

重现蓝天：

中美清洁空气合作核心机遇分析

合作伙伴：



重现蓝天： 中美清洁空气合作核心机遇分析

2016年12月

亚洲协会特别报告

合作伙伴：



© 2016 Asia Society

亚洲协会北加州分会
500 Washington Street, Suite 350
San Francisco, CA 94111

亚洲协会纽约分会
725 Park Avenue
New York, NY 10021

清洁空气创新中心
(联盟秘书处)
北京市朝阳区建外大街甲24号
东海中心709室
北京, 100004

伙伴机构



亚洲协会是全球领先的教育机构，致力于在全球背景下增进美国与亚洲国家间人民、领袖和机构之间的互信与合作。亚洲协会的工作横跨艺术、商业、文化、教育和政策，就当前各热点问题和挑战提供深度观察，促进对话与交流，以期创造一个共同的未来。协会于1956年由约翰·D·洛克菲勒三世创立，是一家非盈利、非政治性的教育机构。总部设在纽约，在香港、休斯顿、洛杉矶、马尼拉、孟买、旧金山、首尔、上海、悉尼、华盛顿和苏黎世设有中心。



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，于2013年1月23日正式成立，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。



能源基金会（中国）于1999年在北京成立，是致力于中国可持续能源发展的非营利公益组织，其总部位于美国旧金山。能源基金会（中国）的宗旨是推动能源效率的提高和可再生能源的发展，帮助中国过渡到可持续能源的未来。通过资助中国的相关机构开展政策研究、加强标准制定，推动能力建设并推广最佳实践，助力中国应对能源挑战。项目资助领域包括清洁电力、环境管理、工业节能、低碳发展、可持续城市、交通、策略传播七个方面。

合作机构:



专注于北美电力市场的E3创建于1989年，在美国和加拿大设有办公室。E3为公共事业部门、监管者、政府、电力供应者、能源技术公司以及投资者提供专业咨询服务，业务涵盖电力和天然气产业的重要议题。

重现蓝天： 中美清洁空气合作核心机遇分析

项目指导委员会成员

MARY NICHOLS

Chair

California Air Resources Board

ROBERT B. WEISENMILLER

Chair

California Energy Commission

LIJIAN ZHAO

Program Director, Environmental Management

Energy Foundation, China

TONNY XIE

Director

Secretariat for Clean Air Alliance of China

RASTO BREZNY

Executive Director

Manufacturers of Emission Controls Association

FAN DAI

Climate Change Advisor

California Environmental Protection Agency

WILLIAM COLLINS

Director

Climate Readiness Institute

ROBERT W. HSU

Associate Director

Asia Society Northern California

HUI HE

Senior Researcher, China Regional Lead

International Council on Clean Transportation

JIM WILLIAMS

Director

Deep Decarbonization Pathways Project

主要作者:

Dr. Fredrich (Fritz) Kahrl, Director, Energy + Environmental Economics

Juan Wei, Senior Program Manager, Sustainability, Asia Society Northern California

Kyle Graycar, Sustainability Project Consultant, Asia Society Northern California

Tonny Xie, Director, Secretariat for Clean Air Alliance of China

贡献作者:

Lijian Zhao, Alexander Eggers

审阅人:

Elaine Chang, Alberto Ayala, Rasto Brezny, Hui He, Fan Dai, Robert W. Hsu, Lisha Wang, N. Bruce Pickering

目录

序言	6
表格和图表	8
内容摘要	9
报告简介	13
1. 中国空气质量挑战：新出现的问题和优先领域	14
1.1 中国面临的空气质量挑战	14
1.2 污染监测与治理的五个优先领域	16
2. 美国现有及新兴的清洁空气技术	27
2.1 柴油车排放控制技术	27
2.2 挥发性有机化合物（VOC）排放控制技术	34
2.3 空气质量监测与室内空气净化器	38
2.4 工业与民用替代燃料	39
2.5 火力发电厂超低排放控制技术	42
3. 为排放控制技术的发展创建有利的环境：加利福尼亚州经验	46
3.1 美国的空气质量管理	46
3.2 加州支持清洁空气技术的配套环境	50
4. 中美清洁空气技术与政策合作优先领域	59
4.1 清洁技术	59
4.2 有利的监管环境	60
4.3 市场推动	61
5. 结论与建议	65
参考文献	66
致谢	70

序言

近年来,中国作为一个新兴的全球经济体发展迅速,但是经济的腾飞也付出了环境的代价。中国是世界上温室气体排放最多的国家之一,同时也面临着空气污染的严峻挑战。中国政府认识到空气污染严重威胁人民健康,所以对排污企业的监控、到区域治理的措施以及国家层面的政策和法规等各个层面入手积极着手解决这一问题。这个过程为清洁空气技术的发展和应 用创造了巨大的市场需求,同时也为中美合作提供了更多的机会以应对全球气候变化。

《重现蓝天:中美清洁空气合作核心机遇分析》是在能源基金会的资助下,由亚洲协会和中国清洁空气联盟共同研究起草的。考虑到城市空气污染对公共健康的危害,此报告希望能在亚洲协会多年来的相关努力的基础上进一步推动中美两国在清洁空气和气候变化方面的合作。我们相信空气污染的治理是双边合作最具成效的合作领域之一,并且能够同时达到两国减少温室气体排放的目标。中美两国在气候变化领域有很多成功的合作,最近的一次是双方对《巴黎气候协定》的同步批准。虽然在撰写此前言的时候我们仍不清楚下一任美国总统是否继续会就全球气候变化问题与中国(及世界其他各国家)开展合作,我们坚信两国在环境领域的合作最具互惠互利基础,并且能够有效地增进双边关系。我们也希望中美两国能以此为基础进一步促进双方在其他领域的合作。

美国在发展过程中也曾经经历并且目前仍有很多城市面临城市空气污染挑战。这份报告分析了中国在改善空气质量的过程中在政策和技术方面的需求,同时也分享了美国在空气质量管理方面的最佳实践和成功经验。从空气污染监测以及其他新技术的部署到各种政策法规的相继出台,本报告以美国经验为基础为中国的空气质量管理提供了丰富全面的信息以及最佳实践案例。加州的经验尤其值得一提,加州拥有很多全球创新的清洁技术公司,也在空气污染防控方面有着一些全国最为严格的措施。不仅如此,加州用自身的经验证明了严格的空气质量管理与经济的持续高速发展之间并不存在对立,而是可以同时实现的目标。对于中国而言,在治理空气污染的同时保证经济的可持续发展也是一个非常重要的目标。

我们的报告表明中美两国能在空气质量和气候变化的合作中实现互利共赢。除了新的市场能为美国的清洁空气技术供应商提供商业机会,中国治理空气 污染的规模和速度也为很多公司的大规模技术部署提供了肥沃的试验场,使其有更多的机会开拓创新。在政策监管方面,美国的管理者可以观察中国市场如何应对新的规则 and 标准,这也许会对回答“何地、何时、怎样使新的监管措施达到最佳效果”这样的问题产生新的思路 and 观点。最后,空气污染具有流动性,一个国家或区域欠佳的空气质量对其他国家及地区的也会有影响。比如,加州的许多大城市仍在应对欠佳的空气质量,与此同时中国的空气污染已经跨过太平洋进入美国大陆。像这样的空气污染已经不仅仅是局部性的问题,而更是一个区域性全球性的问题。

这个项目也得益于与加利福尼亚州很多政府机构的合作,这些机构承担着引领清洁能源发展的重任,它们包括加州空气资源委员会、加州环保局和加州能源委员会。

在报告起草的过程中,我们也咨询了很多私营企业,他们为报告的撰写提供了很多有益的经验和视角。他们中的很多公司也正在开发新的清洁技术并将他们投入市场来帮助美国实现其清洁空气和清洁能源的目标。

非政府组织和咨询公司也为这份报告的撰写提供了很多思路,它们也在对现行的技术应用和政策实施进行独立的分析和解读。

这份报告希望突出政府、私营机构与非政府组织之间的合作生态网络,这些机构相互协作,为实现中美两国更清洁的空气及温室气体减排贡献了各自的力量。

清洁空气对公共健康有很大的益处并对当今城市的宜居性至关重要,中国领导人认识到了这一点并且正在努力地通过更严格的政策管理措施和大规模的清洁空气技术部署来实现这个目标。他们也面临着在前所未有的规模和速度上采取有效措施的挑战。与此同时,美国的能源消耗依然占有世界总量的很大部分且在其国内的很多地区仍然存在空气污染问题,但是美国也采取了很多有效的综合性的空气污染治理措施,这些成功经验对其他国家具有相当借鉴意义。当今世界,美国与中国都担负重要责任去走在空气污染治理的前列,我们也希望这份报告可以为两国的进一步合作提供新的视点和机会。

Orville Schell
Arthur Ross 主任
亚洲协会美中关系中心

N. Bruce Pickering
亚洲协会全球副主席
亚洲协会北加中心执行主任

解洪兴
主任
中国清洁空气联盟秘书处

表格和图表

图1: 2014年中国移动排放源在NO _x 和PM排放中的占比	表1: 重型柴油发动机排放标准
图2: 2009年中国VOC排放源占比 (估测值)	表2: 国家关于VOC治理的政策
图3: 中国火力发电厂煤耗及排放 (1990-2010)	表3: 中国火力发电厂排放标准
图4: 美国、中国、欧盟和日本重型汽车颗粒物和氮氧化物排放标准之对比	表4: 柴油机排放控制关键技术
图5: 2015年美国机动车辆燃料油耗 (估测值)	表5: 不同控制技术的颗粒物减排效果
图6: 美国环境保护署2008年8小时臭氧标准超标地区	表6: 不同控制技术的NO _x 减排效果
图7: 美国工业一次能源使用量 (1949-2015)	表7: 空气净化器技术
图8: 美国民用一次能源使用量 (1949-2015)	表8: 火力发电厂主要污控技术
图9: 典型空气源热泵	表9: 六种基准污染物现行国家环境空气质量标准
图10: 美国火力发电设备役龄分布图 (截止到2010年)	表10: ARB针对各类柴油排放源的监管策略
图11: 美国的发电结构 (1980-2014)	表11: 《卡车与客车条例》针对超重车的排放控制达标时间表
图12: 美国能源信息管理局清洁电力计划下的发电结构	表12: CARL MOYER 计划下“重型道路车队现代化”各类排放源的最高拨款额 (按车型和核证排放水平区分)
图13: 经EPA新排放源评审后发出的牌照	表13: 美国清洁空气技术供应商进入中国市场的障碍
图14: 美国空气质量管理的科学技术依据	
图15: 条例发布后达标和不达标卡车随时间变化示意图 (假设车辆平均寿命为20年, 车辆保有量年增长率为2%)	
图16: 中美清洁空气技术合作优先领域	
图17: 创建清洁空气技术扶持性监管框架的优先领域	

内容摘要

在中国, 空气污染仍是人们健康的一大威胁,中国近期出台的《大气污染防治法》和《大气污染防治行动计划》表明了政府大力改善空气质量的决心。实现上述两个文件中制定的远景和目标, 不仅需要迅速、广泛地推广清洁空气技术, 还需要一个有利于制造业创新和技术应用的监管环境。如果规划得当, 大规模推广清洁空气技术还能减少中国的温室气体排放, 有助于实现中国国策中更长远的气候目标。

出于共同利益, 中美两国在空气质量和气候政策方面的合作由来已久。中国的空气污染也对美国产生了一定影响, 促使美国联邦政府和州政府共同与中国同行开展空气质量方面的合作。中美气候变化工作组以及其他双边举措反映了两国的共识: 同心协力引领合作对减缓气候变化来说至关重要, 空气质量和气候变化领域的合作已成为中美关系的一大支柱。

未来十年, 持续合作将带来更大好处。在中国寻求显著改善空气质量之际, 分享美国在清洁空气技术监管方面的经验可能会助中国一臂之力。反过来, 美国的监管机构也能从中国学习到很多应对空气质量挑战的经验。两国在长远空气质量和温室气体法规上的进一步协调统一, 还能向清洁技术创新投资领域发出一个重要信号。中国清洁空气技术市场的潜力巨大, 极具竞争力, 能进一步推动技术创新, 降低减污成本。

本报告由亚洲协会、中国清洁空气联盟(CAAC)、能源基金会中国办公室共同起草, 众多顾问和专家参与撰写。报告探讨了中美两国在清洁空气技术与政策方面持续合作的前景。报告旨在探讨确定中美两国在清洁空气技术合作方面的优先领域, 以推动相关法规的建立和市场开发。空气的清洁化还会进一步推动中美两国在减缓气候变化方面的合作。

中国正在迈入空气质量管理新纪元, 重心从工业烟囱直接排放的一次污染物(二氧化硫、大颗粒物)转向对由固定排放源和移动排放源组合产生的二次污染物(细颗粒物、臭氧), 尤其是在大城市地区。在美国, 这一过渡经历了几十年的时间, 而中国只用了不到20年的时间就完成了这样的转变, 因此不论在技术上还是监管上也需要完成巨大转变。

中国在长期空气污染物降低方面的目标反映了这一问题的严重性和紧迫性。例如, 中国要求所有城市在2030年以前力求达到大气颗粒物 $PM_{2.5}$ 的国家年度减排标准。达到这一及其他空气质量标准则需要未来的15年使 $PM_{2.5}$ 、二氧化硫、氮氧化物等主要污染物减少排放50%以上。这些空气污染物减排目标的实现只有通过大规模清洁空气技术的应用, 柴油机污染的有效控制和可再生能源的采用等措施才能得以实现, 这也将在中国创造出全球清洁空气技术应用的巨大市场。

为了支持这一技术方面的转变, 中国清洁空气联盟于2015年创立了“创蓝奖”, 旨在发现并推广能够对改善中国空气质量、提高人类健康水平产生变革性影响的关键技术。在2016年的“创蓝奖”活动中, 中国清洁空气联盟通过分析国家长期空气目标之需求, 选定了五个优先领域。这五个领域也是本报告讨论的重点:

- 柴油机和柴油设备；
- 挥发性有机化合物 (VOC) 排放源；
- 火力发电厂；
- 民用和工业用煤；
- 空气质量监测与室内空气净化器。

就前四个领域而言,改善空气质量和减少温室气体排放之间有很大的协同性。比如,用非化石燃料发电取代原来的火力发电要比加装先进排放控制设备更经济一些;再比如轿车和公共汽车,就满足空气质量要求和长期气候目标来说,电气化的成本效益要比使用内燃机车排放控制设备更高一些。

清洁空气技术优先合作领域

美国是“创蓝”五大领域的技术领先者。通过对新兴技术的研究(本报告第2章),我们确定了中美清洁空气技术合作的五个优先领域:

- **先进的空气质量监测仪**—空气质量监测新技术能让我们更清晰地了解空气污染的时间、地点和暴露风险。在中国,认真布署这些技术能够帮助监管机构提高对空气污染源的认识,深入了解污染暴露风险和健康影响,从而制订出更多更有效的空气质量和污染排放标准,并能够就最严重排放源的减排措施进行优先级排序。
- **重型车辆一体化设计与清洁燃料的使用**—美国联邦法规催生了新一代重型车辆的出现,这些车辆 in 提高燃油效率和性能的同时满足了严格的排放限制;加州和美国其他州还在探索能长久供应的柴油车辆燃料新来源。在中国,针对柴油重型汽车发动机和污染控制的新型设计无形中会拉低新产车的排放限值,同时,针对重型车的清洁燃料规划也会有助于实现长远的空气质量目标和气候目标。
- **客车和公交车辆电气化**—中国和美国都是率先支持早期开发和部署电动汽车、公交车和无尾气排放的短距离重型货车的国家。这些措施如能与可再生能源或核电相结合,便可以实现零总排放。发展汽车新技术和建设充电设施可作为中国空气质量与气候政策之一,降低交通电气化成本。
- **低环境影响污染溶剂**—溶剂(用在油漆、润滑剂、油墨、粘合剂和清洁产品中)是城市臭氧污染的主要来源,会造成臭氧层空洞、产生有毒气体、导致气候变化。新一代溶剂能满足多重环保标准,有助于中国实现一系列环境目标。
- **炼油厂、化工厂和管道的泄露检测与修复**—遥感技术的使用,提高了炼油厂、化工厂和管道的逸散污染和温室气体排放检测准确率、降低了防控成本。在中国,先进的测漏检测与修复技术使监管机构能够以低成本迅速而显著地实现这些排放源的减排。

监管政策环境方面优先合作领域

实现清洁空气技术开发与部署的过程中,监管(从排放标准到强制性技术要求)的作用至关重要。美国在制定鼓励清洁空气技术的监管框架上拥有50余年的经验,这一经验

¹ Hao, Yin, and Cen (2016).

² See <http://en.bluetechaward.com/>

极具价值,可在中国监管机构规划和制定实施方案、从而实现国家和地方空气质量目标的过程中继续发挥它的价值。反过来,美国监管机构也能从中国的不断实践中学到新的经验。

我们对监管政策环境方面优先合作领域的认定源于我们对加州以下三个监管领域的研究(请见报告第3章):

- 降低柴油风险计划—力求在2020年前将柴油机排放颗粒物减少85%;
- VOC治理法规—重点是溶剂排放法规;
- 协同规划空气质量管理与温室气体减排—使加州满足联邦空气质量标准与本土实现2050年前温室气体减排80%的目标更好地融为一体。

通过对这三个领域的全方位研究,我们总结出一些监管设计要素,希望能给中国的监管机构带来参考价值,具体如下:

- **以科学技术为基础**—为空气质量管理提供殷实的科学依据。
- **吸收利益相关者参与**—建立必要的共识、信任和承诺,促进制造业的创新和技术推广。
- **长期的远景和明确的目标**—向制造商、设备业主、政府机构和公众展示持久的形象和确定性。
- **一体化规划**—以最低成本实现多重污染物(PM_{2.5}、臭氧、SO₂和温室气体)减排目标。
- **激励**—鼓励采用清洁空气技术,并提供拨款资金。
- **前瞻性执法**—采用现有最新技术;执法计划与合规策略和技术相匹配;对不合规者实行惩罚;通过保证书承诺性能;鼓励采用准确的标识和认证以提高执法和合规透明度。

创新与市场引导方面的优先合作领域

在本研究过程中,我们对美国18家清洁技术制造商进行了一次小规模调查,了解他们对中国清洁空气技术市场的兴趣以及在这一市场的经验。调查包括对五个“创蓝”领域部分制造商的采访。

受访者确定了如下五个领域,期待政府和非政府组织在这些领域提供支持,以便于他们能够更顺利地进入中国清洁空气技术市场:

- 协助与当地建立合作伙伴关系;
- 加强知识产权保护;
- 改进监管框架,使之增强执法能力、建立清晰的激励机制、提高透明度、明确角色和职责;
- 提高空气污染问题的公众意识;
- 促进空气质量标准和温室气体标准以及实现这些标准所用技术的全球协调统一。

建议

我们建议在中美之间开展以下三种类型的活动,以使中美之间的持续合作取得变革性成效:

- **就实现长远空气质量和气候变化目标开展战略合作**—就满足空气质量和温室气体减排长远目标所需的技术种类和潜在市场规模来说,中美双方通过统一协调规划,可向制造商、金融机构和企业展现更大的确定性。
- **就支持性法规开展更深入的合作**—进一步加强空气清洁技术支持法规方面的合作,有助于就美国监管经验进行深入交流,从而为实现中国空气质量目标提供支持。这一合作还会为美国监管机构在未来十年里向中国学习经验奠定基础,因为美国的监管机构也在探寻解决方案来应对美国面临的空气质量长期挑战。
- **联手推动市场进入、创新和健康竞争**—推动两国清洁空气技术市场的开放,以促进技术创新、健康竞争并降低实现空气质量与气候长期目标的成本。通过对要求和法规(如排放标准)的时间表进行协调统一,两国将开创一个更大的清洁空气技术市场。

报告简介

本报告主要研究中美之间在清洁空气技术与政策方面加深合作的优先领域。首先,我们来看一个基本问题:美国政府机构、制造商和非政府组织在帮助中国大幅改善空气质量的过程中可以发挥哪些作用?主要在哪些领域开展合作?为深入探讨这一话题,亚洲协会和中国清洁空气联盟在能源基金会的支持下一起进行研究并撰写了本报告。

报告主要分五章进行论述:

- **第1章 (中国空气质量挑战: 新出现的问题和优先领域)** 论述了中国新出现的空气质量挑战, 推荐了五个优先领域, 指出在这些领域采用污控新技术可带来巨大转变。
- **第2章 (美国现有的清洁空气技术与新兴清洁技术)** 针对第1章所述五个领域概要介绍了美国现有的和新兴的清洁空气技术。
- **第3章 (为污染排放控制技术的发展和创建有利的政策环境: : 加利福尼亚州经验)** 分析了加州在营造一个有利于清洁柴油和溶剂技术发展的环境、协调空气质量与温室气体减排规划与管控方面的经验。
- **第4章 (中美清洁空气技术与政策合作优先领域)** 确定了合作的三个优先领域: 技术、配套法规和市场推动。
- **第5章 (结论与建议)** 总结了本报告的主要结论, 推荐了可在近期产生深远影响的合作领域和具体合作活动。

1. 中国空气质量挑战： 新出现的问题和优先领域

过去30年间,中国经济的快速增长带来了一个副产品——空气污染水平不断上升,与此同时,污染源治理和空气质量管理体系也在不断变化发展。本章首先回顾中国的空气污染发展趋势、近年来所采取的政策法规、面临的挑战和存在的差距¹,随后阐述中国清洁空气技术与政策的五个主要领域。相信加大这五个领域的工作力度可对人们健康和环境改善产生巨大成效。

1.1 中国面临的空气质量挑战

1.1.1 中国的污染趋势

中国大城市在过去30年里从工业污染(固定源排放的一次污染物SO₂、PM₁₀、NO₂)转变成混合型污染(既有固定排放源,也有移动排放源,混合了一次和二次污染物(臭氧、PM_{2.5}))。对于许多大城市来说,移动排放源已然成为一个主要的空气污染问题,比如北京和上海,机动车排放的废气约占PM_{2.5}总排放的30%²。

与固定排放源(发电厂、工厂等)相比,移动排放源的排放更难以监测和治理。多年来,中国的环境监管部门针对固定排放源建立了广泛的计划,但在移动排放源污染的监管方面却显得经验不足。对于人口密集的地区来说,移动排放源监管的确是一大难题,比如在北京、天津和浙江,2013年百人机动车保有量已超过15辆,约为全国平均水平的两倍。

在一次污染物导致的空气质量问题仍然存在的同时,二次污染物也逐渐恶化空气质量,这些都为空气污染治理带来了新的挑战。

1.1.2 政策变化和成果

虽然中国早已建立了广泛的空气质量管理政策、法律和行业监管体系,但从2013年起才开始大力加大大气污染防治工作的力度。这一年初春,整个华东地区经历了严重的雾霾天气,能见度极低,造成了公共健康风险。北京及周边地区的PM_{2.5}浓度“爆表”,登上国际媒体头条,引起广泛关注。之后,李克强副总理承诺采取大气污染防治行动。与此相呼应,国务院于2013年9月发布了国家《大气污染防治行动计划》,也就是人们常说的“大气十条”。《行动计划》设立了2013-2017年期间全国大气污染防治工作路线,标志着中国大气污染防治新纪元的开始。中央和地方政府随后出台了一系列政策、法律法规、标准和技术指导方针,以支持《行动计划》的落实,其中包括:建立区域合作机制,提高大气污染防治效率;设立专项资金,补贴环保产业;出台价格和税收机制,鼓励投资于污染

¹ 本报告撰写期间,亚洲协会北加州分会对中美两国之间清洁空气技术及政策之间的差异进行对比分析,分析结果融合在本报告各章节的阐述中。

² 数据来源:中国清洁空气联盟《中国空气质量管理评估报告(2015)》。<http://en.cleanairchina.org/product/7386.html>

排放控制技术；推行重点城市空气质量排名机制；对重污染企业实行强制性环境信息披露制度等³。

与此同时，国家环保部也在2013年提出了各级城市空气质量达标时间表，督促全国所有城市在2030年以前达到国家空气质量标准（即PM_{2.5}平均浓度不超过35微克/立方米）。为了达到这一目标，一次PM_{2.5}排放必须比2013年水平降低53%，SO₂排放必须减少51%，NO_x排放减少64%，VOC排放减少36%，氨（NH₃）排放不得高于2013年水平⁴。2015年底，中国修订了1987年的《大气污染防治法》，加强了地方监管部门在空气质量方面的责任。该法要求，对地方政府官员的业绩的考核不仅要看GDP增长，还要看空气质量指标和任务的完成情况。该法还增加了其他新内容，比如：区域性污染防治条款；雾霾天气预警制度；移动源排放管控；加大违法行为处罚力度；强调大气污染物和温室气体排放协同控制等。

中国在“十三五”规划（2016-2020）中设立了宏伟的空气质量目标，要求数百座城市空气质量必须达到“良好”（空气质量指数在100以下），或者一年内至少有80%的天数在良好以上⁵。

