



中国治理空气污染 可选政策的成本

Keith Crane、Zhimin Mao 合著

唐氏研究所赞助

This is a Chinese translation (simplified characters) of *Costs of Selected Policies to Address Air Pollution in China*.

有关本出版物的更多信息，请查询 www.rand.org/t/rr861。

兰德公司出版，加州圣莫尼卡
版权所有 © 2016 兰德公司
RAND® 是兰德公司的注册商标。

有限的平面和电子媒体发行权

本文件和文中所含商标受法律保护。本作品的知识产权归兰德公司所有，不得用于商业用途。未经授权，严禁在网络上发布本作品。本文件仅允许个人复制使用，但不得擅自修改和删节。未经许可，不得复制或以其他形式将兰德公司的任何研究文献用于商业用途。有关翻印和链接授权的信息，请查询 www.rand.org/pubs/permissions。

兰德公司是一家解决公共政策挑战的研究机构，旨在协助推进全球社区的安全、卫生与繁荣事业。兰德公司致力于公共利益，属于非营利性、无党派组织。

兰德公司的出版物未必代表其研究客户和赞助商的观点。

赞助兰德公司

欢迎通过下列网址提供可免税的慈善捐赠

www.rand.org/giving/contribute

www.rand.org

序言

空气污染已成为中国过去三十年经济转型和增长所造成的最致命后果之一。几乎在每一个主要的城市地区，污染物浓度都超出世界卫生组织提倡的标准。空气污染造成的巨大代价体现在影响健康和劳动生产力的损失上。2000年至2010年期间，中国每年为空气污染付出的代价占国内生产总值的6.5%，而且随着中国城市化的推进和生产力的提高，这个比例还在上升。

如果要改善城市空气质量，使污染物浓度不超过危害人体健康的水平，中国必须积极落实清洁空气政策。然而，这些政策需要付出成本。

本报告旨在粗略估算中国广泛采取空气污染防治措施的潜在成本，当中评估了以下三条可以充分降低城市地区主要污染物浓度的政策措施：

1. 用天然气取代住宅和商业用煤
2. 使用可再生能源和核能替代燃煤发电
3. 报废老旧、高污染的车辆。

本报告的初衷是促进中国政府、中国公众以及国内外有关各方就空气污染防治措施展开讨论。

本研究项目受到唐氏研究所的慷慨资助。兰德亚太政策中心及兰德司法、基础设施与环境顾问委员会提供了后续资金支持。

兰德亚太政策中心的使命是通过为决策者和公众提供严谨、客观、尖端的研究来帮助改善政策，其研究课题涉及亚洲面临的关键政策挑战和美国与亚洲的关系。

关于兰德公司环境、能源与经济发展项目组

本研究由兰德公司环境、能源与经济发展项目组负责实施。环境、能源与经济发展项目组的研究课题包括国内外的环境质量与相关法规、水资源与能源资源及系统、气候、自然灾害与灾难、以及经济发展等，面向政府机构、基金会及私营部门。

该项目组隶属于兰德公司司法、基础设施与环境部。兰德公司司法、基础设施与环境部致力于改善民事及刑事司法，基础设施保护和国土安全，交通和能源政策，以及环

境和自然资源政策等政策领域的政策制定和决策。

如果对本报告有任何疑问或意见，请与项目负责人 Keith Crane (Keith_Crane@rand.org) 和 Debra Knopman (Debra_Knopman@rand.org) 联系。有关环境、能源与经济发展项目组的更多信息，可访问 <http://www.rand.org/energy> 或通过 eed@rand.org 与项目组主任联系。

目录

序言	iii
图表	vi
图形	vi
表格	vi
综述	vii
问题	vii
解决方案	vii
用天然气或丙烷取代住宅和商业用煤	vii
用清洁燃料替换煤炭发电	viii
报废老旧车辆	viii
改善空气质量的成本概算	ix
鸣谢	xii
缩略语	xiii
1. 引言	1
研究目的	1
本报告的组成结构	1
2. 问题	3
趋势	5
污染源	7
3. 解决方案	11
用天然气或丙烷取代住宅和商业用煤	11
安装并运行污染控制设备，用清洁燃料替换煤炭发电	14
在机动车上安装污染控制设备并报废老旧车辆	16
4. 减少空气污染的成本	18
用天然气或丙烷取代住宅和商业用煤	18
使用可再生能源和核能替代燃煤发电	19
报废老旧车辆	20
净收益	21
参考文献	23

图表

图形

图 2.1: 中国最大城市的平均二氧化硫浓度.....	6
图 2.2: 中国最大城市的平均氮氧化物浓度.....	6
图 2.3: 中国总悬浮颗粒物和二氧化硫的排放量 (1991–2012).....	7
图 2.4: 2010 年主要污染源二氧化硫排放比例.....	9
图 2.5: 依据污染控制技术得出的机动车排放污染源	10

表格

表 S.1: 中国治理空气污染措施的年度成本	x
表 S.2: 中国通过报废老旧机动车减少空气污染的一次性成本	xi
表 2.1: 世界卫生组织的空气质量标准	4
表 2.2: 2011 年中国选定城市的平均空气污染物浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	5
表 3.1: 用天然气取代住宅和商业用煤	13
表 3.2: 用核能和可再生能源替代燃煤电厂供应的 1.9 万亿千瓦时电力.....	16
表 4.1: 中国治理空气污染政策措施的年度成本.....	19
表 4.2: 中国通过报废老旧车辆减少空气污染的一次性成本	20

综述

问题

空气污染已成为中国过去三十年经济转型和发展所造成的最致命后果之一。尽管中国中央、省、市各级政府在治污领域已做出巨大努力，一些措施确实改善了空气质量，但空气污染仍然是一个严峻的问题。几乎在每一个主要的城市地区，污染物浓度都超出世界卫生组织提倡的标准。空气污染造成的巨大代价体现在影响健康和劳动生产力的损失上。2000年至2010年期间，中国每年为空气污染付出的代价占国内生产总值的6.5%，而且随着中国城市化的推进和生产力的提高，这个比例还在上升。

中国政府一直在实施与其他工业化国家类似的防治污染政策措施：

1. 补贴或强制使用如天然气、核能和可再生能源等比燃煤排污更少的能源
2. 强制报废高污染排放的机动车、锅炉等设备
3. 在重点污染源和机动车上强制安装污染控制装置。

如果要改善城市空气质量，使污染物浓度不超过危害人体健康的水平，中国必须积极落实上述政策。然而，这些政策需要付出成本。本报告旨在评估中国广泛采取附加空气污染防治措施的潜在成本，并与空气质量改善所带来的收益相比较。本报告的初衷是促进中国政府、中国公众以及国内外有关各方就上述污染防治措施展开讨论。

解决方案

用天然气或丙烷取代住宅和商业用煤

为使中国城市的空气质量达到世界卫生组织的标准，住宅和商业用户必须终止在城市地区燃烧煤炭、生物质和塑料垃圾。过去几十年，大部分国家的经验表明，必须用天然气、丙烷、或其他燃料产生的电热替代煤炭供暖和烹饪，方可有效地减少住宅和商业用户使用锅炉和炉灶造成的污染排放。

2011年，中国家庭和商业用户共消费了1.14亿吨煤炭，占全国煤炭消费总量的3.2%。家庭使用的燃煤炉灶，与住宅和商业楼宇采暖用的锅炉一样，很难安装污染控制设备；在大多数情况下，用天然气或丙烷代替煤炭是减少相关污染排放的最有效方法。但是，要实现煤炭的置换，中国需要额外采购880亿立方米的天然气，这个数量相当于2012年全国天然气消费总量（1,470亿立方米）的60%。

用清洁燃料替换煤炭发电

中国半数的煤炭消费总量用于发电，煤电占有非常大的电力份额，最近几年达到79%。为了达到健康的空气质量水平，中国将不得不使用如天然气、核能、风能或、太阳能等轻污染能源来发电，以取代大量的燃煤电厂，特别是那些位于或靠近主要人口聚集地的燃煤电厂。

在美国和许多欧洲国家，煤电所占的电力份额较小——2013年美国的这一比例为40%。中国要达到美国的比例，以2012年的数据为基准，必须将其燃煤发电量减少39%，即1.918万亿千瓦时。然而，这并非完全不现实：如果首先淘汰表现最差的燃煤电厂，该政策将使中国的颗粒物和二氧化硫总排放量减少25%以上。

我们已经指出，要减少煤炭发电使用量，中国必须以天然气、可再生能源或核能替代之。中国计划将水力发电能力从249吉瓦增加到325吉瓦。这将使水力发电量增加0.264万亿千瓦时，相当于2012年燃煤电厂发电量的5.3%。目前中国风力发电0.996万亿千瓦时，相当于2012年全国发电量的20%。要达到这个目标，在2012年已有装机容量62吉瓦的基础上，中国还需要再增加540吉瓦的装机容量——前提是增加的风电装机容量与现有的风电场发电水平相当。核电站可以弥补0.658万亿千瓦时的缺口，占2012年中国发电量的15.2%。为此，我们估计中国核电装机容量需要再增加84吉瓦，较之到2020年增加58吉瓦的既定目标超出了45%。该目标未计及经济持续增长对发电量产生的额外需求。

