

中国如何在 2030 年实现 PM_{2.5} 空气质量全面达标

—基于能源及末端控制情景的数值模拟探讨

主要结论

根据国务院于 2013 年 9 月颁布的《大气污染防治行动计划（2013-2017）》中的要求，以及环保部在 2013 年提出的全国城市空气质量达标时间表，全国各省市均需制定中长期空气质量达标规划，力争 2030 年中国所有重点城市达到国家空气质量标准。

基于上述对 2030 年中国中长期空气质量改善目标的要求，本研究设定了一系列情景对中国城市空气质量的达标路径进行模拟。这一系列情景由五组能源政策情景和两组末端控制政策情景组合而成。能源政策情景包括 2015 年参考情景（REF），基于当今政策基准的情景（BASE），以及三组未来能源预测情景（RCP4.5, SAVE, DEEP）¹；末端控制情景包括基准（BAU）及强化最佳可行技术（BAT）。在此基础上共组合出七种组合情景进行分析²（REF-BAU, REF-BAT, BASE-BAU, BASE-BAT, RCP4.5-BAT, SAVE-BAT, DEEP-BAT）。据此估算出不同能源情景和末端政策情景下的中国大气污染物源排放量，并对中国 2030 年的空气质量进行了模拟，以定量评估不同大气污染防治措施对中国 74 个重点城市 PM_{2.5} 浓度的削减效果，从而为中国未来空气质量达标提供科学参考依据。

模拟结果表明：

1. 不同能源情景在 2030 年均可以使全国各重点城市的年均 PM_{2.5} 浓度相比 2015 年的浓度明显下降。但只有在进一步优化能源产业结构的节能情景（SAVE）和深度能源结构调整

¹ 见本研究 2.1 章节 See Chapter 2.1

² 见表 0. See Table 0

(DEEP) 的情景中，配合强化末端控制 (-BAT) 的基础上，2030 年全国 74 城市的年均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度才可以达标(也是 WHO 规定的过渡期 I 级标准，年均 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$)。在“节能+强化末端控制”情景下，仍有一些城市的年均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在标准线附近，存在一定不达标的风险。而在“深度能源结构调整+强化末端控制”情景下，所有城市都能够达标。同时，在这两种政策组合中，可以在 2030 年之前实现碳排放达峰，2030 年相比 2015 年的 CO_2 减排比例分别为 1%和 17%，实现空气质量改善与温室气体协同减排的效果。

- “节能+强化末端控制”以及“深度能源结构调整+强化末端控制”这两种组合情景中，可使得超半数城市在 2030 年达到 WHO 所规定的过渡期 II 级标准（年均浓度 $25\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）。上述两个情景中，达到该标准的 2030 年城市占比分别为 50.0%和 56.8%。

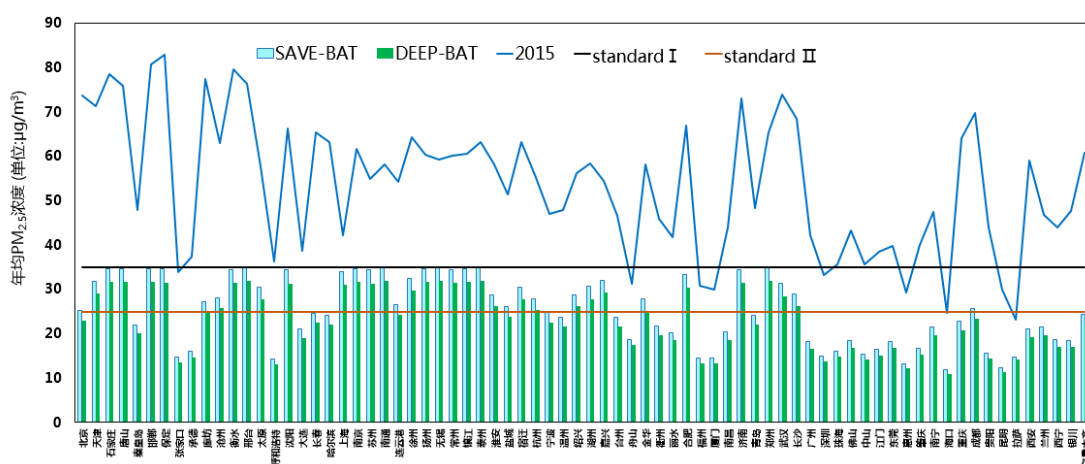
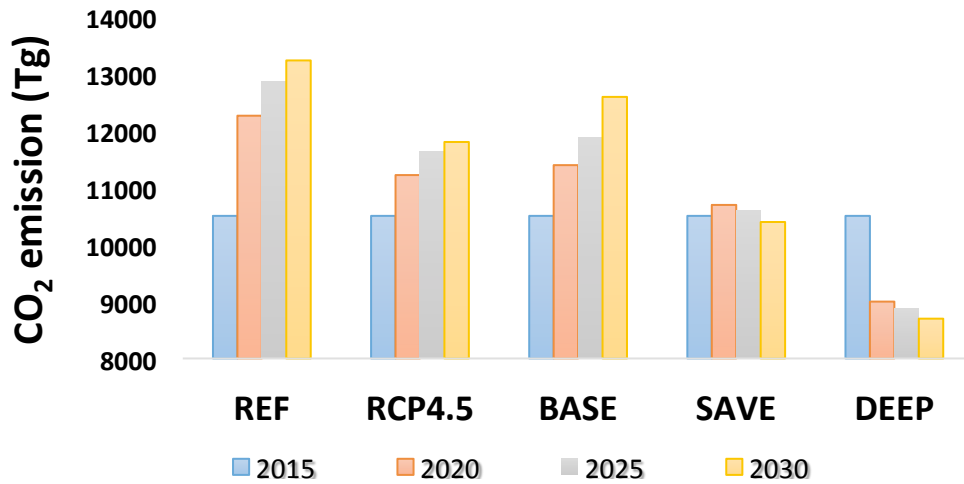