通过对大气污染防治政策的更迭进行连续跟踪发现，新规定相比之前的动作更加积极、力度更大。据亚洲清洁空气中心的一份新报告称，中国在过去3年里通过的大气相关法律法规比过去30年的总和还多⁶。

通过努力，74座重点城市中大多数城市的空气污染物浓度有所下降⁷。据中国清洁空气联盟《中国空气质量评估报告（2016）》显示，过去2年里，全国空气质量实现了持续改善，中央政府跟踪的74个重点城市中，有11个城市空气质量实现达标，相比之下，2014年只有8个城市达标。平均来看，这74座重点城市一年内空气质量平均达标天数为71%，比2014年上升了5%，比2013年上升了11%⁸。

1.1.3 空气质量与气候政策

中国在空气污染控制方面的努力也有助于其实现气候变化方面的目标。中国在达成空气质量目标的过程中可以在遏制气候变化和加快中国实现“巴黎协定”所规定的气候目标方面取得重大进展。充分执行中国新的（和有约束力的）空气质量法规和实现排放目标只能通过中国能源和经济结构的根本性变革来实现。根据最近的模型分析，中国的各级省市是无法只通过末端污染治理的解决方案来达到新的空气质量标准的⁹。因此，中国可以满足空气质量标准的唯一方案是，中国摆脱对煤炭和化石燃料能源的依赖，转向可再生能源，推动公共和非机动化的交通发展，提高交通运输电气化，实现重工业产能过剩的大幅减少。总体而言，这些技术，能源和经济转型代表了一个根本不同的，更绿色的中国，并可能带来巨大的空气质量改善和温室气体减排。

中国的空气污染减排指标是强制性的，但目前的很多低碳试点项目是自愿性的，这意

³ 数据来源：中国清洁空气联盟《中国空气质量评估报告（2015）》。 <http://en.cleanairchina.org/product/7386.html>

⁴ 郝吉明、尹伟伦、岑可法（2016）。

⁵ 数据来源：中国“十三五”规划纲要（中文版全文）， http://xinhuanet.com/politics/2016lh/2016-03/17/c_1118366322.htm

⁶ 详见亚洲清洁空气中心报告（2016年）：“China Air 2015: Air Pollution Prevention and Control Progress in Chinese Cities”

（中国大气2015：中国城市的大气污染防治进展） <http://cleanairasia.org/wp-content/uploads/2016/03/ChinaAir2015-report.pdf>

⁷ 自2013年1月起，中国74座主要城市的空气质量实时监测数据（PM_{2.5}浓度）可查询网站 www.cnemc.cn，这74座城市总共设立了496个监测站。

⁸ 中国清洁空气联盟（2016）。

⁹ 王，赵和付（2016）。

意味着前者的效力更大。根据新修订的《大气污染防治法》，所有未能满足空气质量指标的城市必须制订强制性空气质量达标计划。这意味着中国的260多个城市需要制订新计划，采取多种措施来实现空气质量目标，这些措施同时也会减少二氧化碳排放。

此外，中国正在采取一系列措施来加强空气质量管理法规的执行，其中包括：对省市领导人进行年度考评，考评结果将会影响其政绩。如果空气质量不达标，空气质量监管部门将安排同地方政府领导约谈以进行战略重审；进行城市排名（按空气质量指标实现情况对各城市进行排名）；中央政府定期进行环保督察等。加强空气质量监管执法同时也有利于温室气体排放的防控。

所有这些表明，中国的大气污染防治工作已形成大气候，将大大推动全国二氧化碳的整体减排。中国清洁空气联盟的一项研究就证明了这一点。他们的研究表明，京津冀地区的大气污染防治工作有助于到2030年实现二氧化碳减排210万吨左右，比2013年下降19%¹⁰。

1.1.4 挑战和差距

近年来，中国在空气污染防控方面取得了很大进展。但要确保空气质量持续改善，还面临诸多挑战。对机动车辆污染的控制仍需进一步加强；颗粒物污染仍是中国的一个突出问题；臭氧污染正在逐渐成为危害健康的一大杀手；一些地区的大气污染水平不降反升¹¹。鉴于空气质量管理的复杂性以及中国尚处于大规模城镇化进程之中，今后需要进一步加强清洁空气方面的工作。

尽管很多人认为资金不足、数据可获性差、人员专业知识欠缺等是中国大气污染防治的主要障碍，但广泛而言，许多专家认为，加强监管执法和技术改造才是改进中国整体空气质量管理工作关键。如果对中国目前的监管结构和技术组合进行分析，再将其与美国等已先前一步实施空气治理项目的国家进行对比，将会发掘出更多的合作机会及中国在进一步改善空气质量方面的需求。

制定配套政策和推广先进技术中可能遇到的挑战，是同一问题的两个方面。发达国家的经验表明，政府和企业必须协同作战，才能有效控制空气污染。以往是由政府设定排放限值、由行业确定实现达标的最佳战略和技术。要想使清洁空气新技术在中国得到及时、有效的采用，还需加强配套的政策监管环境。若要顺利实现达标，需要政府部门、私营企业和公众之间密切合作，这一点已在《大气十条》中明确指出—地方政府应对当地空气质量负总责，落实企业治污主体责任，强调“政府统领、企业施治、市场驱动、公众参与”的原则。

1.2 污染监测与治理的五个优先领域

中国到2030年的减排目标将为今后几年的清洁空气技术应用打开一个巨大的市场，市场总价值预计超过5万亿元人民币¹²。未来几年中国对清洁空气技术的需求将继续上升，这将为国际清洁空气技术供应商提供巨大的市场空间。空气质量管理工作是一项复杂的工作。由于经济发展水平不均、能源结构不等、城市模式各异，不同城市的污染源也各不相同。如何帮助这些城市围绕先进清洁空气技术来制订清洁空气行动计划，是中国加快重

¹⁰ 何克斌，张强，同丹（2016）。

¹¹ 中国清洁空气联盟（2016）。

¹² 中国清洁空气联盟（2015）。《大气污染防治行动计划（2013-2017）实施的投融资需求及影响》

现蓝天步伐的关键。

中国清洁空气联盟积极参与了协助中国推广最佳清洁空气技术的行动，联盟分析了各个城市的不同需求，确定了技术开发与应用的五个优先领域，在这些领域里，改进技术和出台配套法规能为空气质量和人民健康带来显著效益。判断每项技术之重要性的依据是：技术效用、潜在环境效益分析、技术性能和财务模型评估，从而找出适用于现今工业排放的突破性技术。以下是选定的五大类技术，也是“创蓝奖”的征集领域：柴油机污染防治技术、VOC防治技术、空气质量监测与室内空气净化技术、工业和民用替代燃料、及火力发电厂超低污染排放控制技术。本章以下部分将介绍每类技术的重要性，并论述对应的现行治理政策。

1.2.1 柴油机排放控制技术

柴油机是中国空气污染的主要来源之一，在PM_{2.5}和NO_x排放中占有相当比重。“柴油机”包括：重型货车、城市公交车、大客车、轻型商用车、农用车辆、非公路施工机械与农用设备、港口运输车和远洋船舶。在北京、上海和珠江三角洲等经济中心，柴油机是空气污染最严重且数量居多的排放源¹³。环保部在《2015年中国机动车环境管理年报》中指出，在城镇地区，柴油车排放的NO_x几乎占机动车辆NO_x排放总量的70%，PM排放占90%¹⁴。中国的柴油卡车数量已从2000年的900万辆跃升到2013年的近3300万辆，表明了这一污染排放源的快速增长¹⁵。

在过去十年里，中国采取了一系列政策措施来降低柴油发动机的排放。其中包括：逐步淘汰高硫柴油；出台更为严格的新车排放标准；制订在用车辆检验与维护计划（I/M）；强化激励政策，鼓励污染最重和役龄最长的车辆（所谓的黄标车）退役。中国针对重型车辆的排放标准自2001年开始实施（“国一”），随后相继颁布了“国二”（2004）、“国三”（2008）和“国四”（2013）标准¹⁶。这些标准要求，新产卡车和公共汽车必须采用排放控制技术，比如柴油氧化催化剂和废气再循环技术。从“国一”到“国三”的这段期间，中国柴油卡车和公共汽车的所有污染物（除NO_x外）排放因子均大大降低（见表1和图1）。

在中国，地方可以早于全国实施日期提前实施机动车排放国家标准，但需经国务院批准。北京一直率先实施车辆排放标准，上海、广州和其他一些主要城市紧随其后。自2015年6月起，北京就开始执行“国五”标准；目前上海和广州只对公交车和市政服务车辆执行了“国五”标准¹⁷。北京市环保局在2015年底推出了“京六”标准，这是中国迄今为止最严格的重型车辆排放标准；国家环保部也于2016年5月下发了有关“国六”标准的征求意见稿，有望在2016年年底正式颁布。

柴油质量（尤其是硫含量）会影响到排放治理效果。“国四”标准（2013）的全国范围内实施，因燃油质量问题被推迟了两年半。某些排放控制技术（比如柴油机颗粒捕集器和选择性催化还原技术）需要使用低硫燃料才能奏效，而中国很多炼油厂目前仍在生

¹³ Huo, (2012).

¹⁴ 详情请见中国环境保护部“2015年中国机动车环境管理年报”。
http://english.mep.gov.cn/News_service/news_release/201603/t20160307_331615.htm

¹⁵ 详见国家统计局“2014年统计年鉴”，<http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2014/indexeh.htm>

¹⁶ 排放标准详见Transportpolicy.net “China: Heavy-duty Emissions”。

http://transportpolicy.net/index.php?title=China:_Heavyduty:_Emissions

¹⁷ 有关排放标准，详见DieselNet. 2015. “Emission Standards: China: Heavy-duty Truck and Bus Engines”
<https://www.dieselnets.com/standards/cn/hd.php>

表1: 重型柴油发动机排放标准

标准	试验循环	CO	HC	NMHC	NO _x	PM	PN	烟气	NH ₃
		g/kWh					kWh-1	1/m	ppm
国一*	ECE R-49	4.9	1.23	—	9.0	0.68			
国二*		4.0	1.1	—	7.0	0.15			
国三	ESC + ELR	2.1	0.66	—	5.0	0.10		0.8	
	ETC	5.45	—	0.78	5.0	0.16		—	
国四	ESC + ELR	1.5	0.46	—	3.5	0.02		0.5	
	ETC	4.0	—	0.55	3.5	0.03		—	
国五	ESC + ELR	1.5	0.46	—	2.0	0.02		0.5	10
	ETC	4.0	—	0.55	2.0	0.03		—	10
国六**	WHSC	1.5	0.13	0.13	0.40	0.010	8.0×10 ¹¹		10
	WHTC	4.0	0.16	0.16	0.46	0.010	6.0×10 ¹¹		10
	WNTE	2.0	0.22	0.22	0.48	0.012			

* PM (颗粒物) 限值适用于功率不超过85kW的发动机

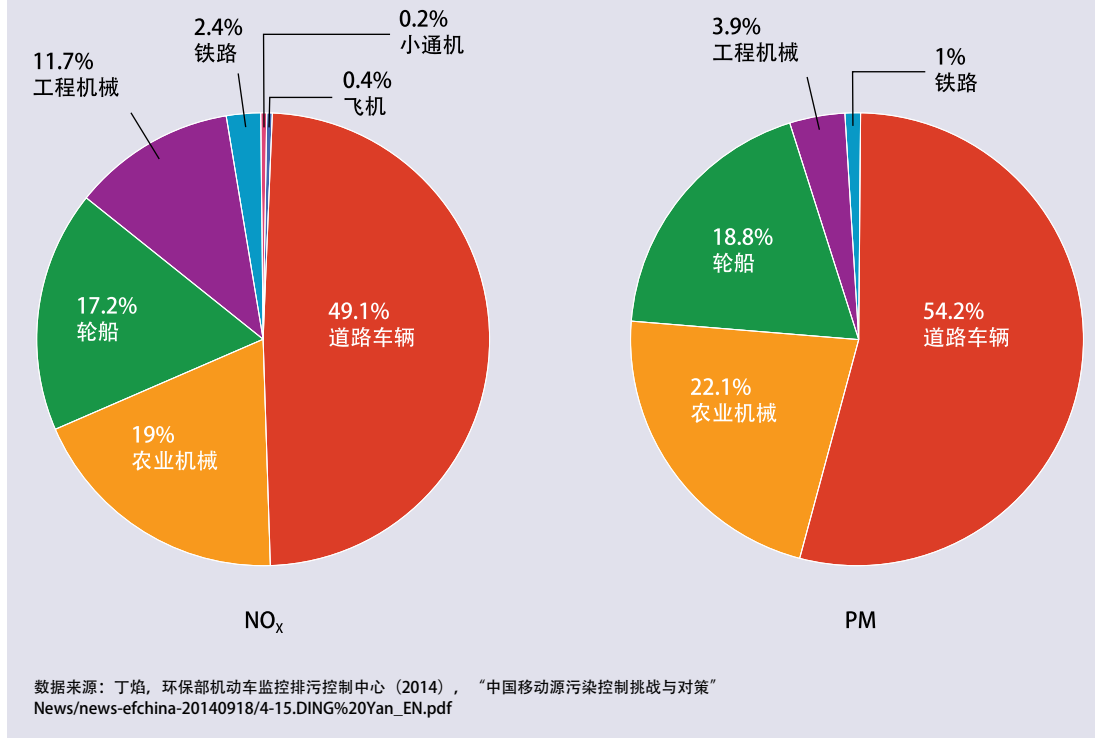
** 预计的“国六”限值

NMHC=非甲烷碳氢化合物

PN = 颗粒物数

表和图中数据均摘自中国环境保护部颁布的“车用压燃式发动机排气污染物排放限值及测量方法”

<http://www.mep.gov.cn/image20010518/1923.pdf> (“国一”)；另源一: DieselNet “Heavy-Duty Truck and Bus Engines” (重型卡车和公共汽车发动机) <https://www.dieselnet.com/standards/cn/hd.php> (“国二”~“国四”)

图1: 2014年中国移动排放源在NO_x和PM排放中的占比

产高硫燃料¹⁸。原定2012/2013年期间在全国范围内实施的“国五”,也被推迟到2017年7月。推迟的原因是全国范围内的优质燃料供应不足。多年来,中国的监管机构未能与石油企业就全国提高低硫燃料供应量的时间表达成一致¹⁹。2013年冬季的严重空气污染事件,最终促使政府高层出面干预。随后出台的燃料质量标准对应了排放标准,要求到2017年1月,硫含量减至10 ppm²⁰。

对于农用和施工用非公路车辆和机械设备,中国采用了基于欧洲法规的标准。目前的标准(第三阶段),是基于欧盟EU IIIA标准制定的,已于2014年10月开始生效²¹,但第四阶段标准的生效日期尚未确定。最小型发动机(50马力)的排放限值与美国的US Tier 1/2标准一致。据环境保护部机动车排放管理中心估计,2014年非公路车辆和机械设备约占移动排放源NO_x总排放的31%、占PM总排放的26%(图1)。

中国的内河船只基本上都是低吨位老旧机型,这些船只大多配备的是已经落后的小马力和中马力柴油发动机。为了节省成本,有些船只使用的是劣质燃料油,造成了更为复

¹⁸ Eveland, 2012, “China IV diesel emissions legislation further delayed”
<https://www.integer-research.com/integer-alert/china-iv-diesel-emissions-legislation-further-delayed/>

¹⁹ 有关清洁空气政策的历史, 详见国际清洁运输理事会文件 (2013)。

²⁰ 数据来源: 国务院 (2015), “李克强主持召开国务院常务会议 (2015年4月28日)”
http://www.gov.cn/guowuyuan/2015-04/28/content_2854625.htm

²¹ 详见DieselNet “Emissions Standards: China: Non-road” <https://www.dieselnet.com/standards/cn/nonroad.php>

进入中国柴油排放控制市场的策略

选择性催化还原 (SCR) 系统已成为广泛采用的达标策略, 以满足更严格的重型车辆NOx排放标准。在中国, 虽说SCR系统的推广尚处初级阶段, 但随着NOx排放标准的逐渐严格, SCR制造商将迎来巨大商机。

优美科汽车催化剂公司开发出了重型发动机的SCR系统, 并已开始在美国推广。该公司总部位于欧洲, 在世界各地设有办事处和研发中心 (包括美国和中国), 但中国目前的执法体系尚不支持SCR系统的广泛应用。此外, 燃料质量也是在中国推广SCR系统的一个难点, 因为柴油中的硫和锰会损坏催化剂系统。

优美科预见到中国将逐步严格NOx法规, 通过仅向中国的大型国际化汽车制造商供应产品, 找到了一条通向中国市场的独特之路。优美科通过开展中国业务在这一行业占据了一席之地。他们在中国的SCR系统供应商中, 90%都是中国本土公司。今后几年内, 随着中国对柴油车的监管日趋严格, 中国重型汽车的制造商有可能去接洽像优美科这样已在中国开展过业务的企业, 由他们供应SCR系统。

杂、更为严重的污染。目前, 虽尚未对内河船只的排放制定具体限制标准, 但37kw以下的小型柴油机, 均按非公路移动设备进行管控, 执行“国一”和“国二”标准²²。功率不低于37kw的中型柴油发动机排放标准目前正在制订之中, 可能会要求采用类似于公路车辆的排放标准。有关低硫柴油的规定, 也将对内河船只的污染防控产生效果。

随着上述防控措施的出台, 清洁燃料有望成为协同实现空气污染防控和碳减排的主要措施之一。柴油车数量的持续增长 (预计2020年达到3600-4560万辆)²³, 将催生一个巨大的柴油颗粒捕集器 (DPF) 及相关设备市场, 市场价值预计达到人民币3万亿元²⁴。

1.2.2 挥发性有机化合物 (VOC) 排放控制技术

VOC属于有机化学物, 室温下挥发性极高, 是中国臭氧和PM_{2.5}污染的重要来源。有些VOC还有致癌或致突变作用。2010年以前, 中国并未把VOC列为主要大气污染物。在2012年《重点区域大气污染防治十二五规划》(2011-2015) 出台之前, 大气污染防治策略并未具体针对VOC, 甚至在2015年初也只是提出要减少VOC排放。

2013年发布的国家《大气污染防治行动计划》是强制要求新工厂建设施工评估中考考虑环境影响的第一法。同年, 北京发布了《北京市2013-2017年清洁空气行动计划》, 设定了VOC排放控制指标, 授权北京市环保局从2014年起向工业排放源征收排污费, 并制定了目标一在2017年前将工业排放源的VOC排放降至2012年水平。2015修订的《大气污染防治法》首次为地方环保局管控VOC排放提供了法律依据, 目前已在北京、上海、江苏和湖南等省市实施。

²² 详见国家环保部环境标准研究所 (2014) 和Lin & Elder (2014)

²³ 数据来源: 《2016年中国机动车管理年报》和《2015年中国机动车污染防治年报》。

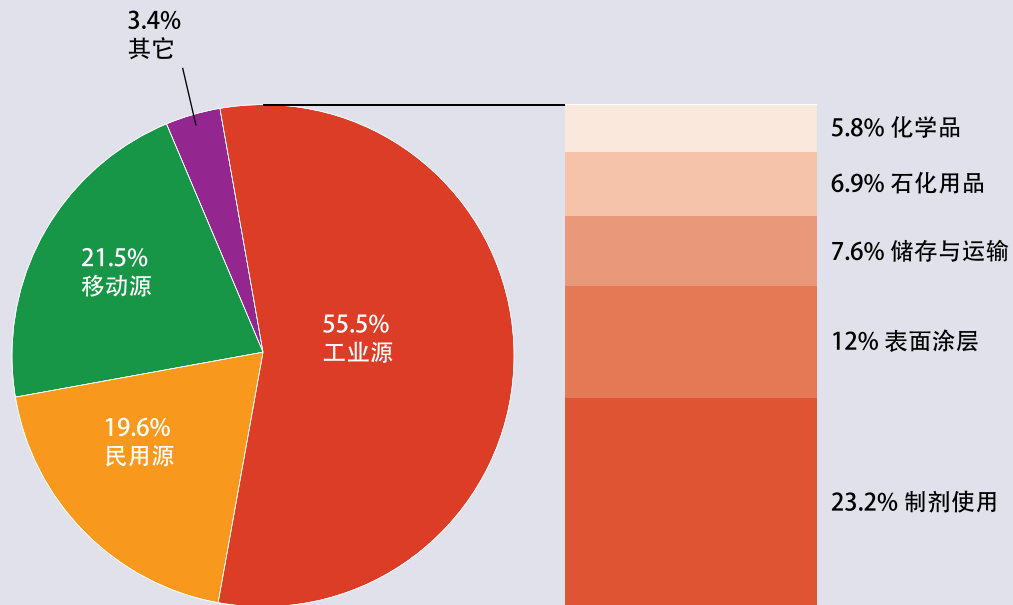
²⁴ CAAC estimated number based on 《深圳市人居环境委关于公开征集在用柴油车改造产品的通知》and 《关于开展移动源颗粒物治理技术环保信息公开工作的通知》。

表2: 国家关于VOC治理的政策

日期	政府部门	政策法规	VOC相关的要点总结
2011.12	国家环保部	《国家环境保护“十二五”规划》	正式提出对VOC排放进行监测和控制
2012.10	国家环保部	《重点区域大气污染防治规划》	必须将VOC污染控制列为建设项目环境影响评价内容
2013.6	国家环保部	《挥发性有机物(VOCs)污染防治技术政策》	规定了含VOC产品及其生产和使用各环节的污染防治方法
2013.9	国务院	《大气污染防治行动计划》	到2017年底, 必须全面推进VOC污染治理
2013.9	环保部等六部	《京津冀及周边地区落实大气污染防治行动计划实施细则》	积极推进清洁生产技术, 到2017年底, 完成钢铁、水泥、化工、石化、有色金属等行业的清洁生产审核
2014.7	环保部等六部	《大气污染防治行动计划实施情况考核办法(试行)实施细则》	制定了北京、天津、河北等地区2014-2017年期间VOC监测控制的工作计划
2014.12	国家环保部	《石化行业挥发性有机物综合整治方案》	建立VOC管理体系, 实施VOC污染控制
2015.6	财政部、发改委、环保部	《挥发性有机物排污收费试点办法》	对石油化工业和包装印刷业试行征收VOC排污费
2015.8	全国人大	新版《大气污染防治法》	首次将VOC纳入环境监管范畴
2016.7	工信部, 财政部	《重点行业挥发性有机物削减行动计划》	到2018年, 工业行业VOC排放量比2015年削减330万吨以上

信息来源: 中证投公司收集的资料 (2016) (中文)
http://pg.jrj.com.cn/acc/Res/CN_RES/INDUS/2016/7/14/c726b2bf-ec09-4895-a613-5087ad1ff827.pdf

图2: 2009年中国VOC排放源占比 (估测值)



中国尚没有VOC排放方面的官方数据
2006-2010人为源VOC排放每年大约在2200至2600万吨之间

图中数据来源：环境保护部环境规划院李晓琼 “Environmental Tax – A potential Policy Tool on VOC Control in China”
http://conferences.au.dk/fileadmin/conferences/gcet/Presentations_in_the_detailed_programme/O_052_Potential_Tool_on_VOC_control_in_China_Li_Xiaoqiong.pdf

近期，财政部与工信部在2016年7月联合下发了《重点行业挥发性有机物削减行动计划》，规定重点行业到2018年的VOC 的排放必须比2015年水平减少330万吨以上（表2）。该计划还要求，苯和甲苯两种VOC排放源的用量必须减少20%以上，低VOC或无VOC的“绿色”农药、涂料、油墨、粘合剂和轮胎产品的使用比例应分别达到70%、60%、70%、85%和40%²⁵。

地方环保局出台的VOC排放规定，重点放在具体操作和定价政策上；国家政策则强调整体减排指标和计算方法。规划中的初步指标是，每年减少VOC排放430万吨（相比2009年水平），到2020年达到1700万吨，到2030年达到1500万吨以下²⁶。据中国清洁空气联盟估算，这些减排要求将带来1730亿元的VOC减排技术投资²⁷。

2009年，工业污染源在中国VOC排放中占有相当大比例，占VOC总排放55%（图2）。污染最严重的是那些使用含VOC涂料或油墨的行业，比如建筑表面涂料业和包装印刷行

²⁵ 有关《重点行业挥发性有机物削减行动计划》，详见 https://hk.lexiscn.com/latest_message.php?access=show_detail&id=195814

²⁶ 环境保护部环境标准研究所（2014）

²⁷ 中国清洁空气联盟（2015），《VOCs治理：千亿投资空间》，<http://www.cleanairchina.org/product/6972.html>

业²⁸。据中国清洁空气联盟估计，2012年这两个行业排放的年增长分别是250万吨和240万吨²⁹。国务院已在2013年的《大气污染防治计划》中要求对含VOC的工业用溶剂执行排放限值。

炼油业是VOC排放的另一大来源。燃油提炼、运输和储存所用的基础设施经过长年累月使用可能会出现小裂缝，逸散少量VOC，聚集后形成大气VOC的主要来源。《大气污染防治计划》要求石化产业对工厂设施进行改造，使用“测漏检测与修复”（LDAR）技术和油气回收技术尽量降低污染风险和影响。具体来说，环境保护部于2015年发布了《石化企业泄漏检测与修复工作指南》，提出工业管道和设备组件中VOC质量分数大于或等于10%时，必须安装LDAR控制系统³⁰。地方环保局也开始颁布当地的LDAR要求，这些要求可以严于国家要求。