报废老旧车辆

机动车已成为中国空气污染快速增长的来源，尤其是氮氧化物的排放。中国通过引进和执行更严格的欧盟空气污染标准来解决这一问题。在中国出售的机动车大部分是由外国汽车公司与中国公司合资生产，这意味着国内制造商能获得外国生产商采用的污染控制技术。因此，在汽车行业要安装符合欧盟现行排放标准的污染控制设备，不存在技

术壁垒问题。事实上，中国已经掌握最严格的污染控制技术并已经在优先实施减排政策的北京等城市出售的汽车上安装应用。

报废仍在使用的污染车辆，是中国减少现有机动车空气污染排放的最有效方法。为了显著减少机动车排放，中国需要报废 14,514,000 辆没有污染控制设备或仅安装简陋的污染控制设备的车辆。若以 2009 年中国的汽车污染排放计算，报废这些车辆，一氧化碳排放将减少 70%，挥发性碳氢化合物排放将减少 70%，氮氧化物排放将减少 61%，颗粒物排放将减少 76%。

改善空气质量的成本概算

本报告提出的措施均已获中国中央、市级政府的部分执行，这将使城市空气质量显著改善。颗粒物、二氧化硫和氮氧化物的浓度将至少下降四分之一甚至更多，中国每年因空气污染造成的健康损害和生产损失将得到实质上的减少。

如表 S.1 所示，上述措施是要付出一定代价的。我们估计，以天然气代替煤用于住宅和商业采暖，每年的经常性成本为 320-520 亿美元；用可再生能源或核能取代半数燃煤发电量的成本为 1,840 亿美元——每年的经常性成本合计为 2,150-2,350 亿美元。除去由此节省的煤炭成本（750 亿美元），年度净成本总共为 1,400-1,600 亿美元。据我们估计，中国每年为空气污染付出的代价占国内生产总值的 6.5%，2012 年大约为 5,350 亿美元，而上述投资不及空气污染代价的三分之一。

在上述三条政策措施中，短期内应优先实施的是用天然气取代住宅和商业用煤。燃烧煤炭、木材或垃圾的锅炉和炉灶是重要的污染排放源，在中国（特别是北方）甚至危及人体健康和预期寿命，这一点已得到证明。在城市地区停止使用这些燃料，将使城市空气质量显著改善，特别是在冬季，可以大大减少空气质量严重超标的天数。

停止住宅和商用用煤的政策，每年成本介于 320-520 亿美元，而使用水电、风电和核电替代燃煤发电的成本估计为 1,840 亿美元，前者成本明显低于后者成本。使用其他能源替代燃煤发电，是我们评估的三条政策措施中成本最高的，但这种措施却可以最大程度

地减少总悬浮颗粒物和二氧化硫的总体排放。然而，它对城市空气质量的影响可能没有预期的减排效果那么大，因为中国大部分的发电厂不在城市地区。尽管燃煤电厂排放的污染物通过风力传播，成为决定城市空气质量的主要因素，但各城市范围内的空气污染源有着更直接的影响。要具体量化区域性污染源与本地污染源对城市空气质量的相对影响，需要详细的建模工作，但总的来说，在城市地区停止住宅和商业用煤可能是近期更优先采取的措施。

表 S.1: 中国治理空气污染措施的年度成本

政策措施	数量	价格 (2012年: 美元)	总成本 (2012年: 10亿美元)
用天然气取代住宅和商业用煤			
2012年东亚液化天然气的平均价格	880亿立方米	360 / 立方米	32
2012年东亚液化天然气的最高价格	880亿立方米	587 / 立方米	52
使用其他能源替代燃煤发电			
水电	0.26万亿千瓦时	90.30 / 1,000千瓦时	24
风电	0.89万亿千瓦时	86.60 / 1,000千瓦时	78
核电	0.76万亿千瓦时	108.40 / 1,000千瓦时	82
合计			184
总计			
最低 (天然气价格最低时)			215
最高 (天然气价格最高时)			235
节约煤炭数量 (百万公吨)	1,009	74	75
年度直接总成本 (净值)			
最低			140
最高			160

资料来源: 兰德测算

中国正着力报废“黄标车”，即老旧、高污染的轿车和卡车。2012年仍在使用的黄标车中，超过三分之一将在2015年底报废，2017年底将全部报废。然而，尽快淘汰污染最严重的轿车和卡车还是大有裨益的。中国可能希望实施有限的旧车回购计划（类似

广东省东莞)，以加快这些车辆的报废。这样的计划耗时较短，因为现有法规要求，到2017年所有的黄标车必须淘汰。报废黄标车的一次性成本介于210亿美元至420亿美元(表S.2)。

表 S.2: 中国通过报废老旧机动车减少空气污染的一次性成本

报废老旧机动车	数量	价格 (2012年: 美元)	总成本 (2012年: 10亿美元)
假定所有老旧机动车均为轿车	1,450 万	1,430	21
假定所有老旧机动车均为卡车	1,450 万	2,860	42

资料来源: 兰德测算

鸣谢

我们谨此感谢唐氏基金会为本项研究提供赞助，同时感谢牵头编写本报告的 Michael Lostumbo 和兰德亚太政策中心顾问委员会对有关研究课题的支持。此外，衷心感谢 Xiao Wang 在早期给予的研究支持。Matthew E. Kahn 和 Nicholas Burger 提出的精辟见解，大大完善了报告。Debra Knopman 和 Michael Lostumbo 对于研究过程中的几个问题发表了有益的意见。Arwen Bicknell 和 Blair Smith 协助编制了最终文件，在此一并表达谢意。

缩略语

英热单位	指	英热单位 (BTU)
一氧化碳	指	一氧化碳 (CO)
国内生产总值	指	国内生产总值 (GDP)
吉瓦	指	吉瓦 (GW)
千瓦时	指	千瓦时 (KWh)
液化天然气	指	液化天然气 (LNG)
PM ₁₀	指	直径小于等于 10 微米的颗粒物
PM _{2.5}	指	直径小于等于 2.5 微米的颗粒物
人民币	指	人民币 (RMB)
总悬浮颗粒物	指	总悬浮颗粒物 (TSP)
μg/m ³	指	微克 / 每立方米
挥发性有机化合物	指	挥发性有机化合物 (VOC)
世界卫生组织	指	世界卫生组织 (WHO)

1. 引言

空气污染已成为中国过去三十年经济转型和发展所造成的最致命后果之一。尽管中国中央、省、市各级政府在治污领域已做出巨大努力，一些措施确实改善了空气质量，但空气污染仍然是一个严峻的问题。几乎在每一个主要的城市地区，污染物浓度都超出世界卫生组织提倡的标准。¹

中国政府一直在实施与其他工业化国家类似的防治污染政策措施：

1. 补贴或强制使用如天然气、核能和可再生能源等比燃煤排污更少的能源
2. 强制报废高污染排放的机动车、锅炉等设备
3. 在重点污染源和机动车上强制安装污染控制装置。

如果要改善城市空气质量，使污染物浓度不超过危害人体健康的水平，中国必须积极落实上述政策。然而，这些政策需要付出成本。在中国，天然气、核能和可再生能源比煤炭的成本更高，大规模替换将会增加电力成本。高污染的工厂和机动车必须关停和清理，这也将遭受经济损失。消费者和企业需要购买配有污染控制设备的车辆、设备和工厂，其中一些比高污染的车辆和装备花费更高。

研究目的

本报告旨在粗略估算中国广泛采取空气污染防治措施的潜在成本，并将这些估算与现阶段的成本相比较。本报告评估了以下三条可以充分降低城市地区主要污染物浓度的政策措施：

- 1、以天然气或丙烷替代煤炭用于住宅和商业采暖等用途

¹ 参见表 2.1 和 2.2，系基于世界卫生组织关于颗粒物、臭氧、二氧化氮和二氧化硫的空气质量准则编制。

- 2、使用可再生能源和核能替代燃煤发电
- 3、报废缺少污染控制装备的老旧车辆。

本报告的组成结构

第二章描述了中国的空气污染程度，重点是以下几个方面：主要城市地区的空气质量，总排放量和污染源，以及不良空气质量导致的健康成本。第三章回顾了上述三种政策选择，量化了燃料替换以及亟需报废的车辆数目。第四章估算了这些政策措施的成本，并总结了对净收益的论述。

2. 问题

中国经济的迅速增长不仅提高了国民收入，也导致大面积的空气、水和土壤污染。环境污染的代价愈发沉重，在过去十年接近国内生产总值的 10%。这一比例比日本和韩国等亚洲发达国家高出数倍，也远高于美国的水平。² 其中，空气污染的代价占了大部分，2000 年至 2010 年间占中国国内生产总值的 6.5%；水污染成本和土壤退化成本分别占国内生产总值的 2.1% 和 1.1%。³ 尽管有报道称污染程度有所下降，但随着中国国民收入的提高，污染的代价也将上升。⁴ 城市化也正在加剧污染的代价，因为更多人受到劣质空气的危害。⁵

