用燃料由燃煤向燃气转化，禁止农业废弃物焚烧。

[4]

进一步提升油品质量和汽车排放标准。

根据以上研究结果，我们的报告也针对北京、天津、河北三地提出了有针对性的到 2022 年的 $\text{PM}_{2.5}$ 减排建议。

北京

基于北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 排放特点：工业过程为一次源 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要来源，能源和交通运输部门是主要的二次源前提物来源，就行业而言应从这三行业重点实施减排；燃煤、油品和非燃料排放（工业生产过程排放）是二氧化硫、氮氧化物、挥发性有机物的主要来源，减排应从大幅度减少燃煤消耗，提升油品质量和汽车排放标准，同时减少工 VOCs 业排放方面着手。

到 2022 年：

- 在关停北京市内燃煤电厂的基础上，进一步加快提高可再生能源电力在北京市电力消费总量中的比例，提高北京市分布式太阳能推广力度和使用比例，城市外用电比例应提高从周边区域引进风电等可再生能源电力；
- 关停现有的全部钢铁厂和部分水泥厂，对现有的水泥窑安装布袋除尘器，禁止新建水泥厂；
- 轻型汽油车和重型柴油车全部实行国六标准，将新能源汽车和出租车的比例提高到 40% 以上；
- 加快电力部门的末端治理，届时所有化石燃料电厂实施烟气脱硫脱硝治理，采用低氮燃烧技术，安装布袋除尘器；
- 减少工业生产过程的挥发性有机物排放。

天津

基于天津市 $\text{PM}_{2.5}$ 排放特点：分行业贡献而言，能源部门（燃煤发电）是 $\text{PM}_{2.5}$ 排放的最大工业排放源，电力部门减排最为关键；分燃料类型而言燃煤和非燃料的排放（工业生产过程排放）是主要来源，减排应从大幅度减少燃煤消耗，减少油品生产过程中二次源 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放入手。

到 2022 年：

- 提高天津市风电、分布式太阳能推广力度和使用比例，大幅度降低煤炭在能源消费中的比例；
- 加大油品及相关产品生产过程的污染治理，完成脱硫改造，减少挥发性有机物的排放；
- 关停部分水泥厂、钢铁厂，对现有的水泥窑安装布袋除尘器，禁止新建水泥厂和钢铁厂；
- 加快电力部门的治理，所有现有电厂实施烟气脱硫脱硝治理，采用低氮燃烧技术，安装布袋除尘器，并在加强末端治理的基础上，进一步关停部分现有燃煤电厂。

河北

基于河北省 PM_{2.5} 排放特点：能源部门（燃煤发电）是 PM_{2.5} 的最大工业排放源，工业过程为一次源 PM_{2.5} 的主要来源，居民和商业部门也贡献较大，就行业而言应从这三行业重点实施减排；燃煤和非燃料的排放（工业生产过程排放）是主要来源，减排应从大幅度减少燃煤消耗，减少工业生产过程排放入手。

到 2022 年：

- 最大限度的挖掘区域可再生能源发电潜力以替代燃煤发电；
- 加快关停部分钢铁厂、焦化厂、水泥厂，禁止新建钢铁厂、焦化厂、水泥厂。钢铁厂实施烟气脱硫，高效除尘技术，水泥窑安装布袋除尘器；
- 加快电力部门的治理，所有现有电厂实施烟气脱硫脱硝治理，采用低氮燃烧技术，安装布袋除尘器，并在加强末端治理的基础上，进一步关停部分现有燃煤电厂；
- 加强民用和小规模商业炉灶的改造，使民用燃料由燃煤向燃气转化，禁止农业废弃物焚烧。

就整个京津冀地区而言，河北省无疑是治理的重点，河北省的污染物排放总量最大，重工业比重最高，且民用、商用小锅炉污染影响在三地区最大，如果河北省不能快速有效地降低大气污染物的排放，那么整个区域的空气污染治理都将会被掣肘。在北京、天津、河北各自治理的基础上，京津冀地区应尽快建立区域性的大气污染防治协作机制，并将治理和扶持的重点向河北省倾斜。在区域的层面上，通过从根本上降低煤炭在能源消费中的比例，加强重点行业的末端治理和联合执法，加快小锅炉的清洁化改造，以及深化区域空气污染监测预警、应急和联合减排等措施，实现对空气污染的有效治理。





1

研究背景

1 研究背景

悬浮颗粒物 (Suspended Particulate Matter, SPM) 是主要的大气污染物类型, 悬浮颗粒物按照粒径可分为粒径小于 100 微米的总悬浮颗粒物 (Total Suspended Particles, TSP)、粒径小于 10 微米的粗颗粒物 (PM_{10}) 和粒径小于 2.5 微米的细颗粒物 $PM_{2.5}$ 。粗颗粒物和 $PM_{2.5}$ 容易被人和动物呼吸进入肺部产生一系列致病风险, 又称可吸入颗粒物。其中, $PM_{2.5}$ 由于其 $PM_{2.5}$ 粒径小, 含大量有毒、有害物质且在大气中停留时间长、输送距离远, 对人体健康和大气环境质量影响显著。相关研究表明, 大气 $PM_{2.5}$ 浓度增高可显著增加人体致癌与非致癌风险, 导致诸如肺癌等疾病死亡率上升。例如, $PM_{2.5}$ 大气浓度每增加 $10\mu g/m^3$, 将导致肺癌死亡率增加 8%, 低出生体重患儿率增长 10%, 心肺疾病死亡率增加 6% (Greenpeace 2013a)。绿色和平另一个研究 (Pan, Li and Gao 2012) 表明, 当前的 $PM_{2.5}$ 浓度水平每年仅在北京、上海、广州、西安四个城市就能造成上万人的过早死亡。根据世界卫生组织估算, 2008 年由于空气污染造成中国 47 万人过早死亡; 世界银行的研究表明, 2003–2006 年由于空气污染导致的死亡和疾病给中国带来的损失, 相当于当年 GDP 的 1.16%~5%。WHO 近期发表的研究报告表明, 大气颗粒物污染已经是导致东亚人口死亡率的第四大因素。

中国作为世界上人口最多的国家和最大的发展中国家, 其工业化和城市化进程消费大量能源和工业产品并造成严重的环境污染。中国是世界上最大的一次能源消费国, 其消费量占

全球 24%。2008 年至 2011 年间中国的煤炭消费增长占全球总增长的 80% 以上。中国水泥、钢铁、玻璃等主要工业产品产量占全球总产量的一半以上。在快速增长的能源消费和工业生产驱动下, 中国已成为全球 $PM_{2.5}$ 浓度最高的国家 (van Donkelaar et al. 2010), 其中京津冀地区的细颗粒浓度水平超过撒哈拉沙漠地区。2012 年冬季, 全国各地经历了极其严重的以 $PM_{2.5}$ 为主导的雾霾天气, 北京等地区实时 $PM_{2.5}$ 浓度超过 $1000\mu g/m^3$ 。

降低 $PM_{2.5}$ 大气浓度的关键在于降低人为活动源的 $PM_{2.5}$ 及其前体物的排放。公众、社会舆论被 $PM_{2.5}$ 带来的巨大环境和健康影响所震惊, 对降低大气中 $PM_{2.5}$ 具有空前高涨的减排热情, 政府的一系列措施也表明其迫切而坚决的减排决心。2010 年 5 月, 环保部等九部委联合出台《关于推进大气污染联防联控工作改善区域空气质量的指导意见》。2012 年 2 月环保部发布新的《环境空气质量标准》(GB3095–2012), 规定了 $35\mu g/m^3$ $PM_{2.5}$ 浓度限值, 首次在国家层面制定了 $PM_{2.5}$ 国家环境空气质量标准。同时, 国务院召开国务院常务会议, 同意发布新修订的《环境空气质量标准》, 要求 2012 年在京津冀、长三角、珠三角等重点区域以及直辖市和省会城市开展环境空气中细颗粒物与臭氧等项目监测。2012 年 10 月, 国务院颁布《重点区域大气污染防治“十二五”规划》。2012 年 12 月, 京津冀、长三角和珠三角以及省会城市建立 $PM_{2.5}$ 监测网络并实时发布空气质量监测数据。2013 年 6 月国务院发布“大气污

染防治十条措施”并制定了在未来5年内针对空气质量改善投资1.7万亿人民币的计划。2013年9月，国务院出台《大气污染防治行动计划》，在40个城市实时监控PM_{2.5}数据，并计划采取综合措施，环保部则发布《京津冀及周边地区落实大气污染防治行动计划实施细则》，力图在2017年将京津冀地区PM_{2.5}浓度降低25%，并将北京市PM_{2.5}年均浓度控制在60μg/m³的水平。

然而，这一系列措施仍然难以抑制严峻的PM_{2.5}污染，并且不能满足公众对自身生存环境的迫切要求。例如，国家环保部出台在2030年达到国家空气质量二级标准的空气质量目标，京津冀重点城市70%的受访公众认为这一达标时间太过漫长，92%的受访居民认为应该在2020年以前达标（Greenpeace 2013b）。由于尚且缺乏对PM_{2.5}排放构成的部门分析，对“未来浓度趋势怎样”、“如何降低PM_{2.5}排放”以及“减多少才能达到空气质量标准”这样一些关键问题的回答仍然十分模糊，是当前解决PM_{2.5}污染的最严峻挑战。

需要注意的是，PM_{2.5}并非某一种化学类型的污染物，而是由多种污染物组成（参见附录1：PM_{2.5}背景知识）。相关研究报道大多仅关注PM_{2.5}的直接一次源排放，而对由前体物转化形成的细颗粒物的分析较为缺乏。本报告针对PM_{2.5}污染最为严重的京津冀地区，综合分析PM_{2.5}一次源和前体物的排放，量化各行业部门和能源类型对PM_{2.5}

的贡献，在此基础上基于通用多尺度空气质量模型（CMAQ）以及温室气体和大气污染物相互作用和协同效益模型（GAINS）对京津冀地区2010年至2030年PM_{2.5}浓度进行数值模拟。最后，根据部门排放量和控制措施的应用比例，提出分部门的PM_{2.5}减排政策建议。

本报告是国内外第一个完整包含来源分析、浓度模拟和减排政策建议的京津冀地区PM_{2.5}研究报告。本报告的发布不仅仅为了唤醒公众和社会对京津冀地区PM_{2.5}污染状况的关注，更直接作用于决策者和利益相关方，为切实可行的降低PM_{2.5}排放提供依据和支持。





2

主要研究方法

2 主要研究方法

本研究借助多个研究方法，我们在污染源排放清单的基础上，借助 CMAQ 空气质量模型和 GAINS 空气质量模型估计当前 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度，并评估各种情景下的浓度变化。具体研究方法见下图：



2.1 排放源清单建立方法

准确了解 $\text{PM}_{2.5}$ 排放源需要完善的排放源清单。本研究根据 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放结构特征，分部门行业和能源消费类型，构建包括 $\text{PM}_{2.5}$ 一次源以及 $\text{PM}_{2.5}$ 主要前体物（二氧化硫 SO_2 、氮氧化物 NO_x 、氨气 NH_3 、挥发性有机物 VOCs ）的排放源清单。

清单是基于 2010 年数据，采取自下而上的方法（即观测数据反演法）编制的。本研究中使用的是 2010 年的排放源清单，涵盖了全国 150 多个行业，根据《中国能源统计年鉴

2011》、《中国能源统计年鉴 2012》及环保部公开信息，京津冀地区的煤炭消费增速、油品消费增速、行业煤炭消费占比以及燃煤锅炉末端治理安装率并未发生大的改变；如：京津冀 2011 年煤炭消费增幅为 10%，油品消费增幅为 8%，燃煤电厂消费煤炭比例在 2010 年为 35%，2011 年为 36%，工业耗煤在过去两年维持在 22% 的水平，燃煤电厂脱硫脱硝安装率从 2010 年至 2012 年增长率约为 6% 和 10%。这说明尽管该地区的能源消费总量、燃料消费发生了改变，部分工业产能发生了改变，但根据排放源清单对燃料贡献和行业贡献的趋势分析依然有效。

源清单里涉及的 $PM_{2.5}$ 排放量的计算公式如下：

$$PM_{2.5} \text{ 排放量} = \sum_{j,k,m} [A_{j,k,m} \times EF_{j,k,m} \times X_{j,k,m} \times (1 - \eta_{j,m})]$$

j, k, m 分别代表行业类型 (j)、燃料类型 (k) 和污染控制技术类型 (m)

$\sum_{j,k,m}$ 表示根据燃料类型和控污技术水平对各类排放源所排 $PM_{2.5}$ 进行全行业加和

A 为某排放源的活动水平，按照煤的热当量计（标准煤）

EF 为排放系数，即某行业排放源单位活动水平（以煤当量计）的 $PM_{2.5}$ 排放量（千克 / 千焦耳）

X 代表某控污技术在某行业的分布率（%）

η 为控污技术去除污染物的效率（%），清单把每个行业的技术水平大致分成五个档次

2.2 基准排放情景设定

基准排放情景（即按照现有趋势发展）的设置是借用了国际应用系统分析研究所（International Institute for Applied Systems Analysis-IIASA）^①提供的“温室气体和大气污染物相互作用和协同效益模型（The Greenhouse Gas and Air Pollution Interactions and Synergies Model，以下简称 GAINS 模型）”中的内嵌情景，以每 5 年为间隔对京津冀地区 2010 年至 2030 年各污染物的排放量进行估算。