《大气污染防治计划》同样要求国家环保部和地方环保局对VOC的其他工业排放源（比如车辆、设备、家具、电子产品、医药等）进行管控。由于车辆排放标准越来越严格（从“国一”到“国四”），公路汽车尾气排放的VOC明显下降。但2009年的一份预测称，VOC排放仍有21%来自移动排放源，极可能是汽油加油过程中从油箱蒸发的VOC（图3）。现行的中国汽油车蒸发排放标准是基于欧洲“阶段II”的油气回收技术，这种技术对混合型蒸发排放场合（加油、渗漏和运行损耗）的控制效率只有46%³¹。

1.2.3 空气质量监测与室内空气净化

经历了30多年的快速发展和工业化之后，中国现在不得不面对严峻的环境问题，其中包括冬季困扰大部分地区的雾霾问题。中国过去报告的户外空气质量数据不够充分，近些年这一状况已有所改善。2012年，中国修订了空气质量标准，可谓是中国空气质量控制的一个里程碑。此次修订首次规定了PM_{2.5}（可入肺颗粒物）和O₃（臭氧）的排放限值。此外，还提出了“三步走”的城市空气质量管理计划，要求京津冀地区、长江三角洲和珠江三角洲的省会城市和重点城市从2012年开始监测和报告PM_{2.5}和O₃水平，113个环保重点城市从2013年起执行这一计划，333个地级市准备从2016年开始执行。这些空气质量实时监测网络为地方政府提供了监督空气污染状况的有效途径。

冬季严重雾霾迫使人们（特别是老人和儿童）停留在室内的时间更多，室内空气质量便成为了一个重要的健康因素。室内虽存在空气污染源（如建筑材料、家具、装饰、油漆和涂料等），但户外大气环境仍对室内空气质量有很大影响。事实上，近年来雾霾正在成为中国冬季最大的室内空气污染源。尽管中国在采取多项措施改善城市空气质量，但要取得成效绝非一朝一夕之事，因此有必要将使用室内空气净化技术作为短期内提高人民健康水平的重要措施之一。

非典事件、日益恶化的空气污染、空气质量监测信息的公开以及媒体的广泛宣传，都提升了公众对这一问题的认识，也使得室内空气质量监测装置和室内空气净化器市场迅速扩张，尤以2010年初最为明显。2012年，中国的空气净化器生产商达到了223家，城镇居

²⁸ 数据来源：He (2016)。

²⁹ 数据来源：中国清洁空气联盟（2015）

³⁰ 《石化企业泄漏检测与修复工作指南》。http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201511/W020151124546328688845.pdf

³¹ 详见MECA报告“Reducing Evaporative Emissions - the Largest Source of VOC Emissions Leading to Haze, PM_{2.5} and Ozone Formation in China's Major Cities: A Macro and Micro Analysis with Information on International Experience and Related Implications for China”（2014）

http://www.meca.org/resources/MECA_China_Evap_English_June_2014.pdf

民家庭安装的空气净化器达到了600万台³²，与2011年相比，市场规模扩大了50%。2013年雾霾大爆发，进一步刺激了这些地区的市场增长。据中国《科技日报》估计，到2020年，空气净化市场的市值将达到1000亿元人民币³³。

1.2.4 工业与民用替代燃料

中国很大一部分煤耗来自工业用煤。2013年，中国约23%的煤耗是工业直接消耗，另有15%用于生产工业用焦炭³⁴。虽然针对大排放源（钢铁厂、水泥窑等）出台了相关规定，但执行困难，实际成效难免打折扣³⁵。仅工业锅炉一项就占到了全国总煤耗的18%，烟尘排放总量的33%，二氧化碳排放总量的27%。工业燃料改用天然气、生物质油和电（部分行业）的潜力很大，可有助于减少燃煤排放³⁶。使用替代燃料所能带来的空气质量改善不仅仅局限于工业行业，事实上，民用燃煤也是威胁中国空气质量和民生健康问题的一大排放源。

中国许多农村家庭使用型煤和生物质（木柴和农作物秸秆）来取暖、烧水和做饭。室内燃烧煤和生物质会释放出大量颗粒物、黑碳和有机碳，是造成室内空气污染和局部雾霾的一大成因。民用燃料引起的室内空气污染会导致呼吸系统疾病、肺癌和慢性阻塞性肺病³⁷。在大量燃烧生物质取暖的冬季，污染相当严重。尽管民用煤量不及总煤耗的1%，但因暴露风险要高很多，所以对健康影响很大³⁸。

为解决这一问题，中国在2000年修订了《中华人民共和国大气污染防治法》，规定大城市禁止使用或销售煤炭。各省政府选出了113个“重点城市”³⁹，责令这些城市的地方环保部门划定禁止销售和使用高污染燃料的区域⁴⁰。非重点地区也只允许使用比原煤清洁的固硫型煤等燃料。但目前尚未公布相关实施数据，来评估相应的执法成效。在农村地区，随着居民收入水平的提高和对商品煤负担能力的提高，烧煤越来越多地取代了烧生物质燃料⁴¹。蜂窝煤因其密度高于原煤，因此排放的PM和SO₂比原煤低，可随清洁炉灶一起享受中国政府为推广使用而提供的补贴。

除了对民用燃料的使用进行限制外，中国还重点开展了“改炉改灶干预措施项目”——对使用清洁炉灶做饭和取暖实行鼓励政策，开展研究并发放改良炉具。从20世纪80年代初到90年代中期，政府实施了一个“国家改炉改灶项目”，发放了1.8亿个改良炉灶，这些炉灶的排放要比柴灶低很多。中国于2012年加入了“全球清洁炉灶联盟”，以此来推动清洁炉灶的发放与研究。但中国的锅炉行业还是面临诸多挑战，比如：标准体系不完整、产品质量低下、缺乏一个强大的认证和评估体系等⁴²。

根据中国环保部公布的信息，中国每年的“散煤”⁴³耗用量在6000亿吨到7000亿吨之

³² 详见Pim撰写的“China's 'China's Home Air Purifiers Market Research” (2014).
http://www.pimchina.com/uploads/soft/150826/1_1152293511.pdf

³³ 《科技日报》2015.1.28, “空净市场未来五年将破千亿”。

³⁴ 数据来源：国家统计局网站, <http://www.stats.gov.cn/>.

³⁵ Clifford, 2015, “China's Economic Slowdown: We May have Seen Peak Coal”

<http://www.forbes.com/sites/mclifford/2015/09/03/chinas-economic-slowdown-we-may-have-seen-peak-coal/#22061ba31c00>

³⁶ Shen, Price, Lu, Liu, Tsen, (2015).

³⁷ Zhang & Smith, (2007).

³⁸ 数据来源：国家统计局“2013年统计年鉴”

³⁹ 大中型城市，包括31个省会城市

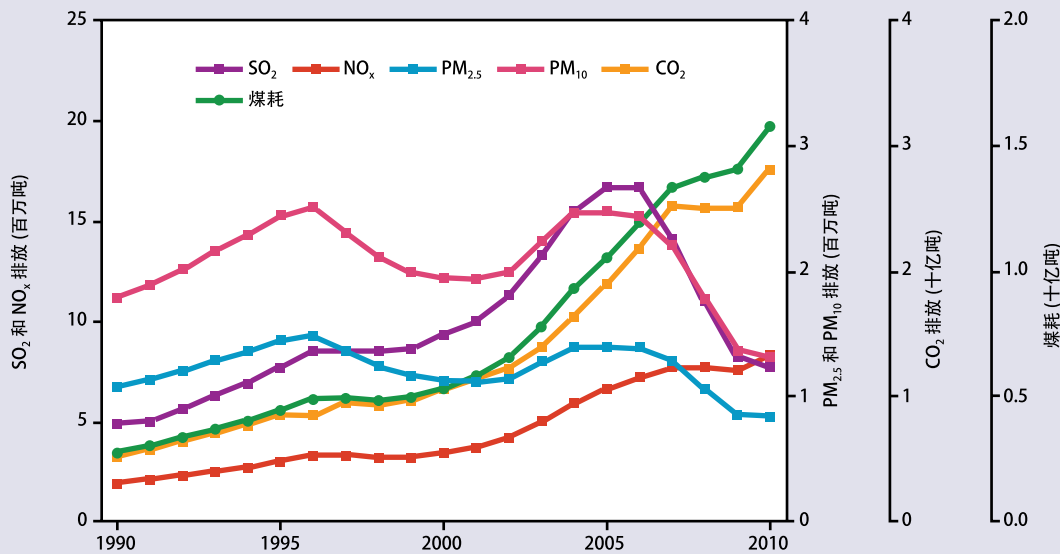
⁴⁰ Duan & Zhang, (2014).

⁴¹ Duan & Zhang, (2014).

⁴² 中国农业大学 (2015)

⁴³ 其中包括居民取暖、家庭烹饪和小型工业锅炉用煤量。

图3: 中国火力发电厂煤耗及排放 (1990-2010)



图片来源: F. Liu, Q. Zhang, D. Tong, B. Zhang, M. Li, H. Huo, 和 K. B. He, "High-resolution inventory of technologies, activities, and emissions of coal-fired power plants in China from 1990 to 2010," <http://www.atmoschem-phys.net/15/13299/2015/acp-15-13299-2015.pdf>

间, 占中国年耗煤总量的20%, 造成了约1000万吨的SO₂排放和320万吨的NO_x排放⁴⁴。为解决这一问题, 中国正在逐步加强对散煤排放的控制。据统计, 京津冀地区散煤年耗量为3600万吨。某研究表明, 如果这些用煤量能通过替代燃料取代, 那么到2020年, 仅京津冀地区的市场规模就有可能达到580亿元⁴⁵。

1.2.5 火力发电厂超低排放控制技术

中国的煤炭资源丰富, 煤一直是中国成本最低的发电资源。2012年, 中国用煤量达到了36亿吨, 占全球用煤总量的一半。2014年, 电力行业70%以上的电由火力发电厂提供, 这些发电的年耗煤量占全国总煤耗量的近一半⁴⁶。以往, 火力发电厂是二氧化硫 (SO₂)、颗粒物 (PM) 和部分氮氧化物 (NO_x)、汞和二氧化碳 (CO₂) 的最大排放源⁴⁷。另外, 火力发电厂也是温室气体排放大户。近期研究数据表明, 在中国, 火力发电仍在排放60%的SO₂和40%的CO₂⁴⁸。

⁴⁴ www.cnenergy.org, “年消耗达6-7亿吨, 散煤成煤炭清洁高效利用难点” (2015).

www.cnenergy.org/tt/201512/t20151224_255791.html

⁴⁵ 在京津冀区域大气污染防治技术培训研讨会上杨旭东发言, “京津冀地区清洁能源技术与分析”, 2016年1月22日

⁴⁶ Thieriot, Tan, Nagpal, Ferroukhi, 2016, “Water Use in China’s Power Sector: Impact of Renewables and Cooling Technologies to 2030” http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_China_Water_Risk_Power_brief_2016.pdf

⁴⁷ Wang, 2012, “Emissions of air pollutants from power plants in China”

[http://www.htap.org/meetings/2012/2012_10/Presentations/Tues/Plenary%20Session/Wang-HTAP-20121009\(1\).pdf](http://www.htap.org/meetings/2012/2012_10/Presentations/Tues/Plenary%20Session/Wang-HTAP-20121009(1).pdf)

⁴⁸ 数据来源: Zhao X., (2015).

表3: 中国火力发电厂排放标准

	1996 全国	2002 北京	2003 全国	2007 北京	2011 全国	2020 全国
SO ₂ (毫克/立方米)	1200-2100	100-150	400-1200	50	200	35
NO _x (毫克/立方米)	650-1000	—	450-1000	150-250	100-200	50
PM (毫克/立方米)	200	50	50	10	30	10

数据来源: Wang Shuxiao, (2012)

为减少火力发电厂排放,自2005年在“十一五”规划中提到议事日程后,排放标准首次开始收紧。“十一五”规划要求,在全国范围内关闭低效和污染严重的小型火力发电厂,所有发电厂必须安装烟气脱硫设备⁴⁹。除五年规划外,国务院的《大气污染防治行动计划》还设定了重点地区的用煤上限,禁止重点地区新建发电厂(热电联产除外),要求到2017年全国电力行业用煤比例降至65%,洗煤率达到70%。

在新出台的《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014-2020年)》中,提出了一项“超低排放与煤电节能”⁵⁰计划,要求到2020年全国所有新建和既有火力发电厂必须将排放降到与天然气发电机组同等的水平,华东和华中地区分别于2017年和2018年提前达标(表3)⁵¹。该计划还旨在提高火力发电厂效率,力争将单位发电煤耗从310克煤当量降至300克煤当量。

超低排放是中国政府大力推广的一项技术,并提供有特殊财政补贴和信贷融资支持。据金融服务业估算,污控改造的市值可能在400亿元左右⁵²。

⁴⁹ Zhao et al., (2014).

⁵⁰ 超低排放的标准是:在基准含氧量6%条件下,火力发电厂排放的烟尘、二氧化硫、氮氧化物排放浓度分别不高于10mg/Nm³、35mg/Nm³、50mg/Nm³。

⁵¹ 环境保护部(2015).

⁵² 上海证券报(12月3日, 3015). Shanghai Securities News (December 3, 2015).
http://finance.ifeng.com/a/20151203/14105567_0.shtml

2. 美国现有及新兴的清洁空气技术

本章概要介绍美国在前一章所述五个领域的现有技术和新兴技术。

1. 柴油机排放控制技术
2. 固定排放源和汽油车VOC (挥发性有机化合物) 排放控制技术
3. 空气质量监测与净化装置
4. 工业与民用替代燃料
5. 火电厂超低排放控制技术

2.1 柴油车排放控制技术

“柴油机”涵盖范围广泛, 其中包括: 卡车、公共汽车、火车、建筑施工车辆、港口车辆、矿山用车、非公路车辆和水上船只。其中, 道路车辆通常是最大污染源之一 (也是本章讨论的重点), 其排放控制技术与其它柴油机类似。在某些具体应用中, 柴油机发动机因其高效、耐用的特性而比汽油发动机更受欢迎。由于柴油发动机的设计和工作特性与汽油发动机有很大不同, 因此所用的排放控制技术通常也不同于汽油发动机。

柴油机会排放多种对人体健康有直接或间接危害的污染物。在美国, 环境监管部门近年来一直将重点放在整治柴油道路车辆颗粒物 (PM) 和氮氧化物 (NO_x) 排放上。美国目前针对新产重型柴油车辆实施了最严格的PM和 NO_x 排放标准 (图4), 这些标准自2007年起就已生效⁵³。柴油发动机制造商为了满足这些排放标准, 采用了技术上具有一定共性的解决方案, 本章将介绍这些技术。

有些排放控制技术还可以减少柴油机的温室气体排放, 但是想要进一步减少交通运输行业的温室气体排放, 仍需逐步摒弃柴油燃料的使用。柴油发动机替代燃料的应用领域仍然很窄, 仅在短距离搬运卡车和公共汽车上应用。

2.1.1 颗粒物和氮氧化物排放控制技术

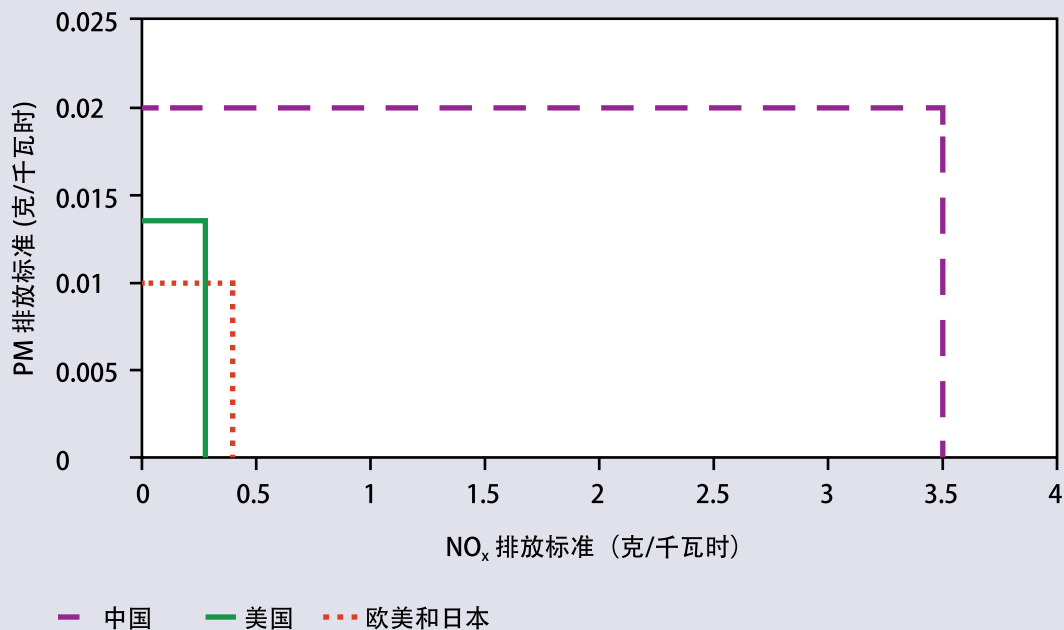
PM (颗粒物) 和 NO_x (氮氧化物) 的排放原因各不相同。PM排放是因柴油燃料不完全燃烧所致, 但这种排放可通过调节空气和燃料在发动机燃烧室内的混合程度来降低。而 NO_x 的排放则主要源于空气中的高温燃烧, 由于完全燃烧会导致燃烧温度升高, 所以减少PM排放的同时可能会增加 NO_x 的排放。因此, 要显著降低柴油车辆总排放量, 需要协同控制这两种污染物的排放。

一般来说, 有两种方法可以协同控制柴油车辆的PM和 NO_x 排放: (1) 抑制PM和 NO_x 在发动机气缸内形成 (“缸内”技术); (2) 清除发动机排气中的PM和 NO_x (“排气端”技术)。这两种方法目前囊括了控制PM和 NO_x 排放的11项关键技术 (表4)⁵⁴。

⁵³ 美国环保局的颗粒物排放标准于2007年开始实施, 氮氧化物排放标准2007年到2010期间分阶段实施, 有关最终规定, 详见EPA (2001)。

⁵⁴ 有关这些技术的详细描述, 请见 Posada et al. (2016) 和 MECA (2007)。

图 4：美国、中国、欧盟和日本重型汽车颗粒物和氮氧化物排放标准之对比



数据来源：TransportPolicy.net。中国的数据基于“国四”和“国五”，这些标准最初计划在2013年开始实施，但已推迟实施。这些标准将使中国的NO_x标准降至2.0 g/kW-hr。欧盟的标准是欧VI（2013），日本的标准在2016年开始实施。

2.1.1.1 汽缸内控制技术

“缸内控制排放”技术是指：通过调节空气和柴油燃料在发动机燃烧室内的混合程度来控制PM排放；通过调节燃烧温度来控制NO_x排放。发动机的总体设计对于空气与燃料的混合来说举足轻重，但发动机通常还使用专用设备来管理进入燃烧室的空气和燃料。空气管理系统能精确控制空气的温度、速度、组分和压力。燃油喷射系统可以更精确地控制燃油喷射的时间、速度和压力。这些系统可以协同校准，使之既降低PM排放又降低NO_x排放，从而满足现有标准⁵⁵。

本世纪初，许多重型车辆制造商开始安装废气再循环（EGR）系统，以期符合美国环保署的NO_x排放标准。废气再循环技术的原理是，将发动机排出的废气再循环回发动机汽缸中，从而降低燃烧温度，减少NO_x形成。可变几何涡轮增压器（VGTS）常与废气再循环系统结合使用，用以控制进入歧管的冷却气体，优化发动机性能、减少NO_x排放。此外，制造商还会继续将废气再循环系统与选择性催化还原系统联用。

⁵⁵ 具体地说，可以根据监管要求来调整空气管理和燃油喷射系统，从而调高或调低PM和NO_x产生量。例如，前级燃油喷射往往是提升燃烧温度、减少颗粒物排放、并增加氮氧化物排放，而后级喷油系统则往往是低温度、增加颗粒物排放、减少氮氧化物排放。

表4: 柴油机排放控制关键技术

技术	重点	污染物
发动机设计	缸内	所有
空气管理系统	缸内	所有
燃油喷射系统	缸内	所有
柴油氧化催化剂	排气端	PM
柴油机颗粒捕集器	排气端	PM
闭式曲轴箱滤清技术	排气端	PM
废气再循环系统	缸内	NO _x
选择性催化还原系统	排气端	NO _x
稀燃氮氧化物捕集器 (亦称氮氧化物吸附器)	排气端	NO _x
稀燃NO _x 催化剂	排气端	NO _x
车载诊断系统	整机	所有

2.1.1.2 PM控制技术

上世纪90年代, 柴油发动机制造商开始安装柴油氧化催化剂, 以满足美国环保署的PM和NO_x排放标准⁵⁶。使用柴油氧化催化剂后, 废气经过催化剂, 氧化了颗粒物的可溶有机成分、其他未燃烧碳氢化合物和一氧化碳, 转化为二氧化碳和水⁵⁷。柴油氧化催化剂一般可将颗粒物排放量减少35%至20%, 具体取决于废气中可溶有机物的比例 (相对于干燥固体颗粒) (表5)。

为了满足环保署2007年的PM标准, 美国所有新产重型柴油车辆均被要求安装高效 (壁流) 柴油颗粒物捕集器。高效率捕集器作用是: 利用超细颗粒多孔材料捕获发动机排气中的颗粒物, 将颗粒物排放减少90%以上 (表5)。使用这种捕集器, 需要使用低硫柴油, 因为高硫燃油会影响捕集器的性能和耐久性。早在2007年标准制订期间 (即2006年年中), 美国环保署就已开始要求生产低硫柴油 (15 ppm)⁵⁸。

在加利福尼亚州, 为了满足在用柴油机的排放标准, 车辆运营商根据应用场合和排

⁵⁶ 柴油氧化催化剂虽不降低NO_x排放量, 但使用柴油氧化催化剂能使制造商能够在符合严格PM标准的同时满足环保局大幅减少NO_x排放量的要求。

⁵⁷ 可溶有机物是指可以使用有机溶剂提取的颗粒物组分, 由附着在固体干碳颗粒上的碳氢化合物组成。

⁵⁸ EPA (2001)。

表5: 不同控制技术的颗粒物减排效果⁵⁹

技术	PM减排
柴油氧化催化剂	20 – 35%
高效柴油颗粒物捕集器	> 90%
分流式柴油颗粒物捕集器	30 – 75%
闭式曲轴箱滤清技术	不详

放控制要求, 或采用高效壁流颗粒物捕集器、或采用半流颗粒物捕集器。与高效率捕集器相比, 半流捕集器的材料不同。虽说捕获效率低了许多, 但优点是: 几乎无需维修, 还可以根据不同的发动机应用量身定制。

柴油氧化催化剂的功能与柴油颗粒物捕集器略有不同, 两者常常联用, 前者用在上游或与后者集成在一起。柴油氧化催化剂的作用是, 在排气端对碳氢化合物进行氧化, 此外, 通常还有另外两个作用: (1) 提高选择性催化还原系统的效率; (2) 减少颗粒物在捕集器上的累积⁶⁰。

在内燃机中, 曲轴箱属于大体积金属容器, 内含曲轴以及发动机其他关键部件。燃烧过程中, 发动机气缸逸出的气体会进入曲轴箱。2007年之前, 美国环保署对除涡轮增压重型发动机以外所有的高速公路车辆曲轴箱PM排放进行了管控, 容许涡轮增压重型发动机的大部分PM排放到大气中。2007年, 美国环保署开始对所有高速公路车辆的曲轴箱排放进行管控, 并引入了闭式曲轴箱滤清系统⁶¹, 将曲轴箱气体收集起来, 然后通过一个捕集器去除颗粒物。

2.1.1.3 NO_x排放控制技术

为满足美国环保署对新产道路车辆实行的NO_x排放标准, 所有重型柴油机制造商目前都在使用选择性催化还原 (SCR) 系统。SCR系统是将尿素喷入发动机尾气中, 在催化剂作用下, 将氮氧化物转化为氨和水⁶²。但由于尿素盛装在车载尿素罐中, 会增加车重; 另外, 在寒冷地区还常常需要使用电加热器, 来确保尿素罐不冻结。SCR系统通常使用传感器来确定尿素喷射量, 如果喷射过量, 还会导致氨气排放。

SCR系统的工作温度范围较宽, 这样柴油燃料燃烧便可达到很高温度, 车辆效率也会提高。高温燃烧减少了颗粒物, 提高了燃油效率, 有助于去除柴油颗粒物捕集器上的颗粒物。而因燃烧温度升高而增加的发动机NO_x排放量可通过SCR系统来降低。

