



中国环境与发展国际合作委员会  
专题政策研究报告

# 应对气候变化与大气污染治理协同控制 政策研究

— 聚焦短寿命气候污染物和非道路移动源

中国环境与发展国际合作委员会 2015 年年会

2015.11

## 项目组成员

### 中外组长\*:

郝吉明，国合会委员，清华大学环境学院教授，中国工程院院士

Lars-Erik Liljelund, 斯德哥尔摩环境研究所合伙人，瑞典环保局前局长

Michael P. Walsh, 国际专家，国际清洁交通委员会前董事会主席

### 中外成员\*:

田春秀，环境保护部环境与经济政策研究中心办公室主任兼气候变化政策研究部主任，研究员

杨金田，环境保护部环境规划院副总工，研究员

张世秋，北京大学环境科学与工程学院教授、环境与经济研究所所长

鲍晓峰，环境保护部机动车排污监控中心主任，研究员

徐洪磊，交通运输部规划研究院环境资源所所长，教授级高级工程师

吴烨，清华大学环境学院教授，国家环境保护大气复合污染来源与控制重点实验室副主任

Johan KUYLENSTIERNA, 斯德哥尔摩环境研究所政策主任

Drew T. SHINDELL, 杜克大学尼古拉斯环境学院气候科学教授

Lyne Monastesse, 加拿大环境部国际司

Alberto Ayala, 加州空气资源委员会副执行官

Barbara Finamore, 自然资源保护协会中国项目主任

韩国义，斯德哥尔摩环境研究所中国行动计划主任（协调员）

### 中方特邀专家:

张小曳，中国气象科学研究院副院长，研究员

王书肖，清华大学环境学院大气所所长，教授

葛蕴珊，北京理工大学机械与车辆工程学院，教授

胡建信，北京大学环境科学与工程学院，教授

### 支持专家:

冯相昭，环境保护部环境与经济政策研究中心气候变化政策研究部副主任，副研

究员

刘哲，环境保护部环境与经济政策研究中心，副研究员（协调员）

雷宇，环境保护部环境规划院大气环境规划部副主任，副研究员

杨礼荣，环境保护部对外合作中心处长，研究员

支国瑞，中国环境科学研究院，研究员

韩甲业，煤炭信息研究院能源安全研究所副所长曹国良，中国气象科学研究院，  
研究员

丁焰，环境保护部机动车排污监控中心副主任，研究员

伏晴艳，上海市环境监测中心副主任总工，教授级高工

李莉，国家环境保护城市大气复合污染成因与防治重点实验室副主任

卢旭阳，深圳市人居环境委员会污染防治处调研员

郝利君，北京理工大学机械与车辆学院，副教授

杨柳，交通运输部规划研究院环境资源所，高级工程师

Freda FUNG，自然资源保护协会，顾问

刘欢，清华大学环境学院，副教授（协调员）

**顾问：**

苏伟，国家发改委应对气候变化司司长

赵英民，环境保护部污染防治司司长

周大地，国家发改委能源研究所原所长

潘家华，中国社会科学院城市发展与环境研究所所长

朱凯，中国船级社副总裁兼总工程师

**协调员：**

刘欢，刘哲，韩国义

\* 本专题政策研究项目组中外组长、成员以其个人身份参加研究工作。

# 执行摘要

## 一、项目背景和必要性

短寿命气候污染物（SLCPs）主要是指黑碳（BC）、甲烷（CH<sub>4</sub>）、对流层臭氧（O<sub>3</sub>）和部分氢氟碳化物（HFCs）。减少短寿命气候污染物特别是甲烷和黑碳的排放能够在减少空气污染的同时减缓短期气候变暖。因此，实施短寿命气候污染物减排战略会带来多重收益，如改善公众健康、避免粮食产量损失及应对短期气候变化等。短寿命气候污染物减排与非道路源污染物控制关联紧密，但目前的相关政策框架中往往将其忽略。通过短寿命气候污染物和非道路移动源污染物的协同控制，可以协同治理空气污染和应对气候变化。

### 1、中国面临协同治理空气污染和应对气候变化的机遇和挑战

2014-2015 年是实现“十二五”规划中关于能源、环境和碳强度等一系列目标的关键年份，也是“大气污染防治行动计划”生根落地的关键时期。该行动计划旨在到 2017 年显著改善中国空气质量。此外，这段时间也是国民经济和社会发展“十三五”规划和“十三五”环保规划酝酿和出台的窗口期。中国将面临气候变化适应和减缓、空气质量改善等多重目标的挑战。

中国新修订的《大气污染防治法》（以下简称“新大气法”）2015 年 8 月 29 日获得审议通过，并将于 2016 年 1 月正式实施。这给短寿命气候污染物和非道路移动源（NRMS）污染物的减排带来了新的机遇，也明确地将治理空气污染和应对气候变化工作有机地联系了起来。新大气法的第二条指出“防治大气污染，应当以改善大气环境质量为目标，坚持源头治理，规划先行，转变经济发展方式，优化产业结构和布局，调整能源结构”。此外，该法还系统地针对煤炭、工业、道路和非道路移动车辆和船舶、扬尘、农业和其他污染源等领域提出了空气污染治理的具体措施，并鼓励通过区域联动切实减少颗粒物（PM）、二氧化硫（SO<sub>2</sub>）、氮氧化物（NO<sub>x</sub>）、挥发性有机物（VOCs）、氨（NH<sub>3</sub>）和温室气体（GHGs）的排放。

同时，国家还在大力推进“五位一体”总体布局中的生态文明建设，将其作为社会经济发展的支柱，并将绿色、循环和低碳发展融入社会经济发展的方方面面。与“新大气法”相呼应，2015 年 9 月 11 日刚刚获得审议通过并正式印发的《生态文明体制改革总体方案》中，明确了生态文明体制改革的基本理念、原则、目标以及建设内容等，为中国深入推进生态文明领域国家治理体系和治理能力现代化

奠定了社会经济制度的基础。空气污染和气候变化是相互关联的。在中国，协同应对气候变化和治理空气污染能够实现多重收益，“新大气法”中也对相关工作进行了整体规划。短寿命气候污染物是本研究报告重点关注的内容之一，这部分污染物在大气中的寿命较短，其排放能够带来显著的短期升温，并且能够导致空气污染。

近期的科学评估显示，采取快速行动减少特定源的短寿命气候污染物排放可以降低未来几十年内的升温速度和程度，且有助于促进细颗粒物（PM<sub>2.5</sub>）减排和对流层臭氧浓度的降低，同时带来公众健康改善、避免重要作物的产量损失等收益。在中国采取相关减排行动，不仅可能给中国带来环境和发展方面的收益，也能推动临近国家和北半球的空气质量改善。这种通过针对特定污染源实施减排措施和行动来减缓短期升温、同时改善空气质量的办法就是短寿命气候污染物减排战略的基本思想。

在中国，一个与短寿命气候污染物减排战略相关但较少受到关注的减排领域是非道路移动源污染物的排放，其主要排放来源包括建筑施工机械、农用机械、内河和海运船舶等。黑碳是一种重要的短寿命气候污染物，非道路移动源中包含大量的黑碳排放。例如，近些年随着海运贸易量的迅速增长，人们开始关注船舶和港口。控制船舶和港口的排放成为了治理空气污染的重要领域，同时船舶还是重要的黑碳排放源。其中长寿命温室气体和短寿命气候污染物（黑碳）的排放量都很大。因此，非道路移动源在本研究中也作为重点领域加以关注。

本报告评估了中国短寿命气候污染物战略及非道路移动源减排所能带来的收益和机遇，在尽早针对特定污染源采取协同减排行动的条件下，两个领域都能带来气候和空气质量的协同收益。

## 2、短寿命气候污染物战略对于未来几十年间减缓升温和其他气候变化的影响有一定作用

根据 IPCC 评估报告，气候正在发生显著变化，并且在未来几十年中还可能持续加速。使温室气体排放尽量早地达到峰值，减缓长期气候变化的影响，对于避免气候变化在本世纪内带来灾难性影响十分关键。相关的首要措施就是减少二氧化碳（CO<sub>2</sub>）的排放，这对全世界和中国而言都非常重要。然而，随着气候态向变暖移动，伴随着极端天气气候事件频发，特别是叠加在气候长期变暖背景下的短期升温会在未来几十年间对极端事件施加额外的影响，研究发现这其中短寿命气候污染物可能具有重要的作用。