GAINS 内嵌的 4 种排放情景包括：

[1]

UNEP-United Nations Environment Programme，联合国环境署。
模型基于联合国对中国地区的能源发展预期。

[2]

IEA-International Energy Agency，国际能源署。
模型基于 IEA 世界能源展望中的中国地区能源发展预期。

[3]

Eclipse - Evaluating the Climate and Air Quality Impacts of Short-lived Pollutants:
短期污染物和空气质量综合评价模型。

[4]

TOP-Tokyo Ozone project。丰田臭氧项目模型。

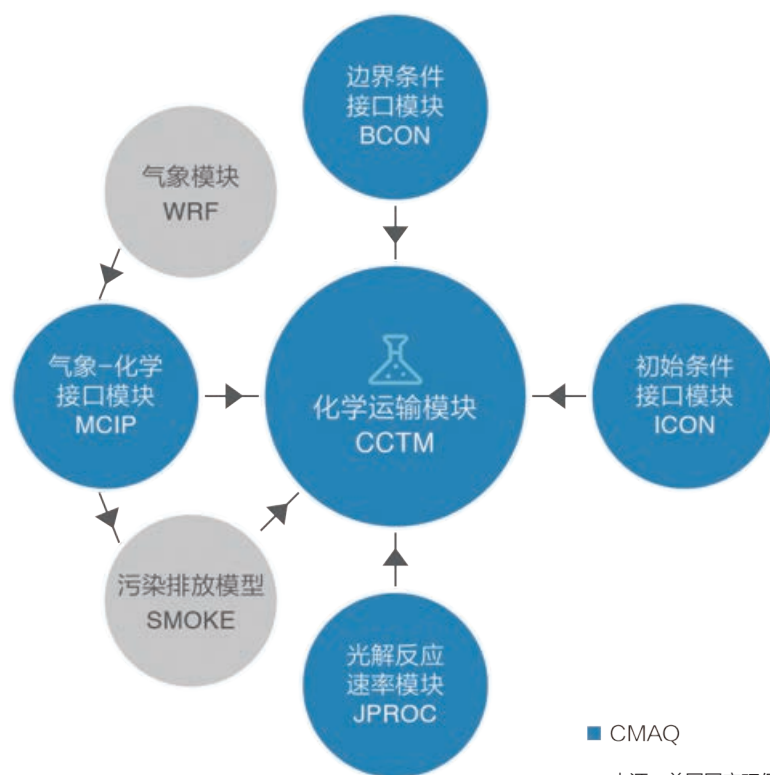
完整的情景假设参见 IIASA 的网站。

^① <http://www.iiasa.ac.at/>

2.3 CMAQ 空气质量模型

本报告中凡涉及到 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的计算（包括基准年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和煤炭减排情景分析）均是依靠 CMAQ 模拟完成的。CMAQ，即多尺度空气质量模型（Community Multi-scale Air Quality），广泛用于环境管理的相关决策中，最早由美国国家环保署于 1998 年 6 月发布，之后一直在不断发展和更新，本研究使用的版本为 V4.7.1，于 2010 年 6 月发布。

影响 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度的因素众多，CMAQ 模型将对流层^①大气作为一个整体，综合考虑了气象条件，地形和地表因素，以及污染物在排放、传输和扩散过程发生的物理和化学作用。CMAQ 模型由 5 个主要模块组成（见下图标注），其核心的模块为化学运输模块（CCTM），用以模拟大气污染物的传输过程，化学转化过程和气溶胶沉降过程等。



■ CMAQ

来源：美国国家环保署

<http://www.epa.gov/asmdner/Research/RIA/cmaq.html>

^①对流层，地球大气层中最靠近地面的一层，也是地球大气层里密度最高的一层。它蕴含了整个大气层约 75% 的质量，以及几乎所有的水蒸气及气溶胶。

本研究中 CMAQ 在模拟区域的选取及设置如下：垂直方向，从地面到对流层层顶不等份划分为 14 层（顶层气压为 100 百帕），离地面越近，其层数越密集；在水平网格设置上采用单向三层嵌套网格，最外层网格覆盖整个东亚，包括中国、朝鲜、韩国及日本等国，其空间分辨率为 $36\text{km} \times 36\text{km}$ ；第二层网格覆盖中国经济较发达的东部地区，空间分辨率亦提升为 $12\text{km} \times 12\text{km}$ ；第三层网格的空间分辨率最高（ $4\text{km} \times 4\text{km}$ ），覆盖了北京及其周边地区，即本报告的研究区域。外层粗网格为内部网格提供初始（ICON）及边

界（BCON）场，而最外层的边界场则来自全球化学传输模型 GEOS-Chem^① 的模拟结果。

CMAQ 的运转需要提供气象输入场，本研究采用 WRF（即天气研究和预报模式）对气象场进行模拟。为保证边界气象场的准确性，WRF 模拟区域比 CMAQ 模拟区域的水平各边界多 3 个网格；垂直方向分为 23 个 σ 层，层顶为 100 百帕。地形和地表类型数据采用 MODIS 土地利用数据。

2.4 控制措施的减排效果

本研究通过利用 GAINS 模型的分燃料类型和行业的详细 $\text{PM}_{2.5}$ 及其前体物的排放清单，分析了各种减排手段和措施对各污染物的减排量，并基于 GAINS 的模拟结果，模拟了政策情景下 $\text{PM}_{2.5}$ 大气浓度的变化，从而计算得到政策情景相对于基准情景的减排效果。政策情景以达到国家空气质量二级标准所要求的 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ 为目标，分析包括 $\text{PM}_{2.5}$ 一次排放源及其前体物减排所需要的政策措施。

本研究考虑的主要几类减排措施包括：

- 能源替代：用更清洁能源替代现有能源消费。例如，煤燃烧产生大量 SO_2 、 NO_x 等 $\text{PM}_{2.5}$ 前体物，在现有技术下，运用如天然气、风电、光伏等清洁能源替代燃煤。
- 提高能效：提高工业部门单位产品的能效水平，相关研究表明中国主要工业生产的能效水平比西方发达国家低 30% (IEA 2009)。
- 能源梯级利用：综合利用工业过程中的热能，提高热电联产设备的比例，将居民供暖设备由分散式供暖改为集中供暖。
- 采取更有效的末端治理技术，例如，使用布袋除尘器等高效的除尘措施。

① <http://geos-chem.org/>

- 改进生产技术方式，例如，在水泥生产中，新型干法水泥生产线替代立窑生产线。
- 采取更加严格的环保标准：例如，对所有机动车辆实行国家第五阶段甚至第六阶段排放标准，同时淘汰国家第二阶段排放标准及以下的机动车辆。
- 限制和淘汰高耗能产能：逐步在京津冀地区淘汰和关停高污染的水泥厂、钢铁厂等高耗能产能。

我们从上述几类减排措施中综合遴选 79 种具有进一步减排潜力的政策措施（见附录 3）。然后依照下述公式对各减排措施的减排潜力进行依次排放：

$$\text{减排潜力指数} = \sum \frac{\Delta E_i}{E_i}$$

i 一代表各类污染物，包括直接排放 PM_{2.5} 及其各类前体污染物如 SO₂、NO_x、NH₃、VOCs

E_i 一代表某污染物在基准情景下的总排放量

ΔE_i 一代表由于某特定减排措施导致污染物的排放减少量

从上述公式可见，减排潜力考察的是某特定减排措施对所有一次及二次前体物细颗粒物的综合减排能力。



③ 京津冀 PM_{2.5} 污染源 解析结果



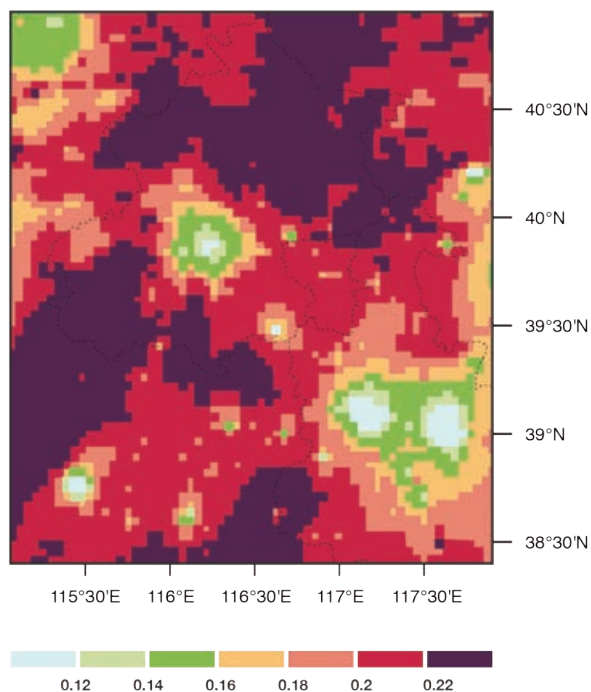
3 京津冀 PM_{2.5} 污染源解析结果

在此我们首先根据浓度模拟结果介绍京津冀地区 PM_{2.5} 的构成以及一次源和二次源对总浓度的贡献比例，然后根据源清单的统计结果，分行业和燃料类型从源头追溯京津冀三地的一次 PM_{2.5} 及其前体物的排放情况。

3.1 京津冀地区 PM_{2.5} 组分分析

CMAQ 的 PM_{2.5} 浓度模拟结果显示，2010 年北京地区一次源直接排放对 PM_{2.5} 浓度的贡献占 40%，而 PM_{2.5} 前体物排放对总浓度的贡献为 60%。在天津，这一比例为 47% 对 53%，河北地区该比例分别为 41% 和 59%。这

NO₃⁻



SO₄²⁻

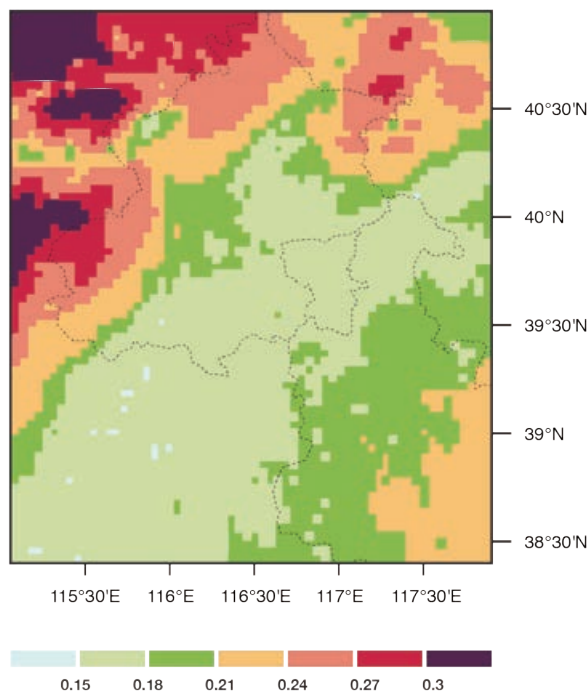


图 3-1 NO₃⁻（左）和 SO₄²⁻（右）质量浓度贡献比例（单位：浓度占比）

直接表明降低 $PM_{2.5}$ 的浓度需同时考虑控制 $PM_{2.5}$ 一次源和 $PM_{2.5}$ 前体物排放。

各地产业结构和自然环境差异造成 $PM_{2.5}$ 组分的显著区别。以京津冀地区 $PM_{2.5}$ 中的碳质气溶胶（一次源和二次源）和二次无机气溶胶（前体排放物）的主要组分为例：

碳质气溶胶包括碳黑^①（BC）和有机碳（OC）。模型研究表明，BC 作为一次源在 $PM_{2.5}$ 质量浓度中占比较低，最高介于 5~9%（附录 2）。BC 主要是化石燃料或生物质不完全燃烧所致，常被作为衡量机动车污染的一项指标（Huang et al. 2006）。北京城区的 BC 质量浓度在京津冀三区中最高，与北京地区具有全国最高的汽车保有量相关联。碳质气溶胶的另一组分—有机碳（OC）的质量浓度最高出现在河北，介于 20~22% 之间（见附录 2）。OC 既是一次污染物也是二次污染物，它的来源包括：一为直接排放的一次有机物（Primary Organic Aerosol, 简称 POA），主要为燃烧产生；二为直排后的挥发性有机物（VOCs）经化学转化后形成的二次有机气溶胶（Secondary Organic Aerosol, 简称 SOA）。

二次无机气溶胶主要由硫酸盐 SO_4^{2-} 、硝酸盐 NO_3^- 和铵盐 NH_4^+ 这三种无机离子（简称 SNA）组成，它们是由二氧化硫、氮氧化物和氨气转化而来（见附录 1），故为二次源。研究表明，硫酸盐最高占 $PM_{2.5}$ 质量浓度的 30~33%

（图 3-1 右），其次是硝酸盐，最高占 22~24%，铵盐最高占 15~16%。可见 SNA 是最重要的 $PM_{2.5}$ 组分，总共占其质量浓度的 50~70% 之间（附图 2）。