空气污染的代价高昂，是由于对人体健康的影响。表 2.1 显示世界卫生组织关于主要污染物的空气质量标准。世界卫生组织建议：直径小于等于 10 微米的颗粒物 (PM₁₀) 日常浓度年平均限值不超过 20 μg/m³；直径小于等于 2.5 微米的颗粒物 (PM_{2.5})，对人体健康更有害，日常浓度年平均限值不超过 10 μg/m³（表 2.1）；二氧化硫的 24 小时平均浓度不超过 20 μg/m³；氮氧化物的日常浓度年平均限值不超过 40 μg/m³。如表 2.2 所示，中国所有主要城市均超过世界卫生组织的标准，只有少数几座城市的氮氧化物浓度达标；大部分城市的 PM₁₀ 日平均限值超标 5 倍以上。

² 世界银行和中华人民共和国国务院发展研究中心，《2030 年的中国：建设现代、和谐、有创造力的高收入社会》，华盛顿特区：世界银行，2012 年，第 39 页；Nicholas Z. Muller 和 Robert Mendelsohn，《美国空气污染损害测量》，新泽西州普林斯顿：耶鲁大学林业与环境研究院，2007 年 1 月 9 日。

³ 世界银行等，2012 年，第 39 页；环境保护部和中国工程院，《中国环境宏观战略研究：环境要素保护战略卷》，北京：中国环境科学出版社，2011 年。

⁴ 随着收入的增长，污染的代价也在增加。工人的生产效率更高，收入也更高，所以，当他们生病不能工作时，就会付出更大的代价。有关经济增长造成污染代价日益上升的讨论，请参阅 Nicholas Z. Muller, Robert Mendelsohn 和 William Nordhaus, “美国经济之环境污染核算”，《美国经济评论》，第 101 卷，第 5 期，2011 年，第 1649–1675 页；以及 Dora L. Costa 和 Matthew E. Kahn, “生命价值的变化，1940–1980”，《风险与不确定性杂志》，第 29 卷，第 2 期，2004 年，第 159–180 页。

⁵ 有关城市化的污染成本含义的讨论，请参阅 Ying Zhou, Jonathan I. Levy, John S. Evans 和 James K. Hammitt, “中国现有电厂分布对健康造成的影响”，《环境国际》，第 32 卷，第 3 期，2006 年，第 365–373 页。

如果不能将空气污染物浓度降低到世界卫生组织的标准之下，在健康方面将付出重大代价。最近的一项研究发现，在中国，每立方米总悬浮颗粒物（各种尺寸，包括 PM₁₀ 和 PM_{2.5}）的年平均含量每增加 100 微克，预期寿命减少 3.0 岁。⁶ 该研究还发现，在总悬浮颗粒物含量极高的北方地区（空气质量往往是最差的），预期寿命比南方地区平均减少 5.5 岁，而南方地区本身污染就比较严重。除了对人体健康的影响，空气污染还引发了其他代价，包括农业用地退化，危害森林、植物、牲畜和野生动物，侵蚀楼房和其他建筑的外墙。

表 2.1：世界卫生组织的空气质量标准

		年平均值	24 小时平均值	8 小时平均值
颗粒物	PM _{2.5}	10 µg/m ³	25 µg/m ³	
	PM ₁₀	20 µg/m ³	50 µg/m ³	
臭氧				100 µg/m ³
二氧化硫			20 µg/m ³	
氮氧化物	二氧化氮和 其他含氮化合物	40 µg/m ³		

资料来源：世界卫生组织关于颗粒物、臭氧、二氧化氮和二氧化硫的空气质量准则：2005 年全球更新版，瑞士，日内瓦；世界卫生组织，2006 年。

⁶ 陈玉宇、Avraham Ebenstein, Michael Greenstone 和李宏彬，“空气污染对预期寿命的长期影响：基于中国淮河取暖分界线的证据”，《美国国家科学院院刊》，2013 年 5 月 28 日。

表 2.2: 2011 年中国选定城市的平均空气污染物浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

城市	颗粒物 (PM ₁₀)	二氧化硫	氮氧化物
世界卫生组织标准	年平均值 (每日: 20)	日常平均值 (20)	年平均值 (每日: 40)
北京	113	28	56
天津	93	42	38
哈尔滨	99	41	46
上海	80	29	51
南京	97	34	49
合肥	113	22	25
武汉	100	39	56
长沙	83	40	47
广州	69	28	49
重庆	93	38	31
成都	100	31	51
西安	118	42	41

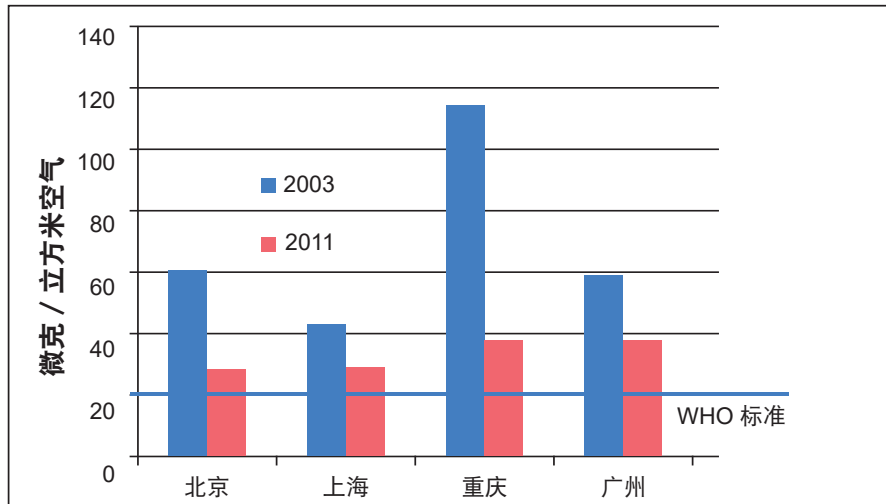
资料来源: 《中国统计年鉴》, 2012 年, 表 12-19

趋势

根据中国的统计数据, 过去 10 年, 中国大部分城市的空气质量有所改善。⁷ 图 2.1 显示以二氧化硫浓度测定的空气质量趋势, 图 2.2 显示中国四个最大城市: 北京、重庆、广州和上海的空气中氮氧化物趋势。根据中国官方统计数据, 2003 年以来, 这四个城市每立方米空气中二氧化硫和氮氧化物的年平均浓度已经下降。尽管如此, 总悬浮颗粒物、氮氧化物和二氧化硫的浓度仍超过世界卫生组织的标准。中国采用年平均污染物浓度值来测量污染水平, 这并非是测量空气质量的最佳方式; 世界卫生组织设定了 24 小时标准和 8 小时标准 (表 2.1)。重度污染的天数是另一项重要指标。