短寿命气候污染物消减战略能够减少其对高脆弱性地区和生态系统的气候

影响，这些地区包括喜马拉雅山脉和北极地区等。中国西部 5000 多个冰川样本的分析结果表明，自二十世纪后半页以来，有超过 80% 的冰川表现出退化趋势，青藏高原地区冰川损失最大，这其中固然有长寿命温室气体增温的影响，也有短寿命气候污染物的贡献。此外，因冰川湖水增加引发的洪水灾害是气候变化短期气候影响之一。例如，过去的 100 年间，尼泊尔、巴基斯坦、不丹和中国等地至少爆发了 35 次冰川融水性洪水灾害，严重影响下游谷底居民的生活。短期温升影响威胁着那些温度变化和降水敏感型的作物生产，而短期温升和作物产量又都受到短寿命气候污染物排放的影响。

过去的几十年中，中国的降雨模式也发生了改变。越来越多且越来越充分的科学证据表明，短寿命气候污染物也是导致降雨模式改变的原因之一。此外，降雨强度和极端降水也可能受到短寿命气候污染物排放的影响。这些灾害事件会带来重大经济损失，并通过破坏农业生产和基础设施影响人们正常生活。

### 3、空气污染影响能够通过短寿命气候污染物战略得到一定程度减缓

中国的空气污染情况不容乐观，已经对人体健康、农业生产、生活质量和经济发展产生了重要影响。有研究估计，暴露于室内外细颗粒物污染导致了全球上百万人的过早死亡。细颗粒物污染还会导致猝死、心脏疾病、肝癌和呼吸系统感染，使人的寿命较没有细颗粒物污染的情况下显著缩短。此外，更广泛的人群还在承受非致命性的威胁，包括哮喘、不适、新生儿初生重量偏低、缺课和旷工等。因此，空气污染无疑是中国在未来十几年中需要优先解决的问题。

短寿命气候污染物战略能够从多方面降低空气污染带来的影响。首先，该战略关注不完全燃烧导致的主要污染源，涵盖了能够增加细颗粒物浓度的排放，能够降低细颗粒物浓度增加导致的危害和健康影响；其次，该战略还能够降低对流层臭氧对作物产量、森林生长和人体健康等方面的影响，是未来空气污染治理的重要领域；第三，短寿命气候污染物战略还可能带来短期气候收益、部分抵消由于脱硫脱硝等措施带来的温升效应并同时控制空气污染。

中国通过《大气污染防治法》减少二氧化硫和氮氧化物的排放，从而避免其对人体健康的损害，这点诚然是中国需要优先解决和重点关注的。但需要指出的是，大气中的这两种污染物能够降低地表温度，因此其减排可能会带来中国和全球的温升。短寿命气候污染物战略是能够减少这项工作带来的温升效应的做法，对中国而言也是如此。

在非道路移动源案例中，减少燃油的硫分是减缓空气污染和健康影响的普遍

做法。减少燃油硫分同样可能带来区域的短期温升。这种效应有可能通过短寿命气候污染物战略来部分抵消。鉴于二氧化硫的消减量预期很高，因此有必要加速减少船舶黑碳等短寿命气候污染物的排放，来抵消脱硫措施带来的气候影响；另一方面，低硫燃油的使用有利于一些先进的减排技术的应用，这增加了短寿命气候污染物战略实施的可能性。

## ● 短寿命气候污染物减排措施的识别

短寿命气候污染物战略关注那些能够带来短期气候收益的减排领域，也关注那些通过减少空气污染带来公众健康和生态环境收益的领域。短寿命气候污染物减排措施可通过评估不同气体和颗粒物温升效应加以识别。这些减排措施指那些带来降温效应（减少黑碳、甲烷、对流层臭氧和部分氢氟碳化物能够带来降温效应）部分抵消升温效应（减少硫化物、有机碳和氮氧化物能够带来升温效应）的措施。

黑碳在大气中仅留存几天，臭氧会在大气中留存几周到几个月，甲烷会存在 12 年，一些氢氟碳化物平均存在 15 年。这些物质的大气寿命都比二氧化碳短很多，二氧化碳会在大气中留存约 100 年。因此，如果有办法能够仅减少黑碳、甲烷、对流层臭氧和部分氢氟碳化物的大气浓度，而同时不减少对全球升温有抑制作用的硫酸盐、硝酸和有机碳等气溶胶，有可能在未来 10-20 年中实现气候和空气质量的协同收益。

## ● 对现行政策的补充

短寿命气候污染物战略对空气污染、气候变化、交通、农业和其他部门的政策形成有益补充。该战略所鼓励的措施目前不同程度地分散在各个部门计划、政策和法规中。例如，新大气法和大气污染防治行动计划中规定了在三个重点区域减少细颗粒物的排放；通过 UNFCCC 的报告机制，中国将甲烷排放纳入了其国家信息通报；通过中美合作机制等，中国政府将进一步消减氢氟碳化物的生产和消费；挥发性有机物和其他对流层臭氧前体物也将被纳入大气污染防治体系。这些国内政策和行动已经将绝大多数短寿命气候污染物排放源纳入了管控体系。

短寿命气候污染物战略强调应在现有机制安排下，更快更扎实地落实特定措施，切实针对特定污染源减少短寿命气候污染物的排放。因此，需要识别该战略和现行各项政策措施之间的差距，其重点在于识别关键措施，而不仅仅关注个别物质排放量的减少。这实质上包括了所有减少甲烷和氢氟碳化物排放的措施。但对于控制来源复杂的黑碳及其共生物质的排放，短寿命气候污染物战略只包括那些防止不完全燃烧的措施。换言之，只有那些能够同时减缓近期温升效应的黑碳减排措施才是该战略的内容。UNEP/WMO 评估报告以及关于短寿命气候污染物

的气候与清洁空气联盟（CCAC）的相关工作中识别了部分短寿命气候污染物减排领域：

- ✧ 甲烷：煤矿、水稻种植、油气生产-存储-运输过程、城市填埋场、动物粪便管理等。
- ✧ 黑碳：柴油发动机、民用煤炭和固体生物质燃料、小型工业锅炉不完全燃烧等。
- ✧ 氢氟碳化物：用低全球升温潜势值的替代物替代高全球升温潜势值的氢氟碳化物、建筑的有效制冷等。

## 二、主要发现和结论

### 1、在大气污染防治工作中对短寿命气候污染物和非道路移动源关注程度不够

长期以来，中国的大气污染防治工作所关注的主要问题集中在城市空气质量和酸雨等方面。这是正确的，因为中国严重和广泛的大气污染问题会对公众健康和环境产生巨大的不利影响。特别是随着中国的复合型大气污染在近年来日益突出，中国的管理资源和研究资源都大幅向常规大气污染防治倾斜。但这也带来了对短寿命气候污染物的关注远远低于对常规大气污染物的关注。

在非道路排放源方面，截止到 2013 年底，中国工程机械保有量约为 610-660 多万台左右，年均增长率超过 10%。研究表明，道路和非道路移动源氮氧化物排放的分担比例已经达到了 6：4，而非道路移动源排放的一次细颗粒物甚至超过了道路移动源。目前进入我国的远洋船舶仍以重油为主要燃料，重油中的硫含量一般在 1%~3.5%，较高的硫含量使得船舶的二氧化硫和颗粒物排放量均十分巨大。

### 2、当前短寿命气候污染物和非道路移动源的管理系统不足以确保非道路部分短寿命气候污染物的有效控制，“新大气法”为改善此系统提供机会

在控制非道路移动源空气排放方面，中国现有的管理系统还缺乏统一的监控和监管要求，较难确定非道路机械排放的实际水平。在燃料质量管理方面，工程机械所使用的燃料硫含量很高，质量很差，特别是远洋船舶所使用的燃料质量更差。因此，控制短寿命气候污染物和非道路移动源排放的管理系统和技术路线亟待改善。“新大气法”为环保等部门在国家 and 地方水平控制来自非道路机械和船舶的大气污染以及燃料质量的改善方面提供了法律基础，为在国家水平和大气污染严重的关键区域改善现有短寿命气候污染物和非道路移动源的管理体系提供



了机会。

### **3、短寿命气候污染物和非道路移动源的排放法规标准及政策相对滞后，“新大气法”为监管体系的完善提供了可能**

在短寿命气候污染物方面，我国目前的《环境保护法》和《大气污染防治法》这两项大气污染防治的基本法律中，都没有专门提出控制要求；在大气污染物排放标准中，除了《生活垃圾填埋场污染控制标准》（GB16889-2008）和《煤层气（煤矿瓦斯）排放标准（暂行）》中提出了对甲烷排放的控制标准外，对来自油气开采和农业等领域的甲烷排放没有控制要求，对黑碳和氢氟碳化物排放的主要污染源也未提出控制要求。中国现有的污染物控制政策并未把短寿命气候污染物控制作为工作目标。