较之于硝酸铵（ NH_4NO_3 ），硫酸铵（ $(NH_4)_2SO_4$ ）较稳定，在多数情况下，氨气优先和二氧化硫生成硫酸铵（Damberg 2007），长期在大气中存留，并通过长距离运输影响其他地区，产生区域性污染（Zhang 2011）。虽然硝酸铵在大气中存留较短，但当温度较低、湿度较大等条件下，即便大气中二氧化硫浓度较低，氨气仍会和氮氧化物形成硝酸铵（Wang et al. 2006），短期内可能导致 $PM_{2.5}$ 的浓度不降反升^②（Wang et al. 2013）。因此降低 $PM_{2.5}$ 污染需要采取多种污染物的联合防控措施。

3.2 京津冀地区 $PM_{2.5}$ 的来源分析

根据我们的污染源排放清单估算，2010 年，京津冀地区共向大气排放了一次 $PM_{2.5}$ 及其二次源主要前体物一千多万吨，以地区计，河北是京津冀地区最主要的排放源。以行业计，水泥、钢铁、制砖等工业生产过程及居民、商业部门的小规模炉灶是京津冀地区一次 $PM_{2.5}$ 的主要排放源，共占该地区一次 $PM_{2.5}$ 颗粒物总排放的 80%，而燃煤发电部门是京津冀地区二氧化硫和氮氧化物的重要排放源，分别占其总排量的 69% 和 47%。以燃料种类计，煤炭是京津冀地区 $PM_{2.5}$ 重要排放来源，占一次 $PM_{2.5}$ 颗粒物 25% 的排放，对二氧化硫和氮氧化物总排放量的贡献分别为 82% 和 47%。

① 碳黑 (Black carbon, 简称 BC) 有时也叫黑碳，或元素 EC (Elementary Carbon)。

② 生成 1 份的硫酸铵需要 2 份的氨气和 1 份的二氧化硫。在有利硝酸铵生成的天气条件下，盈余（由于二氧化硫的减排）的 2 份氨气会和氮氧化物生成 2 份的硝酸铵。因为 2 份硝酸铵的分子重量要比 1 份的硫酸铵要高，致使 $PM_{2.5}$ 浓度暂时升高。

3.2.1 分地区贡献

依照排放源清单，2010 年京津冀地区共计排放了 156 万吨的一次 PM_{2.5} 颗粒物，其中北京市约 13 万吨，天津市约 14 万吨，河北省约 129 万吨；二氧化硫的排放总计约 347 万吨，其中北京市约 30 万吨，天津市约 51 万吨，河北省约 267 万吨；总计约 222 万吨的氮氧化物，其中北京市约

27 万吨，天津市约 29 万吨，河北省约 165 万吨；总计挥发性有机物约 192 万吨，其中北京市 33 万吨，天津市 29 万吨，河北省约 129 万吨；总计约 100 万吨的氨气，其中北京市 6 万吨，天津市 5 万吨，河北省约 89 万吨。

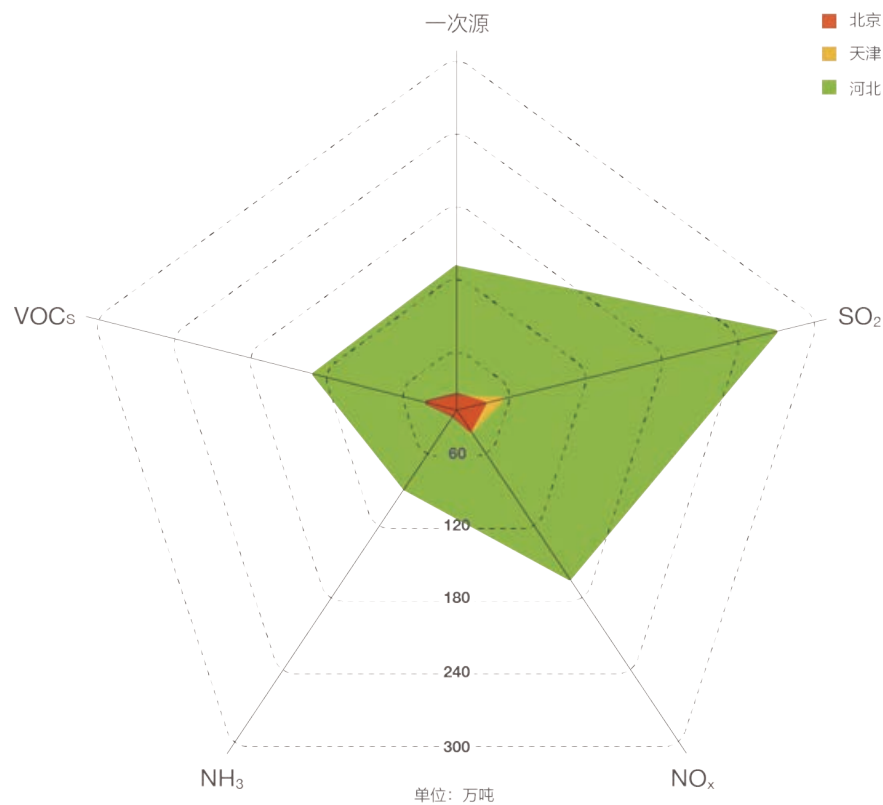


图 3-2 2010 年京津冀地区 PM_{2.5} 一次源及前体物排放总量

3.2.2 分行业贡献

从排放总量上，能源部门（燃煤发电）是京津冀地区最大的污染源，燃煤发电占京津冀地区一次 PM_{2.5} 颗粒物 9% 的排放，二氧化硫和氮氧化物京津冀总排量的 69% 和 47%。

包括钢铁、水泥、制砖等在内的工业生产过程是京津冀地区第二大污染源，共占该地区一次 PM_{2.5} 颗粒物总排放的 49%，二氧化硫和氮氧化物总排量的 12% 和 17%。居民和商业部门是京津冀地区第三大污染源，共占该地区一次 PM_{2.5} 颗粒物总排放的 32%，二氧化硫和氮氧化物总排量的 14% 和 6%，挥发性有机物总排放量的 25%。

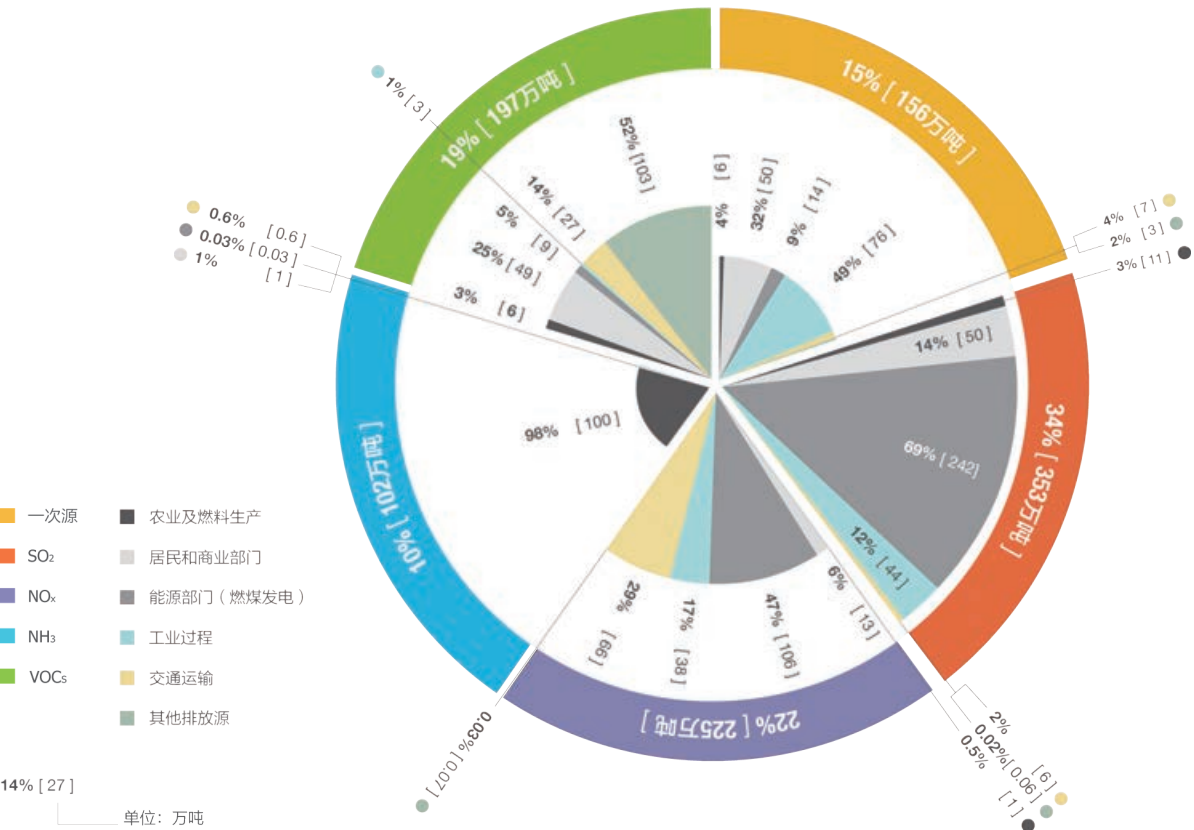


图 3-3 2010 年京津冀地区 PM_{2.5} 一次源及前体物分行业排放比例 (%) 及排放量 (万吨)

交通部门虽然释放较少的一次 PM_{2.5} 颗粒物、二氧化硫等特征污染物，但在京津冀地区的氮氧化物和挥发性有机物排放总量上的比例分别为 29% 和 14%，影响作用明显。

3.2.3 分燃料排放

煤炭是京津冀地区主导性的燃料污染来源，占京津冀地区一次 PM_{2.5} 颗粒物 25% 的排放，二氧化硫和氮氧化物京津冀总排量的 82% 和 47%。

非燃料排放（工业、农业生产过程等）占京津冀地区一次 PM_{2.5} 颗粒物总排放的 55%，二氧化硫和氮氧化物总排量的 13% 和 16%，氨气排放总量的 98%，挥发性有机物总排放量的 53%。油品在京津冀地区的一次 PM_{2.5} 颗粒物排放、氮氧化物和挥发性有机物排放总量上的比例分别为 4%，31% 和 18%。生物质燃料在京津冀地区的一次 PM_{2.5} 颗粒物和挥发性有机物排放总量上的比例分别为 15% 和 19%。

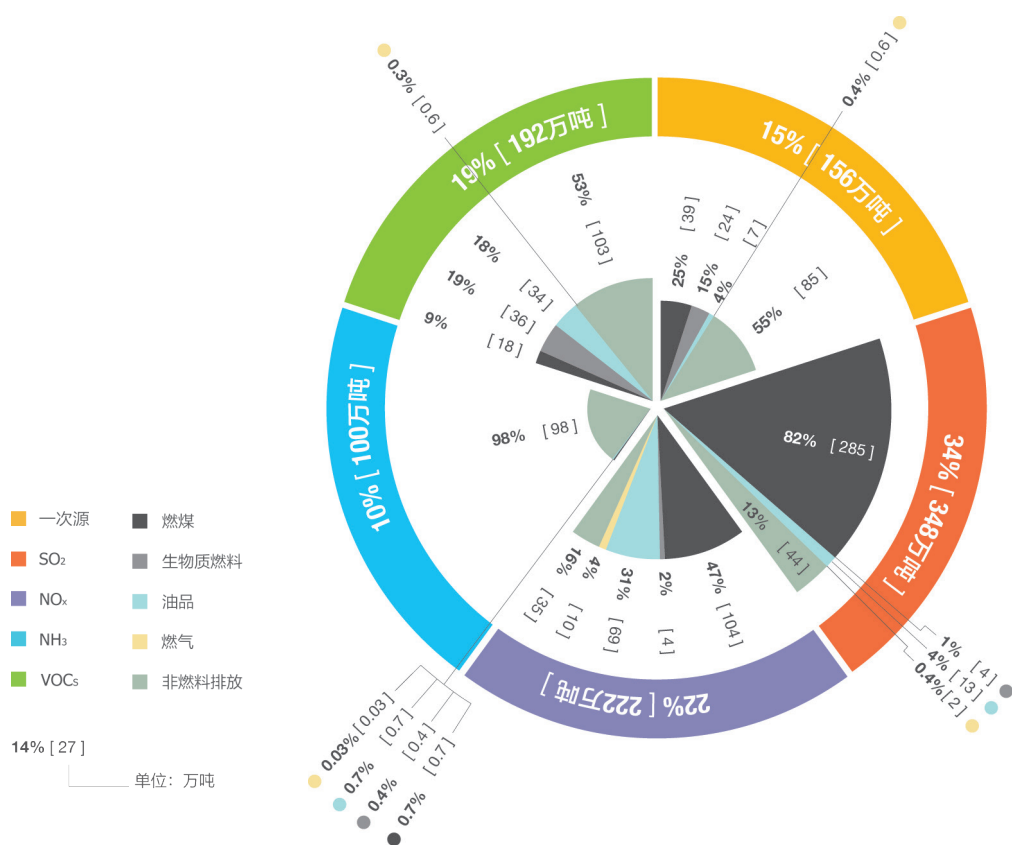


图 3-4 2010 年京津冀地区 PM_{2.5} 一次源及前体物分燃料排放比例 (%) 及排放量 (万吨)

3.3 北京地区 PM_{2.5} 的来源分析

研究综合评估北京地区 PM_{2.5} 化学组分、一次源直接排放、二次源前体物排放、分行业及分燃料种类的排放指出，煤炭是北京市 PM_{2.5} 污染最主要的来源，其次是交通消耗的油品。