虽然SCR目前在美国是重型公路车辆NO_x减排达标中采用的主要技术, 但稀燃NO_x

⁵⁹ 估算依据: Posada et al. (2016) 和 MECA (2007)

⁶⁰ 柴油氧化催化剂通过将发动机尾气中的氮氧化物 (NO) 转化为二氧化氮 (NO₂) 来提高选择性催化还原系统的效率, 从而提高较低温度下将NO_x转换为氨和水的能。NO₂也在被动式再生系统中用作氧化剂, 将柴油颗粒物滤清器中的颗粒燃烧掉。

⁶¹ 美国环保署的PM标准适用于车辆总排放量, 允许制造商灵活设计。比如, 如果曲轴箱排放到大气中的PM增多, 就必须对排气进行更严格的控制。参见EPA (2001)。

⁶² 具体地说, 尿素先通过水解分解反应器转化为氨 (NH₃), 氨然后与NO和NO₂反应, 形成氮 (N₂) 和水 (H₂O)。

表 6: 不同控制技术的NO_x减排效果⁶³

技术	NO _x 减排
选择性催化还原系统	75 – 90%
稀燃NO _x 捕集器	50 – 90%
稀燃NO _x 催化剂	10 – 30%

捕集器也基本上被认为是可行的替代方案,因为它去除NO_x的效率可能会非常高(表6)。稀燃NO_x捕集器可“捕获”尾气中的NO_x,然后通过催化作用,将其转化成氮。制造商已在轻型柴油车辆上采用稀燃NO_x捕集器,研究人员也研究了将稀燃NO_x捕集器和SCR系统联合使用所能实现的功能—由NO_x捕集器为SCR系统提供氨源,不再需要安装车载尿素罐⁶⁴。

目前,有关新一代柴油机氮氧化物控制技术的研究正在进行之中,例如,加州空气资源委员会正在协助开展先进柴油机与控制技术的研究,以期在当前标准的基础上再降低90%的排放⁶⁵。

2.1.1.4 集成系统设计

若要大幅度降低柴油排放,需要采用更加集成系统的方法来设计新车发动机和排放控制系统。发动机制造商将发动机与排放控制装置集成为一个系统,而不是孤立的组件⁶⁶。这一方法使得制造商能够在满足排放标准和最小化排放控制设备成本的同时,优化发动机和排放控制系统的设计,从而提高燃料效率和车辆性能。

2.1.1.5 车载诊断系统

为实施更为严格的柴油排放控制标准,美国环保署和加州空气资源委员会要求生产厂家必须安装车载诊断系统,用以监测车载污控设备的运行。这种系统在确保在用车辆持续满足排放标准中发挥了重要作用。当排放水平超过特定阈值时,通常需要使用诊断系统来检测并报告问题所在。例如,加州空气资源委员会要求使用车载诊断系统,基于尾气中的NO_x含量来监控SCR系统的转换效率⁶⁷。车载诊断系统要求的进一步严格,推动了先进传感器技术的发展,包括温度、氧气、空燃比和NO_x浓度等传感器的发展,以确保发动机和排放控制系统的运行与制造商技术规格相符。

⁶³ 计算依据: Posada et al. (2016)和MECA (2007)

⁶⁴ 参见MECA (2007) 和Zukerman et al. (2009)

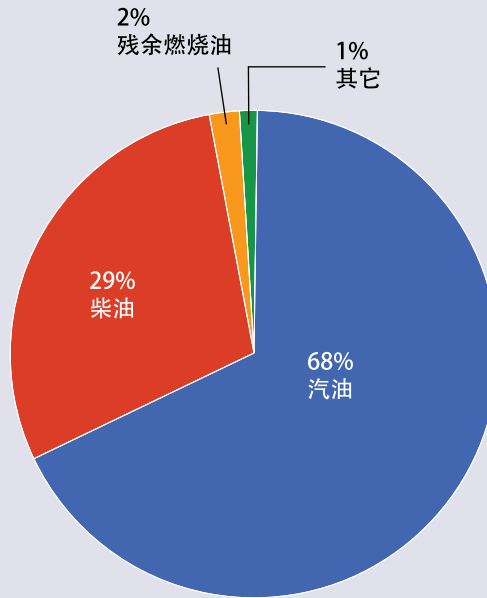
⁶⁵ 参见加州空气资源委员会“Evaluating Technologies and Methods to Lower Nitrogen Oxide Emissions from Heavy-Duty Vehicles,”
<http://www.arb.ca.gov/research/veh-emissions/low-nox/low-nox.htm>; ARB (2015a)

<http://www.arb.ca.gov/research/veh-emissions/low-nox/low-nox.htm>; ARB (2015a)。

⁶⁶ 参见康明斯“Meeting Emissions – The Cummins Solution”, <https://cumminsengines.com/cummins-aftertreatment-system>。

⁶⁷ ARB (2013)。

图5：2015年美国机动车辆燃料油耗（估计值）



数据来源：美国能源信息管理局估值（2015a）

2.1.2 替代燃料

美国绝大多数车辆都使用石油燃料，其中以汽油（轻型车）和柴油（中型和重型车）为主（图5）。最近，使用替代燃料的汽车已走进部分行业。替代柴油燃料的应用包括：以电、天然气和生物柴油为动力的车队以及短途电动卡车。天然气和生物柴油车辆也是NO_x排放源，也需要予以控制。电动汽车使用电源，因此也需要考虑上游发电过程中的排放。

在空气质量差的地区（比如城市或港口周边），替代燃料卡车和公共汽车的使用最为成功。例如，美国约40%的公交车完全或部分以生物柴油、电力或天然气为动力⁶⁸。加州目前要求绝大多数船舶泊岸时使用电作为动力，而不准使用柴油发动机，加州南海岸空气质量管理局目前正在与西门子合作一个示范项目：接触网系统——通过架空电线，柴油混合动力车在靠近洛杉矶和长滩港口时变为电动模式⁶⁹。

从更多应用来看，替代燃料车辆的推广并未取得太大成功。随着美国天然气价格的下跌，有人预言压缩天然气和液化天然气卡车将在车辆总保有量中占有更大比例。但这并未成为现实，主要原因有三：一是柴油价格下跌拉长了天然气的投资回收期，因此前期成本高于柴油车；二是天然气卡车加油站为数不多；三是柴油车现在还能够满足严格的排放标准。

⁶⁸ 数据来源：美国能源部替代燃料数据中心，“U.S. Transit Buses by Fuel Type”，<http://www.afdc.energy.gov/data/10302>。

⁶⁹ 有关该技术的更多详情，参见西门子“Electrification of road freight transport”
<http://w3.siemens.com/topics/global/en/electromobility/pages/ehighway.aspx>

港口卡车清洁化

加州的洛杉矶港和长滩港当属美国最大港口，其空气质量问题也广为人知。迫于公众压力，港口管理局、空气监管机构和制造商正在探索清洁空气新技术，以降低港口及周边的空气污染。加州南海岸空气质量管理区目前正在与西门子合作一个示范项目——接触网系统，通过架空电线，使柴油车在靠近洛杉矶和长滩港口时变为电动模式。

此外，美国能源部和加州空气资源委员会通过南海岸空气质量管理区提供资金，以激励可适用于港口的先进运输技术的开发和采用。位于南加州的Transpower公司是该项资金的受益人之一。该公司开发出了一套先进的重型车辆电力推进系统，由洛杉矶港为其提供场地，验证ElecTruck技术的运行性能和经济性。TransPower公司目前正在建造和测试在洛杉矶港口和其他仓库使用的约20台站场电动搬运车和货运卡车。此外，该公司的ElecTruck技术还覆盖校车、公共汽车和施工车辆。

尽管TransPower从中国采购关键部件，也有意于将产品销往中国市场，但该公司目前的战略是继续以美国市场为重心，待技术成熟和规模化后再谋发展。对于中国市场来说，资金和对外交易是他们担心的主要问题。

但人们一直在关注天然气发动机卡车，以满足更严格的臭氧排放和氮氧化物排放规定。加州提出到2023年，要将重型车辆的NO_x排放限值从当前水平降低90%，即降至0.027克/千瓦时⁷⁰。现有的柴油发动机控制技术无法满足这一标准，但天然气汽车可以。例如，康明斯西港公司已认证了一款以天然气为动力的重型发动机，该发动机就符合美国环保署和加州空气资源委员会的这一标准⁷¹。

未来十年，很多州须鼓励采用替代燃料汽车，才能满足长远的温室气体排放目标。重型车可采用的低温室气体排放燃料有如下三种：

- 用温室气体排放较低的电力生产液态氢
- 由沼气、氢气、合成天然气和天然气等混合产生的低温室气体排放的压缩气体或液化气体；
- 先进的液体生物燃料

未来，哪种燃料将占主导地位尚不得而知⁷²。美国环保署预计，生产厂商通过提高燃油效率，将能满足中型及重型发动机2021-2027年见的温室气体排放标准⁷³。

⁷⁰ 参见南海岸空气质量管理区“SCAQMD to Petition U.S. EPA to Adopt Lower Emission Standard for Heavy-Duty Engines,” March 2016, <http://www.aqmd.gov/home/library/public-information/2016-news-archives/near-zero-nox-emissions>

⁷¹ 参见Cummins Westport,公司“ISL G Near Zero Natural Gas Engine Certified to Near Zero” (ISL G近零排放天然气发动机已通过Near Zero认证)，是自EPA 2010标准颁布以来北美首台将NO_x排放降低90%的中马力发动机。

⁷² 参见Williams et al. (2015) and Fulton and Marshall (2015)

⁷³ EPA (2015).

洛杉矶车队清洁化

车队车辆（如公共汽车、垃圾车、校车和货车）往往是推广重型车辆替代燃料的重点。以天然气为动力的汽车和双燃料汽车，都是替代燃料的一种策略。双燃料汽车主要由天然气驱动，但使用柴油辅助点火。在用柴油车辆可以采用双燃料技术进行改造。

2001年，Clean Air Power公司通过一个示范项目，在洛杉矶卫生局的10台环卫垃圾运输车上装备了专有技术（该项目部分资金来自南海岸空气质量管理区拨款），成功展示了双燃料技术的好处。示范项目的成功，加上“SCAQMD Rule 1193”（南海岸空气质量管理区规定1193）要求垃圾车队必须采购替代燃料卡车，促动该市又购入250多辆替代燃料卡车。另一家替代燃料卡车制造商Greenkraft公司，也利用了政府的激励政策来生产以压缩天然气或液化天然气为动力的中型和重型卡车。

Clean Air Power的母公司Vayon集团是一家发展势头强劲的跨国集团公司，目前尚未进入中国，正在寻求与一家拥有相应技术的西方制造商建立战略伙伴关系，或通过改装来改造现有汽车车队。Vayon公司进入中国市场的障碍一是担心知识产权保护问题，二是中国卡车制造商的部件与他们当前技术不匹配，因而在发展合作伙伴关系的过程中需要更多的时间、研究和资本投入。

2.2 挥发性有机化合物 (VOC) 排放控制技术

和中国一样，美国的人为VOC排放也来自各种排放源。在美国，工业排放源占VOC排放总量的比例最大，挥发性溶剂占近50%⁷⁴。但VOC排放源随地区不同和经济活动的不同而各不相同。在城镇地区，移动排放源可能是室外VOC的最大排放源⁷⁵。在大规模炼油作业地区，炼油厂和石化生产可能是最大的VOC排放源⁷⁶。减少室外VOC排放使之符合大气臭氧浓度标准，通常都需要一套综合性监管方法，以便覆盖绝大部分或全部排放大户。

美国环保署自1970年起就一直对固定、移动和区域VOC排放源进行监管。但美国还有相当一部分地区尚未达到2008年联邦8小时臭氧标准（图6），更不用说2015年的新标准了⁷⁷。如图6所示，最严重的超标区域位于加利福尼亚州，包括南加州的南海岸空气盆地和加州中部的圣华金谷地。

2.2.1 移动排放源

汽油动力汽车有史以来一直是美国许多城镇的VOC主要排放源⁷⁸，汽油发动机比柴油发动机工作温度低，因此发动机尾气中碳氢化合物的不完全燃烧情况更为严

⁷⁴ EPA (2012).

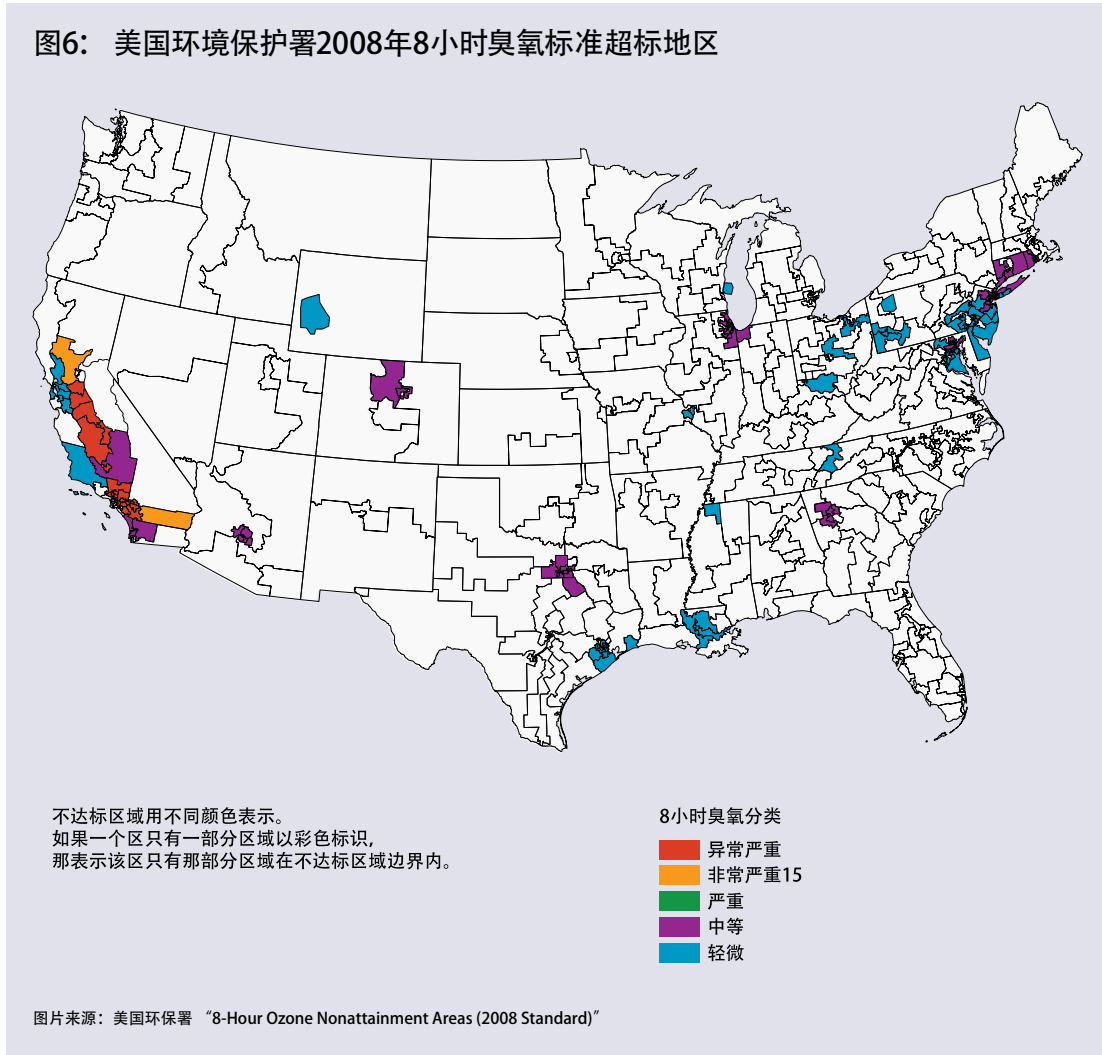
⁷⁵ Pang et al. (2015)

⁷⁶ Buzcu 和 Fraser (2006)

⁷⁷ 2015年，美国环保署将8小时臭氧标准降至十亿分之几的水平。

⁷⁸ Pang et al. (2014)

图6: 美国环境保护署2008年8小时臭氧标准超标地区



重、VOC浓度更高。由于沸点相对较低，汽油中的轻烃往往在温度升高后蒸发，产生VOC排放。

在美国，以前对汽油车尾气排放VOC的控制都是通过催化转化器实现的，上世纪70年代中期以后生产的轻型汽油车都必须安装这一排放控制设备⁷⁹。催化转换器采用一种催化剂，将汽车尾气中的VOCs（碳氢化合物）氧化，转化为二氧化碳和水。虽然新型催化转换器VOC减排成效显著，但催化剂会老化，导致性能降低⁸⁰。

加州自上世纪70年代起就开始对汽油车的蒸发排放进行管控，要求制造商在新生产的车辆上安装蒸发排放控制（EVAP）系统。EVAP系统收集油箱蒸发的碳氢化合物，

⁷⁹ 自1975起，美国环保署要求使用双向催化转换器来控制一氧化碳和碳氢化合物排放。1991年，环保署开始要求使用三向催化器，该方法还可减少NO_x排放。

⁸⁰ 另外，催化转换器在低温下，转换效率也会很低，这就意味着在启动过程中排放量可能会很高。这些都不会对大气中的VOC浓度产生太大影响。

然后将它们送至一个密闭容器中储存起来，直到发动机启动。发动机预热后，碳氢化合物就被吸入发动机里燃烧。

随着时间的推移，控制技术已逐步发展到碳罐、低渗透材料、主动净化系统以及ORVR系统（车载加油油气回收系统）。碳罐和主动式净化系统可提高EVAP系统的效力；低渗透材料可减少油箱中碳氢化合物的蒸发排放；ORVR系统可减少加油时的排放，将加油过程产生的油气引至储罐。EVAP系统的性能可通过车载诊断系统进行监测⁸¹。

尽管美国在极力控制新产汽油车的尾气排放和挥发性VOC排放，但汽油车的VOC排放总量仍居高不下。在加州南部，汽油车仍是最大的VOC排放源⁸²。大多数排放可能都来自于老旧车辆，其催化剂可能已老化或失效⁸³。在车队更新换代以及车辆全部安装ORVR系统之前，各州还要求汽油加油站加装VOC回收系统，作为车载控制技术的补充⁸⁴。

自上世纪90年代起，强制汽车采用替代燃料就一直是车辆VOC减排提案的内容之一。在已设定温室气体减排目标的州，目前正在考虑替代型汽车项目，以期协同降低NO_x、VOC和温室气体排放。加州的零排放车辆计划在众多州所制定的计划中最为瞩目，该州的目标是，零排放汽车（ZEV）和插电式混合动力车、蓄电池车和燃料电池车在2030年达到400万辆⁸⁵。

2.2.2 固定排放源和区域排放源的监测与治理

VOC的固定排放源和区域性排放源多种多样，主要分为以下四类：（1）建筑涂料中的溶剂（油漆等）、工业产品（润滑油等）、油墨、消费型清洁产品和粘合剂；（2）炼油厂和其他工业设施的逸散排放；（3）工业燃烧排放；（4）消费产品（如除臭剂、止汗剂、发胶等）的排放。不同的排放源需要不同的治理策略，本章着重介绍溶剂和逸散型排放。

2.2.2.1 溶剂

美国环保署对VOC排放已实行了近30年的管控，所做的努力已见成效，推动了制造商在降低VOC排放上的一系列创新。就拿涂料来说，制造商最初在上世纪70年代开发了高固体涂料和低密度溶剂，以满足新的联邦标准。一些实行更加严格标准的州开始使用非活性溶剂（1,1,1-三氯乙烷），但后来发现其对臭氧层有破坏而淘汰。20世纪90年代，美国环保局开始对有害的空气污染物进行管控，要求油漆制造商对划分为有害空气污染物的溶剂进行更新换代⁸⁶，加州也于2010年开始对高GWP（全球变暖潜值）溶剂进行管控。

为了满足加州等州日趋严格的环保标准，过去使用高VOC溶剂的产品制造商逐渐转向一些替代产品：

- 建筑涂料——非活性（“无VOC”）溶剂、丙烯酸树脂、醇酸树脂乳液、100%固体、水性环氧树脂和聚氨酯；

⁸¹ 有关挥发性排放控制技术的更多说明，请见MECA（2010）。

⁸² Pang et al. (2015)

⁸³ Pang et al. (2014)

⁸⁴ 有关加州更多油气回收项目，请参见加州空气资源委员会的“Vapor Recovery Program”，<https://www.arb.ca.gov/vapor/vapor.htm>

⁸⁵ 加州在“零排放汽车行动计划”中要求，零排放和插电式混合动力电动汽车在2020年之前要达到150万辆（Governor's Interagency Working Group on Zero-emission Vehicles, 2013）。该州于2016年定稿的《移动排放源战略》（Mobile Source Strategy）要求大力增加零排放和插电式混合动力电动汽车数量，在2030年之前达到420万辆（ARB, 2016b）。

⁸⁶ 有关对溶剂VOC排放的管控历史，参见Litton (2013)。

高科技、低成本泄漏检测与修复 (LDAR) 技术

美国已实施LDAR要求数十载, 各种解决方案层出不穷, 为工厂运营者提供了低成本的有效监测方法。例如, 一家总部位于旧金山的公司Environment Intellect (Ei) 开发了LDAR清单软件, 技术人员经过基本的培训就能以最低成本开始从事监测。Ei公司的平板电脑软件无需多步骤复杂操作, 只需一位技术人员执行一步操作就可以完成评估。因此, 监测和修复的效率更高、成本更低, 同时还提升了质保、增强了控制功能。Ei在美国 (包括最近在海湾地区空气质量管辖区) 的十几家炼油厂都在使用这一软件。

Ei公司最近开始探索进入中国市场, 在中国北方一家大型炼油厂应用LDAR软件, 以满足逸散型排放新规。项目期间, Ei软件将18.7万个LDAR组件列入排放清单, 并对之进行监测。另一家美国LDAR公司—排放监控服务公司 (EMSI) 在与上海一家公司成功合作了一个示范项目后, 成立了一家合资公司。上海这家合作方帮助EMSI随时了解中国新出台的LDAR法规并协助探索新商机。

- 工业产品——无VOC溶剂、水基清洗剂、生物基溶剂;
- 家用清洗剂——水基清洗剂、生物基溶剂、无VOC溶剂⁸⁷。

评估过程中, 加州空气质量监管机构发现越来越多的产品能够满足VOC排放限值以及对臭氧层破坏物质、有害空气污染物和高GWP气体的限制性要求⁸⁸。加州的经验彰显了管控多重污染物的重要性, 推动了能满足多重标准的技术的开发。

2.2.2.2 逸散型排放

逸散型VOC排放一般出现在碳氢化合物的生产、运输和储存过程中。逸散型VOC排放的主要源头是加压设备的泄漏 (比如直通阀、接头、泵和机械密封件等) 以及炼油厂化工厂的废水处理池和贮罐的蒸发。泄漏通常是逸散型VOC排放的主要来源⁸⁹。

美国环保署和当地空气监管机构要求, 逸散型排放源必须实施泄露检测与修复 (LDAR) 计划。找出泄漏源头往往是一项耗资巨大的工作, 因为大部分排放往往是来自工厂或设施的某一角落。检测设备的不断创新, 给降低成本、提高LDAR成效带来了福音。

在这些技术中, 最受瞩目的是光学遥感, 可用来远程监测和记录工厂设施周边的碳氢化合物浓度。在遥感技术中, 应用最广泛的技术之一是差分吸收光探测与测距 (DIAL)。欧洲部分地区的炼油厂使用DIAL技术测量VOC浓度已有20年的历史⁹⁰, 光学遥感技术在炼油厂的采用表明, 炼油厂VOC的排放量远远高于报告出来的排放量⁹¹。

⁸⁷ 参见南海岸空气质量管辖区, “Reducing VOC Emissions from VOC-Containing Materials,” <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/planning/architectural-coatings/reducing-voc-emissions-from-voc-containing-materials69bd9aefc2b66f27bf6ff-f00004a91a9.pdf?sfvrsn=7>.

⁸⁸ Ibid.

⁸⁹ EPA (2014).