我国对非道路移动机械用发动机进行了排放型式核准管理，但是尚未对在用非道路移动机械排放进行有效管理。飞机及远洋船舶排放主要遵守相关国际公约。此外，宽松的柴油质量标准（与发达国家相比）阻碍了先进排放控制技术在非道路柴油机中的广泛应用。“新大气法”规定所有国内船舶使用的新发动机必须进行排放测试，以验证其是否符合污染排放标准，同时在关键区域设立排放控制区域。针对额定净功率 37 kW 以上的船用发动机的排放标准正在制定，燃油质量也正在进一步提升，这些新立法和监管的发展为非道路部门的加强控制提供了一个难得的机会。

### **4、短寿命气候污染物和非道路移动源的某些先进控制技术已在世界范围内应用，这为加快其在中国的应用提供了重要的国际经验**

中国在控制技术的选择过程中，没有从短寿命气候污染物减排的角度进行考虑，仅是在某些政策和技术评估中，对涉及黑碳等有限的短寿命气候污染物减排效果进行了简要分析。其中，中国现行的致力于提高燃烧效率的煤炭清洁化利用、改进炉灶和窑炉的燃烧方式等政策措施对黑碳的减排有促进作用；中国国务院颁布的《大气污染防治行动计划》要求到 2017 年淘汰所有黄标车等等。这些政策行动都会同时减少不同来源的黑碳排放，但都不是专门针对减排黑碳而出台的。中国减少甲烷、氢氟碳化物和不完全燃烧产物（如黑碳等）排放的主要措施和策略基于当前研究即可确定。

在非道路机械方面，国际上先进的减排技术主要包括选择性催化还原技术（SCR）、颗粒物捕集器技术（DPF）等。这些技术可有效地降低氮氧化物和细颗粒物的排放，但受到燃油品质、工程机械尿素存储能力等方面因素的影响，这些技术尚未应用于国内的非道路机械上。在船舶方面，先进的减排技术包括靠港船舶使用岸电技术、发动机换低硫燃油等。其中，受到供电电网和相应设备标准

的制约，目前岸电技术尚未广泛应用，国内仅有上海港、深圳港、天津港等港口进行了一些试点研究。我国尚未建立排放控制区，因此，远洋船舶进入我国海域范围内未有转换低硫燃油的要求。

## **5、进一步系统研究和更全面的数据将提高对短寿命气候污染物和非道路移动源有效控制的能力**

在短寿命气候污染物方面，中国现有的统计体系并未将其纳入污染物排放量的统计范围。虽然在《气候变化国家信息通报》等政府文件中，报告了甲烷的排放量，但是并没有纳入年度排放统计工作，时效性也相对较差；对于其他短寿命气候污染物，甚至没有国家层面的排放量报告。在科研项目的支持下，国内一些科研单位研究了中国短寿命气候污染物的排放总量和分布特征，但是由于研究方法和基础数据等方面的限制，这些排放清单尚不能给政策制定和效果评估提供足够的支撑。

在非道路移动源方面，由于缺乏系统全面的统计数据及排放基础数据，我国尚未建立非道路移动源国家排放清单。非道路移动机械种类繁多，我国尚未对各类机械排放进行全面的研究，目前的研究结果只提供了部分机械测试结果。因此基础排放因子数据比较有限。同时，机械的活动范围广泛，应用领域多样，致使活动水平数据的收集存在一定困难。在船舶方面，中国目前主要利用国外的基础数据来研究其港口船舶的污染物排放，这就很难全面的掌握船舶污染物排放的真实水平。

## **三、主要政策建议**

### **1、制定并完善相关的排放法规标准及政策**

对于短寿命气候污染物，应完善排放标准体系，并基于减排的最佳实用技术规定相应的排放限值。针对黑碳，能源使用政策转换的速度应该加快，道路柴油车、炼焦炉和砖窑应通过达到最佳实用技术要求来减少黑碳排放。针对煤矿瓦斯部分，要提高煤矿瓦斯利用补贴标准和财政补贴标准，进一步完善税收优惠政策，建议将《煤层气（煤矿瓦斯）排放标准（暂行）》改为正式文件发行，提高煤矿瓦斯利用率。最佳实用技术也可应用于甲烷的其他来源，包括油、气工业和填埋场的无组织排放；而最佳的方法，如间歇灌溉可用来减少来自水稻种植的甲烷排放。

应尽快制定针对新的和在用的工程机械、农业机械和海洋船舶排放削减的法规，以力争 2020 年达到国际最佳实践水平的目标。到 2018 年 1 月 1 日，中国普

通柴油中的硫含量将不高于 10 ppm，中国应考虑在“十三五”期间跨越到欧 IV 阶段非道路排放标准，甚至在京津冀、长三角、珠三角、四川盆地、东北及其它高污染的地区更早实现跨越。到 2020 年，对于内河、沿海船舶，中国应考虑跨越到美标 Tier 4 或同等标准，同时以推动广泛采用最有效的黑碳控制技术（如颗粒物捕集器技术），在关键港口地区和主要的内陆水道鼓励尽早采用更严格的标准。

为了直接减少黑碳排放和确保先进排放控制技术（如选择性催化还原技术和颗粒物捕集器技术）的正常使用，严格的船用燃油标准亟待建立。这可与在关键港口区域排放控制区的设置相结合，国内船舶和在排放控制区行驶的远洋船舶使用更低含硫量的燃料，并尽早将燃料硫含量限值降低到 0.1%。

## **2、建立短寿命气候污染物和非道路移动源污染减排管理体系**

### **（1）明确监管主体和各部门分工**

在短寿命气候污染物监管方面，应将黑碳和臭氧控制目标纳入大气污染防治目标体系之中，并制定包括甲烷和氢氟碳化物在内的非二氧化碳类温室气体排放标准和减排行动方案，推动完善有关法律法规。针对不同的污染物，根据其主要来自来源确定主要监管部门和协作部门。对于黑碳，进一步明确能源、环保、农业、交通、城建等部门的职责，重点减少煤炭的终端使用、减少柴油发动机的排放；对于甲烷，进一步完善现有体制机制，充分发挥各相关部门的作用，着重从减少能源开采过程和废物处置过程中的甲烷释放量入手进行控制；对于氢氟碳化物，在现有的联合履约机制下，按既有任务进一步开展工作，加强其排放管理，加快氢氟碳化物销毁和替代，推动有关企业全面开展 HFC-23 控排行动；对于对流层臭氧，进一步明确与氮氧化物、挥发性有机物排放控制有关的部门责任。

“新大气法”明确规定了非道路移动机械和船舶污染防治相关的部门责任和职责分工，并强化了环境保护主管部门对非道路移动源的环保监管职能，进一步明确生产企业应承担移动源大气污染控制的主体责任。交通部与环保部应进一步加强合作，在国家和地方层面加强沟通，联合制定计划，有效执行更为严格的船用燃料和发动机标准。在交通部加快研究和推进排放控制区域，当船舶在中国水域运行时，需要使用含硫量更低的油品。

### **（2）建立国家-地方分工明确的非道路移动机械环保管理模式**

环保部应建立国家新生产非道路移动机械环保达标管理体系，包括企业信息公开、生产一致性、在用符合性、环保召回、环保标志等管理制度，要求企业公开产品环保控制相关信息。地方环保部门应建立在用非道路移动机械环境管理体系，包括环保定期检验、环保抽查、低排放控制区、环保升级治理、加速淘汰等

管理制度。

### **(3) 强化排放标准达标管理，创新标准实施机制**

相关部门应加强能力建设，根据职责分工建立针对短寿命气候污染物主要排放源和重要非道路移动源的排放监测与监管网络，建立非道路移动源油品质量监管网络，提高对短寿命气候污染物和非道路移动源开展环境监管的水平。“新大气法”允许执法者对超标或违规排放进行强有力的罚款（最高惩罚达到产品价值的三倍），以确保能遵守更严格的排放标准和措施，这些新措施应当积极应用到实践中去。

加强制度创新，开展绿色领跑者计划、排污交易、环境税费等政策研究，提高排放标准实施的灵活性和有效性。在空气污染严重、船舶交通密集的领海和内水水域和港口区域加快建立船舶排放控制区的研究工作，并择机向国际海事组织（IMO）申请建立覆盖全国沿海专属经济区的船舶排放控制区（ECA），实施全球最严格的船舶大气污染排放控制要求。