在行业贡献中，能源部门（燃煤发电），交通运输，水泥和钢铁是北京市最主要的 PM_{2.5} 污染源。

3.3.1 污染物总量

研究显示，北京 2010 年全年 PM_{2.5} 一次源直接排放量为 13 万吨，二次源的前体物排放量依次为：二氧化硫为 30 万吨，氮氧化物为 27 万吨，氨气 6 万吨，挥发性有机物最多 33 万吨。

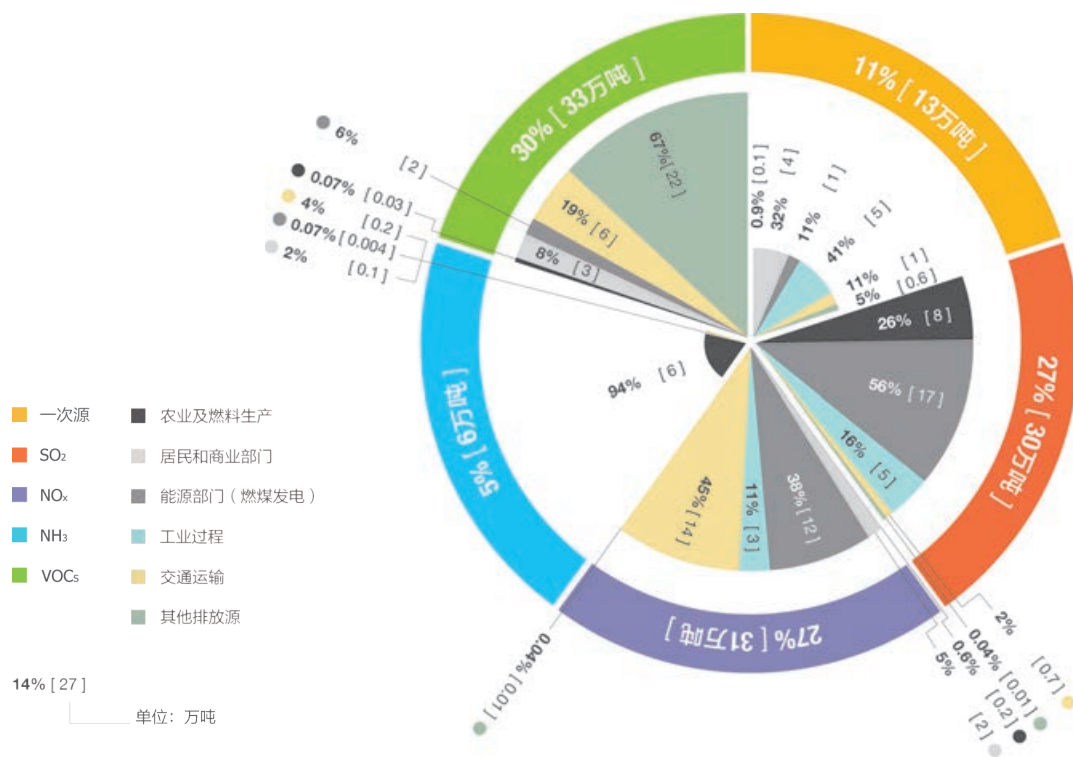


图 3-5 2010 年北京 PM_{2.5} 一次源及前体物排放行业分布



图 3-6 北京工业过程分解

3.3.2 分行业贡献

从行业分类看,能源部门(燃煤发电)是北京市PM_{2.5}最主要的贡献源。紧随其后的是交通运输部门。

北京市一次PM_{2.5}的首要来源是工业过程(水泥生产、炼焦、金属加工冶炼等),贡献占比达到了41%,其次是居民和商业部门(主要为居民和商业用的功率在50MW以下的小型锅炉),贡献占比为32%。

虽然能源部门(燃煤发电)对一次PM_{2.5}的贡献仅为11%,但它却是重要的PM_{2.5}二次源前体物的排放部门:北京56%二氧化硫和38%的氮氧化物来自能源部门(燃煤发电)(图3-8)。交通运输的燃油是北京市氮氧化物最大的来源,占到了45%。

北京氨气的排放源较单一,主要来自农业畜禽养殖和化肥生产。相比之下,VOCs的排放源则较多样,包括交通运输的油品挥发、居民和商业使用的小型炼焦炉和其他挥发性有机物生产的工业过程等。

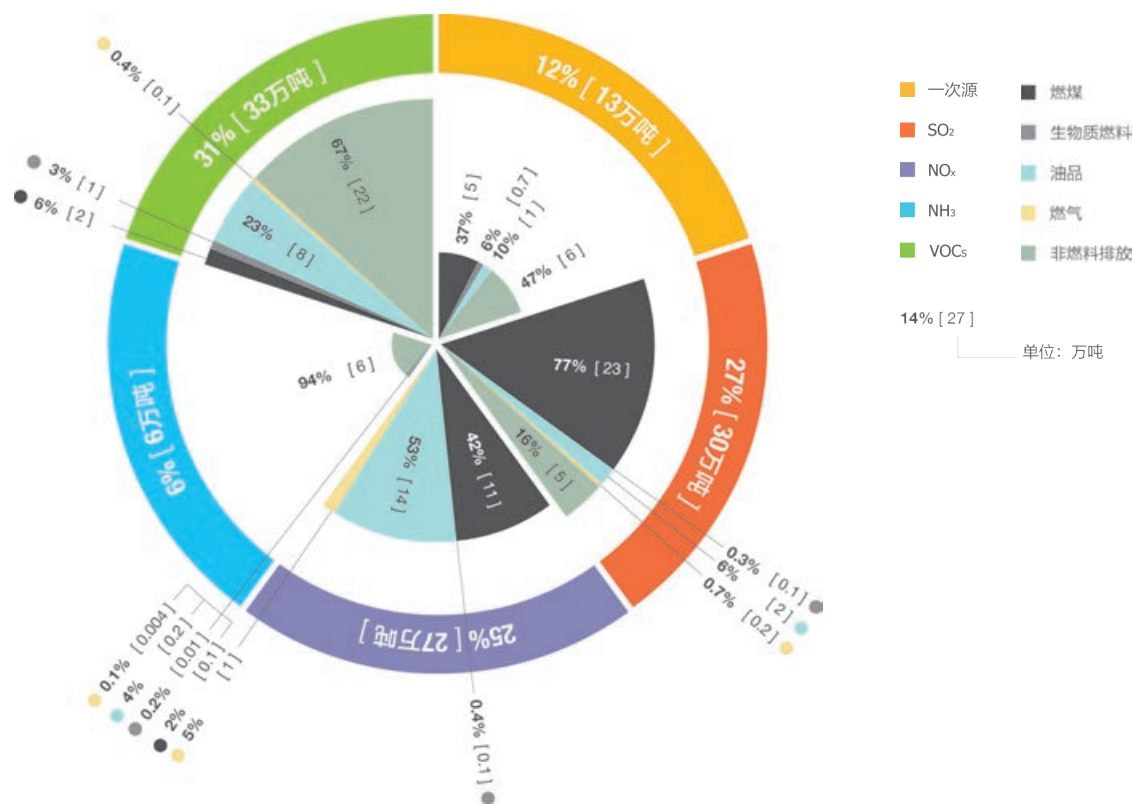


图 3-7 2010 年北京 PM_{2.5} 一次源及其前体物排放的燃料类型分布

3.3.3 分燃料排放

从燃料类型的贡献比来看，燃煤是北京市 PM_{2.5} 最大的来源。在 PM_{2.5} 一次排放源中，非燃料（主要为水泥生产、玻璃生产、炼钢、制砖等过程产生的各类尘）及燃煤排放占主导，分别为 47% 和 37%。从二氧化硫的排放情况看，77% 的二氧化硫是燃煤产生的（主要为火力发电燃煤，也包括各类工业和民用锅炉燃煤）；油品和燃煤是氮氧化物最

主要的来源，分别占比为 53% 和 42%。氨气和挥发性有机物的形成机制和二氧化硫及氮氧化物不同，他们不是因为燃料的燃烧导致（即非燃料），而是在生产和生活过程中由于泄漏、挥发和溢散等造成。

3.4 天津地区 PM_{2.5} 的来源分析

研究综合评估天津地区 PM_{2.5} 化学组分，一次源直接排放量，二次源前体物排放量，分行业及分燃料种类的排放指出，与北京市不同，煤炭在天津市 PM_{2.5} 污染来源中主导位置明显。在行业贡献中，煤炭消耗量最高的能源部门（燃煤发电）是天津市最主要的 PM_{2.5} 污染源。根据中国能源及电力年鉴，2010 年天津共建有 29 座燃煤火电站，总煤耗为 2500 万吨，是天津市总煤炭使用量的 52%。

3.4.1 污染物总量

清单表明，天津市 2010 年全年 PM_{2.5} 一次源直接排放量为 14 万吨，二次源的前体物排放量依次为：二氧化硫为 51 万吨，氮氧化物 30 万吨，氨气 5 万吨，挥发性有机物 29 万吨。

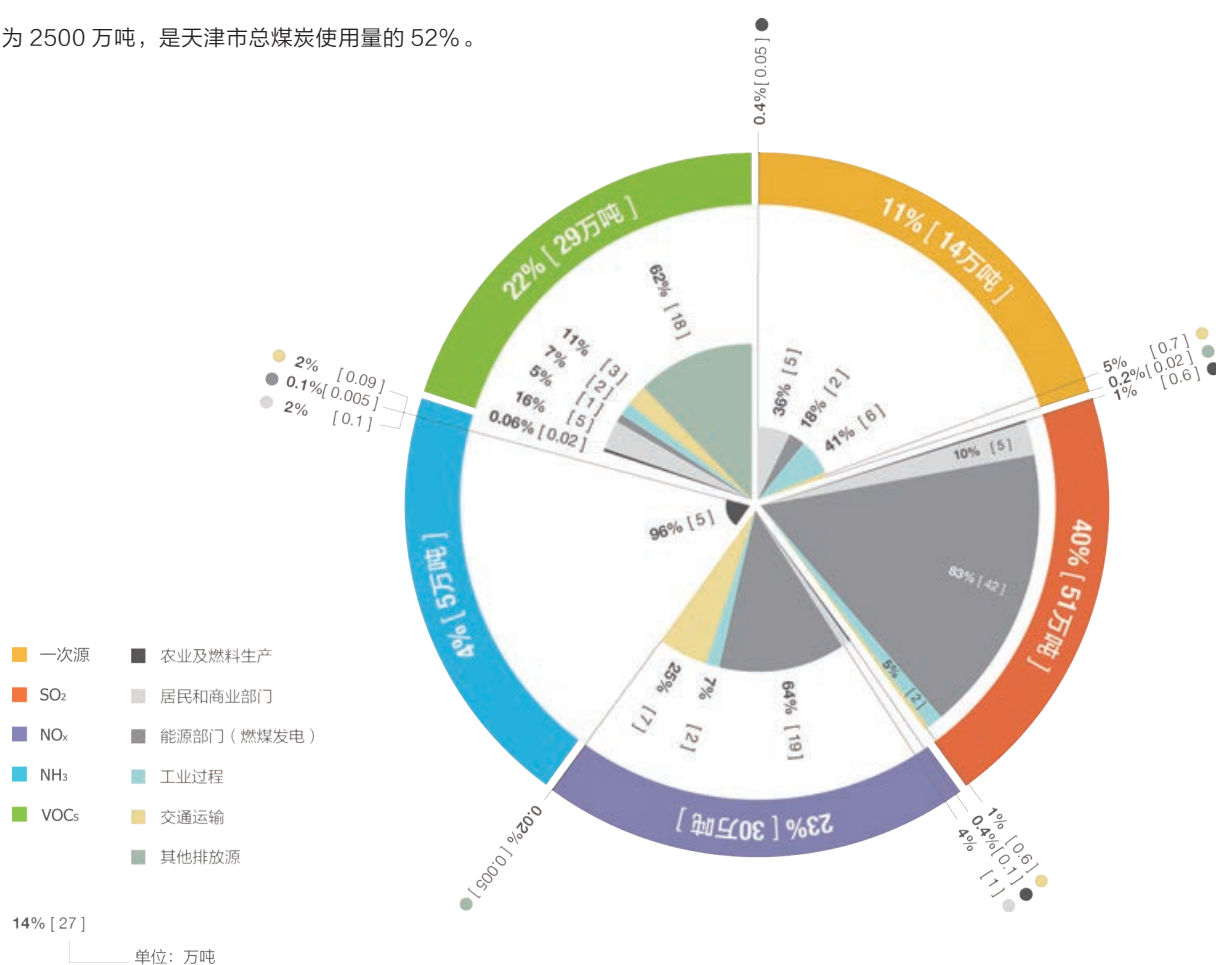


图 3-8 2010 年天津 PM_{2.5} 一次源及其前体物排放的行业分布

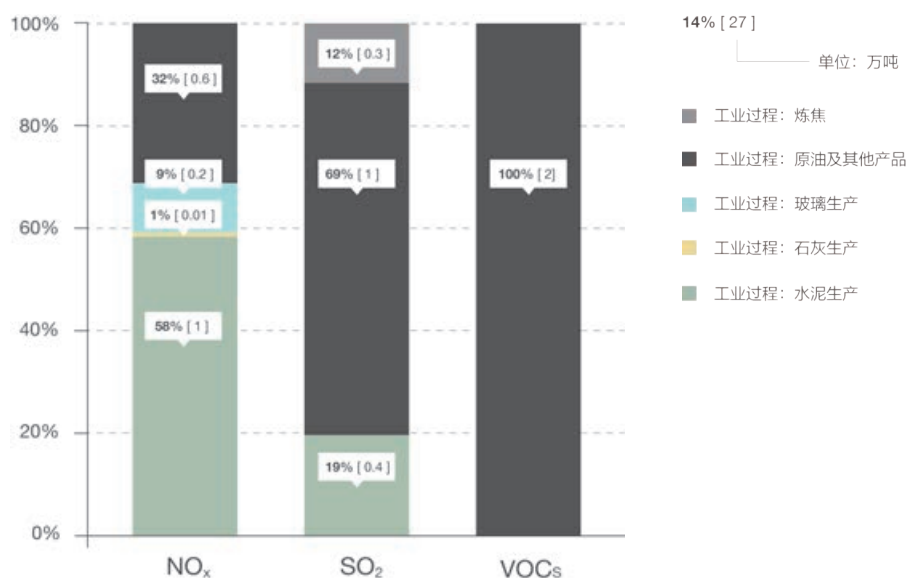


图 3-9 天津工业过程分解

3.4.2 分行业贡献

能源部门（燃煤发电）是天津市最大的 PM_{2.5} 污染源。在 2010 年，能源部门（燃煤发电）排放占天津市二氧化硫排放的 83%，氮氧化物排放的 64%，排放量在这两种最重要的前体物排放中均占第一。而在北京，交通运输部门是氮氧化物最主要的排放源。