⁹⁰ 可参见Frisch (2003) 等文章。

⁹¹ 详见Cuclis (2012)。

光学遥感监测技术可扩展到炼油厂以外,还可用来制订具体工厂设施的排放清单和其他排放源(例如 NO_x 、 SO_2 和逸散甲烷(一种强温室气体))的减排策略。比如加州南海岸空气质量管理区目前资助的一个示范项目,采用先进光学遥感技术检测炼油厂的VOC、甲烷、 NO_x 和 SO_2 排放、加油站和油气井的VOC和甲烷排放以及船舶烟囱的排放等⁹²。通过对甲烷泄漏的检测,遥感技术将会推动加州温室气体的减排。

2.3 空气质量监测与室内空气净化器

空气质量监测一直是空气质量管理的重要内容。新技术可提高室内外空气质量监测的空间和时间分辨率,通过量身定制的解决方案,可保证空气质量的改善和空气质量问题的缓解。目前室内空气净化器在美国还没有取得中国市场这样的成功,但新技术使得净化器的体积更小、价格更低、效率更高。

2.3.1 空气质量监测

2.3.1.1 室外空气监测

室外空气监测站通常是部署在某一区域的大型设备。这种区域性监测站虽为政策和监管决策提供了重要信息,但通常达不到用来判定“热点”区域(如:公路、工厂和工地附近)空气质量的时间分辨率。为了更好地以高分辨率了解排放特性,美国出现了两项技术,作为传统空气质量监测站的补充。

第一种是便携式设备:这是一款以电池为电源的小型装置,带LCD数字显示屏和数据显示记录并用USB接头。虽然手持设备可作为临时固定监测设备使用,但更多的还是用来测量局部污染暴露风险。第二种分辨率更高的监测技术是遥感技术。遥感空气质量监测是一项较新的技术,创业公司和学术机构正在积极研发之中。远程传感器可安装在某一地区或车辆上,并无无线连接到云端。该系统通过提供数据点网络,进而提高数据分辨率,使用户可以实时了解到排放源是如何直接影响周边区域的。

便携式和遥感空气质量监测仪并非区域性空气质量监测网络的替代品,在美国,监测网络必须按照“清洁空气法案”满足空气质量防控标准。但如果应用得当,新的监测技术可以作为传统监测站的重要补充。

2.3.1.2 室内空气监测仪

家用和个人用便携式空气监测仪是一项新兴技术,适用于那些想了解自己所在空间的空气质量和不同活动有可能造成的污染程度的人群。目前市面上的设备不过是颗粒物计数装置,原理是利用比浊计技术测定灰尘引起的散射光从而对颗粒物进行计数。近年来,高端产品陆续面市,用以探测空气中的颗粒物、挥发性有机化合物(VOC)、温度和湿度,其中就包括上述激光散射技术与MOS传感器结合使用,来测定VOC对吸附在电路中氧化锡表面上的氧气量的阻挡程度⁹³。某些先进设备还可以与其他智能设备(比如智能空气净化器)连接,自动调节空气质量。为了将数据传输给消费者,这些设备还配备了LCD显示屏,可通过WiFi或蓝牙实现与智能手机连接。

⁹² 参见南海岸空气质量管理区“SCAQMD Awards \$1.1 Million for Remote Sensing Projects to Enhance Emissions Monitoring at Oil Refineries, Ships, and Other Sources”,

<http://www.aqmd.gov/home/library/public-information/2015-news-archives/remote-sensing-projects>

⁹³ 可参见Figaro工程公司“Operating principle”, <http://www.figaro.co.jp/en/technicalinfo/principle/mos-type.html>

空气污染地图细化到街道级

Aclima是位于旧金山的一家科技公司，从事环境监测用区域性传感器网络的开发。Aclima和谷歌合作，将谷歌街景地图车配备Aclima EI平台，绘制出街道级空气污染地图。通过捕获街道级环境数据，便可以在全景地图中体现出交通、基础设施、城市规划 and 空气质量之间的关系——无论是某个街道角落、某个社区，还是整个城市。为了实现这一功能，Aclima和谷歌做了大量工作，绘出了谷歌在世界各地21个办事处的室内环境地图。全球环境传感器网络目前是同类功能中的首例，每天处理5亿个数据点。室内空气质量数据帮助谷歌促进了员工健康、提高了生产力和创造力。Aclima还与美国环保署和劳伦斯伯克利国家实验室进行科研合作，推进环境传感技术和方法的开发。

另一家湾区创业公司BioInspira正在开发一种用图案化病毒设计绑定到特定气体分子的环境传感器，该公司认为这一技术可提高空气污染物监测的精确度。这些新兴技术可以为监管机构、公众和政策制定者提供资源，使其更深入地了解污染源和污染风险，以便在今后做出更明智的决策。

2.3.2 室内空气净化器

如果污染源控制和通风改进措施不足以保障室内住户的健康和舒适度（特别是当室外空气污染严重而无法提供清洁通风的情况下），空气净化器是降低室内空气污染的一个补充手段。空气净化器可以作为一个部件安装在商业建筑暖通空调系统中，也可作为便携式装置插入传统电源插座上，在独立房间内使用。

此种便携式空气净化器已获家电制造商协会颁发的“清洁空气输出比率”证书，证书上标明了过滤的空气量和推荐使用这种过滤装置的房间大小⁹⁴。中国的监管机构（特别是沿海城市）最近亦开始使用清洁空气输出比率（CADR）作为空气净化器的检验标准⁹⁵。

对于美国的商业写字楼，美国暖通空调工程师协会（ASHRAE）为从事楼宇通风系统设计和维护工作的建造师、工程师和承包商推出了《室内空气质量指南》。这些最佳实践经常被视为建筑规范，供当地和州监管机构采用和实施（比如建筑物最低通风量标准）。

这些技术一般划分为三大类，每一类针对不同污染物（见表7）。这些技术可以整合到同一台空气净化器中，或与其他设备结合使用，以清除更多类型的污染物。

2.4 工业与民用替代燃料

就治理工业和民用能耗的直接排放而言，美国面临的挑战与中国大不相同，不同之处在于，美国耗煤量的绝大部分（95%）来自发电行业⁹⁶。尽管煤炭是上世纪50年代初美国工业一次能源的主要来源，但在20世纪后半叶已大部分被天然气取代，到2015年仅占

⁹⁴ 参见家庭用具制造商协会“[What is the Clean Air Delivery Rate \(CADR\)?](http://ahamverifide.org/search-for-products/room-air-cleaners/what-is-the-clean-air-delivery-rate-cadr/)”，<http://ahamverifide.org/search-for-products/room-air-cleaners/what-is-the-clean-air-delivery-rate-cadr/>。

⁹⁵ 新浪网“[小米空气净化器1被抽查结果：质量问题严重](http://tech.sina.com.cn/mobile/n/n/2016-01-14/doc-ifxnqiz9618705.shtml)”，<http://tech.sina.com.cn/mobile/n/n/2016-01-14/doc-ifxnqiz9618705.shtml>。

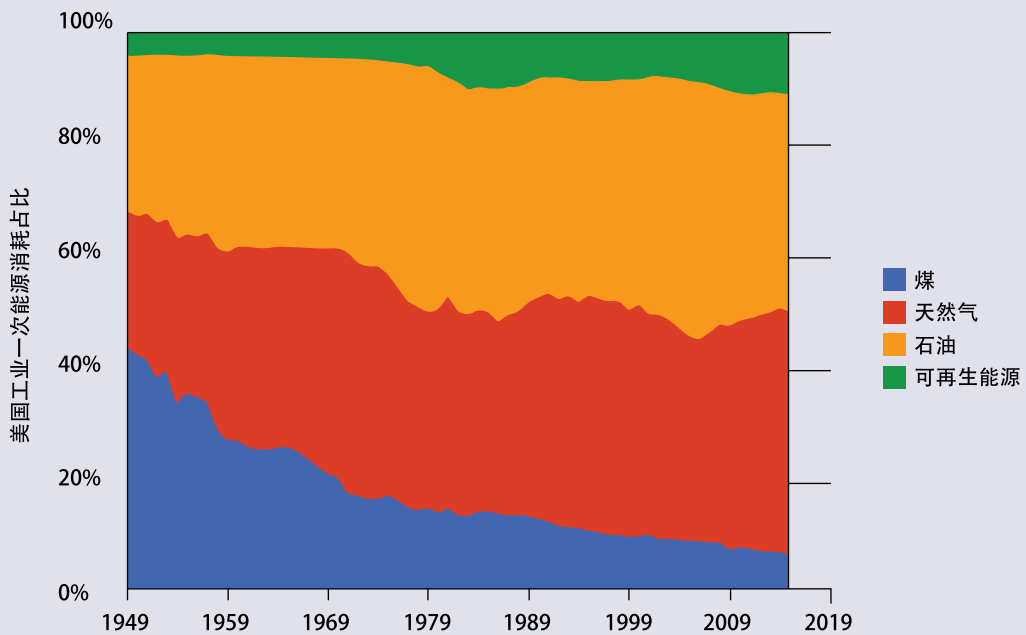
⁹⁶ 数据来源：美国能源信息管理局（EIA）网站，www.eia.gov

表 7: 空气净化器技术

类别 (针对的污染物)	技术
颗粒物清除 (颗粒物)	颗粒物捕集器
	离子发生器
	静电除尘器
气态污染物的清除 (VOC、臭氧、SO ₂ 、NO _x 等)	气相空气过滤
污染物分解 (气态和生物污染物)	紫外线照射灭菌仪 (生物污染物)
	光催化氧化清洁剂 (气体污染物)

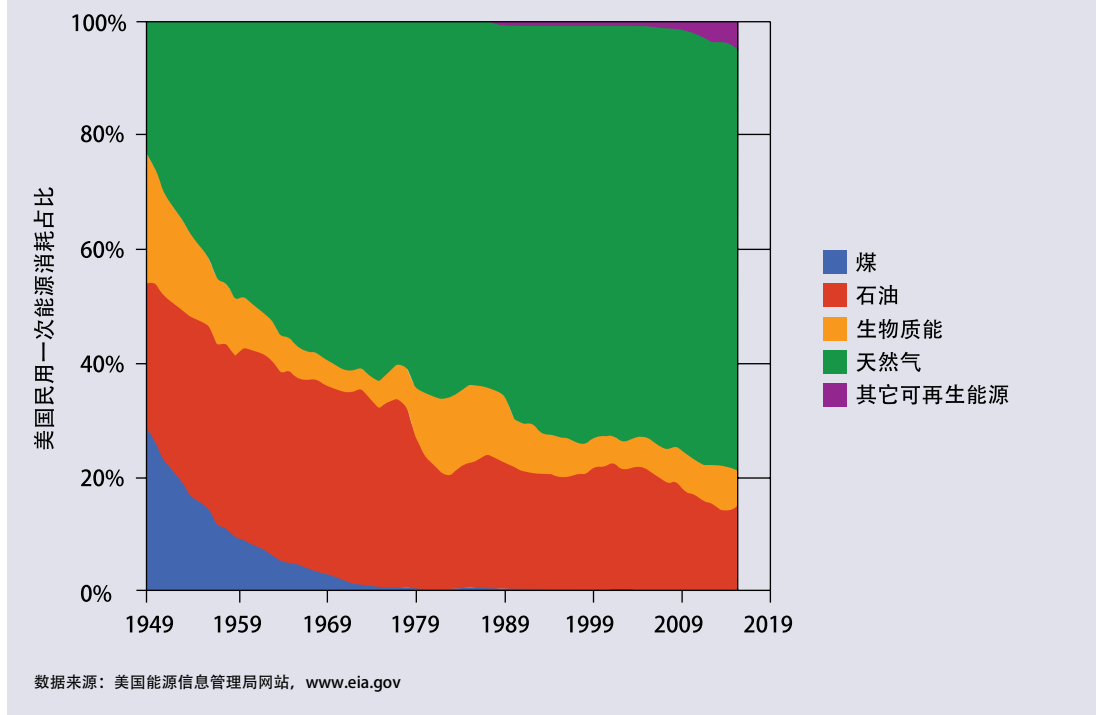
参见美国环保署 “Guide to Air Cleaners in the Home,” <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/guide-air-cleaners-home>

图7: 美国工业一次能源使用量 (1949-2015)



数据来源：美国能源信息管理局 (EIA) 网站, www.eia.gov

图8：美国民用一次能源使用量 (1949-2015)



工业能源使用量的6% (图7)。

在民用领域，上世纪50年代初的民用一次能源主要是煤、石油 (馏分燃料油) 和生物质。随着时间的推移，天然气开始大面积取代这些能源 (图8)，目前占民用一次能源用量的近四分之三，馏分燃料油和生物质所占比例较小，分别为15%和7%。在美国，民用一次能源的使用通常并不被看作是空气的主要污染源。

但我们越来越清楚地看到，要想满足长远的温室气体减排目标，需要找到能够取代民用领域天然气的替代能源⁹⁷。迄今为止，加州提出了两套主要战略方案：(1) 将天然气与生物气、氢和合成天然气混合⁹⁸；(2) 现有天然气终端用能转向用电 (如：建筑物供暖和烹饪)。

热泵一直被提议作为电暖的一项技术，其原理是利用电能泵送制冷剂，用以吸取外部冷环境 (比如室外大气) 中的热能，然后在室内释放这些热能 (图9)。此种解决方案下，大部分室内供暖能源均来自对室外热量 (而不是电) 的吸取，这样可以使热泵产生比电阻加热器更高的能效。由于热泵较为复杂，因此前期投入成本要比电阻加热器的成本高很多，但因其能效高，所以在那些电力成本较高的地方，具有一定的成本效益。

⁹⁷ 参见 Williams et al. (2012)、Williams et al. (2014)。

⁹⁸ 有关于这些燃料源和脱碳天然气供应商的更多信息，参见SoCal Gas “Decarbonizing the Pipeline,” <https://www.socalgas.com/smart-energy/presentations-webinars/decarbonizing-the-pipeline>。

图9：典型空气源热泵



图片来源：<http://www.greenhomegnome.com/wp-content/uploads/2015/01/heat-pump.jpg>

2.5 火力发电厂超低排放控制技术

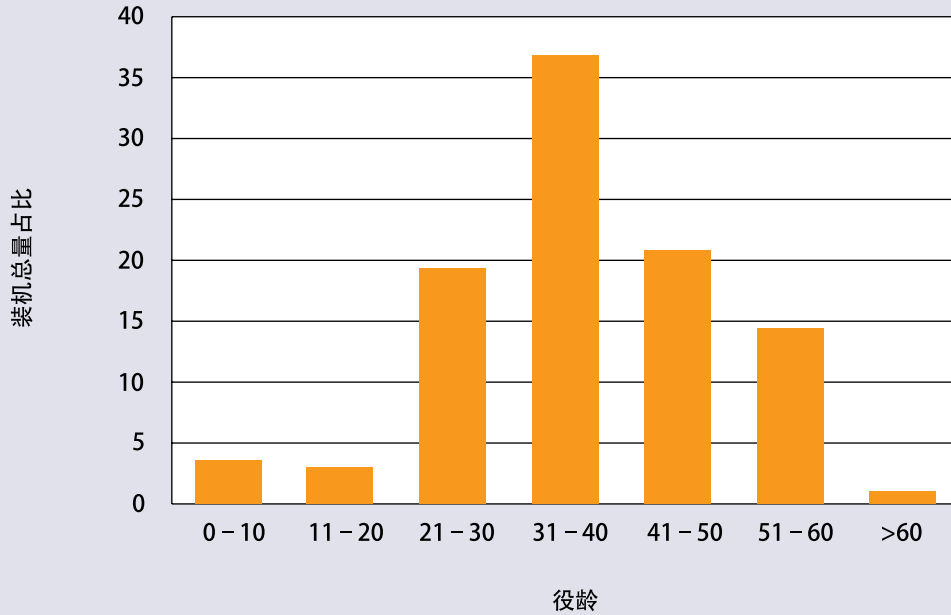
美国的火力发电厂整体比较陈旧，污染严重。2010年，火力发电设备的平均役龄为37年，近四分之三的机组服役超过30年（图10），一些老旧火力发电机组甚至没有安装污控装置。

美国环保署最近发布了一系列限制性规定，限制新建未采用“碳捕捉与封存”（CCS）措施的火力发电厂，并对既有发电厂提出了严格的减排规定。这些规定包括（但不限于）：

- 碳排放污染标准 — 对新建、改造和重建的发电厂设定二氧化碳排放上限；
- 清洁发电计划 — 针对既有火力发电厂制订二氧化碳排放国家标准；
- 州际空气污染细则 — 要求一些州减少发电厂二氧化硫（SO₂）和氮氧化物（NO_x）排放；
- 汞及大气有毒物细则 — 限制火力发电厂有害污染物的排放。⁹⁹

⁹⁹ 美国最高法院于2016年2月批准了《清洁能源计划》。

图10: 美国火力发电设备役龄分布图 (截止到2010年)



数据来源: 美国能源信息署 “Age of electric power generators varies widely”, <http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=1830>.

受上述环保规定的约束和天然气价格低的影响,许多发电厂近年来纷纷淘汰了火力发电机组。结果,美国市场上的火力发电份额从2000年的53%降到了2014年的40%(图11)。新建发电机组有的满足了排放标准,有的对污控设备进行了合规升级改造。

2.5.1 火力发电厂先进污控技术

火力发电主要产生四种大气污染物: 二氧化硫 (SO_2)、氮氧化物 (NO_x)、颗粒物 (PM) 和汞,此外还排放大量毒性大气污染物。 SO_2 、 NO_x 和PM的控制技术相对完善,清除效率非常高(表8)。但是,即使清除效率如此之高,残余排放仍居高不下。

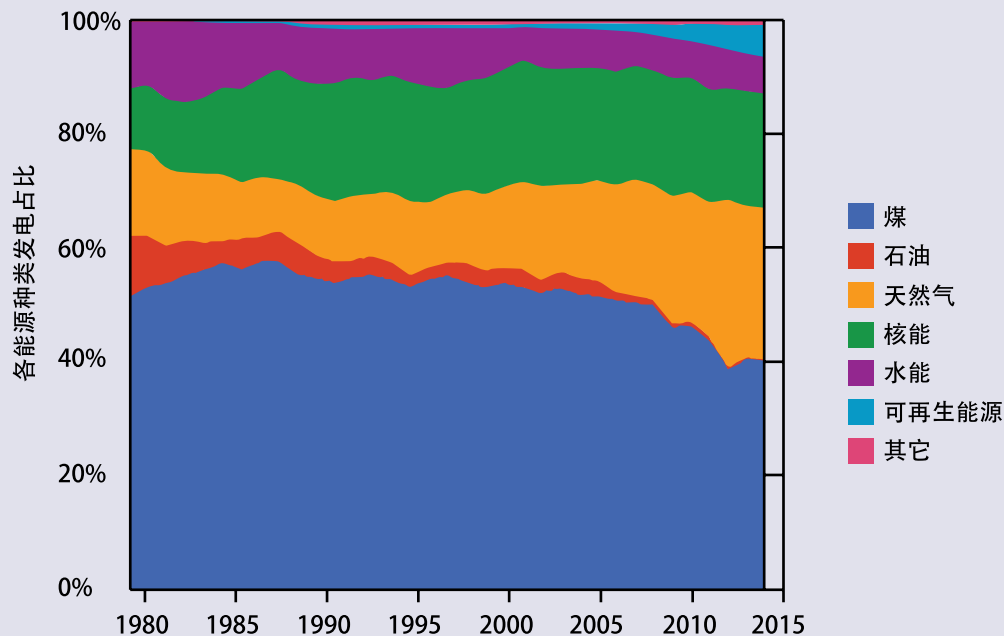
和中国一样,烟气脱硫 (FGD) 也是美国去除二氧化硫的一项主要技术,但在2010年时,美国只有约60%的火力发电厂使用了这一技术¹⁰⁰。在烟气脱硫系统中,排放的烟气与碱性溶液 (“湿式”烟气脱硫) 或粉末 (“干式”烟气脱硫,通常都是石灰石) 反应,去除烟气中的二氧化硫。美国环保署报告称,干、湿烟气脱硫系统分别可达到93%和98%的清除效率¹⁰¹, 但湿式烟气脱硫生产厂商报告的这一数字为99%¹⁰²。湿式烟气脱硫系统还可

¹⁰⁰ 数据来源: 美国能源信息署 “Coal plants without scrubbers account for a majority of U.S. SO₂ emissions”, 2011, <http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=4410>

¹⁰¹ 美国环保署, “Documentation for Base Case v.5.13: Emission Control Technologies,” 2013, https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/chapter_5_emission_control_technologies.pdf

¹⁰² 日立公司声称, 湿法烟气脱硫的脱硫效率已超99%以上。参见日立公司 “Recent Operating Results of the Five New Wet FGD Installations for Ameren Corporation”, 未注日期, http://www.psa.mhps.com/supportingdocs/forbus/hpsa/technical_papers/Recent%20Operating%20Results%20of%20the%20Five%20New%20Wet%20FGD%20Installations%20for%20Ameren%202011.pdf.

图11：美国的发电结构 (1980-2014)



数据来源：美国能源信息管理局

以对其他污染物 (比如汞) 进行协同控制¹⁰³。

随着与柴油机的结合使用, 美国火力发电厂需要安装选择性催化还原系统, 来满足更为严格的氧化氮排放规定。美国环保署报告称, 选择性催化还原技术的除污效率高达90%¹⁰⁴, 生产厂商报告的这一数字高达95%¹⁰⁵。为了控制颗粒物的排放, 美国的火力发电厂结合采用了静电除尘器 (ESP) 和织物过滤器 (袋式过滤器)。之前, 静电除尘曾是控制颗粒物的主要技术, 但为了满足更为严格的PM_{2.5} 规定, 一些发电厂转向使用织物过滤器。无论是直径较大 (PM₁₀) 还是较小 (PM_{2.5}) 的颗粒物排放, 织物过滤器的清除效率均高于99%¹⁰⁶。

从温室气体排放合规方案来看, 美国的火力发电厂在近期和中期均有很大不确定性。比如, 要想满足碳排放标准, 要求新建火力发电厂必须配备“碳捕捉与封存”技术 (CCS)。美国目前只有两个在建CCS项目, 但均未投入使用¹⁰⁷。

¹⁰³ 日立公司声称, 其湿法烟气脱硫系统的氧化汞去除率超过99%。资料来源: Ibid.

¹⁰⁴ 美国环保署 “Documentation for Base Case v.5.13: Emission Control Technologies”

¹⁰⁵ 通用电气公司 “NO_x Control”, <https://www.gepower.com/steam/products/aqcs/nox-control.html>

¹⁰⁶ 参见Lindsay Morris, “Particulate Matters to EPA: Regulations affecting PM and controls for compliance,” Power Engineering, August 2011, <http://www.power-eng.com/articles/print/volume-115/issue-8/features/particulate-matters-to-epa-regulations-affecting-pm-and-controls-for-compliance.html>

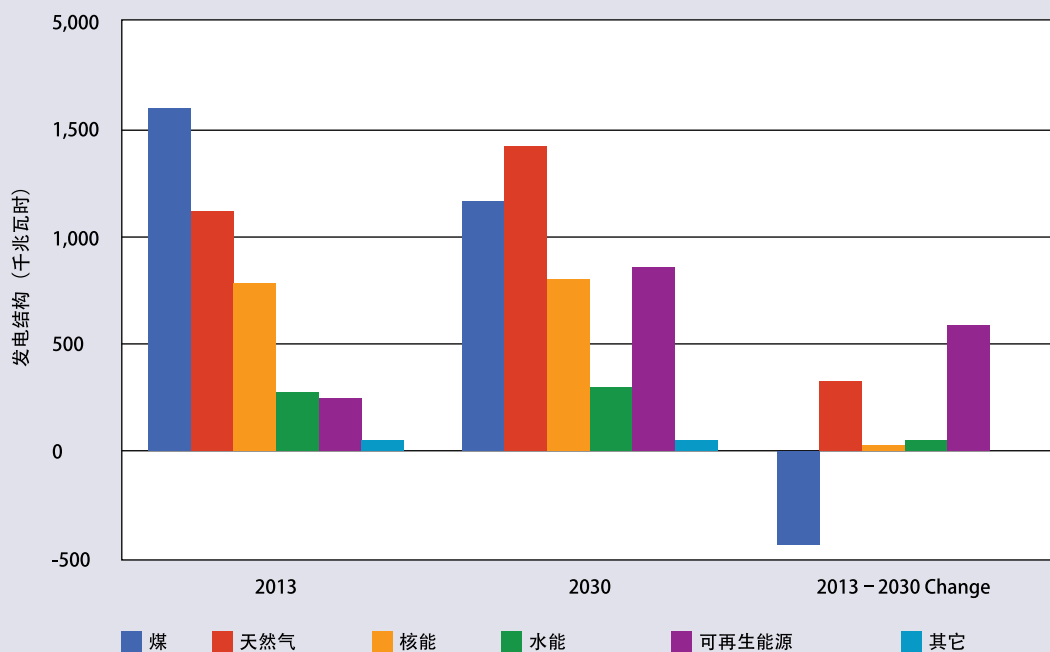
¹⁰⁷ 数据来源: 麻省理工学院CCS项目数据库http://sequestration.mit.edu/tools/projects/index_capture.html

表8: 火力发电厂主要污控技术¹⁰⁸

污染物	主要污控技术	最大清除效率 (%)
二氧化硫 (SO ₂)	烟气脱硫	> 99%
氮氧化物 (NO _x)	选择性催化剂还原技术	95%
颗粒物 (PM)	袋式空气过滤器	> 99%

随着空气质量标准更加严格,可再生能源成本降低、天然气价格下滑以及二氧化碳监管规定的即将出台,美国发电用能结构中的碳份额有望持续下降。美国能源信息管理局“清洁发电计划”下的火力发电比例将会在2030年以前降至25%,火力发电厂的能源将主要由可再生能源发电和天然气发电替代,分别占63%和33%(图12)。

图12: 美国能源信息管理局清洁电力计划下的发电结构



2030年预测值基于美国能源信息管理局CPP案例中的数字, 参见EIA (2015b)

¹⁰⁸ 表中数字源于报告文字内容。

3. 为排放控制技术的发展创建有利的环境： 加利福尼亚州经验

本章将介绍加州为排放控制技术的开发和采用创造配套有利政策环境的经验。为了方便理解, 首先简要介绍一下美国的空气质量管理状况。

3.1 美国的空气质量管理

美国空气质量管理的监管框架源自于1963年的《清洁空气法》(Clean Air Act), 该法要求美国环保署(EPA)为六类“基准”污染物制定、实施和执行国家环境空气质量标准(NAAQS)。美国环保署制定了两级空气质量标准: (1) 一级标准: 以保护人体健康为目标, 留有充足的安全余地; (2) 二级标准: 以保护自然生态及公众福利为主要目标¹⁰⁹。当前执行的标准如表9所示。

EPA制定空气质量标准的过程由以下三个步骤组成:

1. 标准的制定、审核与修订。《清洁空气法》要求环保署在现有最好的科学成果基础上, 定期对其标准进行审核和更新。这种审议过程正式而系统化, 包括对现有科学成果的评审、对人类健康或环境风险的定量评估, 以及对政策方案的评估。在审议过程结束后, EPA发布通告, 提出拟议规则, 并启动征求意见期, 在此期间, 允许社会各界提出意见。然后, 美国环保署会考虑这些意见并颁布构成NAAQS的最终规则¹¹⁰。
2. 达标情况评定。在新版或修订版NAAQS审定后, 即启动EPA评定流程。在发布新的NAAQS的两年内, EPA必须对各个地区的达标情况(“达标”)或不达标情况(“不达标”)进行评定。这种评定以空气质量检测数据为依据, 在某些情况下, 空气质量模型也作为依据。各州就各地区的达标情况向EPA提出建议。EPA根据各州的建议并对已有数据进行评估, 然后确定出评定结果¹¹¹。
3. 达标实施计划。在新的NAAQS发布三年内, 各州必须向EPA提交关于“基础设施”的州实施计划(SIP)。该计划的作用是, 证明各州具有实施SIP所需的、完备的空气质量监测和数据系统、执法计划、权限和资源。此外, 在新NAAQS颁布的18-36个月内, 各州还必须提交不达标地区的SIP。SIP中提出为满足NAAQS所要采取的具体控制措施。EPA要求各州允许公众就SIP提出意见, 并应正式采纳SIP中所提出的控制措施。这些措施由联邦法院强制执行, 并由联邦法院确定生效日。EPA可以处罚不符合SIP规定的州。如果各州不提交SIP计划, EPA就必须制定一份联邦实施计划(FIP)¹¹²。

¹⁰⁹ 公共福利包括: 维护重点风景区的可见性以及保护动物、农作物、植被和建筑物不受损害。

¹¹⁰ 详见EPA, “Process of Reviewing the National Ambient Air Quality Standards,”

<https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/process-reviewing-national-ambient-air-quality-standards>.