## **3、尽快组织实施“国家清洁柴油机行动计划”**

借鉴美国在非道路移动机械污染防治领域的成功经验，结合我国“一带一路”和“中国制造 2025”国家战略，在“十三五”期间尽快组织实施“国家清洁柴油机行动计划”，由国务院牵头，环保部、交通部、住建部、农业部、发改委、工信部、财政部等部门参加，重点开展道路柴油车、工程机械、农业机械、船舶等关键柴油机领域的清洁化专项工程。具体目标是在符合条件的前提下，在尽可能多的车辆和发动机上、尽可能快地安装颗粒物捕集器等先进技术，使细颗粒物质量浓度和粒数浓度、黑碳等污染物排放大幅削减。最新的道路和非道路低硫燃料控制进程为这些先进技术的应用创造了条件。进一步加快老旧柴油机淘汰进程，出台高排放柴油机限期强制淘汰制度，采取财政支持和市场扶持相结合的手段鼓励提前淘汰老旧柴油机，使用 DPF 等先进技术改善符合条件的在用柴油机排放水平，优化现有非道路移动源车队结构，从本质上减少颗粒物和黑碳排放。加快船舶岸电设施建设与使用力度，在港作船、公务船、短途固定航线船舶中推广天然气等清洁能源船舶应用。

## **4、强化科技创新应用和行业减排国际合作**

加强短寿命气候污染物对空气污染和气候变化协同效应的研究工作。政府应持续加大投入，推动短寿命气候污染物和非道路移动源排放控制最佳实用技术的自主研发，例如尽快启动适用于非道路移动源的先进发动机和后处理技术（选择性催化还原技术和颗粒物捕集器技术等）的开发、示范和产业化工作；推进适用

于短寿命气候污染物战略和非道路移动源的先进排放监测技术及设备的研发和示范等。

在短寿命气候污染物中，对于黑碳和臭氧，应与其他大气污染物的统计核算体系保持一致，并加强多污染物和多污染源减排协同收益的定量评估和分析方法研究；对于甲烷和氢氟碳化物，应完善相关温室气体排放统计体系。建立相关大数据监管和控制决策平台，并完善相关科研和监管数据的公开和共享机制。中国在建立减排战略的过程中，应充分参考和利用现有的针对短寿命气候污染物治理的多边国际合作机制，包括全球甲烷行动计划（GMI）、气候与清洁空气联盟（CCAC）、全球清洁炉灶联盟等。中国加强相关行动的参与力度不仅能够获得直接收益，还能通过该合作机制加强其在国际事务处理中的话语权和影响力。中国应慎重评估是否成为气候与清洁空气联盟会员，这是目前致力于短寿命气候污染物减排的重要国际网络。

关键词：空气污染，气候变化，协同治理，短寿命气候污染物，非道路移动源

# 目 录

执行摘要 .....	I-IX
第一章 短寿命气候污染物和非道路排放源研究进展与政策行动 .....	1
一、国内外研究进展.....	1
二、国际政策行动和经验分析.....	5
三、国内政策行动和面临挑战.....	7
四、小结.....	9
第二章 中国短寿命气候污染物和非道路移动源排放现状及行业特征 .....	11
一、短寿命气候污染物的排放现状和行业现状.....	11
二、非道路移动源排放现状和行业现状.....	18
三、小结.....	23
第三章 短寿命气候污染物和非道路移动源控制技术和减排潜力分析 .....	25
一、短寿命气候污染物排放控制技术和减排潜力分析.....	25
二、非道路移动源排放控制技术和污染物减排潜力分析.....	31
三、小结.....	34
第四章 中国短寿命气候污染物和非道路移动源减排的多部门协调机制和政策分析 .....	37
一、中国短寿命气候污染物和非道路排放源的多部门协调机制现状.....	37
二、中国短寿命气候污染物减排的多部门协调机制和政策建议.....	40
三、中国非道路移动源减排的多部门协调机制和政策建议.....	42
参考文献 .....	45

# 第一章 短寿命气候污染物和非道路排放源 研究进展与政策行动

## 一、国内外研究进展

### （一）短寿命气候污染物

短寿命气候污染物（SLCPs）主要指那些在大气中留存时间较短，且能够带来温升效应的物质，如黑碳、甲烷、对流层臭氧和部分氢氟碳化物。SLCPs 减排战略指采取措施减少近期温升影响并通过细颗粒物和臭氧浓度的降低实现空气质量提升的协同效应。联合国环境规划署（UNEP）和世界气象组织（WMO）的研究（UNEP/WMO, 2011）表明，SLCPs 对空气质量、人体健康、作物产量等产生负面影响，该研究还认为针对特定排放源减排 SLCPs 具有多种潜在收益，包括规模收益、成本收益和减排效果的响应速度等，越早的国际合作和国家行动所带来的收益越大。相关研究表明，如果将所有人源的黑碳排放都考虑在内，由于其协同排放的物质中普遍具有降温效应，其综合的升温效应可忽略不计。因此，UNEP/WMO 关于黑碳和对流层臭氧的评估报告从另外一个角度来识别减排措施，指出只有那些能够带来净温升效应降低的黑碳减排措施才值得优先执行。该报告认为，包括黑碳、甲烷、一氧化碳和非甲烷类易挥发有机物的减排带来的温升效应降低，只有在超过降温物质（二氧化硫、有机碳和氮氧化物）的减排所带来的效应时才能够真正发挥作用。因此，SLCPs 的减排应该聚焦那些考虑所有协同排放的污染物的情况下，以黑碳和甲烷为主的增温物质占更大比重的领域（UNEP, 2011a），同时改善环境质量和减缓气候变化，实现协同增效。此外，UNEP 引领的研究还针对氢氟碳化物（HFCs）的影响和消减/替代技术进行了研究分析（UNEP, 2011b）。HFCs 主要用于冰箱和空调制冷剂，如车载空调、民用和商用冰箱和冷柜，以及绝缘泡沫的发泡剂，在一些情况下，还用于制造灭火的气雾剂和溶剂。HFCs 是重要的温室气体，并且排放增速很快，如果不采取行动抑制其排放，全球 HFCs 排放总量将达到 8.8Gt 二氧化碳当量。

在 UNEP 发布一系列报告之后，国际层面的研究逐步细化，并且引起了国际社会关注，加快落实了一系列黑碳、甲烷和 HFCs 的减排措施。这些措施能够显著降低未来几十年间的温升效应，并能够避免上百万人的过早死亡和上百万吨的 4 种主要粮食作物损失（UNEP/WMO 2011）。2012 年美国环保署就黑碳问题专门给美国国会提交了一份报告，强调黑碳是重要的空气污染物和气候污染物，会对空气质量、人体健康、作物产量等产生负面影响。报告还指出目前黑碳的排放主

要集中在亚洲、非洲和拉丁美洲。有研究显示，柴油燃烧等可能是黑碳排放的重要来源（Jacobson A. et al., 2013）。黑碳与其它同步排放的污染物一起构成了细颗粒物（PM<sub>2.5</sub>）的主要成分，并是导致疾病和过早死亡的主要因素之一（Lim S. et al., 2012）。除了引起短期升温，SLCPs 还会带来一系列其他方面的短期影响，对高脆弱性地区和生态系统将产生非常恶劣的影响，这些地区包括冰川和雪原，如喜马拉雅地区和北极地区。根据世界银行和国际冰冻圈气候倡议的联合报告（World Bank and ICCI, 2013），中国地区排放的黑碳和其它 SLCPs，能够通过大气环流移动到青藏高原、喜马拉雅地区和北极地区，对其冰雪消融、冰雪反照率改变、短期升温产生负面影响，同时这些 SLCPs 在中国地区产生的升温热量也会通过热环流影响这些敏感地区的大气温度。因此，减少 SLCPs 的排放，特别是某些特定源的 SLCPs，对于减缓近期气候变化及其影响至关重要。因为减排二氧化碳和其他长寿命温室气体无法在短期改变大气中温室气体的浓度，现存的长寿命温室气体还将在大气中停留几百年时间。减排短寿命气候污染物能够减缓短期升温，而减排长寿命温室气体是降低未来的气候风险。幸运的是，一些 SLCPs 减排措施已经存在，并且或多或少正在被实施。这些措施成本不高，有些甲烷的减排技术的应用从全生命周期角度来看还是盈利的。