对天津地区的工业过程进行拆分，我们发现，天津市油品、水泥和钢铁是二次源前体物的主要来源（图 3-9）。

3.4.3 分燃料贡献

从燃料类型看，煤炭是天津市二氧化硫及氮氧化物的主要来源，占了二氧化硫排放总量的 91% 和氮氧化物排放总量的 61%（图 3-10）。

天津的氨气排放构成和北京类似，但其生物质燃料（如农村秸秆的燃烧）排放的各种挥发性有机物比北京要高出 13 个百分点。《2010 年中国城市化率调查报告》显示北京的城市化率比天津高约 18%。

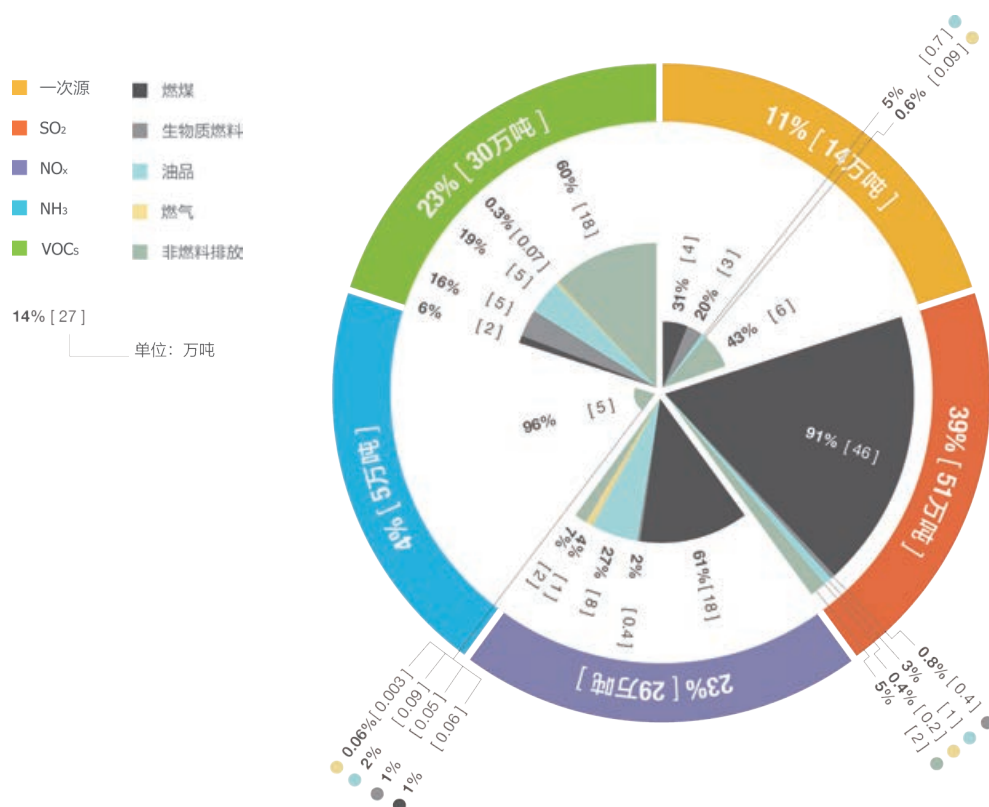


图 3-10 2010 年天津 PM_{2.5} 一次源及其前体物排放的燃料类型分布

3.5 河北地区 PM_{2.5} 的来源分析

研究综合评估河北地区 PM_{2.5} 化学组分，一次源直接排放量，二次源前体物排放量，分行业及分燃料种类的排放指出，煤炭在河北省 PM_{2.5} 污染来源中主导位置明显。在行业贡献中，能源部门（燃煤发电）、工业生产和居民及商业部门是河北省前三大 PM_{2.5} 污染来源。

3.5.1 污染物总量

河北省 2010 年一次 PM_{2.5} 及各前体物排放量排序如下：二氧化硫排放量最大，为 270 万吨，其次为氮氧化物 170 万吨，挥发性有机物 140 万吨，一次细颗粒物 130 万吨，氨气最少为 90 万吨。累计上述各 PM_{2.5} 污染物，清单表明河北省的总排放量是天津的 6 倍，北京的 7 倍。

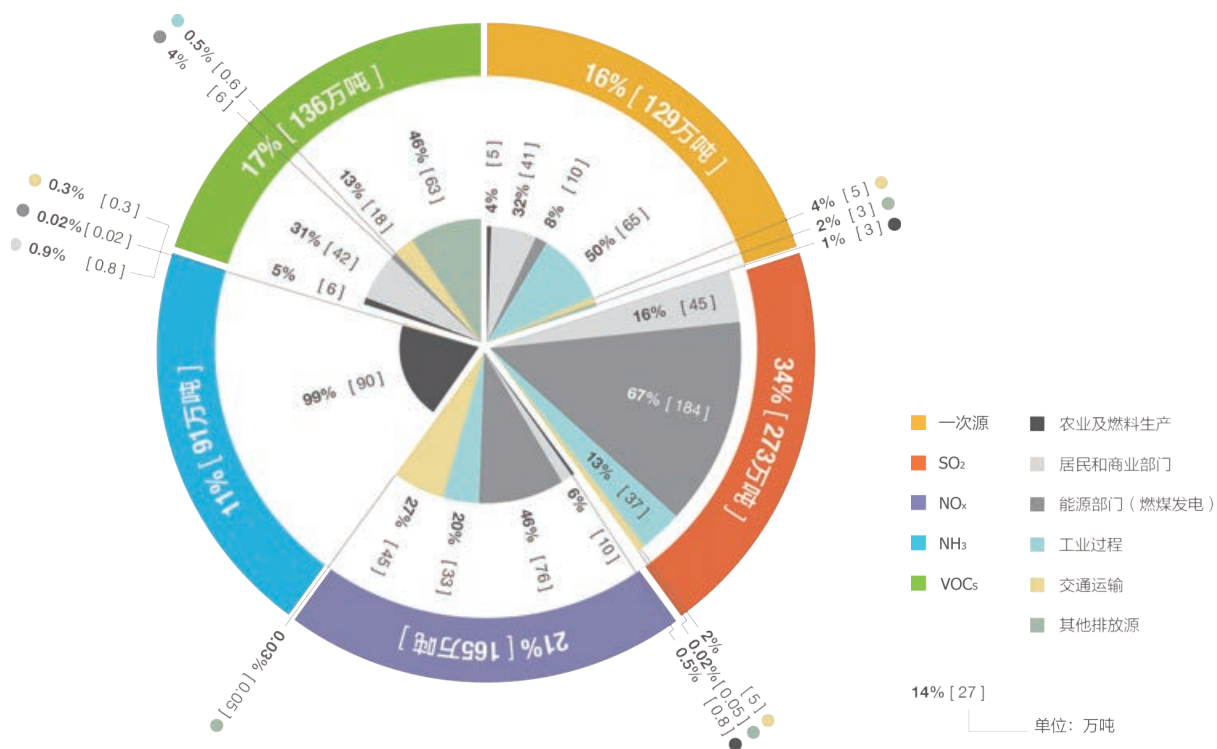


图 3-11 2010 年河北 PM_{2.5} 一次源及其前体物排放的行业分布

3.5.2 分行业贡献

能源部门（燃煤发电）是河北地区最大的 PM_{2.5} 一次源及前体物排放部门，共计排放了二氧化硫和氮氧化物总量的 67% 和 46%。中国电力协会的统计数据表明，2011 年河北境内建有燃煤发电站 153 座，占京津冀地区火力发电总装机容量的 73%。火力发电用煤虽是二氧化硫排放的主力军，但居民和商业部门的锅炉燃煤也占了 16% 的份额。

河北工业过程（如水泥生产、石灰生产、炼焦和制砖等）对一次细颗粒物及二次源的主要前体物的贡献率要比北京和天津高：以氮氧化物为例，河北工业过程的氮氧化物排放量和交通运输部门贡献相当，占总排放量约 20%，这一比例比北京和天津分别高 9% 和 13%；在一次源排放中，工业过程是河北省一次细颗粒物最重要的来源，共占一次源排放总量的 50%。

对河北省工业过程的 $\text{PM}_{2.5}$ 排放整理我们发现，钢铁是河北省最大的工业生产 $\text{PM}_{2.5}$ 一次、二次源排放源，其次是水泥生产。

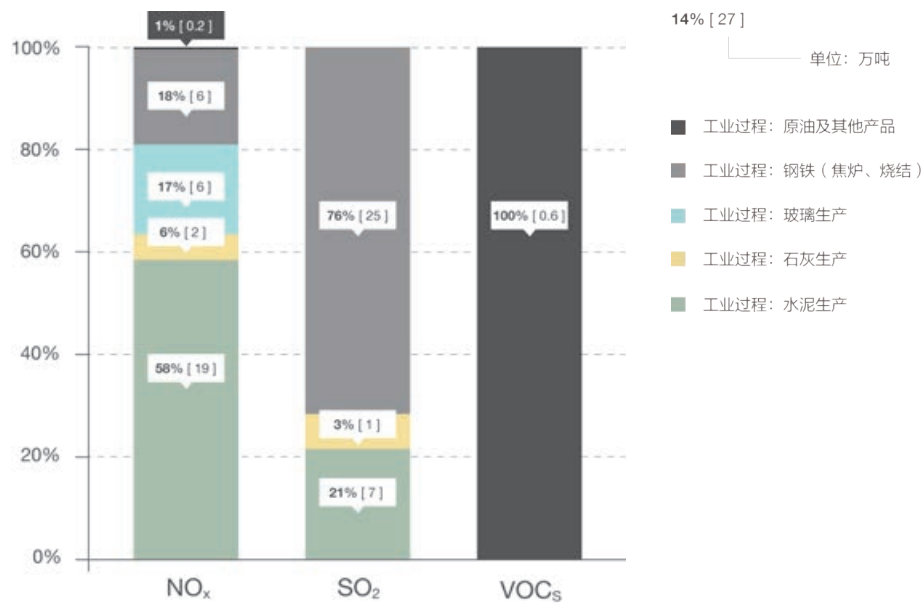


图 3-12 河北的工业过程分解

3.5.3 分燃料贡献

煤炭在河北省的污染来源中占首要位置，类似于京津两市，燃煤也是河北的首要二氧化硫排放源，占 81%。在一次细颗粒物及二次氮氧化物排放中，燃煤也分别贡献了 24% 及 45%。