¹¹¹ 详见EPA, “NAAQS Designations Process,” <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-designations-process>.

¹¹² 详见“Process of Reviewing the National Ambient Air Quality Standards,”

<https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/process-reviewing-national-ambient-air-quality-standards>

表9: 六种基准污染物现行国家环境空气质量标准

污染物		一级、二级	平均时间	水平	形式
一氧化碳 (CO)		一级	8小时	9 ppm	超标不得多于每年1次
			1小时	35 ppm	
铅 (Pb)		一级、二级	3个月滚动平均值	0.15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	不得超过
二氧化氮 (NO ₂)		一级	1小时	100 ppb	每天最大1小时平均值第98百分位数浓度, 取3年的平均值
		一级、二级	1年	53 ppb	年平均值
臭氧 (O ₃)		一级、二级	8小时	0.070 ppm	每天8小时最大浓度的年度第4高值, 取3年的平均值
颗粒物 (PM)	PM _{2.5}	一级	1年	12.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	年平均值, 取3年的平均值
		二级	1年	15.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	年平均值, 取3年的平均值
		一级、二级	24小时	35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	第98百分位数, 取3年平均值
	PM ₁₀	一级、二级	24小时	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	按3年平均计算, 超标的次数不得多于每年1次
二氧化硫 (SO ₂)		一级	1小时	75 ppb	每天最大1小时平均值第99百分位数浓度, 取3年的平均值
		二级	3小时	0.5 ppm	超标不得多于每年1次

该表复制于美国环保署“NAAQS Table”（六种基准污染物的现行国家环境空气质量标准），
<https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>。

除了户外空气的污染物浓度标准外，《清洁空气法》还授权并要求EPA对具体排放源进行监管。EPA和州环保局对不同的排放源采取不同的监管方式。

对于移动排放源，EPA的做法是制定国家排放标准并对燃料质量进行监管¹¹³。原则上，美国国会可以就某个标准所涉及的排放和排放源应当制定什么水平的标准、以及何时生效等向EPA提出具体指示。通常的做法是，由国会制定大方针，EPA在标准的制定方面有更多裁量权。一般说来，EPA在制定移动排放源标准上拥着广泛权力，前提是其能够证明

¹¹³ 关于EPA对燃料的监管，最显著的两个例子是无铅汽油强制令和低硫柴油强制令。

拟议的标准对于保护公众健康而言是必要的。

EPA和各州环境监管机构有六条“合规途径”，以保证移动排放源达标：

1. 认证。EPA必须对所有满足排放标准的新车或新发动机进行认证。
2. 检验与调查。EPA有权对制造商的认证记录和设施进行检查，如果认为制造商向其提供了虚假信息，EPA有权追究责任。
3. 执法抽查。EPA要求制造商进行新车辆的装配线测试。
4. 召回。如果在用车辆性能达不到设计指标，EPA可以要求制造商召回这些车辆、进行维修或更换。
5. 保证。EPA负责制定催化转化器等排放控制装置的保证条款。
6. 检验与维护。各州对车辆的检验和维护计划进行管理，对在用车辆的排放控制设备进行定期检测¹⁴。

对于固定排放源，由EPA制订全国排放标准，由EPA和各州环保局对新排放源或变动的排放源进行审核，由各州环保局对主要排放源的“牌照”计划进行监督。EPA设立了两大类排放标准，分别是：《新排放源排放标准》(New Source Performance Standards, 缩写: NSPS)——针对新排放源或变动排放源的基准空气污染物；《危险空气污染物国家排放标准》(National Emissions Standards for Hazardous Air Pollutants, 缩写: NESHAP)，针对新排放源或已有排放源的有毒排放物。

NSPS和NESHAP都是针对具体排放源的排放标准，但这些标准既适用于“主要排放源”（排放大户），比如锅炉或炼油厂等，也适用于“次要排放源”（“局部”排放），例如柴油发电机或小企业等。EPA负责按排放源类别制定标准，各州和地方环保局将这些标准细化为针对具体设施的要求。

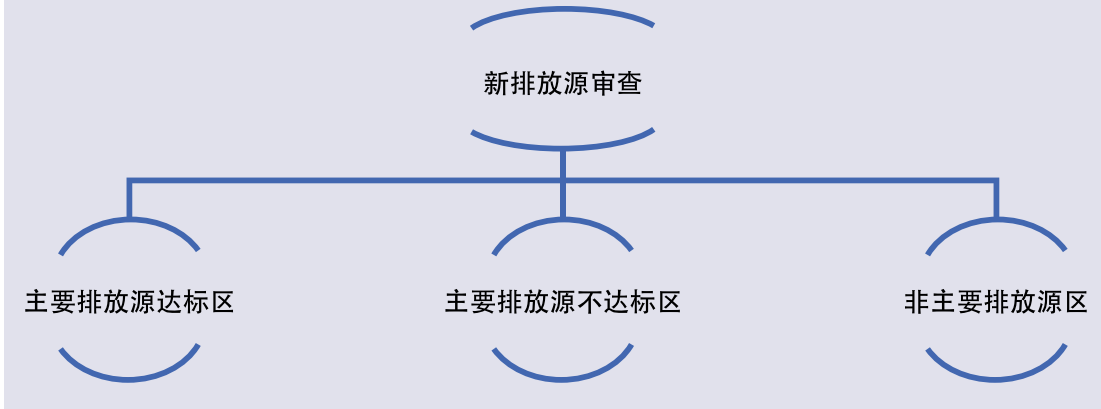
除了制定排放标准外，EPA和各州环保局还通过新排放源审查 (New Source Review) 计划对新排放源和变动排放源进行审查。新排放源审查计划要求：新排放源在投入使用之前（“新排放源”）或在做出大幅度变动（“变动排放源”）之前，必须经过环境审查并获得批准。新排放源的评定牌照通常由州环保局发放，一般分为三大类（图13）。

对于主要排放源，州环保局对国家空气质量标准达标区域内的排放源发放“严重恶化预防”牌照，向不达标区域内的排放源发出不达标牌照。“严重恶化预防”牌照要求：新排放源或变动排放源必须采用现有最先进的控制技术 (best available control technology, 简称BACT)，并且由州环保局和排放源确保空气质量的影响控制在可以接受范围内。而“不达标”牌照则要求新排放源或变动排放源必须达到一个能够实现的最低排放率 (lowest achievable emission rate, 简称LAER)，并要求他们向现有排放源购买排放额度。各州对次要排放源的要求不尽相同，但这些要求的制定通常是为了确保次要排放源不妨碍本州对国家空气质量标准的达标能力。新排放源审查 (New Source Review) 过程为公众的参与提供了大量机会。

《清洁空气法》还要求大型设施的业主在投入运行后，必须持续获得运行牌照，并按牌照运行。运行牌照，又称“V字头” (Title V) 牌照，通常由州和地方环保局发放，这一牌照还包括报告要求。牌照有效期为五年，到期必须更换，牌照审查过程允许公众参与。

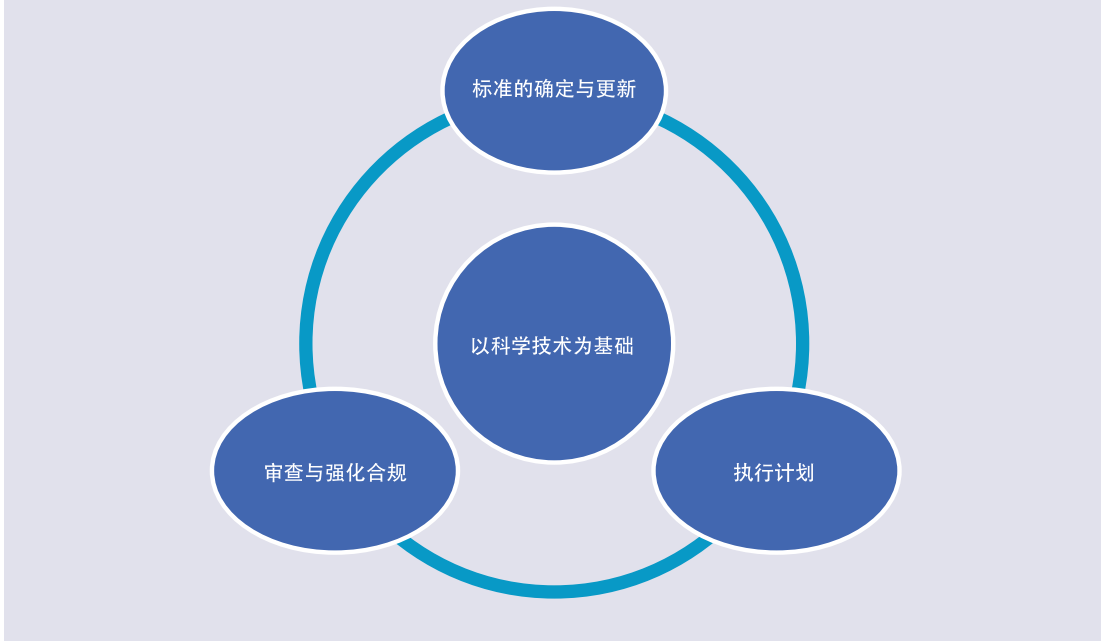
¹⁴ MECA, “The U.S. Environmental Protection Agency’s Motor Vehicle Compliance Program,” <http://www.meca.org/regulation/the-us-environmental-protection-agencys-motor-vehicle-compliance-program>.

图13： 经EPA新排放源评审后发出的牌照



美国空气质量管理监管框架的核心，包括空气质量和排放标准的制定、地方达标实施计划以及达标的评估和执法等均建立在科学技术基础之上(图14)。这一基础为我们鉴别人类及生态健康风险、将风险转化为空气质量及排放标准、并随着对科学技术的理解不断深入而不断更新标准提供了科学依据。

图14： 美国空气质量管理科学技术依据



3.2 加州支持清洁空气技术的配套环境

加州对空气质量实行管理的历史悠久。首次见于报道的雾霾事件于1943年发生在洛杉矶。因此加州早在20世纪60年代中期就开始对空气质量进行了积极监管¹¹⁵。从那时起，加州空气质量的改善一直有赖于新技术的推广（催化转化、低VOC溶剂等技术）。因此，加州在为清洁空气技术创造政策环境方面堪称经验丰富。

加州在美国的空气质量领域占有独特地位。《清洁空气法》禁止各州制定自己的机动车标准，但却唯独给予加州豁免权。从那时起，加州经常领衔制定联邦机动车排放标准，与EPA密切合作，对不同的标准、方法和计划进行协调。

本章从三个方面介绍加州支持新技术的政策环境：该州的《柴油风险降低计划》（Diesel Risk Reduction Plan）—目标是到2020年实现柴油车污染排放的大幅度减低；（2）针对溶剂的州立VOC法规—对于能否满足联邦的臭氧标准很关键；（3）全州空气质量和温室气体减排协同计划—旨在就确保空气质量达标措施和旨在满足温室气体减排目标的措施之间协调一致。

3.2.1 加州的柴油风险降低计划

1998年，加州空气资源委员会（ARB）完成了一项为期10年、有关柴油排放暴露健康影响的研究，该研究估计，加州约70%的空气致癌风险来自柴油机和发动机的PM排放¹¹⁶。随后，ARB将柴油排放的PM认定为有毒空气污染物，并开始就减低相关排放物与各利益相关者展开对话。经过努力，ARB于2000年发布了《关于减少柴油发动机和车辆颗粒物排放的风险降低计划》¹¹⁷。

《柴油风险降低计划》是美国首个针对在用柴油机和发动机的政策。该计划所设定的目标是，到2010年，使所有柴油排放源排放的PM总排放量比2000年下降75%，到2020年下降85%。该计划由三大部分组成：

1. 认证。EPA必须对所有满足排放标准的新车或新发动机进行认证。
2. 检验与调查。EPA有权对制造商的认证记录和设施进行检查，如果认为制造商向其提供了虚假信息，EPA有权追究责任。
3. 执法抽查。EPA要求制造商进行新车辆的装配线测试。

ARB的计划和目标是基于一项控制技术（即柴油机颗粒物捕集器）制定的，这项技术当时得到了广泛采用。

在ARB发布《柴油风险降低计划》后不久，EPA发布了道路柴油车排放新标准，要求道路柴油车制造商从2007年生产的新车开始，大幅降低PM和NO_x排放。加州也采用了相同的标准。

《柴油风险降低计划》在适用范围和宏伟目标中对ARB的要求是：（a）针对各类柴油车和柴油发动机（从重型卡车到柴油发电机）制定既全面又有区分的监管方法；（b）制定在用车辆减排战略（包括灵活的达标战略）；（c）建立车队业主激励机制，寻找资金来源；（d）

¹¹⁵ 关于加州空气质量管理的历史沿革，参见ARB，“Key Events in the History of Air Quality in California,” <http://www.arb.ca.gov/html/brochure/history.htm>

¹¹⁶ 世界卫生组织的国际癌症研究机构(IARC)在2012年也将柴油发动机的排放物定义为致癌物。参见IARC，“IARC: Diesel Engine Exhaust Carcinogenic,” https://www.iarc.fr/en/media-centre/pr/2012/pdfs/pr213_E.pdf.

¹¹⁷ 参见ARB(2000)

制定新的执法计划；(e) 建立一个开放的流程，大范围吸纳利益相关者的参与。本章后面部分介绍ARB为应对这些挑战所采取的方法，主要介绍这些方法是如何创造了一个有利于新技术开发及推广的环境的。

3.2.1.1 柴油车和发动机综合监管框架

柴油车和柴油发动机涉及了大量而广泛的技术，涵盖了重型卡车和公共汽车、建筑施工设备、农用设备、货物装卸设备、运输制冷机组和固定式柴油发电机等。若要实施《柴油风险降低计划》，就需要创建一个监管框架来涵盖大部分排放源。

表10列出了ARB针对各类柴油排放源的监管策略，其中每一类都需要特定的监管计划。

表10: ARB针对各类柴油排放源的监管策略

类别	监管	策略
道路用新产车辆	认证要求	通过测试过程证明新发动机满足排放标准
在用道路车辆	《卡车与公共汽车条例》(2008)	为现有车辆的达标设定时间表
非道路新产车辆	认证要求	通过测试过程证明新发动机满足排放标准，推广检验计划
在用非道路车辆 (非农用、非货物装卸)	《在用非道路柴油车辆条例》(2007)	确定现有最佳控制技术，设定车队平均排放因子指标，规定所有非道路车辆必须向ARB报告，限制在车队中加入老旧车型
在用非道路车辆 (货物装卸)	《港口和联运铁路堆场移动货物装卸设备条例》(2006)	确定现有最佳控制技术，制定达标时间表并制定检验程序
机车	协议和谅解备忘录	鼓励使用低硫柴油、评估污染控制措施、鼓励减少怠速
海洋船舶	《远洋船舶燃油条例》(2008) 《在泊条例》(2007)	要求在加州近岸使用低硫馏分燃油，要求使用岸电
港勤船舶*	《商业港勤船舶条例》(2009)	要求使用低硫柴油、确定现有最佳控制技术，制定达标时间表
固定式新产柴油机	《固定式柴油发动机条例》(2011)	通过测试过程证明新发动机满足排放标准
在用固定式柴油机	《固定式柴油发动机条例》(2011)	要求使用低硫柴油、制定排放标准

*港勤船舶包括“船员通勤和补给船、租赁捕鱼船、商业捕鱼船、渡船/旅游船、引水船、顶推船或推船、拖船和工作船”。

ARB的通用方法对于大部分类别的排放源是一致的。对于新柴油发动机，ARB要求制造商通过排放测试来证明其产品满足排放标准。对于在用柴油发动机，ARB确定了已有最佳控制技术（“已验证的柴油排放控制策略”，简称VDECS），并要求车辆或设备业主或安装VDECS设备或通过更换车辆和设备来达到车队平均排放标准或其他性能要求。ARB的《卡车与公共汽车条例》（将在下一节详细介绍）为在用道路车辆达到新车排放标准制定了时间表。

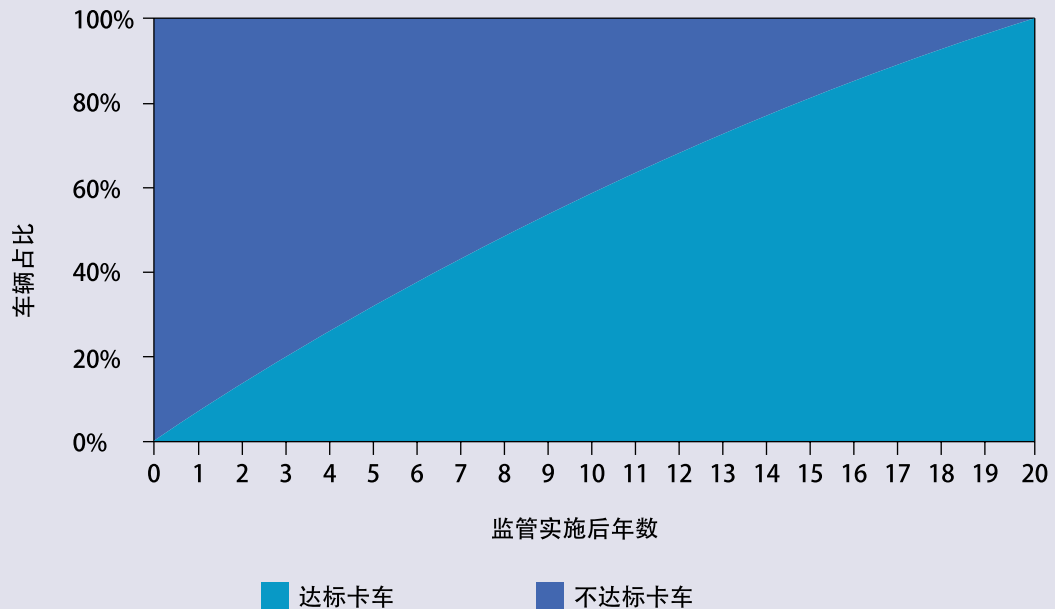
加州对有些柴油排放源的监管权有限，例如远洋船舶和机车。为了使这些排放源实现减排，ARB结合采用了以下三种策略：(1) 与EPA合作（但EPA拥有监管权）；(2) 与营运人签订协议（如铁路公司等）；(3) 发布涉及加州拥有途经地或使用地监管权的法规。

第三种策略主要用于靠近加州海岸的海洋船舶的减排。ARB的《在泊条例》要求船舶营运人减少船舶在港口停泊期间的排放，目标是到2014年减排50%，到2017年减排70%，到2020年减排80%。满足这些法规的主要策略是岸电，即在船舶关闭发动机后接通岸上电力。ARB还要求在加州近岸区域航行的船舶使用低硫馏分燃料。

3.2.1.2 在用柴油车辆减排策略

要达到《柴油风险降低计划》的PM减排总目标，需在采取在用车辆减排策略的同时，尽量减少对车主的经济影响。例如，柴油卡车的使用寿命通常超过20年，因此柴油

图15：条例发布后达标和不达标卡车随时间变化示意图
(假设车辆平均寿命为20年，车辆保有量年增长率为2%)



*在这一简示图中，假定车辆在其20年的寿命期结束后更新换代，则意味着在初始车辆保有量中，当年只更换5%（也就是说，新车要到21年后才更新换代）。

表11:《卡车与客车条例》针对超重车的排放控制达标时间表

出场年	达标时间表
1994年以前	2015年以前未做要求, 自2015年起必须达到2010年款的排放标准
1994 - 1995	在2016年以前不做要求, 自2016年起必须达到2010年款的排放标准
1996 - 1999	到2012年必须安装PM颗粒物捕集器, 到2021年必须达到2010年款的排放标准
2000 - 2004	到2013年必须安装PM颗粒物捕集器, 到2022年必须达到2010年款的排放标准
2005 - 2006	到2014年必须安装PM颗粒物捕集器, 到2023年必须达到2010年款的排放标准
2007 - 2009	在2023年以前不做要求, *自2023年起必须达到2010年款的排放标准
2010	达到2010年款的排放标准

* 2007年款及以后的新车要求必须在出厂前安装柴油颗粒捕集器, 以达到PM排放标准。
 更多内容参考: Source: ARB, "Truck and Bus Regulation Compliance Requirements Summary."
www.arb.ca.gov/msprog/onrdiesel/documents/FSRegSum.pdf

卡车车队的构成随时间的变化很慢。因此在车队中能达到新排放标准的卡车所占的比例随时间的增长也很缓慢。图15是一个简单的示例, 在条例发布10年后, 车队中的达标车辆只占60%。

为解决在用道路柴油车辆的污染排放, ARB在2008年发布了《卡车与客车条例》。该条例为不同年份(“年款”)和重量(“重型”和“轻型”)的在用卡车和私营客车就安装颗粒物捕集器以及达到联邦PM和NO_x的排放标准制定了时间表, 适用于2010年款及以后的车辆。

《卡车与客车条例》适用于所有柴油车辆营运人, 包括物流公司、建筑公司和公交客运公司等。对于卡车车队和公共汽车车队的业主而言, 要想达到时间表的要求, 必须在车辆使用满20年后立即更换新车或在时间表下仍能达标的旧车(例如, 1997年款的车可以用一辆在2021年安装了颗粒物捕集器的2005年款车替换)。截至2023年, 所有卡车和客车车队至少必须达到2010年款的排放标准。

ARB提供了多种可选方案供车队运营人选择, 提高了在用车队的达标灵活性, 将运营人每年必须升级的车辆比例控制在25%以内。这些方案包括:

1. 选择参与式“逐步过渡方案”——此方案能让车队业主实现整个车队的PM和NO_x达标,而不是按照达标时间表达标¹¹⁸;
2. 选择参与式“小车队方案”——此方案能让小车队(1-3辆车)的业主按车辆数而不是达标时间表来达标¹¹⁹;
3. 对于不常用或用于短程行驶的车辆、农用车辆和在污染较轻的地区使用的车辆,达标期限可以延长。

对于采用这些灵活达标方案的卡车与客车运营人, ARB建立了一项报告制度, 要求运营人必须确定采用具体方案的车辆, 并在每个达标年的年初提供必要的信息(比如: 不常用车辆的里程数)。

3.2.1.3 激励机制和拨款计划

奖励性资助是监管中一项非常重要的补充性政策。柴油车和发动机的升级和改造需要大量资金投入, 为了帮助柴油车辆和发动机的业主早日达标或超额达标, ARB建立了以下资助计划:

- **低息贷款。**在ARB的加州设备贷款援助(PLACE)计划下, 通过与加州污染防控拨款局(CPCFA)合作, 为车辆或设备业主提供低息贷款。CPCFA的贷款资金通过免税债券获得¹²⁰。
- **直接奖励。**由ARB和地方空气质量管理区共同成立的合作项目——Carl Moyer Memorial空气质量达标计划(Carl Moyer Memorial Air Quality Standards Attainment program), 每年为道路车辆、非道路车辆和设备、农业设备、火车、海洋载具和轻型车的车主提供6000万美元左右的拨款。该计划通过收取轮胎附加费和车辆注册费来筹集资金, 拨款额度视车型和新车排放水平而定。例如Carl Moyer计划下的“重型道路车队现代化”类排放源, 可为加速高排放旧车的退役提供资金来源, 最高资金额与排放水平和车辆毛重挂钩(表12)¹²¹。

这些资助计划是鼓励采用清洁技术的一个重要机制。通过这些计划, 加州投入了大笔资金来降低现有柴油车队和发动机的排放。

3.2.1.4 执法计划

《柴油风险降低计划》的执行, 建立在ARB已有的检验、维护和标签计划和合作行动基础之上, 这些计划和行动包括:

- **重型车检验计划**——通过随机路边检验来确保车辆的烟气排放不超标、没有被篡改、且贴有正确的排放标识;

¹¹⁸ 具体而言, 此方案要求车队业主到2030年, 在30%的车上安装颗粒物滤清器。到2013年安装比例达到60%, 2014年和2015年达到60%, 2016年达到100%; 到2020年, 实现所有车辆PM和NO_x排放达标。

¹¹⁹ 具体而言, 此方案要求车队业主到2014年1月1日前实现一辆车达标, 到2017年1月1日前实现两辆车达标, 到2018年1月1日前实现三辆车达标。

¹²⁰ 关于CPCFA, 详见 <http://www.treasurer.ca.gov/cpcfca/>。

¹²¹ 关于Carl Moyer计划, 详见 <http://www.arb.ca.gov/msprog/moyer/moyer.htm>。

表12: Carl Moyer计划下“重型道路车队现代化”各类排放源的最高拨款额（按车型和核证排放水平区分）

车型	核证排放水平	最大资助水平
重重型	0.20 g/bhp-hr	\$60,000
	0.50 g/bhp-hr	\$50,000
	1.20 g/bhp-hr	\$40,000
中重型	0.20 g/bhp-hr	\$40,000
	0.50 g/bhp-hr	\$30,000
	1.20 g/bhp-hr	\$25,000
校车	不适用	车辆价值的100%
		100%发票金额

Source: Table values are based on sources in the text.