国内研究目前尚未将短寿命气候污染物作为一大类污染物进行整体研究。国内相关研究特别是 SLCPs 减排相关的社会经济分析还比较少。现有研究发现能够识别一些排放源和减排措施，关于排放和源解析的进一步相关研究也是需要的，那样才能支撑协同减排 SLCPs 的决策，并将行动聚焦于最具成本收益性的措施上。分污染物种类来看，关于排放、源解析、影响、减排技术、管理规范等相关研究已经有些进展。国内关于黑碳的研究起步相对较早，研究超前于政策行动，相关研究很早就注意到了民用领域黑碳排放的清单和减排措施相关问题（陈颖军等人，2009）。有研究在分析空气污染的主来源中将黑碳作为 PM<sub>2.5</sub> 的来源之一加以分析（曹国良等人，2011；张小曳等人，2013）。有研究做了 PM<sub>2.5</sub> 的健康影响分析，并将黑碳的影响做了专门分析（黄德生，张世秋，2013）。总体来看，近些年来，国内关于城市点源黑碳的检测工作已经初步展开，检测方法主要有颗粒物捕捉和红外监测两种，相关数据主要来自气象部门和环境检测部门，但是这部分数据的覆盖面还不足以反映我国主要城市、农村地区的黑碳排放全貌，特别是对小散源和非道路源的黑碳排放数据基础相对薄弱。关于黑碳影响的研究还相对滞后，其中关于健康影响方面的研究主要采用流行病学统计研究方法，样本量较小，且多数针对细颗粒物而非黑碳，时间跨度也相对较短。

国内关于甲烷排放的统计和核算主要依据是两次《国家气候变化信息通报》，数据分别是 1994 年和 2005 年的截面数据。关于甲烷的排放清单也有学者分别从农业（水稻、反刍动物、牲畜粪便管理）、垃圾填埋（固体废物和污水）、化石燃料开发和生产过程（煤、石油、天然气）等方面给出相对分散的研究结论，方法多是参考《IPCC 温室气体清单统计核算指南》。关于甲烷的减排技术，有研究针



对低浓度煤矿瓦斯的控制技术进行了详细分析（韩甲业，应中宝，2012；刘文革等人，2013；韩甲业，2013）。有研究针对城市固体废物和废水的甲烷和氧化亚氮的排放因子、减排技术等问题进行了探讨（刘俊蓉等人，2014；马占云等人，2014；蔡博峰等人，2015）。也有研究专门针对农业甲烷减排领域的措施和技术。关于氢氟碳化物的排放，国内统计数据主要来自清洁发展机制支持项目相关的统计，对实际排放的全国范围的统计始于 2013 年，目前尚未公开发布相关数据。关于氢氟碳化物的消减，有研究针对 HFC23（崔永丽等人，2013）以及 HFC134a、HFC142b 等物质的消减和替代进行了详细分析，并对我国 HFCs 减排的整体战略进行了分析（林慧等人，2014；胡建信等人，2014；韩佳蕊等人，2015）。

## （二）非道路排放源

非道路移动源主要包括工程机械、农业机械、船舶、航空器等等。随着我国城镇化进程和基础设施建设的加快，非道路移动源的保有量呈逐年增加的趋势。截止 2013 年底，工程机械保有量约为 610-660 万台，年均增长率超过 10%。目前，我国对道路移动源的排放进行了有效的控制，但对非道路领域的控制才刚刚起步，这使得非道路移动源的排放问题日渐突出。研究表明：道路和非道路移动源  $\text{NO}_x$  的分担比例已经达到了 6: 4；而非道路移动源排放的一次  $\text{PM}_{2.5}$  甚至超过了道路移动源。在非道路移动源中，工程机械、农业机械和船舶是三类最重要的排放源。

以工程机械和船舶为例。我国工程机械的主要机型包括挖掘机、装载机、叉车、压路机、推土机和平地机等。其中，挖掘机、装载机、叉车为主要机械类型，分别占其工程机械的 22.0%、28.5%、28.0%。从 2010 年 10 月开始，我国对各个功率段的非道路移动机械执行国 II 阶段排放标准。国 II 阶段机械主要采用的是增压中冷技术。该技术可通过增加进气压力来提高燃烧效率并通过中冷技术来降低污染物特别是  $\text{NO}_x$  的排放。船舶方面，随着我国航运事业快速的发展，水路运输在世界范围内已处于主导地位。2013 年货物吞吐量达到 118 亿吨，船舶已成为我国港口城市空气质量的重要污染源（见专栏 1-1）。按照活动范围不同，船舶可分为内河船舶和远洋船舶、沿海船舶等。我国尚未颁布针对船舶的排放控制标准，导致船舶大气污染控制形势非常严峻。另外，我国船舶发动机技术也十分落后，一些内河船舶的发动机进气方式仍是自然吸气。这种落后的技术一方面导致船舶燃油经济性较差，另一方面也导致了排气污染物的显著增加。

### 专栏 1-1 中国港口城市正面临严重的非道路移动源大气污染问题

上海是中国的经济中心，是长三角地区的核心城市，也是中国的交通和航运中心之一，上海港的集装箱吞吐量居世界第一。目前上海非道路机械总量约 9 万台，非道路机械年柴油消耗量为 50 万吨。随着城市建设和港口物流的飞速发展，以及工业源和机动车污染排放逐步得到严加管控和有效治理，船舶和非道路机械等以往被忽视的污染问题日显突出。分析进出港总吨比例，上海港国际航行船舶的比例最高，占到了 51%，外港水域内河船舶、沿海船舶和内河船舶的比例分别是 23%、19% 和 7%。从污染物排放分担率看，在各类型海洋船舶排放中，集装箱船在港口船舶中的贡献率最高，达到了 30%，其次是散货船和拖轮等。在各类型非道路机械中，8 年及以上国 0 老旧机械占到了 35-55%。以上海市  $\text{NO}_x$  和  $\text{PM}_{2.5}$  的一次排放清单为例，船舶和非道路机械的排放分担率分别为 30% 和 7%；上海市 2013 年  $\text{PM}_{2.5}$  源解析研究结果表明，船舶和非道路机械排放对本市  $\text{PM}_{2.5}$  的贡献达 7-10% 左右，非道路移动源排放对上海空气质量造成的影响日益显现。同时，对于以渣油、重油或柴油为主要燃料的船舶和非道路机械，其排放对黑碳的份额则高达 20%，其中船舶占 13%。由此可见，加强对船舶等非道路移动源的排放控制，不仅对于城市复合性大气污染物的改善具有重要作用，还将对于短寿命温室气体如黑碳污染的缓解产生积极的协同减排效益。

作为珠三角地区重要的港口城市，深圳的船舶排放问题也十分突出。深圳目前是全球第三大集装箱港，2014 年深圳港远洋船舶年消耗重质燃油约 20 万吨， $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{NO}_x$ 、和  $\text{SO}_2$  年排放量约为 1250、14300 和 12000 吨，分别占到了深圳所有排放源的 5%、16% 和 59%。其中，集装箱船的排放贡献率最高，占船舶排放总量的 74%。据深圳  $\text{PM}_{2.5}$  源解析结果，2014 年深圳源解析点位  $\text{PM}_{2.5}$  的统计浓度为  $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，其中远洋船舶的一次排放贡献约为 5% ( $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )。从时空分布来看，船舶一次排放贡献在夏季最高，质量浓度在  $2-4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ；冬季贡献较低，质量浓度在  $1-3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。考虑一次排放与二次转化，全年船舶平均贡献约占  $\text{PM}_{2.5}$  总量的 13% ( $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )，其中本地船舶贡献约  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。此外，空气质量模拟分析表明，船舶废气排放导致深圳地区  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_2$  年均浓度分别约增加  $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

欧美等发达国家从 90 年代开始重视非道路移动源的排放控制问题。相关研究表明，非道路机械和港口船舶排放已成为影响人体健康和气候变化的重要因素。因此，欧美等国从 1996 年开始对非道路机械的排放实施 I 阶段排放控制法规。经过十几年的发展，目前非道路机械已经执行 IV 阶段的排放标准。对于船舶而言，欧美等国从 2000 年开始对船舶发动机  $\text{NO}_x$  排放进行控制，之后又对  $\text{SO}_2$  进行控制。目前，欧美等国已经执行 Tier II 阶段排放标准。为了降低在用机械的排放，欧美等国政府一方面不断要求降低燃油中的硫含量，另一方面采用经济补贴

和刺激政策来鼓励非道路机械采用新技术来降低污染物排放。其中，颗粒物捕集技术在美国加州和瑞士等国得到了广泛应用。该技术能较好去除颗粒物（PM）和黑碳（BC），但其对不同机械的适用性还有待于进一步测试检验。在测试分析技术方面，欧美等国家已从过去单一的法规工况测试，逐步开始利用车载排放测试设备（PEMS）对机械开展实际工况下的排放测试。该技术可获得机械在实际作业时的排放数据，从而更好地了解和掌握非道路机械的实际排放水平。对于港口船舶实际工况下的排放，欧美等国主要采用使用清洁燃油、靠泊使用岸电等措施来降低船舶的排放。其中，清洁燃油计划主要是指在欧美等国规定的排放控制区内，船舶必须将燃油从高硫重油转换为低硫柴油，从而降低 SO<sub>2</sub> 的排放，也间接降低了颗粒物的生成量。而靠泊使用岸电可有效降低船舶辅机的排放，从而减少对港口区域的污染。