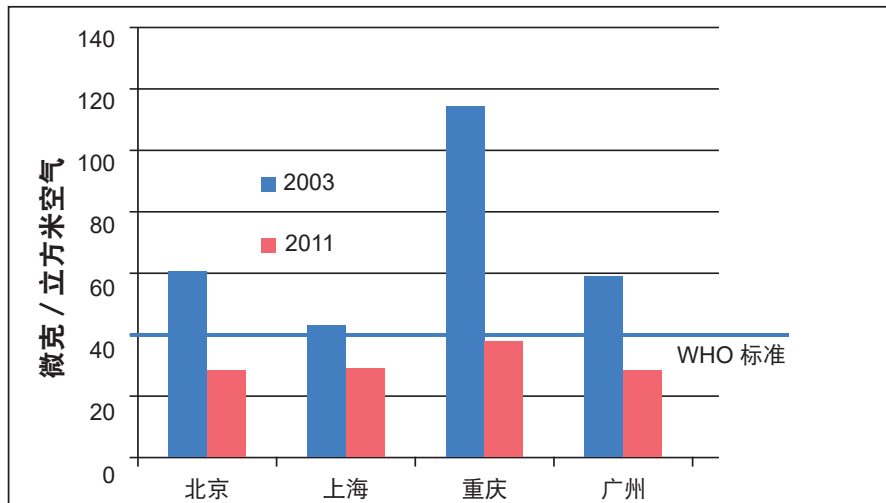
⁷ 《中国统计年鉴 - 2012》, 表 12-19

图 2.1: 中国最大城市的平均二氧化硫浓度



资料来源: 《中国统计年鉴》, 2004 年和 2012 年, 表 12-19

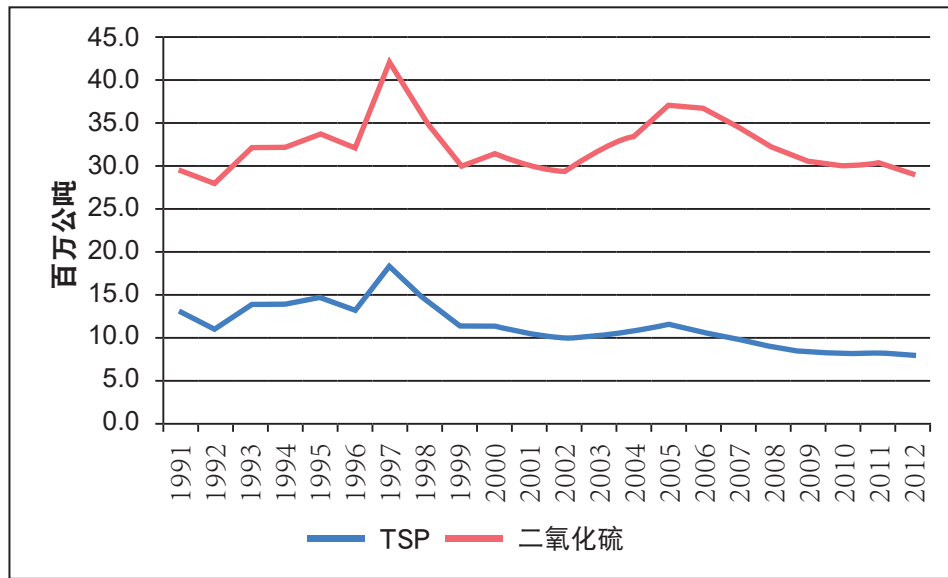
图 2.2: 中国最大城市的平均氮氧化物浓度



资料来源: 《中国统计年鉴》, 2004 年和 2012 年, 表 12-19

图 2.3 显示了全中国的二氧化硫和总悬浮颗粒物排放量 (以百万吨计), 可见空气质量有所改善。总悬浮颗粒物和二氧化硫的总量自 2005 年以后分别下降 32% 和 17%。

图 2.3: 中国总悬浮颗粒物和二氧化硫的排放量 (1991–2012)



资料来源:《中国统计年鉴》, 1995年, 2000年, 2005年, 2010年和2014年, 表 12-15

图 2.1-2.3 是以中国官方统计数据为基础。一些研究表明, 中国的空气污染数据存疑。在部分城市, 官员为了满足监管目标而捏造污染数据。⁸ 有关氮氧化物和二氧化硫的排放数据可能被低估。O' HARA 等人发现, 2003 年中国的二氧化硫排放量或比官方统计数据高出 70%。⁹ 如果污染物排放量和浓度存在少报现象, 我们建议减少的煤炭使用量会导致减排更多、空气质量改善更大。

污染来源

从图 2.4 可见, 中国大部分的二氧化硫排放来自发电厂, 加上水泥厂和冶金厂的排放量, 几乎占二氧化硫总排放量的四分之三。在中国, 煤炭是排放这些污染物的主要燃料, 大部分的二氧化硫和总悬浮颗粒物都是燃煤导致的。1990 年至 2010 年间, 中国的煤炭消费量翻了两番。¹⁰ 尽管如此, 燃煤电厂的总悬浮颗粒物排放同期却减少近 40%, 原因是中

⁸ 陈玉宇、金哲等人, “空气污染数据的博弈: 来自中国的教训”, 《伯克利经济分析与政策杂志》第 12 卷, 第 3 期, 2012 年; 安雪峰, “矛盾的空气质量数据: 北京的“蓝天”数和 PM₁₀ 浓度”, 《环境研究快报》, 第 3 卷, 第 3 期, 2008 年; D. Ghanem 和 J. Zhang, “‘完美呈现: ’中国城市污染数据是否造假?” 《环境经济学与管理杂志》, 第 68 卷, 第 2 期, 2014 年。

⁹ T. O' Hara 等人, “1980-2020 年期间亚洲人为污染源之排放清单”, 《大气化学与物理学》, 第 7 卷, 第 16 期, 2007 年, 第 4419-4444 页。

¹⁰ 《中国统计年鉴》, 2011 年, 2012 年, 表 7-5

中央政府强制要求燃煤电厂安装袋式除尘器和洗涤器以减少污染物排放量。¹¹ 然而，发电厂的二氧化硫排放量却增加了 31%，总悬浮颗粒物的浓度仍然居高不下。¹² 工业和建筑业产生的粉尘也急剧下降，1991 年至 2012 年间的降幅达三分之二，原因是市级政府采取措施减少施工造成的粉尘，强制要求自卸卡车安装顶盖并保持建筑工地和街道的整洁。

在中国的城市地区，家庭和小企业的总悬浮颗粒物排放比例失调，特别是与其消耗的能源份额相比。[《中国统计年鉴》，2011 年，2012 年，表 7-5。] 主要问题是住宅和商业用户使用煤炭、工业和生活垃圾、木材和生物质作为采暖燃料，排放了大量的污染物。历史上，中国政府为家庭用户提供低于成本价（有时甚至免费）的煤炭，用于取暖和烹饪。2011 年，家庭和商业用户共烧掉 1.14 亿吨煤，占全国当年煤炭消费总量的 3.2%（1.14 亿吨煤相当于美国 2011 年煤炭消费总量的 12.6%）。[《中国统计年鉴》，2012 年，2013 年，表 12-15；美国能源情报署，《国际能源展望》，2014a。] 而燃烧这部分煤炭的锅炉和炉灶缺乏有效的污染控制设备。另外，小企业和家庭对塑料、废弃化学品和油料等的处置方式，经常是在户外和家用炉灶中一烧了之。这些废弃物大都没有充分燃烧，释放出大量有毒物质，如多环芳香族碳氢化合物。另一方面，城乡地区的农业活动也造成了过高浓度的总悬浮颗粒物：农作物收获之后，农民经常就地焚烧杂草和秸秆，排放出大量的总悬浮颗粒物。

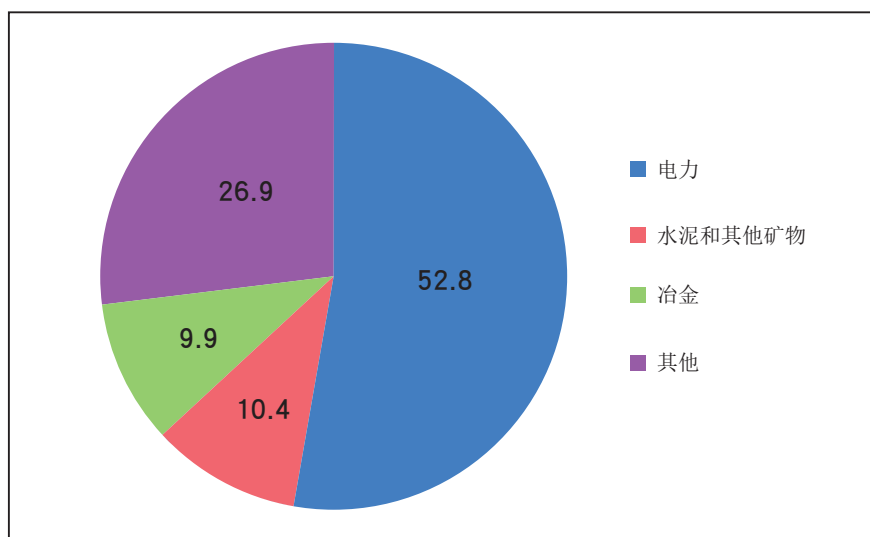
¹¹ 袋式除尘器是一种织物过滤器，当废气通过织物时，可以阻留废气中的颗粒物。过滤器从过滤到清洗分阶段循环工作。在清洗阶段，织物表面累积的粉尘会被清除，进行沉积处理。洗涤器通常使用水性溶液清除燃煤设施排出的废气流中的颗粒物和二氧化硫。《中国环境统计年鉴》，2005 年，2006 年，2007 年，2008 年，2009 年和 2010 年，废气排放和处理表。