河北挥发性有机物的排放，有 24% 来自燃烧生物质燃料（图 3-18），如农业残留物、沼气、薪材等。这跟河北的农业占经济的比重较天津和北京要高有关。

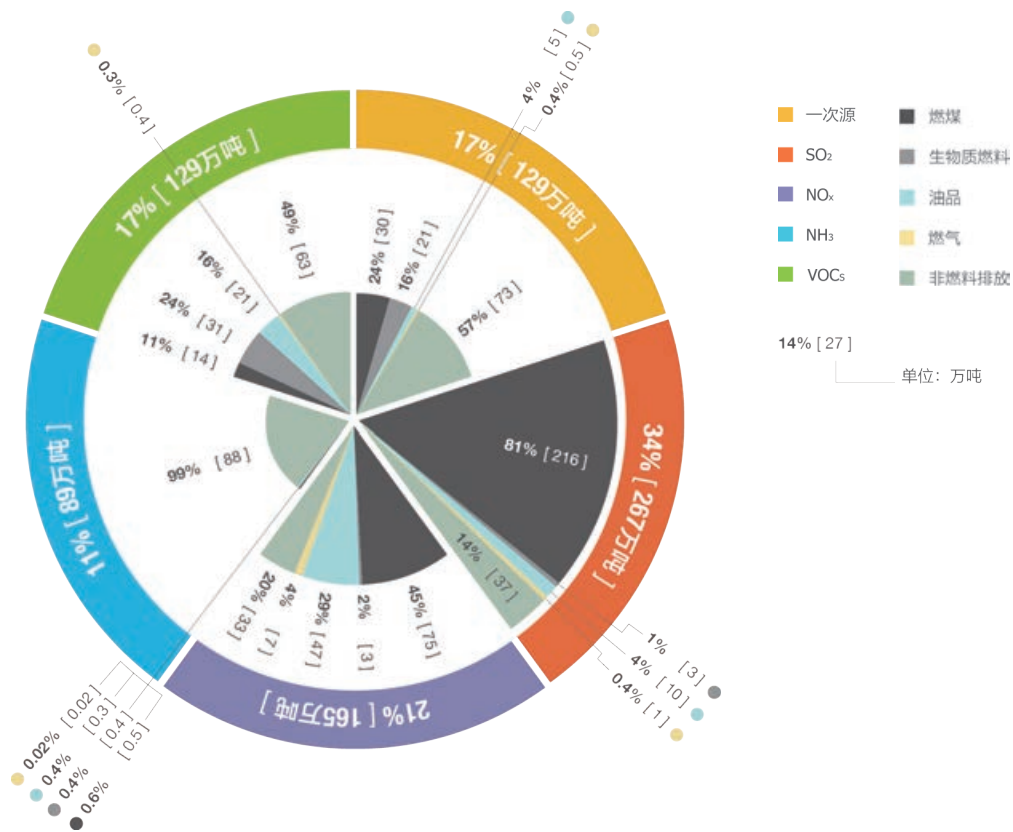


图 3-13 2010 年河北 PM_{2.5} 一次源及其前体物排放的燃料类型分布





4

基准情景 PM_{2.5} 浓度 趋势预测

4 基准情景 PM_{2.5} 浓度趋势预测

基准情景 (Business as usual scenario) 是指按照现有趋势发展, 不施加进一步干预的预期情况, 对细颗粒物的未来排放情况做趋势外推。本章节对当前细颗粒物浓度进行了模拟, 并预测不采取额外减排措施的基准情景下未来 20 年的浓度变化趋势。

4.1 当前 PM_{2.5} 浓度评估

PM_{2.5} 实际浓度具有很强的地域性和时效性, 在不同的时间和地点其浓度值会发生明显变化。本报告选用细颗粒物浓度为年平均浓度。对于京津冀地区的年均细颗粒物浓度值, 目前尚无公开的官方统计数据, 仅有一些估算方法。报告对当前细颗粒物浓度的评估是比较模型输出结果和实测值的基础上综合得出的。

细颗粒物浓度的获得, 常见的方法有下述几种:

- 根据实测的粗颗粒物浓度推导细颗粒物浓度, 并假设两者存在着固定的转换率。表 4-1 中环保部估算的细颗粒物浓度是基于 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的质量浓度比为 0.65 的假设得出的。此法虽然简单, 但有较高的不可确定性 (Brauer et al. 2012)。
- 仪器实测值。此法能准确地测算测试点的 PM_{2.5} 浓度, 但是监测点分布通常比较有限, 不能覆盖所有评估范围。

- 大气模型模拟法, 包括本研究采纳的 CMAQ 模型和 GAINS 等空气质量模型。模拟结果受多种因素影响, 跟实测值相比会有一定误差。
- 根据美国国家航空航天局 (NASA) 发布的卫星图^① 测量出气溶胶光学厚度 (Aerosol Optical Depth), 进而得出地表 PM_{2.5} 的浓度值。公开的最新卫星图仅提供 2001-2006 年的 PM_{2.5} 多年平均值。

^① 参见 <http://www.nasa.gov/topics/earth/features/health-sapping.html>

表 4-1 环保部公布的 2010 年粗颗粒物浓度及估算的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	粗颗粒物浓度	$\text{PM}_{2.5}$ 浓度估算
北京	124	80.6
天津	105	68.25
河北石家庄	105	68.25

本报告综合上述四种办法，比较空气质量模型的模拟值和实测值的大小，并根据相关文献得出如下京津冀地区浓度加权平均值^②和市区 ($20\text{km} \times 20\text{km}$) 浓度平均值：

表 4-2 京津冀各区 2010 年 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度

	$\text{PM}_{2.5}$ 浓度 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (人口加权平均值)	数据来源	$\text{PM}_{2.5}$ 浓度 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (市区 20 公里内平均)	数据来源
北京	73.7	Bauser et al (2012)	89.2	北京环境监测站和美国驻华使馆实测值
天津	76.0	本研究 CMAQ 模拟	91.7	CMAQ 对天津市区的模拟结果
河北	80.1	本研究 CMAQ 模拟	112.2	CMAQ 对石家庄市区的模拟结果

②人口加权平均值是各网格内根据卫星数据或模型模拟得出的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度乘以该网格内居民占全省 / 市人口总数的百分比，即计算所有网格区域的大气污染暴露浓度的人口加权平均值后便得到人口加权大气污染暴露水平。

上表中，天津和河北的人口加权平均值和市区平均值来自本研究 CMAQ 空气质量模型输出结果。和实测值相比，由空气质量模型模拟出的北京平均浓度存在偏高 (GAINS) 或偏低 (CMAQ) 的情况。基于此，对于北京的人口加权平均值，我们采纳了 Bauser 等为 2010 全球疾病负担项目 (the Global Burden of Disease 2010 project) 所做的评议成果。北京市市区的浓度平均值则借鉴了北京市环境监测站的发布数据和美国驻华使馆的监测值。

4.2 基准情景下未来二十年浓度变化趋势

借助国际应用系统分析研究所 (IIASA) 提供的 GAINS 模型，本研究对基准情景下京津冀地区的细颗粒物浓度在 2010—2030 年间的走势进行了预测。

预测细颗粒物浓度，需要对未来的经济发展走势、人口增长、能源需求及其供给情况等关键参数做出合理的假设。GAINS 模型的相关假设是采纳了 4 种国际同行的评议研究成果 (联合国环境署 -UNEP，国际能源署 -IEA，短期污染物和空气质量综合评价模型 -ECLIPSE，丰田研究 -TOP)。我们平均上述四种基准情景的输出结果，得出了基准情景下京津冀地区 2010—2030 年细颗粒物浓度的平均走势 (见图 4-1)：

图 4-1 显示，若政府不采取进一步干预措施，继续 2010 年的发展态势， $PM_{2.5}$ 浓度会呈逐渐下降趋势；如，北京 2030 年 $PM_{2.5}$ 平均浓度将比 2010 年浓度降低 10%，天津降 13%，河北降 11%。这一下降趋势是由于产业发展过程中第三产业比重的自然增加，国家能源使用规划中新能源所占比重的增长，以及五年计划中关停、淘汰落后产能的预期。

显然，仅靠基准情景下的下降趋势既不能在 2017 年实现浓度降低 25% 的目标，在未来 20 年内也无望实现细颗粒物浓度达 $35\mu g/m^3$ 的国家二级标准。我们必须采取进一步的积极干预措施。在本研究接近结题时，国务院《大气污染防治行动计划》出台。这比起基准情景的假设，已经迈出了一大步。

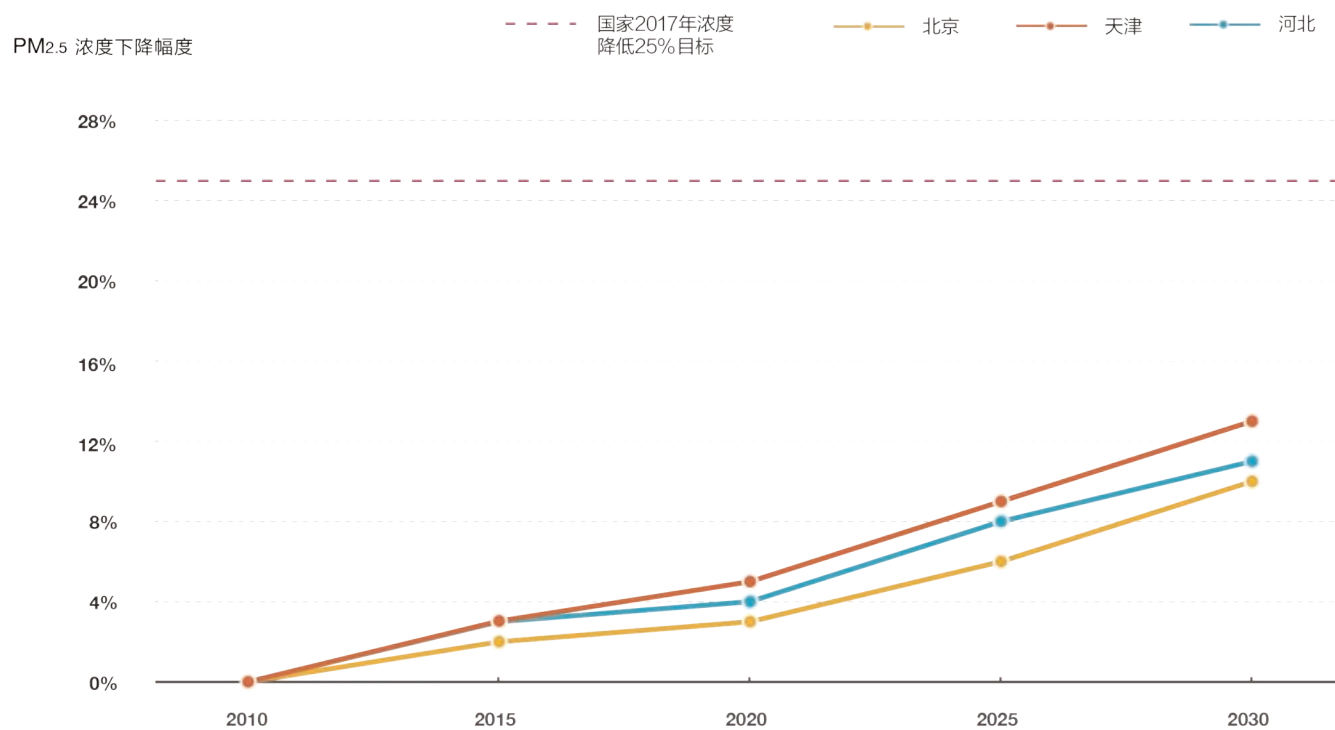


图 4-1 基准情景下京津冀地区 2010—2030 年间 PM_{2.5} 浓度变化趋势



The background image shows a hazy industrial landscape. In the foreground, a person wearing an orange safety vest stands on a dark, muddy surface. Behind them is a large pile of grey gravel. In the distance, several industrial structures are visible, including tall smokestacks and a large building with a complex roof. The sky is overcast and grey.

5 京津冀地区 PM_{2.5} 浓度达标应对策略

5

京津冀地区 PM_{2.5} 浓度达标应对策略

京津冀地区是中国大气污染最严重的区域，该地区的大气污染治理和 PM_{2.5} 浓度的控制也成为各级政府部门主要工作议程。2013 年 9 月，国务院颁布了国家《大气污染防治行动计划》（国发〔2013〕37 号），提出到 2017 年京津冀地区 PM_{2.5} 浓度下降 25%；其中北京市细颗粒物年均浓度控制在 60μg/m³ 左右。依据《大气污染防治行动计划》，环保部等六部门随后发布了《京津冀及周边地区落实大气污染防治行动计划实施细则》（环发〔2013〕104 号），首次提出实行煤炭消费总量控制，其中北京市净削减原煤 1300 万吨，天津市净削减原煤 1000 万吨，河北省净削减原煤 4000 万吨。此外，北京市、天津市和河北省政府也分别制定了《北京市 2013-2017 年清洁空气行动计划》、《天津市清新空气行动方案》和《河北省大气污染防治行动计划实施方案》。

现有的政策提出到 2017 年 PM_{2.5} 浓度比 2012 年下降 25%，这个目标离国家空气质量二级标准（35μg/m³）仍有一段距离，与公众期盼也有较大差距，相应的措施也难以控制严峻的 PM_{2.5} 污染。最新的研究显示（Liu et al. 2013），采取更加积极的综合措施可使北京市 PM_{2.5} 直接排在 2020 年降低一半以上。

因此，本研究提出一系列措施以期在未来十年内实现 PM_{2.5} 降到 35μg/m³。基于一次源及其前体物的排放清单，对应《大气污染防治行动计划》的时间表，根据我们的模

型显示，京津冀地区在 2022 年间实现 PM_{2.5} 浓度降低至 35μg/m³，需要将 PM_{2.5} 排放总量在 2017 年削减 50%，在 2022 年实现需削减 80% 的 PM_{2.5} 直接排放、60% 的 SO₂ 排放、75% 的 NO_x 排放、85% 的 NH₃ 排放和 90% 的各种 VOC 排放。

基础措施选择：

在 PM_{2.5} 减排手段的选取上，我们按照排放清单的部门分类，综合国内外相关研究（Liu et al. 2013），从民用、交通、工业、火力发电等主要部门中遴选了 79 种具有进一步减排潜力的政策措施（见附录 3）。针对北京，从 79 种政策措施中筛选了 15 种重点减排措施，并初步考察了北京采取各项措施所能达到的减排效果。具体的减排措施和减排比例见图 5-1。