## 二、国际政策行动和经验分析

### （一）短寿命气候污染物

近些年，国际上涌现了很多行动倡议旨在减少 SLCPs。UNEP 发起的科学评估报告引起社会各界重视 SLCPs 减排收益，这些收益涵盖短期气候变化和空气污染治理等方面。2012 年 2 月，旨在减少短寿命气候污染物的气候与清洁空气联盟（CCAC）成立，此联盟由 6 国政府发起，通过 UNEP 运作，是全球第一个专门针对减排 SLCPs 的行动倡议。CCAC 目前已经发展了 100 多个合作伙伴。CCAC 是一个自愿性的国际框架，已经开展了很多务实而具体的合作项目，是一个合作伙伴引领的加强 SLCPs 减排行动的组织。它既能及时开发新的减排项目，又能有效推动现有项目的落实。CCAC 的合作伙伴明确了七大部门行动倡议，能够在短期内产生显著的气候和空气净化收益（CCAC，2014）。

由于北极地区受到黑碳等 SLCPs 的影响最为严重，北极委员会对该地区进行多项技术和科学评估，并为相关政策制定者提出了在减排黑碳和甲烷方面的政策建议，并提出了一系列试点示范项目。2015 年 4 月，北极国家协议签署了“加强减少黑碳和甲烷排放的行动框架”，由此承诺北极国家的行动将得到进一步落实。同时，还号召北极委员会的观察员国家参加相关行动。这个行动框架重点在于编制 SLCPs 排放清单、出台减排行动计划，定期向北极委员会报告并分享最佳实践，以及加强科学合作。

在《蒙特利尔议定书》框架下，国际社会也在共同努力减少 HFCs 的排放。大多数 HFCs 都是臭氧层消耗物质的替代物，并已经在《蒙特利尔议定书》框架下逐步淘汰。所有 CCAC 的合作伙伴都以开展切实行动推进 SLCPs 的减排。欧盟将黑碳作为单独的空气质量评价指标，并出台严格的消减和替代 HFCs 的政策；

欧盟的移动空气制冷设备指令 (EU Mobil Air-Conditioning Directive) 要求自 2011 年起, 所有新增车载 HFC134a 均停止使用; 美国和加拿大出台了严格的道路柴油车发动机和油耗标准; 加拿大执行新的空气质量管理体系 (Air Quality Management System), 并将致力于消减工业源和非工业源的黑碳排放。此外, 国际上对油气行业的甲烷散逸也加强管制。例如加拿大、美国和墨西哥宣布对相关来源的甲烷排放进行管制。在加拿大, 政府宣布加强对 HFCs 的生产、进口和使用的管控。美国还致力于消减填埋场甲烷, 替代高增温潜势 (GWP) 的 HFCs, 还出台了生物燃气发展路线图 (Biogas Roadmap) 来鼓励甲烷的回收和利用。此外, 美国对于油气开采、生产、运输和流通活动的甲烷逸散排放比较重视, 如联邦层面有 EPA 推动的天然气之星计划。墨西哥将 SLCPs 纳入了国家气候变化特别行动计划 (National Special Program on Climate Change 2014-2018), 并在其自主决定的国家贡献 (INDC) 中将黑碳作为增温物质之一做出了 2030 年的减排承诺, 摩洛哥等国也将 SLCPs 纳入其 INDC 中。此外, 在孟加拉、哥伦比亚、尼泊尔等山地国家还出台了黑碳的清单编制计划及相关的减排行动计划。

## (二) 非道路排放源

对于欧美等发达国家而言, 非道路移动源的排放问题仍不容乐观。美国加利福尼亚州的研究表明, 非道路移动机械  $\text{NO}_x$  在整个加州的排放贡献率达到 14%。目前, 美国对新出厂的非道路发动机实施 IV 阶段排放标准。与之前的 I-III 阶段标准相比, IV 阶段中对 CO 的排放限值没有变化, 而对 HC、 $\text{NO}_x$  和 PM 的限值进一步加严。在排放控制技术方面, IV 阶段标准要求所有非道路移动机械必须采用后处理技术。其中, 颗粒物捕集器 (DPF) 技术可有效的去除颗粒物。选择性催化还原 (SCR) 技术可大大降低  $\text{NO}_x$  的生成。在标准认证工况方面, IV 阶段法规要求非道路移动源发动机需要满足“非道路瞬态测试工况循环” (the Non-Road Transient Cycle, NRTC), 并且需要进行 1000 小时的耐久性测试。同时, 欧美等国要求非道路移动机械使用更为清洁的低硫柴油。对在用机械控制方面, 美国通过对非道路移动机械的登记制度来掌握其实际的排放状况。在此基础上对每一台机械生成一个识别号码。这个识别号码会安装在非道路机械机身的显著位置。这使得机械的使用者可通过查询识别码来了解该机械的实际排放水平。同时, 政府通过财政补贴等政策, 鼓励老旧机械加装后处理设备来降低污染物的排放。值得注意的是, 欧美等国家对非道路机械的在用符合性检测方面, 已经开始引入道路排放测试技术 (PEMS) 来进行测试和检验。该测试技术能更好的反映工程机械实际工况下的排放水平, 可较好的弥补法规标准工况的不足。

在船舶排放方面, 欧美国家已经意识到港口船舶排放对健康和环境的影响, 并已采取了相关措施来防治船舶和港口的空气污染。对于远洋船舶, 由联合国机构“国际海事组织” (IMO) 制定  $\text{SO}_x$ 、PM 和  $\text{NO}_x$  的排放标准。欧美等发达国家地区已经建立四个排放控制区 (ECA)。其中, 在欧洲北海和波罗的海的 ECA 针

对 SO<sub>x</sub> 排放进行控制；在北美洲和加勒比海的 ECA 针对 SO<sub>x</sub> 和 NO<sub>x</sub> 进行控制。在北美和欧洲的 ECA 范围内航行和停靠的船舶，其使用的燃油含硫量不可超过 10000 ppm，该标准在 2015 年将收紧至 1000 ppm (0.1%)。该限值远低于船用燃料油含硫量的世界平均值 (26000 ppm, 2.6%) 和全球船用燃料油含硫量的最大限值 (35000 ppm, 3.5%)。自 2016 年起，所有新建造的远洋船在北美洲和加勒比海 ECA (海岸线以外 200 海里内的海域) 航行时，其 NO<sub>x</sub> 排放必须比现有的远洋船低 75%。对于欧盟和美国的内河船舶，其燃油标准和 NO<sub>x</sub> 排放标准也都必须高于现行的非道路机械法规标准。通过上述法规和激励政策已推动了航运业替代燃料和先进船舶废气排放控制技术的发展与应用。在降低船舶燃油硫含量的同时，一些船舶运输公司也开始尝试通过加装发动机后处理装置来降低尾气中的 SO<sub>x</sub> 和 NO<sub>x</sub>。其中部分船舶已经采用选择性催化还原技术 (SCR) 和废气再循环技术 (EGR)。另外，在欧美等一些发达国家，以液化天然气 (LNG) 代替船用燃料油的技术正逐渐受到重视。LNG 船舶的 NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub> 和 PM 排放量比使用低硫燃料的船舶更低，而且 LNG 的价格在美国和欧盟比低硫燃油上更有优势。因此，越来越多的欧洲港口已开始建造 LNG 加注设施。另外，欧美的一些港口也鼓励、甚至强制要求远洋船靠岸时使用岸电、降低航速，以进一步减少船舶废气在港口区域的排放。

### 三、国内政策行动和面临挑战

#### (一) 短寿命气候污染物

近年来，中国在大气污染防治和温室气体减排领域出台了诸多相关法律法规、政策和行动计划等，特别是 2013 年中国国务院颁布了《大气污染防治行动计划》、2015 年 8 月发布了新修订的《大气污染防治法》，提出了防治大气污染的具体措施。这些行动措施在减少大气污染物的同时能够达到协同减排 SLCPs 的效果，但中国目前尚无专门针对 SLCPs 的政策行动。

短寿命气候污染物减排战略主要针对那些能够产生综合降温效应的污染源。这些领域包括中国现行的提高燃烧效率的煤炭清洁化利用、改进炉灶和窑炉的燃烧方式等。具体包括民用和工业锅炉改造、减少柴油发动机和非道路机械排放等。中国农业部大力推动的“国家炉灶改进计划 (NISP)” (Smith and Keyun, 2010) 给全球改进炉灶行动树立了一个绝佳案例。中国政府还出台了一系列旨在提高燃烧效率、减少污染物排放的国家标准。这些政策行动都会同时减少不同来源的黑碳排放，但都不是专门针对减排黑碳而出台的。