¹² 《中国环境统计年鉴》，2005 年，2006 年，2007 年，2008 年，2009 年和 2010 年，废气排放和处理表。

¹³ 《中国统计年鉴》，2011 年，2012 年，表 7-5。

¹⁴ 《中国统计年鉴》，2012 年，2013 年，表 12-15；美国能源情报署，《国际能源展望》，2014a。

图 2.4: 2010 年主要污染源二氧化硫排放比例



资料来源:《中国环境统计年鉴》, 2010 年, 废气排放和处理表。

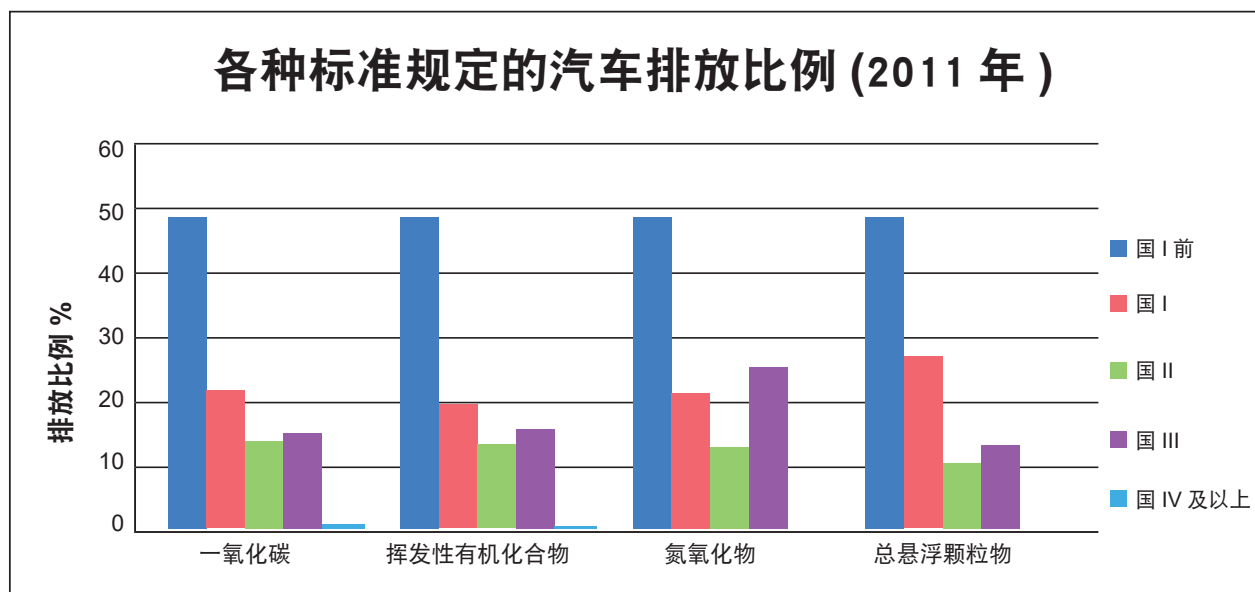
中国的汽车数量从 2004 年的 1,740 万辆上升至 2011 年的 7,480 万辆。¹⁵ 自 2011 年以来, 每年新增 2,000 万辆汽车。其中, 卡车数量的增长稍慢, 从 2004 年到 2011 年 (1,790 万辆) 翻了一番。¹⁶ 随着汽车和卡车数量的增加, 机动车日渐成为中国城市的空气污染源, 尤其是氮氧化物、挥发性有机化合物以及柴油发动机排放的总悬浮颗粒物。中国采用欧盟的汽车和卡车排放标准。经过一段时间, 欧盟会强化排放标准; 每发布一套更加严格的排放标准, 都指定一个编号。当前的排放标准是第五套, 称为欧 5/V 标准, 今年将要推出欧 6/VI 标准。中国也与时俱进, 逐步强化本国排放标准。中国的第一套排放标准是国 I 标准, 对应欧 1/I 标准; 现行标准为国 IV 标准。这些标准对汽车的一氧化碳、挥发性有机化合物、氮氧化物和总悬浮颗粒物等排放设定限制。因为所有出售的新车必须安装污染控制设备, 而且是在汽车装配厂安装, 新车的污染排放必然符合上述标准。¹⁷ 随着时间的推移, 中国检查机制可能无法确保汽车持续符合相关的排放标准。但是, 如图 2.5 所示, 大部分污染排放来自没有安装污染控制设备的老旧机动车。

¹⁵ 《中国统计年鉴》, 2012 年, 2013 年, 汽车存量。

¹⁶ 《中国统计年鉴》, 2012 年, 2013 年, 汽车存量。

¹⁷ 中华人民共和国环境保护部, 新生产机动车环保管理——《2014 年中国机动车污染防治年报》, 第 III 部分。

图 2.5: 依据污染控制技术得出的机动车排放污染源



资料来源：根据《中国统计年鉴 - 2012》的数据计算；中华人民共和国环境保护部，2014 年。

3. 解决方案

许多国家已经成功地大大减少空气污染。根据官方统计数据，中国在减少总悬浮颗粒物、二氧化硫和氮氧化物的排放方面已经取得一些进展，正如前一章图 2.1 和 2.2 所示，主要城市的空气质量有所改善。即便如此，中国的空气颗粒物污染仍高于美国在 1970 年通过《清洁空气法》之前的水平。¹⁸ 尽管所有发达国家都成功地减少了空气污染，却从未有哪一个国家面临像中国这样艰巨的治理任务。

在中国和其他国家已经取得成效的减少空气污染的措施包括：

- 1) 用天然气或丙烷取代住宅和商业用煤
- 2) 在主要污染源安装和运行污染控制设备
- 3) 关闭燃煤电厂，以使用如天然气、核能或可再生能源等清洁燃料的电厂代替之
- 4) 强制新机动车安装和运行污染控制设备，同时淘汰缺少这种设备的老旧车辆
- 5) 关闭那些安装污染控制设备缺乏经济性或位于人口稠密地区的工厂。

中国已经采纳上述全部政策。在本报告中，我们作出了一定程度的数量级估算，确定部分治理措施亟需扩大实施范围，才可能让中国城市的空气质量进一步改善。

用天然气或丙烷取代住宅和商业用煤

中国城市的空气质量想要达到世界卫生组织的标准，住宅和商业用户必须终止在城区燃烧煤炭、生物质和塑料垃圾的做法。在人口聚集地附近，在户外或家用炉灶中每燃烧一公斤的生物质和垃圾，就会产生大量的污染物。¹⁹ 而在中国城市地区，许多这样的锅炉和炉灶都没有安装污染控制设备。鉴于这些用户单位既陈旧、规模又小，通过安装并运行污染控制设备使排放水平降至世界卫生组织的空气质量标准，要么不可行，要么成本远高于搬迁到较大的单位使用替代能源。另外，也很难确保这些小单位的正常运行。

¹⁸ 根据来自 Chen、Ebenstein、Greenstone 和 Li, 2013 年的信息计算。

¹⁹ 美国环境保护署，“户外焚烧的隐患”，华盛顿特区，2003 年。

过去几十年，大部分国家的经验表明，必须用天然气或其他燃料产生的电热替换煤炭供暖，方可有效地减少住宅和商业用户使用锅炉造成的污染排放。在上个世纪，伦敦和布达佩斯强制规定用天然气或其他燃料替换煤炭供暖，作为减少空气污染的一种手段。北京也已经开始使用燃气发电厂替换城中所有的燃煤电厂（包括热电厂）。所有的燃煤电厂将在 2014 年底前关闭。²⁰

燃烧天然气或丙烷几乎不排放任何颗粒物或二氧化硫，尽管的确会排放氮氧化物和一氧化碳。如果中国城市的所有锅炉都用天然气替换煤炭、生物质、或塑料等垃圾作为燃料，城市的颗粒物和二氧化硫浓度将会大幅下降，正如美国和欧洲的城市一样。

市、区级政府必须推行这一措施。大城市的市政府，特别是北京——其空气污染已成为严重的政治问题，已表明其政治意愿并拨付必要的资金来执行上述措施，至少是针对公寓楼和商业场所。中国政府已经对污染“宣战”，而小城市的市政府却处于两难境地：一方面，由于财力不如上海和北京等大城市，小城市更不愿意把相关成本强加给企业；但另一方面，他们也面临实施污染减排措施的压力。²¹ 出于习惯和成本的考虑，许多家庭和单位可能会抵制用天然气或丙烷替代煤炭和垃圾的做法，特别是他们需要购买新的锅炉或炉灶具，还要接入天然气管网。在这种情况下，地方政府就需要确认有收受贿赂倾向的检查员的工作。²² 另一条必要措施是设立热线电话或其他方式，供市民举报违规行为。

表 3.1 显示了我们评估的中国为了完全替代当前住宅和商业用户所用煤炭需要额外采购的天然气数量。（为便于计算，我们只选择了天然气，没有包括丙烷，但在东亚地区，这两种燃料的每个英热单位成本相当。）为了计算这些数字，我们假设一个标准公吨煤炭的能量为 2,780 万英热单位，一千立方米天然气的能量为 3,610 万英热单位。²³ 然后，

²⁰ 美国能源情报署，网页，2014 年 2 月 b。

²¹ Michael Martina 等人，《总理号召：中国坚决向污染“宣战”》，2014 年 3 月 5 日。

²² Yuan Xu, “中国燃煤电厂的二氧化硫洗涤器作业改进”，《环境科学与技术》，第 45 卷，第 2 期，2011 年，第 380–385 页。

我们假定家庭和商业用户使用一个英热单位的天然气可替代一个英热单位的煤炭。这个假设偏保守，预期住宅或商业用户的新式天然气炉比燃煤锅炉的能源效率更高。

表 3.1：用天然气取代住宅和商业用煤

用途	煤炭用量 (百万吨标准煤当量)	等效转化值 (千立方米 / 公吨)	等效天然气 (10 亿立方米)
商业	22.1	0.77	17.0
住宅	92.1	0.77	70.8
合计	114.2		87.8

资料来源：《中国统计年鉴 - 2013》，表 8-5；美国能源情报署，《能量等效转化》，网页，日期不详。

2011 年，中国的煤炭消费总量达 36.1 亿吨标准煤当量，其中家庭和商业用户占 1.14 亿吨（占消费总量的 3.2%）。因为燃烧这部分煤炭的锅炉和炉灶往往缺乏污染控制设备，而且煤炭是在市内燃烧，用天然气取代煤炭将对改善城市空气质量起到不同寻常的作用；城市地区总悬浮颗粒物和二氧化硫浓度的下降幅度将远不止 3.2%。