图 0-1 SAVE-BAT 和 DEEP-BAT 情景下 2030 年各城市年均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度（单位： $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）

图 0-2 各情景下 2015 至 2030 年 CO₂ 排放量（单位：亿吨）



3. 使用基准的末端控制政策（-BAU）组合虽可减少污染物排放，但并不能让所有城市在 2030 年达标。在基准末端控制情景中，2030 年的 SO₂、NO_x 和 PM_{2.5} 排在 2015 年基础上可削减 30.5%、5.9%和 27.2%，32.4%的城市可达到细颗粒物浓度 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的国家二级标准。
4. 仅使用强化的末端控制（-BAT）并不足以使未来空气质量达标。如果不进一步优化调整能源产业结构（REF, BASE, RCP4.5），仅实施强化的末端控制政策，在 2030 年最多能使 70.3%的城市达标，京津冀、长三角等地仍有 50%以上城市存在无法达标的风险，结构性问题是这些地区空气质量难以达标的關鍵原因。

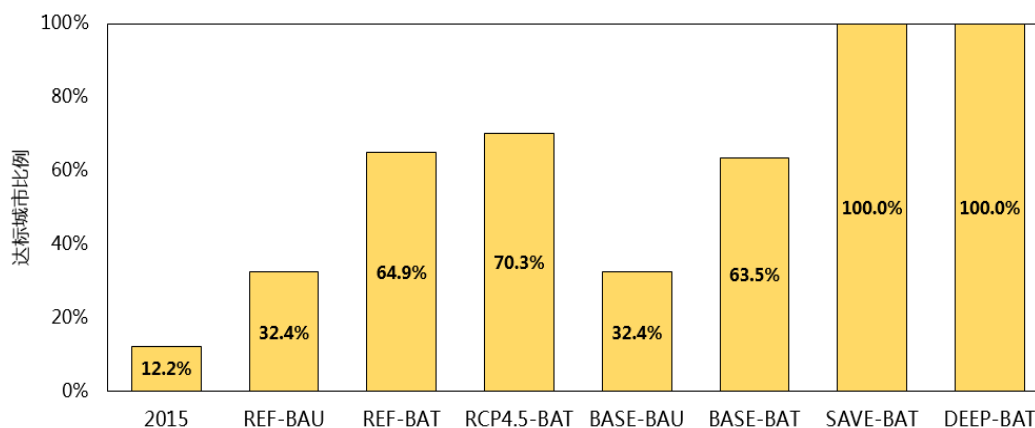


图 0-3 不同情景中中国 74 个重点城市中 2030 年空气质量达标城市占比

根据上述模拟结果，为了实现中国所有重点城市 2030 年空气质量全面达标，需要实施以下主要政策：

1. 产业结构大幅调整

中国未来经济发展格局需要进行大幅调整，降低高能耗产业在经济中的比例。在 2030 年之前完成产业结构升级调整，改变重工业主导的模式，重工业产品产量到 2030 年在 2015 年基础上下降 25%，单位产品能耗下降 20%。

-控制重污染省、市、自治区高能耗、高污染的“两高”行业发展，控制钢铁、水泥和玻璃等重点行业的年产量。

2. 能源结构进一步清洁化。

2030 年，中国煤炭占一次能源消费比例削减至 35%以下，天然气比例显著上升，推行“煤改电”“煤改气”政策，替代大量的煤炭散烧和燃煤工业锅炉。煤炭重点为高耗煤行业以及发电供热行业使用，民用散煤污染得到全面控制，硫含量高于 0.6%的煤炭全部禁止使用。