- 定期烟气检验计划——要求车主每年进行一次烟气不透光性测试，并且所有车辆都必须保留两年的记录；
- 排放控制标识，所有重型车和VDECS必须贴有此标识，以证明排放达标。
- EPA和当地空气质量管理区合作执法。

ARB的执法计划是排气后处理系统广泛采用之前制定的，用以控制NO_x和PM排放。同时，这些计划也是在规定必须使用车载诊断（OBD）系统之前制定的。OBD系统能监测车辆的发动机和排放控制系统的性能。监管部门也可以利用OBD系统来确保排放控制设备的性能和预期的一致，确保车主确实安装了且正在使用控制设备。

考虑到这些变化，ARB目前正在撰写关于修改重型车检验计划和烟气定期检验计划的提案，预计将在2017年实施。到2020年，重型车的检验和维护计划还会发生更多变化¹²²。

3.2.1.5 利益相关者参与

从一开始，ARB就尽力确保《柴油风险降低计划》的制定和实施是公开的且涵盖面广泛。在1998年将柴油机PM定义为空气污染物之后不久，ARB就成立了一个柴油机顾

¹²² ARB, "Public Workshop to Discussion Potential Changes to the Heavy-Duty Vehicle Inspection Program and Periodic Smoke Inspection Program and Plans for a Future, Comprehensive Heavy-Duty Vehicle Inspection and Maintenance Program," <http://www.arb.ca.gov/msprog/mailouts/msc1605/msc1605.pdf>.

问委员会 (Diesel Advisory Committee)，成员包括来自ARB、EPA、其他州和地方政府机构、行业、环境团体及其他组织的人员。顾问委员会通过正式大会和小规划会议结合的方式来指导《柴油风险降低计划》的制定。

在ARB开始制定具体条例来实施《柴油风险降低计划》之时，还通过在全州各地举行研讨会，向制造商、车主、其他行业团体和环境团体征求意见。ARB为具体条例成立了利益相关者顾问委员会（例如为《卡车与客车条例》成立了卡车条例顾问委员会），通过这种方式改进与利益相关者的沟通，找出实施问题。

利益相关者的参与，使得《卡车与客车条例》能有针对性地引入灵活机制（见第2.2.1.2小节），从而能够提高成功几率并降低达标总成本。利益相关者的参与还使得ARB能够通过现场调查，公开、明确地消除利益相关者对柴油机颗粒物滤清器成本、效果和安全性担心¹²³。

3.2.2 加州的VOC法规

加州自20世纪60年代开始对移动排放源和面排放源的VOC排放进行监管，以解决洛杉矶盆地的臭氧污染问题¹²⁴。此后不久，美国联邦政府就效仿了加州的做法。《清洁空气法》1970年修正案要求，EPA必须制定轻型车的VOC排放标准、以及VOC固定排放源中新排放源的性能标准。《清洁空气法》1977年修正案解决了区域排放源（比如溶剂）的VOC排放限值问题。加州常常是美国联邦VOC排放法规的牵头人，为更大范围的生产作业和产品制定更严格的限值。

本节将探讨加州在溶剂VOC排放和其他排放的监管方面的新途径。根据所含化合物的不同，这些排放同时也可能是温室气体排放源、消耗臭氧层物质或危险气体污染排放。

3.2.2.1对多重污染物的区域排放源的监管：溶剂

对溶剂的排放监管涉及多重法规和多个监管机构。EPA按照美国在蒙特利尔议定书中的承诺，对溶剂中的消耗臭氧层物质进行了监管。EPA同时还依照《清洁空气法》1990年修正案的Title III，对溶剂和其他物质的危险空气污染物排放进行监管。加州1987年《空气有毒物质“热点”信息和评估法案》(Air Toxics “Hot Spots” Information and Assessment Act) 要求，工厂须对包括溶剂在内的受控材料的排放进行计算、报告和控制。ARB的《空气有毒物质计划》(Air Toxics Program) 已禁止了某些溶剂的使用¹²⁵。

溶剂的VOC排放对环境的影响实际上是局部的，而不是地区性的。例如，加州的偏远地区由于NO_x排放水平较低，臭氧浓度也较低。因此，在加州，对溶剂的VOC排放限制由地方空气质量区监管，而不是由ARB监管。

这种多级监管框架使监管呈区块分割态势。有些采用臭氧消耗物质的溶剂实际上已被禁用，其他一些溶剂的生产和进口预计在2020年前逐步禁止。Title III 要求对危险空气污染物进行控制，但不是全面禁止。VOC排放地方法规的不同，可能导致相同的产品在同一州不同郡受到的限制不同。

¹²³ ARB (2015b).

¹²⁴ 监管措施包括：洛杉矶空气污染控制区于1966年实行了第66号规定，限制溶剂的反应性VOC排放。同年，加州机动车污染管理委员会 (California Motor Vehicle Pollution Control Board) 还制定了碳氢的排放标准。

¹²⁵ 例如，ARB的Airborne Toxic Control Measure for Emissions of Hexavalent Chromium and Cadmium Motor Vehicle and Mobile Equipment Coatings禁止在汽车涂层中采用六价铬和镉。

标准化和贴标识的做法有助于应对多重污染性溶剂的监管所面临的挑战，这些溶剂对地方的影响是千差万别的，而其全球范围内的影响则是不变的。例如，为了促进整个加州VOC限值的统一，ARB自2000年开始发布“建议控制措施”，这些建议归纳出的规则被南岸空气质量管理区 (South Coast Air Quality Management District) 采用。这些指南是模式规则，地方空气质量管理区可根据本地的需要加以修改。

为了使最终用户在决策时能了解更多情况并方便制造商达标，南岸空气质量管理区制定了“清洁空气溶剂”的自发认证计划。要获得清洁空气溶剂的认证，产品必须满足多重污染物的排放标准：

- 物料中的VOC含量不得超过每升二十五 (25) 克；
- VOC组分的蒸汽分压在20°C (68°F) 下小于5毫米汞柱；
- 形成臭氧的反应率不超过甲苯；
- 不含联邦《清洁空气法》所定义的危险空气污染物 (HAP、或管理区所定义的臭氧消耗化合物 (ODC) 和致全球变暖化合物 (GWC) ；
- 已得到管理区认证，证明其满足上述标准，认证是按照管理区批准的试验方法和过程进行的¹²⁶。

3.2.3 加州空气质量和温室气体协同管理计划

由于最近提高了8小时臭氧标准 (2008年制定) 和PM2.5年度标准 (2012年制定)，EPA将加州的多个地区划定为不达标区。这一划定要求ARB必须制定一项州实施计划，阐明这些地区如何在本世纪20年代的前几年实现达标¹²⁷。与此同时，加州2006年的《全球变暖解决方案法案》(Global Warming Solutions Act) (议会法案，简称AB第32号) 及其后续的执行令已定下目标：到2020年，本州温室气体排放比1990年的水平下降20%，到2030年下降40%，到2050年下降80%¹²⁸。ARB必须制定“工作范围规划”，阐明本州将如何实现2020和2030年的减排目标。

许多旨在达到联邦空气质量和温室气体减排目标的策略 (包括技术、政策和法规)，将会交叉重叠。此外，考虑到制定和部署新技术所需的时间和投资，实现空气质量达标和二氧化碳减排协同达标，很可能会比分别实现这两个目标的成本更低。ARB已建立起多种机制来协同州政府空气质量计划和温室气体减排计划，以下是其中的两种机制。

3.2.3.1 战略和远景研究

ARB一直通过公共研究来制定战略和目标，以实现长期目标。例如：要达到这些目标，需要哪些技术？能否通过现有技术达到这些目标，还是需要开发新技术（“技术力量”）？要达到这些目标，哪些技术、哪种监管法规可能最奏效？都在哪些领域？针对这类问题的研究活动往往随州空气质量实施计划和温室气体计划一同进行，以白皮书或报告的形式发布。最近的两项研究表明，“空气质量与温室气体协同计划”中采用了这一途径。

¹²⁶ SCAQMD (2012).

¹²⁷ 具体而言，加州的16个地区的8小时臭氧指标必须达标，达标截止日期则从中度污染区的2017年到两个极度污染地区（南岸空气质量管理区和San Joaquin空气质量管理区）的2031年。加州的四个被划定为PM2.5排放不达标的地区，到2021年必须达到“中度污染区”的水平。

¹²⁸ 2030年的目标已于2016年9月通过Senate Bill 32写入法律。

在加州部分地区, 要达到联邦臭氧标准, 需在本世纪30年代初实现NO_x减排近90%¹²⁹。在加州, 移动排放源是NO_x的最大排放源。因此, 要达到这一减排水平, 需要大规模采用近零排放和零排放车辆, 特别是客车和货车。

2012年, ARB发布了其题为《清洁空气展望: 空气质量和气候规划框架》(A Framework for Air Quality and Climate Planning) 的研究, 该研究通过情境分析, 以移动排放源为重点, 对实现空气质量和温室气体减排的长期目标所需的技术改造进行了定量研究¹³⁰。研究中提出了下列问题: 如何制定战略来实现空气质量目标和温室气体排放目标的互补? 二者之间有何不同? 技术开发与应用的关键决策点是什么? 这些决策对能源基础设施投资决策有何影响? 技术范围的变化对于未来协调规划措施有何意义?

《清洁空气展望》强调了技术革新对于实现空气质量目标和温室气体减排目标的重要性, 指出实现零排放和近零排放车辆技术可能需要很长一段过渡期。该研究还揭示了为达成这两个目标所能采用的各种技术、对多样化减排策略组合的需求以及协调空气质量规划与温室气体规划的重要性(在各种战略和技术之间进行取舍)。

2016年, ARB按照《清洁空气展望》拿出了自己的《移动排放源战略》(Mobile Source Strategy), 为移动排放源同时实现空气质量达标和温室气体减排达标制定了一个15年战略(2015-2030)¹³¹。《战略》根据《展望》中开发的情境规划工具, 提出了更新版, 并用定量分析来辅佐以下建议: 建议支持大量销售零排放轻型车、支持开发这些车辆的配套基础设施。对于重型车, 《战略》建议: 将NO_x的排放标准下调90%, 提高燃油效率、鼓励可再生燃料的使用以及长期过渡到零排放和近零排放技术。

无论《清洁空气展望》还是《移动排放源战略》, 都是可公开获得的文件, 其中大量采纳了公众意见。长期远景和战略的制定, 有助于增强制造商对长期监管要求和所需技术的信心。

3.2.3.2 计划过程之间的协调

除了远景与战略规划文件之外, ARB还在空气质量计划规划(由州政府实施)和温室气体减排计划之间建立了联系。加州的《全球变暖解决方案法》要求州政府每五年制定一次“工作范围规划(“scoping plan”), 详细说明本州将如何实现温室气体减排中期(2020、2030)目标。在实践中, 两个计划之间已经实现了协调, 那就是利用一个计划的成果作为另一个计划的条件。例如, 南岸空气质量管理区的“空气质量计划”就采纳了“工作范围规划”中的州措施¹³²。进行这种协调, 需要加深地方空气质量管理区、ARB和州能源监管机构之间的合作。

在不同规划中如果能将多重污染物减排措施的好处考虑在内, 实现各个计划流程之间的协调, 就能够同时降低空气质量达标和实现气候目标的成本。如果不同的污染物的实施计划相互孤立, 就有可能出现措施之间相互冲突、措施实施成本高昂、而对于目标的实现又毫无用处的情况。

¹²⁹ ARB (2016a).

¹³⁰ ARB (2012).

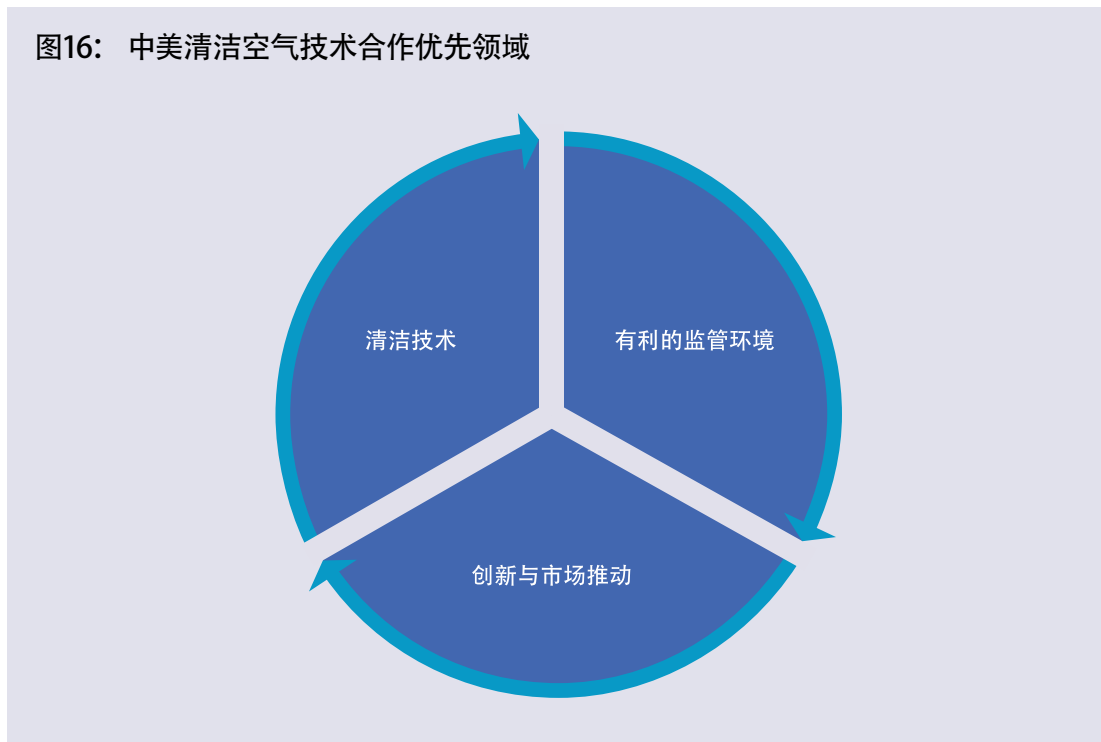
¹³¹ ARB (2016b).

¹³² 见Preliminary Draft of SCAQMD 2016 AQMP Stationary Source Measures: http://www.aqmd.gov/docs/default-source/clean-air-plans/air-quality-management-plans/2016-air-quality-management-plan/control-strategies/1_stationarysourcemeasures_040816.pdf?sfvrsn=4.

4. 中美清洁空气技术与政策合作优先领域

中美环境政策与环境技术合作由来已久，无论是在国家层面还是地方层面。随着两国为改善空气质量、减少温室气体排放而做出的不懈努力，加深两国现有合作和扩大合作领域的机会非常多。通过前几章的分析和对美国制造商的简短调查，本章着重剖析短期内的三个优先合作领域，如图16所示。

图16：中美清洁空气技术合作优先领域



4.1 清洁技术

美国有哪些新兴清洁技术可以对中国产生变革性影响？

我们对优先技术领域的评估基于以下三个标准：

1. 这些技术是否能够帮助解决中国的主要空气质量问题？
2. 这些技术是否已经商业化？或者，是否近期可以商业化？
3. 该领域的技术是否有可能减少多重排放（尤其是空气污染物和温室气体排放）？

基于上述标准，我们确定了如下五个优先技术领域。

先进的空气质量监测技术——信息与通信技术的进步，推动了先进空气质量监测技术的发展，可实现全方位污染监测，并实时生成数据，作为区域空气质量监测网络的补充手段而发挥作用，空气质量监测技术在中国前景良好。作为区域监测网络的一部分或补充，监测仪可进一步明确污染的时间点和地点，从而更好地了解污染源及暴露水平，更有重点地制定战略，做到有的放矢地控制危害最严重的污染源。在美国，监测空气质量的新方法和新技术正在开发、测试和试行之中。

重型车辆一体化设计和清洁燃料——重型柴油车无论在中国还是美国都是PM2.5和NOX的主要排放源。在美国，十年来联邦政府出台的新产公路用柴油车排放标准一直在鼓励采用集成发动机和污染控制系统的设计，以便在满足低排放标准的同时，优化燃料效率和车辆性能。中国如能应用这些技术，监管机构就可以通过调低新产重型车辆排放标准来控制环境污染的主要源头。从长远来看，中美在开发新一代重型车辆排放控制技术和清洁燃料上的合作潜力巨大，美国包括加州在内的许多州都认为，在2030年前实现空气质量和气候政策目标需要采用这些技术和燃料。

客车和公交车辆电气化——客运车辆、公交车和短距离运输车的电气化，是可以同时推进空气质量和气候政策的一个重要领域。电动汽车无尾气排放，因为是依靠电源作为动力，整体排放较低。中国许多城市都在鼓励使用电动汽车和电动公交车。美国以加州为首的几个州计划未来十年快速推广电动汽车和其他零排放车辆。低成本的电池新技术，以及实现电动汽车与电力系统一体化的信息与通信新技术，可对电动车的推广使用产生革命性影响。中美两国都在开展这一领域的创新工作。

低环境影响溶剂——溶剂（用在油漆、润滑剂、油墨、粘合剂和清洁产品中）是城市VOC的第二大排放源，会造成臭氧污染。高VOC溶剂替代品可能还会导致其他环境问题，比如造成臭氧层空洞、导致气候变化、危害室内空气质量等。中国最近几年才开始控制溶剂的VOC排放，在城市地区，控制溶剂排放将来可能会成为臭氧排放管理的一项重要措施。新一代溶剂技术正在美国兴起，这些技术可以满足对多种污染物的限值要求，同时还能保证预期性能。

炼油厂、化工厂和管道的泄漏检测与修复——炼油厂和化工厂设施是逸散型VOC和有害大气污染物的主要排放源；天然气钻井和管道是逸散型甲烷（一种强效温室气体）的主要排放源。许多情况下，这些排放都是源于设备泄漏，饱受检测维修难、成本高的困扰。在中国，炼油厂、化工厂设施和管道只是在最近才开始进入严格监管范畴。而在美国，炼油厂、化工厂设施和管道排放已被管控了几十年。但研究表明，这些设施的实际排放量远远高于报告的排放量。新兴遥感技术是美国刚刚兴起的一项技术，能更好地控制逸散型VOC和甲烷排放，从而降低测漏与修复成本。

4.2 有利的监管环境

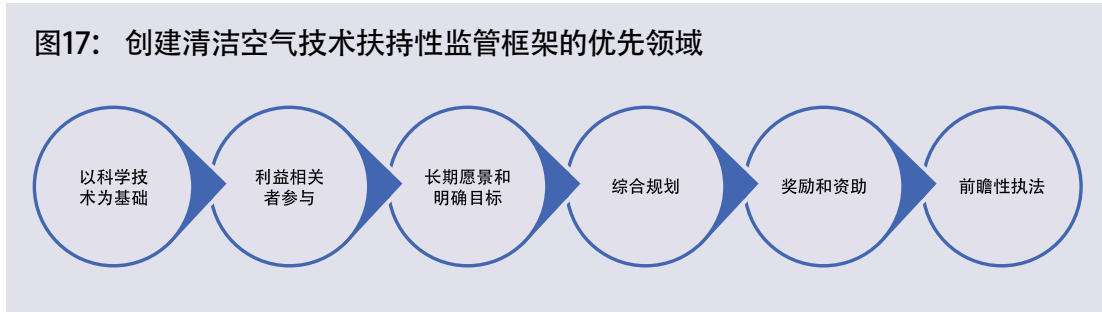
在美国用来支持清洁技术的法规中，哪些可以为中国所借鉴？

在创建有利于清洁技术开发与部署的政策环境方面，加州拥有60多年的经验。我们从中选择了几个领域，供中国政策制定者和监管机构借鉴。

其中包括六大元素，图17按其重要性给出了排序。

以科学科学技术基础——科学技术是基础，了解空气质量及其对人类和生态系统的健康影响、以及应采取什么样的减缓措施，都建立在这一基础之上。加州和美国经验亦

图17: 创建清洁空气技术扶持性监管框架的优先领域



证明了科技在空气质量管理中的重要性, 制定和更新空气质量与排放标准、落实规划和开发经济框架从而对控制措施进行优先级别排序, 这一切都离不开科学技术。

利益相关者参与——新法规制订之初就吸纳利益相关者参与 (尤其是工业利益相关者的参与), 定能建立起进行大规模改革所需的信任、共识和参与热情。吸引利益相关者的途径有很多: 比如成立顾问委员会 (由各界代表组成, 对标准和程序的制订提供指导), 举行公共研讨会 (推介拟进行的监管改革、整合利益相关者的反馈), 推动专业委员会长期参与等。加州“卡车与公共汽车条例” (第3.2.1.2节) 的实施, 提供了利益相关者参与的多条途径, 这一参与, 在不影响空气质量目标的前提下, 可就企业所需的灵活度进行协商, 确保成功实现目标。

长期远景和明确目标——建立长期的远景与战略规划, 与明确的目标和具体指标相结合, 可向制造商、设备业主、政策制定者和公众展示更广阔的前景和更大的确定性。加州经验表明, 这种长期确定性能带动制造商投资于更多的资本密集型研发活动, 从而推动技术的巨大进步。另外, 还能允许监管机构对制造商和设备业主灵活设定满足标准的期限, 从而加大他们成功的机会。

综合规划——趋势表明, 环境监管机构必须满足多重污染物和温室气体减排目标。同时满足所有这些目标 (而不是分别满足各项指标) 将有可能降低成本。加州经验彰显了长期战略规划、协调规划过程和政府机构之间协作的重要性, 这些是成功进行空气质量与温室气体规划整合的前提。

奖励和资助——激励政策能在鼓励新技术的采用中发挥重要作用。比如在加州, 拨款和贷款都在鼓励柴油车辆车主转购达标新车中发挥了重要作用。认定资金来源 (比如通过征税或排污费), 对确保资金的可持续性非常重要。

前瞻性执法——执法往往是空气质量管理中最为关键但又繁琐和困难的环节, 但新技术 (比如先进的空气质量监测和车载诊断系统) 为执法拓宽了新思路。在加州, 如果要利用这些新技术, 就必须积极升级执法程序并对新问题进行跟踪, 比如说, 监管机构如何能够确保来自车载诊断系统的数据是准确的? 质保书和标志也是执法当中要确保的重要元素。