但如此一来，中国需要额外采购 880 亿立方米的天然气。这个数量非常巨大，特别是考虑到中国 2012 年的天然气消费总量为 1,470 亿立方米——意味着要落实此项政策措施，需要在当年天然气消费总量的基础上增加采购 60% 的天然气。这个增量相当于美国 2012 年天然气消费总量的 13%。而据中国预测，到 2015 年天然气供应（包括国内产量和进口）将增加 480 亿立方米。除当前计划的增量外，中国还必须多生产或进口 400 亿立方米的天然气，方可替代家庭和商业用户目前的全部煤炭消费量。²⁴

²³ 美国能源情报署，日期不详。

²⁴ 美国能源情报署，2014b。

安装并运行污染控制设备，用清洁燃料替换煤炭发电

大约 90% 的中国燃煤电厂安装了污染控制设备，以减少二氧化硫的排放。²⁵ 该设备已经帮助中国减少了污染物的排放（图 2.3）。得益于新型超临界和超超临界燃煤电厂的效率越来越高，外加洗涤器的安装和使用，中国现在的燃煤电厂每千瓦时二氧化硫排放量比美国要少。中国较新的发电厂使用市面上最先进的污染控制技术，还安装了污染控制设备以减少颗粒物的排放。中国 90% 的燃煤电厂运用静电沉淀法减少颗粒物的排放；其余 10% 的燃煤电厂使用袋式除尘器。从 1980 年至 2012 年，这些措施将燃煤电厂的颗粒物排放从每千瓦时 16.5 克降到每千瓦时 0.39 克。²⁶

即使燃煤电厂配上污染控制设备，也难以杜绝二氧化硫和颗粒物的排放。如表 2.2 所示，中国主要城市的平均 PM_{10} 水平仍然是世界卫生组织认定的符合人体健康标准的五倍之高。大部分城市的二氧化硫和氮氧化物的浓度也远远超过世界卫生组织的标准。

为了降低颗粒物和二氧化硫的浓度，几乎所有的国家都是多管齐下：用轻污染燃料替代煤炭，以及在燃煤电厂安装污染控制设备。中国半数的煤炭消费总量用于发电，而这些燃煤电厂的二氧化硫排放量也占了一半（图 2.3）。为了使空气污染物水平达到世界卫生组织的标准，中国可能不得不使用如天然气、核能、风能或、太阳能等轻污染能源来发电，以取代大量的燃煤电厂，特别是那些位于或靠近主要人口聚集地的燃煤电厂。大部分致力于空气污染治理的国家大都采用这一策略。

2012 年，中国 79% 的电力（3.91 万亿千瓦时）是由化石燃料产生，几乎全部来自燃煤电厂。²⁷ 美国在 2013 年的比例为 40%，这也是工业化国家比较普遍的比例。中国要降到这一比例，必须将其燃煤发电量减少 39%，即 1.918 万亿千瓦时。以 2012 年的估计

²⁵ 潘荔计算，《中国燃煤电厂大气污染物控制现状分析》，中国电力企业联合会研究室（电力环保与应对气候变化中心），2014 年 5 月。

²⁶ Li, 2014 年。

²⁷ Li, 2014 年。

数据为基准，电力行业每年的煤炭消费量须从 18.24 亿公吨缩减至 9.29 亿公吨，即减少 49%。如果首先淘汰表现最差的燃煤电厂，该政策将使中国的颗粒物和二氧化硫总排放量减少 25% 以上（一半的煤炭消费总量有半数用于发电）。

我们估计，中国停止用煤炭进行住宅和商业供暖连同其他用途势必导致天然气的用量剧增。液化天然气的全球供应量有限，而成本是另一个因素。未来几年，如果中国通力减少家庭和商业部门的煤炭用量，预计天然气在替换煤炭发电方面不会起到实质性作用。我们认为，要减少煤炭发电使用量，中国必须以可再生能源或核能替代之。

2012 年中国水力发电 0.866 万亿千瓦时，占全国总发电量的 17.4%。中国计划将水力发电能力从 249 吉瓦增加到 325 吉瓦。²⁸ 这将使水力发电能量增加 0.264 万亿千瓦时，相当于 2012 年燃煤电厂发电量的 5.3%。2012 年风力发电 0.102 万亿千瓦时。截止至 2012 年，中国上网风电装机容量为 61 吉瓦，而且仍在迅速增长，计划到 2015 年上网风电装机容量总计达 100 吉瓦。这将新增 0.064 万亿千瓦时的发电能力，相当于 2012 年燃煤电厂发电量的 1.6%。太阳能发电仍然是一种边缘能源，截止至 2012 年的装机容量只有 3 吉瓦。但是，中国政府计划到 2015 年将太阳能发电能力扩大到 35 吉瓦。

风能和太阳能发电是间歇性的。风速起伏不定，有时甚至根本无风。日落后太阳能电池便停止运行，碰上阴雨天气发电量极少。当间歇性的可再生能源供电比例变大时，电网运营商很难保持平稳的电力供应。基于业内的讨论，我们凭概测法把风能或太阳能发电量占中国电力供应量的比例限制在 20% 以内；超过这个阈值，电网管理就会遇到困难。中国的风力发电量要达到 0.996 万亿千瓦时（即 2012 年用电量的 20%），需要再增加 540 吉瓦的装机容量——前提是与目前情况一样，增加的装机容量与发电量相当。这个数字接近当前风能和太阳能发电装机总量的 9 倍。

当然，也可以兴建核电站来代替目前的燃煤电厂。如果水电和风电分别再增加 0.264 万亿千瓦时和 0.894 万亿千瓦时，就意味着核电站的发电量必须达到 0.658 万亿千瓦时（即 2012 年中国发电量的 15.2%），只有这样中国才能实现燃煤发电减少 39% 的目标。2012 年，

²⁸ 美国能源情报署，2014b。

中国只有 2.0%（0.098 万亿千瓦时）的用电量来自核电。我们估计，2012 年中国核电站的产能利用率为 90%，略高于美国同期的 86%。²⁹ 依照 2012 年的情况计算，中国核电装机容量需要再增加 84 吉瓦，而当前的目标是到 2020 年增加 58 吉瓦。³⁰

综上所述，表 3.2 显示中国如何利用可再生能源和核能取代原本由燃煤电厂供应的 1.918 万亿千瓦时电力。我们注意到，这些估算是基于 2012 年的发电量得出。尽管在 2013 年和 2014 年中国用电量增长急剧放缓，我们所讨论的扩产计划是建立在需求持续增加的基础上。增加的需求要通过表 3.2 以外的新增产能来满足。

表 3.2: 用核能和可再生能源替代燃煤电厂供应的 1.9 万亿千瓦时电力

燃料	新增装机容量 (吉瓦)	新增发电量 (万亿千瓦时)	相比 2012 年增量 (%)
水电	76	0.264	31
风电	540	0.894	890
核电	84	0.758	769
合计	700	1.918	

资料来源：兰德根据《中国统计年鉴 - 2013》表 8-6 测算；美国能源情报署，2014B；和 LI，2014 年。

在机动车上安装污染控制设备并报废老旧车辆

机动车已成为中国空气污染快速增长的来源，尤其是氮氧化物的排放。如前所述，中国通过引进和执行更严格的欧盟空气污染标准来解决这一问题。在中国出售的机动车大部分是由外国汽车公司与中国公司合资生产，³¹ 这意味着国内制造商能获得外国生产商

²⁹ 根据核能发电量和发电能力数据计算得出中国的数据，《中国统计年鉴 - 2013》；美国的数据来自美国能源情报署，《一个标准核电站的发电量有多大？》，网页，2013 年 12 月更新 b。

³⁰ 美国能源情报署，2014b。注意：假设新增容量仅用于替换 2012 年在运行的燃煤电厂。其中并无考虑中国可能增长的电力需求，这需要额外的装机容量来满足。

³¹ Angelo Young, “2013 年中国新车销量：2013 年中国市场汽车销量突破 2,000 万，外国汽车厂商竞相角逐”，《国际财经时报》，2014 年 1 月 7 日。

的污染控制技术，而且在机动车上安装污染控制设备不存在技术壁垒问题。所有中国汽车在设计上都能够满足欧盟排放标准。中国已经掌握最严格的污染控制技术并已经在优先实施减排政策的北京等城市出售的汽车上安装应用。

但是，只有当使用的燃料符合规定标准时，这些技术才会有效地发挥作用。中国国家发展和改革委员会已经就低硫汽柴油制定了严格的规范，因此，污染控制技术可以发挥预期的作用。2014 年底，中国已全面采用欧盟关于运输燃料的欧 4/IV 标准；上海、北京地区销售的机动车燃料已采用欧 5/V 标准，预计于 2017 年底在全国范围采用欧 5/V 标准。³²