所有甲烷减排措施都有利于减缓短期温升和降低近地臭氧浓度。关于减少甲烷排放，农业水稻生产、动物粪便管理、城市废弃物、工业废水、煤层气等领域

的研究已经开展起来，但相关的政策行动旨在提高资源利用，而减排只是其副产品，协调一致统筹有度的甲烷减排计划和行动尚未展开。2007 年农业部出台了《农业生物质能产业发展规划（2007-2015）》和《全国农村沼气工程建设规划（2006-2010）》，为沼气的发展设立了原则和目标。在《国民经济和社会发展第十二个五年规划》中也强调了加速沼气发展的必要性。化石燃料开采、存储和运输过程中散逸的甲烷尚未加以严格管制，目前仅在煤层气利用领域取得了一些初步进展。

中国在减少 HFCs 排放方面进行了诸多努力，积极参与《蒙特利尔议定书》的谈判和履约工作，并与美国开展双边务实合作，旨在减少 HFCs 的生产、使用和排放。2014 年国务院颁布的《2014-2015 年节能减排低碳发展行动方案》，更明确将 HFCs 减排纳入控制目标，预计“十二五”期间累计减排 2.8 亿吨 CO<sub>2</sub>。中国分两批下达了氢氟碳化物削减重大示范项目中央预算内投资计划，用于支持有关企业新建 HFC-23 焚烧装置。下一步，中国还将在 2019 年之前继续逐年组织安排 HFC-23 减排补贴，并研究制定非二氧化碳类温室气体排放标准和减排行动方案，推动完善有关法律法规，到 2020 年实现 HFC-23 排放得到有效控制，加快研发和推广氢氟碳化物替代技术。此外，中国相关企业积极利用清洁发展机制（CDM）平台，有效降低了 HFC-23 排放。据统计，通过 CDM 项目的实际减排量超过 4.4 亿吨 CO<sub>2</sub> 当量。

## （二）非道路排放源

在法规控制层面，目前我国工程机械仅执行国 II 阶段排放标准。而欧美等发达国家已经执行 IV 阶段排放标准，要求出厂机械必须采用后处理技术（DPF、SCR 技术等）。我国的船舶排放控制法规更为滞后，至今尚未出台相关的排放标准。而欧洲针对内河航运已经执行第 IIIA 阶段排放标准（等同于美国 Tier II 排放标准），美国甚至针对第一/二类型内河船用发动机开始实施 Tier IV 排放标准，以进一步降低 NO<sub>x</sub>、PM、CO 和 HC 的排放。为了缩小与国际控制水平的差距，环保部针对 37 kW 以上的船用发动机正在制定第 I/II 阶段的标准（该标准相当于美国针对第一/二类型船用发动机的 Tier II/III 标准）。

在非道路移动源管理方面，现有的管理体系缺乏统一的排放监管和要求，难于识别非道路机械的实际排放水平。同时，工程机械强制报废制度尚未建立，现阶段仍然存在相当数量的老旧机械（机龄大于 10 年）。这些机械的发动机维护保养状况较差，尾气排放问题十分严重。而对于在用机械的改造，政府部门尚未出台相应的支持和激励政策。与工程机械相类似，船用发动机尾气排放的监管处于空白阶段。船舶监管主要以交通运输部海事局为主，而监管的重点仍是船舶的生活污水排放。

在油品管理方面，工程机械主要使用普通柴油。这种柴油的油品较差，硫含量较高（普通柴油的硫含量仅要求小于 350 ppm，而车用柴油要求硫含量小于 50 ppm）。而船舶使用的燃油油品更差。目前进入我国的远洋船舶仍以重油为主要燃料，重油中的硫含量一般为 1% ~3.5%。较高的硫含量使得船舶 SO<sub>2</sub> 和 PM 排放量十分巨大。而现阶段欧美等发达国家已建立了 4 个船舶排放控制区(ECA)，要求进入排放控制区内的船舶必须转换为低硫燃油（硫含量小于 0.1%），从而降低 NO<sub>x</sub> 和 SO<sub>2</sub> 的排放。部分港口甚至要求船舶停靠时接入岸电，降低停泊时的排放。

## 四、小结

总体来看，国内在控制短寿命气候污染物和非道路移动源方面尚面临较大挑战，包括缺乏专门控制 SLCPs 和非道路移动源的法规和标准；对常规大气污染物与 SLCPs 的协同治理缺乏统筹考虑；SLCPs 和非道路移动源控制技术研发、推广和应用不足；现有研究基础薄弱，统计数据缺乏，不能为相关政策制定提供足够支持。因此，亟需加强：

### （一）加强 SLCPs 和非道路移动源科学研究和技术研发

加强 SLCPs 对空气污染和气候变化协同效应的研究工作，并对 SLCPs 和非道路移动源的排放来源和排放特征、环境影响、减排潜力等方面开展深入研究。政府应持续加大投入，推动 SLCPs 和非道路移动源排放控制最佳实用技术的自主研发，例如尽快启动适用于非道路移动源的先进发动机和后处理技术（SCR/DPF 等）的开发、示范和产业化工作；推进适用于 SLCPs 和非道路移动源的先进排放监测技术及设备的研发和示范。

### （二）充分借鉴国际相关控制的先进经验，推动行业减排国际合作

在现有的国际治理机制下加强 SLCPs 排放控制领域的经验分享，并充分参考和利用现有的针对 SLCPs 治理的多边国际合作机制，包括全球甲烷行动计划（GMI）、气候与清洁空气联盟（CCAC）、全球清洁炉灶联盟等。中国加强相关行动的参与力度不仅能够获得直接收益，还能通过该合作机制加强其在国际事务处理中的话语权和影响力。进而，中国应该有计划地制定符合国情、于人民福祉有利的 SLCPs 控制计划，并出台相关政策。

中国非道路移动源排放控制水平与欧美发达国家差距巨大，应加快非道路移动源的排放控制进程与国际接轨。借鉴欧美在非道路移动源排放控制领域的成功经验。这些经验包括：加快非道路移动源的燃油油品升级进程；尽快提高非道路

移动源的排放标准，降低新出厂机械的排放；加强对新机械和在用机械排放的监管，鼓励对在用机械的技术升级改造；同步法规和激励政策，推动更清洁燃料和排放控制技术的发展与应用；等等。



## 第二章 中国短寿命气候污染物和非道路移动源排放现状及行业特征

### 一、短寿命气候污染物的排放现状和行业现状

#### （一）黑碳及其协同排放物

中国黑碳（BC）主要来源于煤炭不完全燃烧、生物质燃烧和机动车排放，特别是广大农村地区采暖、炊事等燃煤及燃烧生物质等生活保障行为。国内外估算的中国地区（不含港澳台）2000-2008 年各年份 BC 排放量约 96.3-181.1 万吨；与大型工业锅炉、电厂锅炉相比，煤炭、秸秆和薪柴等在家庭煤炉内的燃烧温度较低，供氧不足（导致不完全燃烧），且缺乏或基本没有相应的排放控制措施，细颗粒物排放量较大，因而源于居民生活的黑碳具有较高的排放因子和排放量（Cao et al., 2006），约占总估算排放量的 40-85%（Zhi et al., 2011）。因此控制生活源排放的黑碳是短期内降低黑碳总排放量的有效措施。在最近的排放清单中（Cao et al., 2011），工业燃煤、燃油的 BC 排放量约占总计算排放量的 30-40%，也是需要加强控制的黑碳排放源。相关数据如表 2-1 所示。

表2-1 不同研究的BC排放清单对比（万吨）

排放清单	年份	工业	火电	居民生活	生物质燃烧	交通	总计
张楠 et al., 2013	2008	69.50	1.16	63.60	6.77	19.46	160.49
G. et al., 2003	2000	8.89	0.68	78.07	11.24	5.98	104.86
Ohara et al., 2007	2000	9.9	1.8	93.8		3.8	109.3
Lei et al., 2011	2005	61	1	70		19	151
Zhang et al., 2009	2006	57.5	3.6	100.2		19.8	181.1
曹国良 et al., 2011	2007	52.9	1.3	65.1	10.4	14.5	139.9
Wang et al., 2012	2007	64.6	5.07	98.8	7.77	18.8	195.7
Lu et al., 2011	2008	51.0	1.9	88.8	11.0	25.9	178.7
M et al., 2014	2007			39.2		8.6	96.34