3. 末端措施控制全面实施到位

-燃煤发电全面实现超低排放。

-钢铁企业全面升级改造，安装高效除尘器，如袋式除尘器、电袋复合除尘器等，加强无组织排放管控。钢铁企业烧结机全面安装脱硫设备，脱硫效率不低于 85%。

-工业窑炉升级改造，实现袋式除尘器或电袋复合除尘器的全覆盖，水泥行业全面应用高效静电和布袋除尘器，细颗粒物除尘效率达到 99%。除重点区域推行特别排放限值之外，对 2030 年空气质量达标存在较大风险的地区也执行特别排放限值。

-逐步淘汰中小锅炉和落后炉型，剩余大型锅炉全面开展脱硫、脱硝及除尘升级改造。

-重点省份的炼焦、表面涂装、包装印刷等重点行业的挥发性有机物（VOCs）平均去除效率不低于 70%。

-氨排放管控得到有效加强，2030 年全国缓控施肥比例增加至 30%；2030 年猪、鸡、牛、羊和马集中养殖比例已达 100%。

4. 交通污染得到有效控制

-2030 年须全面完成汽柴油的油品升级，在用车均可实现“国 VI”或更严格的排放标准。

-特大城市和重点省份的机动车保有量得到有效的控制，北京等地的城市公交承担率达 41%以上，节能小汽车占比达到 50%以上，电动汽车占比达到 40%以上。

其他结论和建议：

1. 实现 2030 年的空气质量达标，必须大幅调整产业能源结构。

本研究通过多情景模拟结果对比发现，仅依靠强化的末端治理政策，并不能保证 2030 年中国重点城市的空气质量全面达标。要实现全部达标，必须同时大幅调整产业结构和能源结构。中国必须大幅减少化石燃料比重，加快可再生能源的开发利用。在研究中，我们发现，

在“节能+强化末端控制”情景下，依靠产业结构和能源结构的升级，将 2030 年全国煤炭消费比重控制至 40% 以下，以配合最佳可行技术的末端控制政策，可以使得中国全部重点城市在 2030 年达标。然而该情景下仍有部分城市年均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在标准线附近徘徊。因此，为保证实现城市空气质量全面达标，应该力争实现“深度结构调整+强化末端控制”情景，到 2030 年将全国煤炭消费比重进一步削减至 35% 以下，这样不仅能使中国全部重点城市在 2030 年达到 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的 $\text{PM}_{2.5}$ 标准，同时能使将近 60% 的重点城市达到 WHO 第二阶段 $\text{PM}_{2.5}$ 标准（年均值 $25\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）。

2. 出台“大气十条”二期，并尽快制定科学合理的空气质量达标规划。

2013 年国务院“大气十条”的颁布对中国的大气污染防治工作起到了极大的推动作用，各方面取得了积极的进步。在国家层面，未来仍需要进一步制定衔接中国中长期能源战略目标和短期空气质量改善目标的政策，推动“大气十条”二期政策尽快颁布。同时，在地方层面，需要全面系统开展城市空气质量达标规划和达标管理工作，让各城市因地制宜制定达标策略和措施行动。

3. 不同地区的减排压力和潜力存在区别。

由于中国幅员辽阔，地形复杂，气象条件变化大，排放量也存在很大的差异，目前的空气质量已出现了很大的空间不均衡性。由于不同省市自治区面临的空气污染形势有所区别，须对各省、各地区的政策进行分开的考量，以准确平衡各地经济发展和环境保护的相关政策，落实最佳的减排政策方案。

4. 加大政策落实力度

在实际落实减排政策时，常出现由于各种因素影响而导致落实效果不如预期的情况。建议针对各省市的政策落实情况开展相关研究，明确相应资金和技术需求，建立切实可行的监督方案及整改措施。

5. 在推动颗粒物达标的同时关注臭氧污染。

由于目前中国各地首要大气污染物主要为 $\text{PM}_{2.5}$ ，故本报告着重讨论其年均浓度能否达标。实际上，在颗粒物实行严格的减排控制措施时，常出现臭氧污染随之加重的情况。为防止臭氧污染情况的进一步恶化，须关注颗粒物前体物和臭氧前体物的协同减排，将控制措施进行综合考量。

6. 推动环保服务业的发展、吸引社会资本的投入。

本报告中涉及的各项措施落实均离不开人力、物力、财力的相应投入。目前，中国各层级的空气质量研究、管理、执法从业人数均存在严重缺口。为解决该问题，须广泛增加政府人员以及资金的投入，推动环保服务业的发展，吸引社会资本加入，全面提升环保服务产业的未来发展前景。

7. 大气污染防治减排措施同时可带来温室气体减排。

本研究中的节能和深度能源结构调整情景，都能保证中国 CO_2 的排放量在 2030 年相比 2015 年有所降低。在深度能源结构调整情景下，2030 年中国将在 2015 年基础上减少约 17% 的 CO_2 排放。能源结构减排措施（包括“煤改气”、发展非化石能源等）和产业减排措施（包括削减钢铁、水泥、焦化产能等）实施后，可以使中国在 2030 年之前碳排放达到峰值。