如图 2.3 机动车排放源所示，只有高污染车辆被淘汰之后，上述措施才能大幅度减少污染排放。在中国，达标情况最差的车辆被贴上黄色环保标志，称之为“黄标车”。为了显著减少机动车排放，中国需要报废所有未安装污染控制设备或者仅有简陋设备（比如国 I 设备）的车辆。2012 年，中国共有 14,514,000 辆黄标车。³³ 中国政府已承诺到 2015 年报废其中的 5,000,000 辆，其余的到 2017 年全部报废。³⁴ 如图 2.5 所示，若以 2009 年的汽车污染排放计算，报废未安装污染控制设备或者仅有国 I 设备的机动车，一氧化碳排放将减少 70%，挥发性碳氢化合物排放将减少 70%，氮氧化物排放将减少 61%，颗粒物排放将减少 76%。

³² 美国能源情报署，“中国”，2014b。

³³ 环境保护部，2014 年。

³⁴ 环境保护部，2014 年。

4. 减少空气污染的成本

我们注意到，中国因为空气污染付出的代价估计占中国国内生产总值的 6.5%。中国 2012 年的国内生产总值为 8.277 万亿美元（我们的很多分析是基于这一年的数据），这意味着若中国的空气污染降至世界卫生组织认可的水平，将每年带来 5,350 亿美元的收益。随着中国的国民收入和城市化水平不断提高，上述代价还在上升。尽管我们提出的措施不一定能够使空气质量达到世界卫生组织认可的水平，但肯定可以大大改善中国的空气质量。在城市地区的住宅和商业用户停止燃烧煤炭和垃圾这一措施，尤其见效。

采纳上述措施将大幅度削减中国的煤炭消费量。若把 2012 年的住宅和商业用煤以及大约一半的发电用煤替换掉，煤炭用量将减少 1.009 百万公吨，这相当于中国当年煤炭消费量的 27%。以边际成本估计（比如，进口煤炭的成本，2012 年为每公吨 74 美元），煤炭用量下降将使当年煤炭方面的开支减少 750 亿美元。³⁵

我们估算了中国治理空气污染三大措施的成本：

1. 用天然气或丙烷取代住宅和商业用煤
2. 使用可再生能源和核能替代燃煤发电
3. 报废老旧车辆。

用天然气或丙烷取代住宅和商业用煤

公寓楼和商业场所供暖用的锅炉和火炉所排放的污染物是中国城市空气污染的主要来源。用天然气或丙烷取代煤炭之后，这种情况会大有改观。2011 年，住宅和商业用煤为 1.14 亿吨。为了取代煤炭，中国需要耗费 880 亿立方米（折合 7.84 万亿立方英尺）的天然气或丙烷。2012 年，中国天然气平均价格为 360 美元 / 立方米（折合 10.20 美元 / 立方英尺）；由于东亚地区对液化天然气的需求增加，2013 年天然气的价格上涨至 587 美元 / 立方米（折合 16.60 美元 / 立方英尺）。³⁶ 按 2012 年的平均价格计算，额外采购 2,210 亿立方米天然

³⁵ 兰德测算，根据美国能源情报署，《煤炭季报》，2014 年第二季，2014c，表 10。

³⁶ 美国能源情报署，《中国》，2014 年 5 月 b。

气的成本为 800 亿美元；按最高价计算，成本为 1,300 亿美元。表 4.1 列出了上述年度成本。

表 4.1：中国治理空气污染政策措施的年度成本

政策措施	数量	价格 (2012 年：美元)	总成本 (2012 年：10 亿美元)
用天然气取代住宅和商业用煤			
2012 年东亚液化天然气的平均价格	880 亿立方米	360 / 立方米	32
2012 年东亚液化天然气的最高价格	880 亿立方米	587 / 立方米	52
使用其他能源替代燃煤发电			
水电	0.26 万亿千瓦时	90.30 / 1,000 千瓦时	24
风电	0.89 万亿千瓦时	86.60 / 1,000 千瓦时	78
核电	0.76 万亿千瓦时	108.40 / 1,000 千瓦时	82
合计			184
总计			
最低（假定天然气价格最低时）			215
最高（假定天然气价格最高时）			235
节约煤炭数量（百万公吨）	1,009	74	75
年度直接总成本（净值）			
最低			140
最高			160

资料来源：兰德测算

使用可再生能源和核能替代燃煤发电

电力成本的驱动因素视乎不同来源差别很大。例如，风电成本由安装风力发电机的资金成本决定；天然气发电厂的成本以天然气的成本为主；核电成本则取决于建筑成本，燃料成本相对不会太高。

为了估计上述三种能源（水电、风电和核电）替代燃煤发电的成本，我们采用了每种电力的平准化成本。平准化成本指发电厂生命周期内产生每千瓦时电量的平均成本，即发电厂生命周期内发电总量与兴建发电厂的资金成本之比。美国能源情报署定期估算这些电力来源的平准化成本。

我们假定新增水电可承担 0.264 万亿千瓦时的燃煤发电量，新增风电可承担 0.895 万

亿千瓦时，新增核电可承担 0.758 万亿千瓦时。据美国能源情报署估计，2012 年新增水电成本为 90.30 美元 / 1,000 千瓦时，陆地风电成本为 86.60 美元 / 1,000 千瓦时，先进核电成本为 108.40 美元 / 1,000 千瓦时。³⁷ 尽管因为工资差别和可能较快的许可程序，中国的成本可能多少有些不同，但我们认为，成本上的相似之处可确保这些数据的有效性。在这个领域，中国使用与美国公司类似的技术、材料、（许多情况下）乃至设备。继日本福岛核电站事故之后，中国核电站已建成和运行的反应堆采用了与美国类似的检查、许可和安全作业程序。基于这些成本估算，若在 2012 年使用这些能源供应预定电量，其年度成本分别为 239 亿美元、775 亿美元和 822 亿美元。

报废老旧车辆

如图 2.4 所示，大部分的机动车污染排放来自配有简陋设备或者没有污染控制设备的车辆。2012 年，中国共有 14,514,000 辆“黄标车”。尽管中央政府已决定到 2015 年强制报废其中的 5,000,000 辆，其余的到 2017 年全部报废，立即报废这些黄标车可以从实质上减少污染排放。这些车辆大部分都已经完全折旧，转售价值有限。广东省东莞市已推出一项收购和报废这些老旧车辆的计划。东莞对轿车的最高收购价为人民币 9,000 元，对卡车的最高收购价为人民币 18,000 元，以 2012 年的美元汇率分别折合 1,430 美元和 2,860 美元。如果中央政府在全国范围内推行东莞的计划，用上述单价乘以剩余“黄标车”的数量得出总成本，即中国立即报废这些车辆需要花费 210 亿美元到 420 亿美元（表 4.2）。需要注意的是，与使用天然气等燃料替代煤炭相比，立即报废“黄标车”的成本是一次性成本。

表 4.2：中国通过报废老旧机动车减少空气污染的一次性成本

报废老旧机动车	数量	价格 (2012 年：美元)	总成本 (2012 年：10 亿美元)
假定所有老旧机动车均为轿车	1,450 万	1,430	21
假定所有老旧机动车均为卡车	1,450 万	2,860	42

资料来源：兰德测算

³⁷ 兰美国能源情报署，“《2013 年度能源展望》中新电源类型的平准化成本”，2013 年 1 月 a。

净收益

如表 4.1 和 4.2 所示，上述措施是要付出一定代价的。以天然气代替煤用于住宅和商业采暖，每年的经常性成本为 320 亿美元至 520 亿美元；用可再生能源或核能取代半数燃煤发电量的成本为 1,840 亿美元——每年的经常性成本合计为 2,150 亿美元至 2,350 亿美元。除去由此节省的煤炭成本（750 亿美元），年度净成本总共为 1,400-1,600 亿美元。

上述措施均已获中国中央、市级政府的部分执行，这将使城市空气质量显著改善。颗粒物、二氧化硫和氮氧化物的浓度将至少下降四分之一甚至更多，中国每年因空气污染造成的损失将得到实质上的减少。由此带来的净经济收益可能非常大。前两条措施的年度净成本不及估计空气污染代价的三分之一，2012 年空气污染的代价为 5,350 亿美元（占中国国内生产总值的 6.5%）。

我们不深入研究住宅和商业用煤、发电用煤或机动车在城市空气污染中占据的比例，因为除了数据可用性的限制外，气候、产业结构、机动车保有量以及地形的不同，使得各个城市空气污染的主要成因各不相同。尽管如此，我们认为在上述三条政策措施中，短期内应优先实施的是用天然气或丙烷取代住宅和商业用煤。燃烧煤炭、木材或垃圾的锅炉和炉灶是重要的污染排放源，在中国北方甚至危及人体健康和预期寿命，Chen 等人已经证明这一点。³⁸ 在城市地区停止使用这些燃料，将大大有助于减少城市空气污染，特别是在冬季。

该政策的成本主要由城市居民承担，其次是商铺等商业场所。不过，他们恰恰是受上述空气污染伤害最严重的群体。与其他国家一样，市政府对扩展天然气管网或购买新式炉灶的补贴可以缓解一些负担。该政策一年的成本介于 320 亿美元至 520 亿美元，城市居民人均每年负担约 50 美元至 100 美元，每月 4 美元至 9 美元。虽算不上微不足道，这项成本对于大部分的中国城市居民还是能够应付的。健康成本的下降（可以想见，抵消了政策成本）表明，此举无论从经济还是健康的角度都是非常有益的。