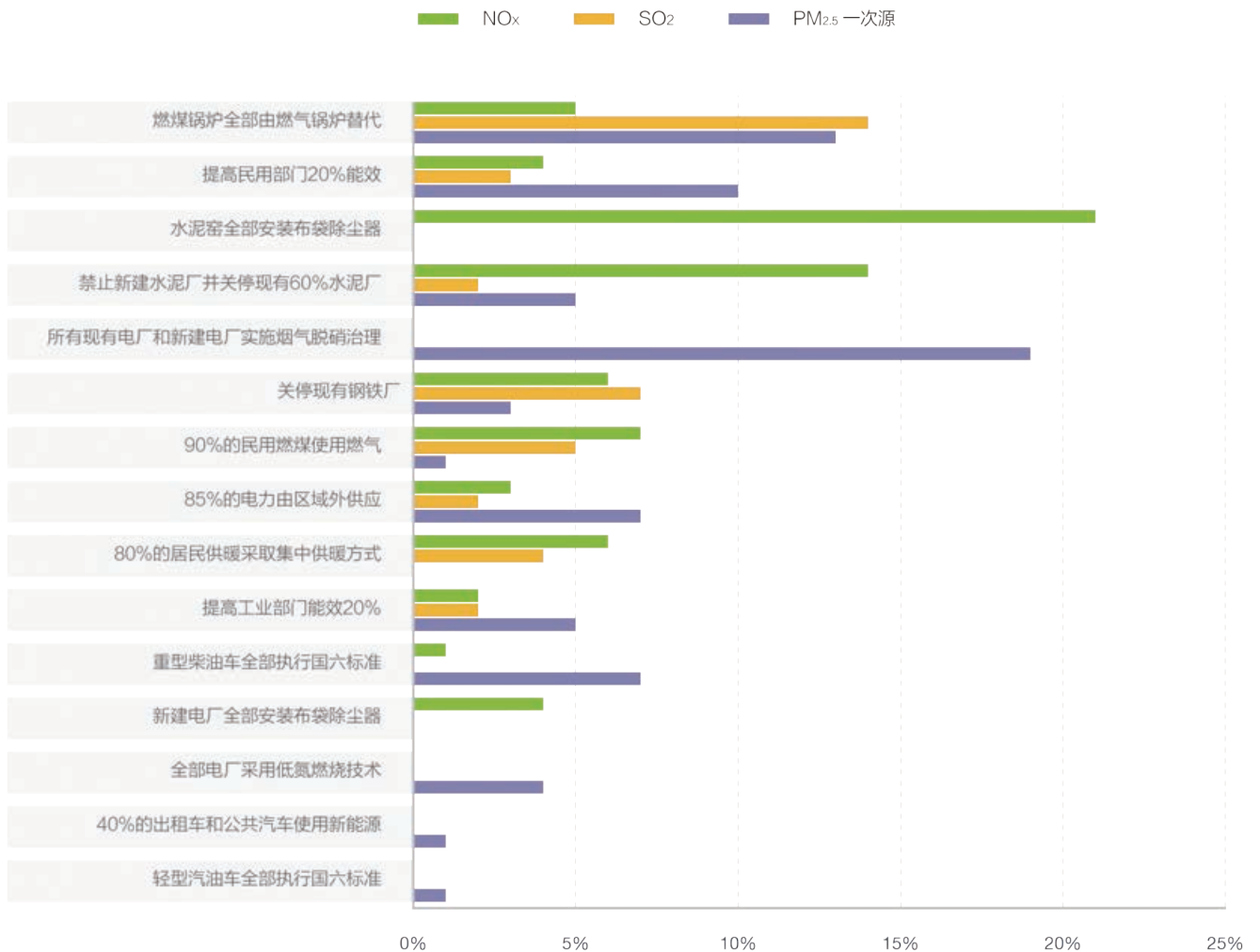


图 5-1 北京十五种最有潜力减排措施的一次 PM_{2.5}、SO₂ 和 NO_x 减排比例（相当于 2010 年排放总量）
（单位：百分比）（Liu et al.2013）

这些措施虽然基于北京，但我们认为其对于京津冀地区进行 $PM_{2.5}$ 污染物减排也具有一定的指导意义。北京地区的技术水平要比京津冀地区的平均水平先进一些，在北京地区可提升的污染物去除技术以及节能减排技术，在京津冀地区进行普遍应用的话，会有更高的减排潜力。当然因为各地污染构成的不同，各项措施的减排效力会有差异，具体实现也应作出相应调整。例如，电力由区域外供应这一项，实质是大幅削减本地火电；对于北京来说，实际的选择是往外走、寻求

电力输送，但对于河北来说，这一项也可以通过提高自身可再生能源在电力供应中的比例来实现。关停钢铁厂这一条对于河北的实现难度与北京的也明显不同。

此次研究虽然无法做到定量给出减排措施在整个区域尺度的效果比例，但比起之前的研究成果，基于排放源的定量分析，我们可以在前人提出的基础措施之上，更加有针对性的指出减排重点、提出建议，做到对症下药。

根据本研究结果显示，以煤炭为主的能源使用是京津冀地区 $PM_{2.5}$ 污染的主导性来源，结合上述的 79 项政策措施，尤其是 15 项重点减排措施，本研究认为对京津冀地区的 $PM_{2.5}$ 治理应围绕在煤炭消费控制和煤炭使用污染治理上。具体的建议如下：

如果要在十年内达到或接近国家空气质量二级标准（ $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ ），京津冀地区需要在 4 个方面施加强力措施：

[1] 在整个区域大幅度限制燃煤使用，尤其是电力行业煤炭使用，不再新建燃煤发电厂，最大程度发掘区域及周边可再生能源潜力，用可再生能源发电替代燃煤发电。

[2] 关停、整治水泥厂、炼钢厂等高污染高能耗行业，大力推广燃气锅炉替代燃煤锅炉。

[3] 全面改造民用和小规模商业炉灶，使民用燃料由燃煤向燃气转化，禁止农业废弃物焚烧。

[4] 进一步提升油品质量和汽车排放标准。

北京

基于北京市 PM_{2.5} 排放特点：工业过程为一次源 PM_{2.5} 的主要来源，能源和交通运输部门是主要的二次源前体物来源，就行业而言应从这三行业重点实施减排；燃煤，油品和非燃料排放（工业生产过程排放）是二氧化硫、氮氧化物、挥发性有机物的主要来源，减排应从大幅度减少燃煤消耗，提升油品质量和汽车排放标准，同时减少工业 VOCs 排放入手。

到 2022 年：

- 在关停北京市市内燃煤电厂的基础上，进一步加快提高可再生能源电力在北京市电力消费总量中的比例，提高北京市分布式太阳能推广力度和使用比例，城市外用电比例应提高从周边区域引进风电等可再生能源电力；
- 关停现有的全部钢铁厂和部分水泥厂，对现有的水泥窑安装布袋除尘器，禁止新建水泥厂；
- 轻型汽油车和重型柴油车全部实行国六标准，将新能源汽车和出租车的比例提高到 40% 以上；
- 加快电力部门的末端治理，所有火电实施烟气脱硫脱硝治理，采用低氮燃烧技术，安装布袋除尘器；
- 减少工业生产过程的挥发性有机物排放。

天津

基于天津市 PM_{2.5} 排放特点：分行业贡献而言，能源部门（燃煤发电）是 PM_{2.5} 排放的最大工业排放源，电力部门减排最为关键；分燃料类型而言燃煤和非燃料的排放（工业生产过程排放）是主要来源，减排应从大幅度减少燃煤消耗，减少油品生产过程中二次源 PM_{2.5} 的排放入手。

到 2022 年：

- 提高天津市风电、分布式太阳能推广力度和使用比例，大幅度降低煤炭在能源消费中的比例；
- 加大油品及相关产品生产过程的污染治理，完成脱硫改造，减少挥发性有机物的排放；
- 关停部分水泥厂、钢铁厂，对现有的水泥窑安装布袋除尘器，禁止新建水泥厂和钢铁厂；
- 加快电力部门的治理，所有现有电厂实施烟气脱硫脱硝治理，采用低氮燃烧技术，安装布袋除尘器，并在加强末端治理的基础上，进一步关停部分现有燃煤电厂。

河北

基于河北省 PM_{2.5} 排放特点：能源部门（燃煤发电）是 PM_{2.5} 的最大工业排放源，工业过程为一次源 PM_{2.5} 的主要来源，居民和商业部门也贡献较大，就行业而言应从这三行业重点实施减排；燃煤和非燃料的排放（工业生产过程排放）是主要来源，减排应从大幅度减少燃煤消耗，减少工业生产过程排放入手。

到 2022 年：

- 最大限度的挖掘区域可再生能源发电潜力以替代燃煤发电；
- 加快关停部分钢铁厂、焦化厂、水泥厂，禁止新建钢铁厂、焦化厂、水泥厂。钢铁厂实施烟气脱硫，高效除尘技术，水泥窑安装布袋除尘器；
- 加快电力部门的治理，所有现有电厂实施烟气脱硫脱硝治理，采用低氮燃烧技术，安装布袋除尘器，并在加强末端治理的基础上，进一步关停部分现有燃煤电厂；
- 加强民用和小规模商业炉灶的改造，使民用燃料由燃煤向燃气转化，禁止农业废弃物焚烧。

就整个京津冀地区而言，河北省无疑是治理的重点，在北京、天津、河北各自治理的基础上，应尽快建立区域性的大气污染防治协作机制，并将治理和扶持的重点向河北省倾斜。在京津冀地区，河北省的污染物排放总量最大，重工业比重最高，且民用、商用小锅炉污染影响在三地区最大，如果河北省不能快速有效地降低大气污染物的排放，那么整个区域的空气污染治理都将会被掣肘。京津冀从根本上降低煤炭在能源消费中的比例，加强主要污染排放行业的末端治理和执法，加快小锅炉的清洁化改造，加深区域空气污染的监测预警应急和信息共享等各方面工作，都应摆在区域层面进行展开。

最后我们必须强调和建议，在 2022 年左右以最大限度实施全部减排措施以确保 PM_{2.5} 浓度可以大幅度降低，但达成这一目标需要相当的经济成本和政策推力。本报告仅从各措施物理减排潜力的角度，在暂时不考虑经济代价情况下，分析达成这一目标的减排途径。一些措施的实施可能带来相关的区域问题。例如，在无法完全控制京津冀地区城市生活生产能源需求增长的情况下，关停、转移电厂和工厂将加重其他地区的污染状况。本报告建议，在具体实施过程中，还需综合考虑减排潜力、经济代价和更大区域范围内的可持续发展。



6 结论



6 结论

本报告基于 GAINS 模型中自下而上的京津冀地区分部门分行业排放源清单、综合运用 CMAQ 模型模拟了 2010–2030 年京津冀地区大气 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度，并以达成 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的 $\text{PM}_{2.5}$ 大气浓度为目标分析了相关措施的减排潜力。

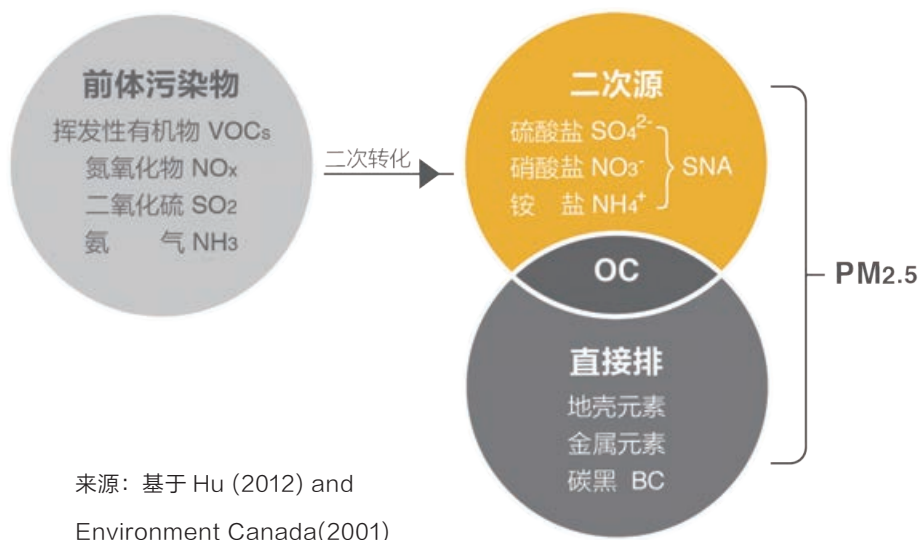
本报告认为，当前京津冀地区市区的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染主要源于火力发电、工业生产过程、小商用、民用炉灶和交通排放等部门，这些部门每年排放一次 $\text{PM}_{2.5}$ 及其前体物超过 1200 万吨。如果不采取更加积极的减排措施，以《大气污染防治行动计划》出台前的减排力度京津冀地区在 2030 年以前其大气 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度仍然处在高位。实现十年内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下

降到 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的目标需要将现有 $\text{PM}_{2.5}$ 排放降低 80% 以上。这意味着京津冀地区需要进行根本的工业结构及能源结构调整，大幅度降低重工业比重并进行电力行业的去煤、清洁替代，并辅以高效、多种污染物协同控制的末端治理。但考虑到二氧化硫等主要 $\text{PM}_{2.5}$ 前体物可远距离传输的特性以及电厂转移等手段将会加重其他地区污染状况，京津冀地区的能源结构调整不应该单纯以煤电转移为解决方法，而应大力发展清洁的可再生能源，从根本上抑制并削减煤炭的使用为解决之道。