4.3 市场推动

作为本报告的一部分, 我们对美国18家清洁空气技术企业进行了一次小规模调查, 了解他们是如何看待入市中国的障碍的。调查包括对本报告所涉技术相关的几个行业的业务开发经理和高管的采访, 所涉技术包括: 空气质量传感器、柴油发动机排放控制设备、电动汽车设备、替代燃料重型汽车、管道终端VOC处理、VOC测漏检测与修复和低污染

加州与中国的合作

过去的20年里，加州州立机构签署了一系列合作协议，与中国同行开展了系列合作。随着时间的推移，这些合作关系得到了进一步的深化和延伸，并已初见成效。

例如，加州空气资源委员会为北京环保局开发轻型和重型车辆排放新标准提供了支持，在北京提出的“京六”标准（2015）中，引进了加州移动排放源条例中的很多内容。另一个例子是，加州与广东省达成了合作备忘录，在该合作下，加州州立机构为广东省排放限额与交易系统的设计以及一个碳标志项目提供了支持。

加州州立机构和中国政府机构之间一直以来最重要的合作形式是信息交流。通过合作，双方更深入地了解了每一领域政策和实践都有哪些差异以及为何存在差异，并开始在美国政策制定者和监管机构之间架设信息交流的桥梁。中美两国之间的合作，既有助于中国的政府机构借鉴加州的政策和实践，又有助于加州学习中国的经验。中国和加州的企业在环保（尤其是气候变化）方面开展的合作，正在成为其他地方性合作的成功典范。

未来加州州立机构和省级政府之间合作的主要领域是：清洁技术的开发与创新、温室气体减排长期策略、能源效率和可再生能源以及基于市场的温室气体减排解决方案。

溶剂。尽管这次调查不完全具备代表性，但美国清洁空气技术供应商进入中国市场的难点可窥见一斑。

受访者认定了如下五个领域，在这些领域中，如果政府和非政府组织能提供支持，即可促成他们顺利进入中国清洁空气技术市场：

- 当地合作关系；
- 知识产权保护；
- 监管框架；
- 空气污染公众意识；
- 技术统一性。

表13给出了认为每个领域存在进入中国市场问题的企业数量，本节随后将详细介绍这些企业在调查中的回应。

4.3.1 当地合作关系

多家受访企业（特别是新兴技术企业）表示，需要一个平台来找到合适的中国国内组织并建立合作伙伴关系，这是进入中国清洁技术市场的最大障碍。受访者指出，在中国这样的国家，商业文化很大程度建立在个人关系基础之上，贸易展会或其它会议是建立合作关系的契机。一些企业（甚至包括那些已在中国建立了合作伙伴关系和在中国有

表13: 美国清洁空气技术供应商进入中国市场的障碍

技术种类	受访企业数量	当地合作关系	知识产权	监管框架	公众意识	技术统一性
空气质量传感器	3	1	1		1	1
柴油排放控制系统	3	1		3	1	3
电动汽车设备	1	1				1
替代燃料重型车辆	6	4	3	1	2	1
管道终端VOC处理	1	1		1		
VOC泄露检测与修复	3	3	2	2	2	
低污染溶剂	1			1		

供应链的企业) 还列举了在跟进中国监管、技术和市场最新发展中遇到的困难。

为发展当地合作伙伴、掌握当地动态等挑战, 受访者建议, 中美两国的市场引导者 (即注重市场开发的政府机构、智囊团、行业协会以及创新中心) 可以定期组织针对特定产业或技术的会议或商务洽谈活动。市场引导者可以通过人们熟悉的媒体 (比如商会通讯等) 提供最新消息和市场动态。

4.3.2 知识产权保护

部分受访企业提到知识产权保护问题, 认为知识产权保护是进入中国市场的一大障碍。对于先进的或新兴的技术, 企业指出, 知识产权是他们的重要资产。受访者普遍认为, 中国不能提供足够的知识产权保护, 使得美国企业在考虑合资或其他形式的合作时较为谨慎, 不愿意全部进入市场。

4.3.3 监管框架

受访者还提到了中美监管框架的不同 (空气质量标准、排放标准、质保需求、执法、奖励和其他监管要素) 也是进入中国市场的障碍。也就是说, 监管标准和执法在中国还不够严格, 无法为他们的技术带来成本效益。对新兴技术来说, 奖励和拨款尚不足以弥补收益和成本之差。在美国, 奖励和拨款是技术革新中的重要推动力。

对于中国近期才开始管控的污染物 (如VOC), 受访者指出, 中国当前的政策法规

尚未明确由哪个监管机构负责执法；地方环保部门的实际做法往往各不相同，不易查到或根本不提供英文材料；执法不严或执法不一致，因而不足以促使终端用户采用新技术。对于柴油机排放控制技术，受访者指出，强制执行低硫柴油困难重重，因此阻碍了美国技术的进入。

4.3.4 公众意识

一些清洁空气技术（如：远程空气质量传感器、零排放公共汽车）是由政府为公众利益而采购的。虽然中国公众对环境问题的认识已大幅提升，但一些受访者仍认为，提高环保公众意识是推动更广泛地采用特定清洁空气技术之必需。这一前提是，由环保意识较高的公众鼓励政府机构为了公众利益采购更先进的监控设备和污染控制设备，用在公共交通工具和公共设备上。

4.3.5 技术统一性

受访者认为，中美两国缺乏协调统一的技术和技术标准也是美国企业进入中国市场的障碍。例如，如果不严格颗粒物排放标准，柴油发动机制造商和车主就不大可能安装柴油机颗粒集器。新兴技术还常常出现相互冲突的技术标准，比如电动汽车充电标准的情况。一些受访者期待技术的协调统一，表示了想“尽早”进入中国市场、建立供应链和客户群的意愿。

5. 结论与建议

中国若要实现清洁空气目标, 必须在未来十年里大举发展清洁空气技术。在很多情况下, 减少空气污染、减少温室气体排放和满足长期气候政策目标之间会产生协同作用。美国在空气洁净技术和监管方面的经验, 既可帮助中国实现国家空气质量目标, 又可支持技术革新, 从而持续满足空气质量目标和气候目标。

为了充分发掘中美清洁空气技术合作的潜力, 我们建议开展以下三种类型的活动, 通过这些活动, 中美之间的近期合作和交流定会取得变革性成效:

就实现空气质量与气候长期目标之战略进行合作——加州多年来的经验是: 设立长远目标并长期开展战略研究, 以使制造商能看到技术确定性 (这些技术是实现长期目标之必需)、市场规模和投资规模。中美在这一领域的合作, 将会推动空气质量与排放长期标准的进一步统一和最终融合, 从而拓宽清洁空气技术市场、促进创新并降低技术成本。

据我们所知, 中美尚未正式迈进共建远景阶段, 但已搭建了所需平台, 其中包括政府间已开展的合作 (例如中国发改委和环境保护部与美国环保署之间的合作)、中美气候变化工作组和非政府合作项目 (如“深度脱碳途径”项目、国际零排放汽车联盟等)。

进一步加强支持性法规方面的合作——在中国开发针对更复杂污染问题的监管体系之际, 美国可分享自身经验, 作为有价值的借鉴。目前美国环保署与中国环境保护部之间已在国家层面展开交流, 加州空气资源委员会也和北京环保局开展了地方层面的交流。建立这种合作伙伴关系还会使美国在今后十年里随着中国改善空气工作的推进而学习到中国在监管方面的开创性经验。若要深化中美监管机构之间的交流、并将这种交流延伸到中国其它省份和美国的其它州, 还必须拓宽思路, 比如合作形式、资金来源、目标和成功标准等方面的创新。

非政府组织的参与, 也可在推动中美政府间有关监管问题的详细交流中发挥重要作用。例如, 加州大学洛杉矶分校清洁空气中心联手南海岸空气质量管理区和加州空气资源委员会每年举办一次空气质量管理培训班, 向中国监管机构介绍加州的监管经验。能源基金会和中国清洁空气联盟也在支持这一交流活动中发挥了重要作用。

共同努力, 推动市场进入、技术创新和健康竞争——中国和美国是全球两大清洁空气技术市场, 对全球技术发展方向举足轻重。中美双方可以通过一个共同市场, 推动创新和竞争, 以便降低空气清洁化成本, 降低气候变化风险成本。创建这一大型市场需要两国共同努力, 发现市场壁垒并采取互惠措施消除这些壁垒。

从正式渠道看, 双方应开展联合研究, 作为“战略与经济对话”的内容之一。从非正式渠道看, 非政府组织 (比如行业协会或贸易和商业发展机构) 也可积极参与这些研究和促进工作。

参考文献

- ARB (2012). Vision for Clean Air: A Framework for Air Quality and Climate Planning (Public Review Draft). Sacramento: ARB.
- ARB (2015a). Technology Assessment: Lower NO_x Heavy-Duty Diesel Engines. Sacramento: ARB.
- ARB (2016a). Proposed 2016 State Strategy for the State Implementation Plan. Sacramento: ARB.
- ARB (2016b). Mobile Source Strategy. Sacramento: ARB.
- Asia Society (2014). A Vital Partnership: California and China Collaborating on Clean Energy and Combating Climate Change. New York and San Francisco: Asia Society.
- Buczu, B. and M. P. Fraser (2006). “Source Identification and Apportionment of Volatile Organic Compounds in Houston, TX.” *Atmospheric Environment* 40: 2385–2400.
- Chafe, Z. (2014). Household Cooking with Solid Fuels Contributes to Ambient PM_{2.5} Air Pollution and the Burden of Disease. *Environmental Health Perspectives*. December 2014, Volume 122, Issue 12
- California Air Resources Board (ARB) (2000). Risk Reduction Plan to Reduce Particulate Matter Emissions from Diesel-fueled Engines and Vehicles. Sacramento: ARB.
- Chafe, Z. (2014). Household cooking with solid fuels contributes to ambient PM_{2.5} air pollution and the burden of disease. *Environmental Health Perspectives*.
- Crouch, E. (2016, March 1). Here are 5 indoor air quality monitors for homes in China. 2016.5.13 检索于Tech in Asia: <https://www.techinasia.com/air-quality-monitors-chinese-home>
- Cuclis, Alex. “Why Emission Factors Don’t Work at Refineries and What to do about it.” Paper presented at the Emissions Inventory Conference in Tampa, Florida on August 13-16, 2012.
- DieselNet. (2011, September). International: IMO Marine Engine Regulations. 2016.5.10检索于 DieselNet: <https://www.dieselnets.com/standards/inter/imo.php>
- DieselNet. (2015, December). Heavy-Duty Truck and Bus Engines. 2016.5.9检索于DieselNet: <https://www.dieselnets.com/standards/cn/hd.php>
- 丁焰 (2016.9.19) “中国移动源污染控制挑战与对策”，2016.5.18检索于能源基金会中国网站: http://www.efchina.org/Attachments/Foundation-News/news-efchina-20140918/4-15.DING%20Yan_EN.pdf
- Duan, X., & Zhang, J. (2014). WHO Indoor Air Quality Guidelines: Household Fuel Combustion. Review 8: Household Coal Combustion: Unique Features of Exposure to Intrinsic Toxicants and Health Effects. World Health Organization.
- ECOpoint Inc. (2014, June). Emission Standards: China: Nonroad Engines. 2016.4.18检索于 DieselNet: <https://www.dieselnets.com/standards/cn/nonroad.php>
- ECOpoint Inc. (2015, December). Emission Standards: China: Heavy-duty Truck and Bus Engines. 2016.4.27检索于DieselNet: <https://www.dieselnets.com/standards/cn/hd.php>
- U.S. Energy Information Administration (EIA). Annual Energy Outlook 2015. Washington, DC: EIA, 2015a.
- EIA. Analysis of the Impacts of the Clean Power Plan. Washington, DC: EIA, 2015b.

Energy Information Administration. (2015, May 14). China.2016.5.11检索于EIA Beta: <http://www.eia.gov/beta/international/analysis.cfm?iso=CHN>

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). “Greenhouse Gas Emissions and Fuel Efficiency Standards for Medium- and Heavy-Duty Engines and Vehicles— Phase 2.” Federal Register 80 (2015): 40137– 40766.

EPA. “Control of Air Pollution From New Motor Vehicles: Heavy-Duty Engine and Vehicle Standards and Highway Diesel Fuel Sulfur Control Requirements; Final Rule.” Federal Register 66 (2001): 5002-5193.

EPA. Leak Detection and Repair: A Best Practices Guide. Washington, D.C.: EPA, 2014.

EPA. Our Nation’s Air: Status and Trends through 2010. Research Triangle Park, NC: EPA, 2012.

Frisch, Lennart. Fugitive VOC-emissions Measured at Oil Refineries in the Province of Västra Götaland in South West Sweden — A Success Story. County Administration of Västra Götaland, 2003.

Fulton, Lew and Marshall Miller. Strategies for Transitioning to Low-Carbon Emission Trucks in the United States. Davis, CA: UC Davis Institute of Transportation Studies and National Center for Sustainable Transportation, 2015.

Governor’s Interagency Working Group on Zero-emission Vehicles. 2013 ZEV Action Plan: A roadmap toward 1.5 million zero-emission vehicles on California roadways by 2025. Sacramento: Governor of the State of California, 2013.

环境保护部环境标准研究所 (2014.2) “中国船舶排放新标准最新进展”, 2016.5.10检索于中国能源基金会网站

郝吉明、尹伟伦、岑可法 (2016)。《中国大气PM_{2.5}污染防治策略与技术途径》。科学出版社。

何克斌, 张强, 同丹 (2016)。《京津冀如何实现空气质量达标?》

He, K. (2016). Air Pollution Prevention and Control Strategy for China’s 13th Five Year Plan. 2016 Global Forum on China’s Urban Air Pollution Control. Washington DC.

Hong Kong Environmental Protection Department. (2002). Study of Air Quality in the Pearl River Delta Region. Hong Kong: Hong Kong Special Administrative Region Government.

Huo, H. (2012). On-board measurements of emissions from diesel trucks in five cities in China. *Atmospheric Environment*, 54, 159-167.

International Council on Clean Transportation. (2013, March). China announces breakthrough timeline for implementation of ultra-low sulfur fuel standards. 检索于ICCT网站: http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCTupdate_CH_fuelsulfur_mar2013_rev.pdf

International Council on Clean Transportation. (2015). Costs and Benefits of Motor Vehicle Emission Control Programs in China. Washington DC: ICCT.

International Maritime Organization. (n.d.). International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL). 2016.5.10检索于国际海事组织网站: [http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-forthe-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-forthe-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx)

International Maritime Organization. (n.d.). Member States. 2016.5.10检索于国际海事组织网站: <http://www.imo.org/en/About/Membership/Pages/MemberStates.aspx>

Kulmala, M. (2015, October 21). Atmospheric Chemistry: China’s Choking Cocktail. 22, 2016.4.22检索于《自然杂志》: <http://www.nature.com/news/atmospheric-chemistry-china-s->

choking-cocktail.18586

Li, X. (2014). Environmental Tax - A Potential policy Tool on VOC Control in China. 15th Global Conference on Environmental Taxation, (p. 11). Copenhagen.

Lin, X., & Elder, M. (2014, March). Major Development's in China's National Air Pollution Policies in the Early 12th Five-Year Plan. 2016.6.2检索于全球环境战略研究所网站: http://pub.iges.or.jp/modules/envirolib/upload/4954/attach/Major_Developments_in_China's_Air_Pollution_Policies_March2014.pdf

Litton, Ronald K. Challenges and Solutions: Solvent Technology for Present and Future Air Quality Regulations. Kingsport: Eastman, 2013.

Liu, F., Zhang, Q., Tong, D., Zheng, B., Li, M., Huo, H., & He, K. (2015). High-resolution inventory of technologies, activities, and emissions of coal-fired power plants in China from 1990 to 2010. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13305.

Liu, J, Denise L. Mauzerall, et al. (2016). Air pollutant emissions from Chinese households: A major and underappreciated ambient pollution source. <http://www.princeton.edu/system/files/research/documents/PNAS-2016-Liu-7756-61.pdf>

Manufacturers of Emission Controls Association (MECA). Evaporative Emission Control Technologies for Gasoline Powered Vehicles. Washington, D.C.: MECA, 2010.

Manufacturers of Emission Controls Association. (2014, June). Reducing Evaporative Emissions - the Largest Source of VOC Emissions Leading to Haze, PM_{2.5} and Ozone Formation in China's Major Cities: A Macro and Micro Analysis with Information on International Experience and Related Implications for China. 2016.6.2检索于MECA网站: http://www.meca.org/resources/MECA_China_Evap_English_June_2014.pdf

MECA. (2014). Reducing Evaporative Emissions - the Largest Source of VOC Emissions Leading to Haze, PM_{2.5}, and Ozone Formation in China's Major Cities. MECA.

MECA. Emission Control Technologies for Diesel-Powered Vehicles. Washington, D.C.: MECA, 2007.

Miller, J. (2016, February 23). China: Heavy-duty: Emissions. 2016.5.9检索于Transportpolicy.net: http://transportpolicy.net/index.php?title=China:_Heavy-duty:_Emissions

Pang, Yanbo, Mark Fuentes, and Paul Rieger. "Trends in selected ambient volatile organic compound (VOC) concentrations and a comparison to mobile source emission trends in California's South Coast Air Basin." *Atmospheric Environment* 122 (2015): 686-695.

Pang, Yanbo, Mark Fuentes, and Paul Rieger. "Trends in the emissions of Volatile Organic Compounds (VOCs) from light-duty gasoline vehicles tested on chassis dynamometers in Southern California." *Atmospheric Environment* 83 (2014): 127-135.

PIM LTD. (2014). China's Home Air Purifiers Market Research. 2016.5.13检索于Pim China: http://www.pimchina.com/uploads/soft/150826/1_1152293511.pdf

Posada, Francisco, Sarah Chambliss, and Kate Blumberg. Cost of Emission Reduction Technologies for Heavy-Duty Vehicles. San Francisco: The International Council on Clean Transportation, 2016.

Pure Living China. (2014). Indoor Air Quality. 2016.4.22检索于Pure Living China: <http://www.purelivingchina.com/learning-center/indoor-air-quality/>

South Coast Air Quality Management District (SCAQMD). Rule 102. Amended May 2, 2014.

Wang, Q. (2007). Impact of biomass burning on urban air quality estimated by organic tracers:

Guangzhou and Beijing as cases. *Atmospheric Environment*.

Wang, S. (2012). Emissions of air pollutants from power plants in China. Beijing: Tsinghua University.

Williams, James H., Andrew DeBenedictis, Rebecca Ghanadan, Amber Mahone, Jack Moore, William R. Morrow III, Snuller Price, Margaret S. Torn. "The Technology Path to Deep Greenhouse Gas Emissions Cuts by 2050: The Pivotal Role of Electricity." *Science* 335 (2012): 53-58.

Williams, James H., Benjamin Haley, Fredrich Kahrl, Jack Moore, Andrew Jones, Margaret S. Torn, and Haewon McJeon. Pathways to Deep Decarbonization in the United States. New York: Sustainable Development Solutions Network and IDDRI, 2014.

Zhang, J., & Smith, K. (2007). Household Air Pollution from Coal and Biomass Fuels in China: Measurements, Health Impacts, and Interventions. *Environmental Health Perspectives*.

Zhao, L., Zhou, R., Xie, H., & Huang, C. (2014). Air Pollution Control in China. Beijing: Retoring Blue Skies: Accelerating Air Pollution Control.

Zhao, X. (2015). Impact of environmental regulations on the efficiency and CO₂ emissions of power plants in China. *Applied Energy*.

Zukerman, R., L. Vradman, M. Herskowitz, E. Liverts, M. Liverts, A. Massner, M. Weibel, J.F. Brilhac, P.G. Blakeman, L.J. Peace. "Modeling and simulation of a smart catalytic converter combining NO_x storage, ammonia production and SCR." *Chemical Engineering Journal* 155 (2009): 419-426.

中国农业大学 (2015), 《中国生物质炉灶标准、测试方法和认证体系路线图》

中国“十三五”规划(中文), http://sh.xinhuanet.com/2016-03/18/c_135200400.htm

中国环境与发展国际合作委员会 (2012) 《中国汞管理专题政策研究》

中国清洁空气联盟 (2015), “VOCs治理: 千亿元投资空间”, 贺克斌、张强、同丹 (2016), 《京津冀能否实现空气质量达标?》。 <http://www.cleanairchina.org/product/7532.html>

中国清洁空气联盟 (2015)。《大气污染防治行动计划 (2013-2017) 实施的投融资需求及影响》。 <http://www.cleanairchina.org/product/7466.html>

中华人民共和国环境保护部 (2001, April 16). “车用压燃式发动机排气污染物排放限值及测量方法”, 2016.5.26检索于中华人民共和国环境保护部网站: <http://www.mep.gov.cn/image20010518/1923.pdf>

中华人民共和国环境保护部 (2013). Report of Environmental Related Human Activity Pattern Survey of Chinese Population. Beijing.

中华人民共和国环境保护部 (2015). 《2015年中国机动车污染防治年报》, 北京, 中华人民共和国环境保护部

中华人民共和国环境保护部 (2015.12.11), 全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案(中文) 2016.5.11检索于中华人民共和国环境保护部网站: http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201512/t20151215_319170.htm

中国国家统计局 (2013). Annual Data: Consumption of Coal and Its Main Varieties. 2016.5.11检索于“National Data: <http://data.stats.gov.cn/english/easyquery.htm?cn=C01>

中国国家统计局 (2014), 年度数据, 2016.5.11检索于 National Data: <http://data.stats.gov.cn/english/easyquery.htm?cn=C01>

中国国家统计局(2014). 中国统计年鉴, 2016.5.9检索于国家统计局中文网站 <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2014/indexeh.htm>

致谢

当我们开始这个项目的时候,中美双方已经在清洁空气和气候变化领域开展了不少的合作,我们对这些已经进行和正在进行的合作表示深深的感谢。当亚洲协会于2015年发布《至关重要的合作伙伴关系:加利福尼亚州与中国携手发展清洁能源和应对气候变化》的报告的时候,我们的目标是希望记录并让更多的人关注此方面的合作。而对于各类致力于城市空气污染治理的公共或私营机构,像《至关重要的合作伙伴关系》一样,这篇报告是对他们现有努力的支持和补充而不是复制。这篇报告也正是源于合作的精神和众多组织和个人的交流参与而撰写的。

中国清洁空气联盟是我们最重要的合作伙伴之一。在我们起草这份报告的过程中,解洪兴先生领导的团队提供了不少的思路、数据,还有很多中国最新的清洁空气管理方面的信息。

我们也非常感谢赵立建先生和他所在的能源基金会的同事们对这项研究的资助以及提供的指导和建议。我们很幸运能够和能源基金会合作来为中国和世界创造一个清洁能源的未来。

我们还要感谢E3的Fredrich Kahrl博士,他在起草这份报告中起着至关重要的作用。我们也很感谢在Deep Decarbonization Pathways Project工作的 Jim Williams博士,他也对报告起草的过程提供了很多指导和建议。

我们还要感谢我们的项目咨询委员会的成员们,他们都贡献了很多好的建议和专业性指导,尤其是加州空气资源委员会的 Mary Nichols 主席,加州能源委员会的 Robert Weisenmiller 主席,排放控制制造商协会的 Rasto Brezny 博士,加州大学伯克利分校的 William Collins 博士,国际清洁运输委员会的何卉女士,加州环保局的戴凡博士。我们的报告审阅人也在报告撰写的过程中发挥了关键作用,尤其是前任加州南海岸空气质量管理区的Elaine Chang博士,加州空气资源委员会的 Alberto Ayala 博士以及中国清洁空气联盟的王丽莎博士。

还要特别感谢所有亚洲协会的同事们,尤其是亚洲协会全球副主席兼北加中心执行总监N. Bruce Pickering先生,还有亚洲协会美中关系中心的Arthur Ross主任 Orville Schell先生,他们在整个项目进行的进程中给予了很多的建议、鼓励和支持。我们也非常感谢 Alexander Eggert先生,他为报告的撰写提供了很多研究方面的协助和支持。

最后,我们要诚挚地感谢我们可持续发展项目的顾问 Kyle Graycar 先生。他从一开始就参与这个项目并且对起草这份报告投入了极大的热情,并且协助完成了很多项目协调方面的工作。

Juan Wei
Senior Program Manager, Sustainability
Asia Society Northern California

Robert W. Hsu
Associate Director
Asia Society Northern California

更多信息，请访问 AsiaSociety.org/AClearOpportunity

亚洲协会政策和商业方面的报告

东北亚碳市场路线图

开创性视角：美国房地产领域的中国投资

至关重要的合作伙伴关系：加利福尼亚州与中国携手发展清洁能源和应对气候变化



帮助亚洲人和美国人联手打造共同未来

亚洲协会是全球领先的教育机构，致力于在全球背景下增进美国与亚洲国家间人民、领袖和机构之间的互信与合作。亚洲协会的工作横跨艺术、商业、文化、教育和政策，就当前各热点问题和挑战提供深度观察，促进对话与交流，以期创造一个共同的未来。协会于1956年由约翰·D·洛克菲勒三世创立，是一家非盈利、非政治性的教育机构。总部设在纽约，在香港、休斯顿、洛杉矶、马尼拉、孟买、旧金山、首尔、上海、悉尼、华盛顿和苏黎世设有中心。