我们估计，使用水电、风电和核电替代一半的燃煤发电的成本为 1,840 亿美元。使用其他能源替代燃煤发电，是我们评估的三条政策措施中成本最高的，但这种措施却可以

³⁸ Chen, Ebenstein 等人，2013 年。

最大程度地减少总悬浮颗粒物和二氧化硫的总体排放。然而，它对城市空气质量的影响可能没有预期的减排效果那么大，因为中国大部分的发电厂不在城市地区。尽管燃煤电厂排放的污染物通过风力传播，成为决定城市空气质量的主要因素，但各城市范围内的空气污染源有着更直接的影响。因此，我们将该政策措施列为第二优先级，排在停止住宅和商业用煤之后。

相比停止住宅和商业用煤的政策，该政策的成本由更广泛的群体“埋单”。电力成本将上升，能源密集型制造业的盈利能力被削弱，中国所有家庭的能源成本增加。

最后，机动车的改进道路已经开启。中国正着力报废“黄标车”。2012年仍在使用的黄标车中，超过三分之一将在2015年底报废，2017年底将全部报废。然而，尽快淘汰污染最严重的轿车和卡车还是大有裨益的。在珠海等机动车是主要空气污染源的城
市，中国可能希望实施有限的旧车回购计划（类似东莞），以加快这些车辆的报废。这样的计划耗时较短，因为到2017年所有的黄标车必须淘汰，报废这些车辆的优势也随之消失。

参考文献

- Andrews, S. Q., “Inconsistencies in Air Quality Metrics: ‘Blue Sky’ Days and PM₁₀ Concentrations in Beijing,” *Environmental Research Letters*, Vol. 3, No. 3, 2008.
- Chen, Yuyu, Avraham Ebenstein, Michael Greenstone, and Hongbin Li, *Evidence on the Impact of Sustained Exposure to Air Pollution on Life Expectancy from China’s Huai River Policy*, Proceedings of the National Academy of Science, May 28, 2013. As of November 20, 2014: <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1300018110>
- Chen, Y., G. Z. Jin, et al., “Gaming in Air Pollution Data? Lessons from China,” *BE Journal of Economic Analysis & Policy* Vol. 12, No. 3, 2012.
- China Environmental Statistical Yearbook—See National Bureau of Statistics and Ministry of Environmental Protection of China.
- China Statistical Yearbook—See National Bureau of Statistics.
- Ghanem, D., and J. Zhang, “‘Effortless Perfection:’ Do Chinese Cities Manipulate Air Pollution Data?” *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 68, No. 2, 2014.
- Costa, Dora L., and Matthew E. Kahn, “Changes in the Value of Life, 1940–1980,” *Journal of Risk and Uncertainty*, Vol. 29, No. 2, 2004.
- EIA—See Energy Information Administration.
- Energy Information Administration, *Energy Equivalent Conversions*, web page, undated. As of November 20, 2014: <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/docs/units.cfm>
- , *The Transition to Ultra-Low-Sulfur Diesel Fuel: Effects on Prices and Supply*, SR/OIAF/2001-01, May 2011. As of April 2014: <http://www.walshcarlines.com/pdf/ulsd.pdf>
- , *Levelized Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2013*, January 2013a. As of May 15, 2014: http://www.eia.gov/forecasts/aeo/er/pdf/electricity_generation.pdf
- , *How Much Electricity Does a Typical Nuclear Power Plant Generate?* web page, updated December 2013b. As of May 7, 2014: <http://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=104&t=3>
- , *International Energy Outlook*, 2014a. As of May 2014: [http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2014\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2014).pdf)

- , *China*, web page, February 2014b.As of May 8, 2014:
<http://www.eia.gov/countries/analysisbriefs/China/china.pdf>
- , *Quarterly Coal Report, April-June 2014*, 2014c.Table 10.As of May 19, 2014: <http://www.eia.gov/coal/production/quarterly/pdf/t10p01p1.pdf>
- Li, Pan, “Current Status of Pollutant Control for Coal-fired Power Plants in China,” Research Office (Center of Power Industry Environmental Protection & Climate Change), China Electricity Council, May 2014.As of May 5, 2014:
[http://www.worldcoal.org/bin/pdf/original_pdf_file/current_status_of_pollutant_control_for_coal-fired_power_plants_in_china\(23_05_2013\).pdf](http://www.worldcoal.org/bin/pdf/original_pdf_file/current_status_of_pollutant_control_for_coal-fired_power_plants_in_china(23_05_2013).pdf)
- Lidderdale, Tancred, and Aileen Bohn, *Demand and Price Outlook for Phase 2 Reformulated Gasoline, 2000*, Energy Information Administration, August 6, 1999.As of September 2014:
<http://www.eia.gov/forecasts/steo/special/pdf/rfg4.pdf>.
- Martina, Michael, et al., “China to ‘Declare War’ on Pollution, Premier Says,” Reuters, March 5, 2014.As of November 20, 2014:
<http://uk.reuters.com/article/2014/03/05/china-parliament-pollution-idUKL3N0M20IS20140305>
- Ministry of Environmental Protection of the People’s Republic of China, *China Emission Control Annual Report*, Part III, National Environmental Management of New Production Vehicles, 2013.
- Ministry of Environmental Protection, *China Vehicle Emission Control Annual Report*, 2013.As of May 15, 2014:
http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/qt/201401/t20140126_266973.htm
- Ministry of Environmental Protection and Chinese Academy of Engineering, *MacroStrategy for China’s Environment:Strategy for Protection of China’s Environmental Factors* (in Chinese), Beijing:China EnvironmentalSciences Press, 2011
- Muller, Robert Mendelsohn, and William Nordhaus, “Environmental Accounting for Pollution in the United States Economy,” *American Economic Review*, Vol. 101, No. 5, 2011.
- Muller, Nicholas Z., and Robert Mendelsohn, *Measuring the Damages of Air Pollution in the United States*, Princeton, N.J.:Yale University School of Forestry and Environmental Studies, January 9, 2007.As of May 20, 2014:
http://aida.econ.yale.edu/~nordhaus/Resources/Muller_overview.pdf
- National Bureau of Statistics, *China Statistical Yearbook*(in Chinese), 2012, 2013.As of May 2014:
<http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/>

- , “Statistical Communiqué of the People’s Republic of China on the 2013 National Economic and Social Development” (in English), web page, February 24, 2014. As of April 2014:
http://www.stats.gov.cn/english/PressRelease/201402/t20140224_515103.html.
- National Bureau of Statistics and Ministry of Environmental Protection of China, *China Environmental Statistical Yearbook*, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, and 2010.
- O’Hara, T., et al. “An Asian Emission Inventory of Anthropogenic Emission Sources for the Period 1980–2020,” *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 7, No. 16, 2007.
- People’s Republic of China Ministry of Environmental Protection, “Regarding the Publication of Desulfurization Equipment and Other Major Air Pollution Abatement Projects for Coal-Fired Power Plants in China” (in Chinese), web page, April 25, 2013. As of April 2014:
http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201305/t20130506_251654.htm
- U.S. Environmental Protection Agency, “The Hidden Hazards of Backyard Burning,” Washington, D.C., 2003. As of September 19, 2014:
<http://www.epa.gov/epawaste/nonhaz/municipal/backyard/pubs/residents.pdf>
- , “Control of Air Pollution from Motor Vehicles: Tier 3 Motor Vehicle Emission and Fuel Standards Final Rule: Regulatory Impact Analysis,” EPA-420-R-14-005, March 2014. As of September 2014:
<http://www.epa.gov/otaq/documents/tier3/420r14005.pdf>.
- U.S. Environmental Protection Agency, Combined Heat and Power Partnership, “Efficiency Metrics for CHP Systems: Total System and Effective Electric Efficiencies,” web page, undated. As of April 21, 2014:
http://www.arb.ca.gov/cc/ceci/presentations/chpefficiencymetrics_epa.pdf
- WHO—See World Health Organization.
- World Bank and Development Research Center of the State Council, the People’s Republic of China, *China 2030: Building a Modern, Harmonious, and Creative High-Income Society*, Washington, D.C.: World Bank, 2012
- World Health Organization, *WHO Air Quality Guidelines For Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide And Sulfur Dioxide: Global Update 2005*, Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2006. As of November 20, 2014:
http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf
- Xu, Yuan, “Improvements in the Operation of SO₂ Scrubbers in China’s Coal Power Plants,” *Environmental Science & Technology* Vol. 45, No. 2, 2011.
- Young, Angelo, “China New Auto Sales 2013: Chinese Consumers Bought Over 20 Million Vehicles in 2013 as Foreign Automakers Jockey For Market Share,” *International Business*

Times, January 7, 2014. As of May 8, 2014:

<http://www.ibtimes.com/china-new-auto-sales-2013-chinese-consumers-bought-over-20-million-vehicles-2013-foreign-automakers>.

Zhou, Ying, Jonathan I. Levy, John S. Evans, and James K. Hammitt, “The Influence of Geographic Location on Population Exposure to Emissions from Power Plants Throughout China,” *Environment International*, Vol. 32, No. 3, 2006.