本研究报告将是京津冀地区进行科学、系统减排的重要依据。

附录 1: PM_{2.5} 背景知识

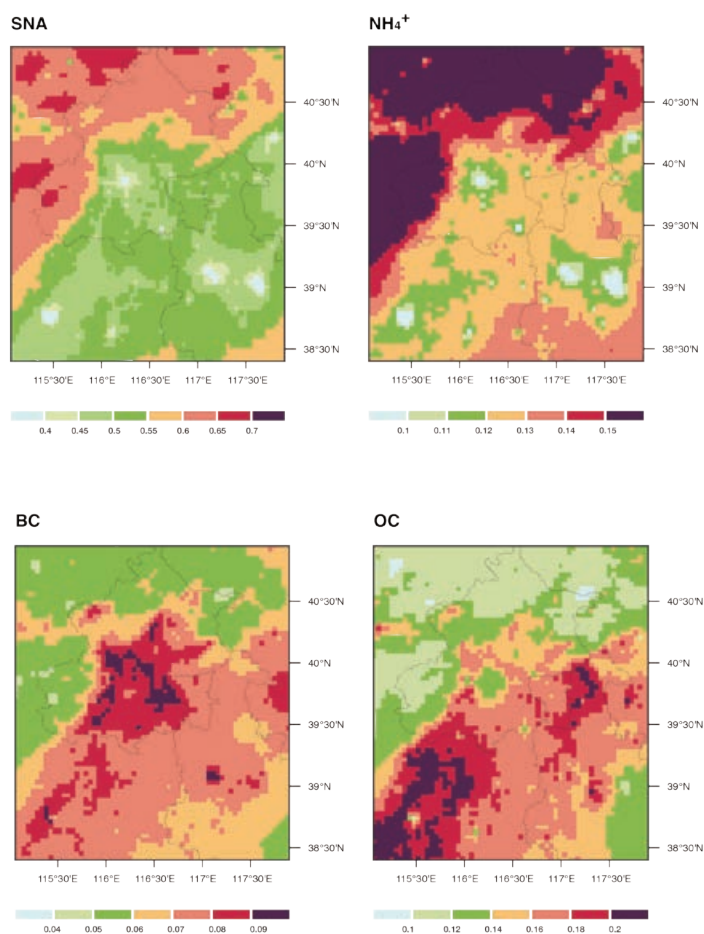
PM_{2.5} 并非某一种化学类型的污染物，而是一些污染物的合集。PM_{2.5} 的来源有两种，即直接排出的一次颗粒物和由气态的 SO₂、NO_x 等前体物通过大气反应而生成的二次颗粒，见图解：



一次细颗粒物又分为直接排出的固态一次颗粒物和在高温状态下以气态形式排出、在冷却过程中凝结成固态的一次可凝结颗粒物。PM_{2.5} 中的一次固态颗粒物主要来源于燃烧过程、矿物质的加工和精炼过程以及工业加工过程排放等；PM_{2.5} 中的可凝结颗粒物主要由半挥发性有机物组成。PM_{2.5} 中的二次颗粒物主要由无机气溶胶（硫酸盐 SO₄²⁻ + 硝酸盐 NO₃⁻ + 铵盐 NH₄⁺，简称 SNA）及挥发性有机物 VOCs 转化而成的二次有机物（SOC）。

相关研究报道大多仅关注 PM_{2.5} 的直接一次源排放，而对由前体物转化形成的颗粒物的分析较为缺乏，而这些二次形成的 PM_{2.5} 往往占 PM_{2.5} 总量的一半以上。因此，系统研究 PM_{2.5} 来源并提出具体的减排建议需要同时考虑 PM_{2.5} 的一次源和前体物的排放。

附录 2: PM_{2.5} 化学组分其他附图及说明



左图依次显示为京津冀地区二次无机气溶胶 (SNA)、铵盐 (NH_4^+)、碳黑 (BC) 和有机碳 (OC) 在该地区 PM_{2.5} 质量浓度中的比例 (如: 若图表指示某处 SNA 为 0.4, 则表明该组分的质量浓度占该地 PM_{2.5} 总浓度的 40%)。BC 主要是化石燃料或生物质不完全燃烧所致, 常被作为衡量机动车污染的一项指标 (Huang et al. 2006)。OC 既是一次污染物也是二次污染物, 它的来源包括: 一为直接排放的一次有机物 (Primary Organic Aerosol, 简称 POA), 主要为燃烧产生; 二为直排后的挥发性有机物 (VOCs) 经化学转化后形成的二次有机气溶胶 (Secondary Organic Aerosol, 简称 SOA)。

二次无机气溶胶主要由硫酸盐 SO_4^{2-} 、硝酸盐 NO_3^- 和铵盐 NH_4^+ 这三种无机离子 (简称 SNA) 组成, 它们是由二氧化硫、氮氧化物和氨气转化而来, 故为二次源。SNA 是最重要的 PM_{2.5} 组分, 总共占其质量浓度的 50~70% 之间。

附录 3：分行业减排措施列表

交通部门	工业过程部门	电力部门
1. 轻型车辆执行国四标准	1. 关停立窑和回转窑水泥厂	1. 提高城市外用电比例
2. 重型柴油车执行国四标准	2. 关停土焦厂	2. 关停小装机容量燃煤机组
3. 重型柴油车执行国五标准	3. 禁止新建水泥厂	3. 燃气电厂替代燃煤电厂
4. 摩托车执行国三标准	4. 禁止新建石灰厂	4. 推行整体煤气化联合循环发电系统
5. 非道路车辆执行国二标准	5. 禁止新建砖瓦厂	5. 推行燃气供热厂
6. 燃气汽车执行国四标准	6. 禁止新建玻璃厂	6. 推行碳捕获与封存技术
7. 轻型汽油车执行国五标准	7. 禁止新建钢铁厂	7. 电力部门推广低硫煤
8. 轻型汽油车执行国六标准	8. 禁止新建焦化厂	8. 燃煤电厂安装烟气脱硫系统
9. 重型柴油车执行国六标准	9. 关停部分现有水泥厂	9. 新建电厂安装布袋除尘器
10. 非道路车辆执行国三标准	10. 关停部分现有石灰厂	10. 新建电厂同时安装电除尘器和布袋除尘器
11. 非道路车辆执行国四标准	11. 关停部分现有砖瓦厂	11. 已有电厂安装布袋除尘器
12. 非道路车辆执行国五标准	12. 关停部分现有玻璃厂	12. 全部电厂采用低氮燃烧技术
13. 非道路车辆执行国六标准	13. 关停部分现有钢铁厂	13. 新建燃气电厂实施烟气脱硝治理
14. 淘汰国一标准以下汽油车	14. 关停部分现有焦化厂	14. 已有电厂实施烟气脱硝治理

交通部门	工业过程部门	工业燃烧部门
15. 淘汰国一标准以下柴油车	15. 工业燃气炉窑替代燃煤窑炉	1. 提高工业部门能效
16. 淘汰国一标准汽油车	16. 水泥窑安装布袋除尘器	2. 推行热电联产技术
17. 淘汰国一标准柴油车	17. 新型干法水泥窑实施烟气脱硝治理	3. 关停小容量工业燃煤锅炉
18. 淘汰国二标准汽油车	18. 石灰厂安装布袋除尘器	4. 燃气锅炉替代燃煤锅炉
19. 淘汰国二标准柴油车	19. 钢铁厂采用高效除尘技术	5. 工业部门推广低硫煤
20. 限制私家车数量	20. 控制钢铁厂无组织排放	6. 燃煤锅炉安装烟气脱硫系统
21. 推行燃气汽车	21. 钢铁厂烟气脱硫	7. 新建燃煤锅炉安装布袋除尘器
22. 推行新能源公共汽车	22. 工业涂装过程中采用低VOC含量的材料	8. 工业锅炉采用低氮燃烧技术
23. 推行新能源出租车		9. 已有锅炉安装湿式除尘器
24. 推行新能源私家车	民用部门	10. 已有燃煤锅炉安装布袋除尘器
25. 柴油车添加氮氧化物还原剂		
26. 加油站油气回收	1. 提高民用部门能效	
	2. 居民集中供热替代分散取暖	
	3. 禁用民用燃煤炉灶	
	4. 民用燃料由燃煤向燃气转化	
	5. 民用部门推广低硫煤	
	6. 民用燃煤锅炉采用高效除尘装置	
	7. 民用燃气锅炉采用低氮燃烧技术	

参考文献

- [1] Brauer M, Amann M, Burnett R T, et al. 2012. Exposure assessment for estimation of the global burden of disease attributable to outdoor air pollution. *Environ. Sci. Technol.*, 46(2): 652–660.
- [2] Damberg R. 2007. Policies for addressing PM_{2.5} precursor emissions. USEPA, Office of Air Quality and Standards. Accessed from: [http://yosemite.epa.gov/oas/eab_web_docket.nsf/filings%20by%20appeal%20number/cd5f1d01895e1b6585257719006e71bc/\\$file/exhibit%2027%20damberg...3.11.pdf](http://yosemite.epa.gov/oas/eab_web_docket.nsf/filings%20by%20appeal%20number/cd5f1d01895e1b6585257719006e71bc/$file/exhibit%2027%20damberg...3.11.pdf).
- [3] Environment Canada .2001. Interim Plan 2001 on Particulate Matter and Ozone. Accessed from: <http://www.ec.gc.ca/air/default.asp?lang=En&n=0768F92F-1&offset=1&toc=show> on Nov 4. 2013.
- [4] Greenpeace. 2013a. The health impact from coal power plants in Beijing, Tianjin and Hebei. [report] Greenpeace East Asia Regional Office, Beijing. [京津冀地区燃煤电厂造成的健康危害评估研究 .[报告] 绿色和平东亚办公室, 北京]. <http://www.greenpeace.org/china/Global/china/publications/campaigns/climate-energy/2013/1306jingjinji-health-rpt.pdf>
- [5] Greenpeace. 2013b. Survey on the public satisfaction of air quality in the Beijing, Tianjin and Hebei region. [绿色和平 . 2013b. 空气质量满意度调查问卷]. <http://www.greenpeace.org/china/zh/news/releases/climate-energy/2013/06/jingjinji-air-polling/>
- [6] Hu M. 2012. Source apportionment of PM_{2.5}. [胡敏 . 2012. PM_{2.5} 来源解析 . 百度文库]. Accessed from <http://wenku.baidu.com/view/1ad4827b8e9951e79b8927b1.html>, on Nov 4, 2013.
- [7] Huang X F, Yu J Z, He L Y, et al. 2006. Size distribution characteristics of elemental carbon emitted from Chinese vehicles: results of a tunnel study and atmospheric implications. *Environ. Sci. Technol.*, 40: 5355-5360
- [8] International Energy Agency (IEA) .2009. Energy technology transitions for industry: Strategies for the next industrial revolution.

[9] Liu F, Klimont Z, Zhang Q, et al. 2013. Integrating mitigation of air pollutants and greenhouse gases in Chinese cities: Development of GAINS-City model for Beijing. *J. Clean Prod.*, 58: 25-33

[10] Ministry of Environmental Protection, China (MEP). 2013. Execution program on the action plan of Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding areas on air pollution prevention and control. [中国环境保护部 . 2013. 京津冀及周边地区落实大气污染防治行动计划实施细则 . 环发 [2013]104 号]. Accessed from: <http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201309/W020130918412886411956.pdf>, on Nov. 4 2013.

[11] Pan X C, Li G X, Gao T. 2012. Dangerous breathing: Measuring the human health and economic impacts on China's largest cities. Greenpeace East Asia Regional Office, Beijing. China Environmental Science Press. [潘小川, 李国星, 高婷 . 2012. 危险的呼吸 :PM_{2.5} 的健康危害和经济损失评估研究 . 绿色和平东亚办公室 , 北京 . 中国环境科学出版社].

[12] van Donkelaar A, Martin RV, Brauer M, et al. 2010. Global estimates of ambient fine particulate matter concentrations from satellite-based aerosol optical depth: development and application. *Environ. Health Persp.*, 118(6): 847-855.

[13] Wang Y, Zhuang G, Zhang X, et al. 2006. The ion chemistry, seasonal cycle, and sources of PM_{2.5} and TSP aerosol in Shanghai, *Atmos. Environ.*, 40, 2935–2952.

[14] Wang Y, Zhang Q, He K, et al. 2013. 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.

[15] Zhang Y. 2011. Chemical characteristics of secondary inorganic aerosols during a Typical Haze Episode in Shanghai. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring* (in Chinese). S1. [张懿华 . 2011. 上海市典型霾污染过程二次无机气溶胶组分特征研究 . 环境监测管理与技术 . 第 S1 期].

地址：北京东城区新中街68号聚龙花园7号
楼聚龙商务楼3层

邮编：100027

电话：+86 10 65546931

传真：+86 10 65546932

网站：www.greenpeace.cn

绿色和平简介：

● **GREENPEACE** 绿色和平

绿色和平是一个全球性环保组织，
致力于以实际行动推进积极改变，保护地球环境与世界和平

● 设计制作：LXU studio