由于缺乏本土化的、经过实测的排放因子，尤其是广大农村地区大量使用煤炭、秸秆等作为生活能源的排放因子数据，导致黑碳排放量估算相差较大，且不确定性很高（Bond et al., 2004; Zhang et al., 2009），排放清单的不确定性普遍在100%以上。在发展中国家开展的有关排放因子的实验表明，无论是机动车，还是农村燃用秸秆的因子，均比以往的估算值要高（Shen et al., 2010; Subramanian et al., 2009; Wang et al., 2012）。

在各种污染源排放黑碳的同时，还有一些其它的气溶胶粒子及前体气体同时被排放到大气中，产生的不同气候效应值得进一步研究。POA、SO<sub>2</sub>、CO、NO<sub>x</sub>和 VOCs 就是这些联合排放物的主要物种。相关研究表明，在中国居民生活排放的 CO、NO<sub>x</sub>、VOCs 分别占不同清单总排放量的 34-43%、5.6-11%、16-33%。

## （二）与对流层臭氧有关的污染物排放

有时与黑碳同时排放的还有 CO、NO<sub>x</sub> 和来自其它来源的 VOCs。它们还都是 O<sub>3</sub> 的前体物，在光照的作用下对 O<sub>3</sub> 的形成、分布也有重要的影响。CO 还控制着 O<sub>3</sub> 的背景浓度水平，而其峰值则受到 NO<sub>x</sub> 和非甲烷 VOC（NMVOC）的显著影响。2010 年 NO<sub>x</sub> 在中国的排放总量为 2582 万吨，其中，电厂、工业锅炉和道路交通是其主要排放源，分别贡献了 2010 年 NO<sub>x</sub> 排放总量的 30.0%、17.1% 和 17.2%。与 2005 年相比，2010 年 NO<sub>x</sub> 排放总量增长了 34.3%，其中，道路交通、工业锅炉和水泥部门分别贡献了 24.6%、21.7% 和 19.3% 的增长量(如图 2-1)。

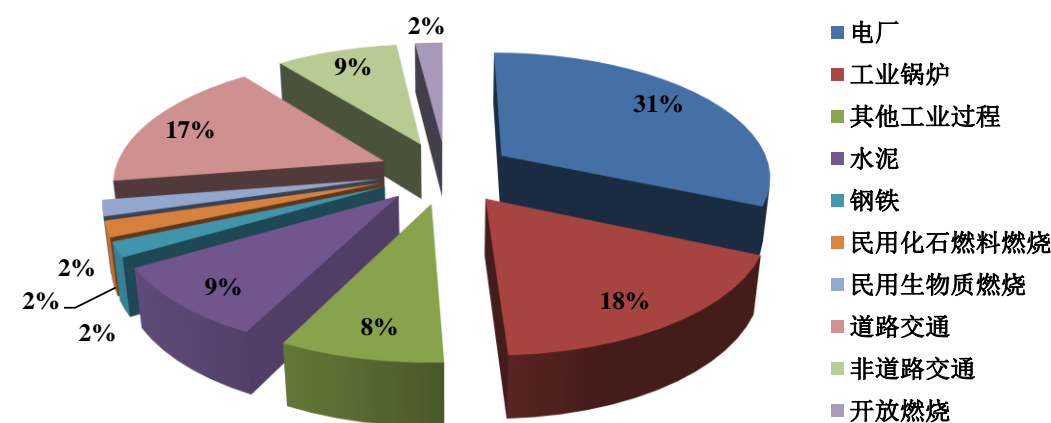


图 2-1 2010 年中国 NO<sub>x</sub> 排放来源及分担率

Zhao et al (2013)估算中国 2010 年 NMVOC 的排放总量为 2286 万吨。其中，工艺过程、工业溶剂使用和民用燃烧是最主要的 VOC 排放源，分别贡献了 2010 年 VOC 排放总量的 25.0%、24.4% 和 18.8% (如图 2-2) 。与 2005 年相比，2010 年排放总量增长了 21.0%，其中，工业溶剂使用排放增长了 102%，贡献了超过 90% 的 VOC 排放增长量；民用燃烧和道路交通部门的排放量有所下降，这主要与已经颁布的机动车排放标准以及逐步控制的生物质直接燃烧有关。

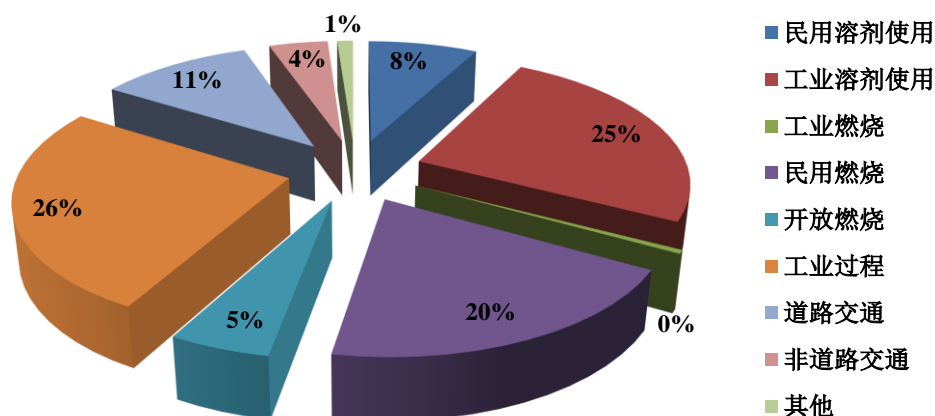


图 2-2 2010 年中国 VOCs 排放来源及分担率

### (三) 甲烷

甲烷的自然源包括湿地、白蚁、海洋、植被和甲烷水合物；人为源包括煤矿开采、天然气生产、垃圾填埋、牲畜、稻田、生物质燃烧(Olivier et al., 2005)。政府间气候变化专门委员会第五次评估报告 (IPCC AR5) 显示，在过去30年内，人为源排放约占全球甲烷排放的50%~65% (Change, 2013)。

《中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报》显示，2005年中国甲烷排放总量约为930 MtCO<sub>2</sub>e，约占当年温室气体排放总量的12%。美国环保署等相关研究表明，中国2010年甲烷排放920 MtCO<sub>2</sub>e，约占当年全球排放的13%左右。中国甲烷的人均排放少于世界前两大排放国（美国和印度）(Zhang and Chen, 2014)。

值得注意的是，基于 2010 年的估算数据，经过排放源细分，煤炭开采、肠道发酵、水稻种植和污水处理成为中国甲烷排放的主要来源，占到中国甲烷排放总量的 83%，其中煤炭开采的甲烷排放占比最大，这可视为中国之现状。

#### 1、能源活动排放的甲烷

Zhang和Chen（2014）估算的2007年甲烷排放数据显示，能源相关活动对中国甲烷排放总量的贡献率约达45%，其中煤矿生产占38%，生物质燃烧和石油/天然气生产分别占到5.3%和1.6%(Zhang and Chen, 2014)。美国环保署（2012）估计2010年能源活动排放的甲烷排放为383.3MtCO<sub>2</sub>e (USEPA, 2006)，占2010年中国甲烷排放总量的42%。2010年中国能源部门的甲烷排放主要来自煤炭生产（295.5 MtCO<sub>2</sub>e; 32%），其次来自生物燃料燃烧（48.5 MtCO<sub>2</sub>e; 5.3%），再次来自石油和天然气生产（4.2 MtCO<sub>2</sub>e, 0.5%）。

在煤炭生产领域排放的甲烷中最主要的是煤矿瓦斯（CMM）。自 2006 年以来，中国煤矿瓦斯抽采量每年以 10 亿  $\text{m}^3$  的幅度增长。2014 年，全国煤矿瓦斯抽采量达到 132.6 亿  $\text{m}^3$ ，利用量 45.3 亿  $\text{m}^3$ ，相比 2005 年分别增长 503% 及 466%。山西、贵州、安徽、河南、重庆、黑龙江、四川、辽宁、陕西等 10 个省（市）的瓦斯抽采量超过 2 亿  $\text{m}^3$ ，山西省的抽采量更是达到 55.34 亿  $\text{m}^3$ ，是全国抽采量最大的省区，占全国瓦斯抽采量的约 42%（图 2-3）。

目前，煤矿瓦斯主要用于民用和工业燃料、发电和汽车燃料等。2006-2014 年期间，累计利用煤矿瓦斯 246.6 亿  $\text{m}^3$ ，相当于节约标准煤 2985 万吨，减排二氧化碳 36990 万吨。根据国家能源局 2015 年 2 月份印发的《煤层气勘探开发行动计划》预测，2020 年全国煤矿瓦斯抽采量达到 200 亿  $\text{m}^3$ ，利用率达到 60%，煤矿瓦斯发电装机容量超过 400 万千瓦，民用超过 600 万户，煤炭领域的减排潜力巨

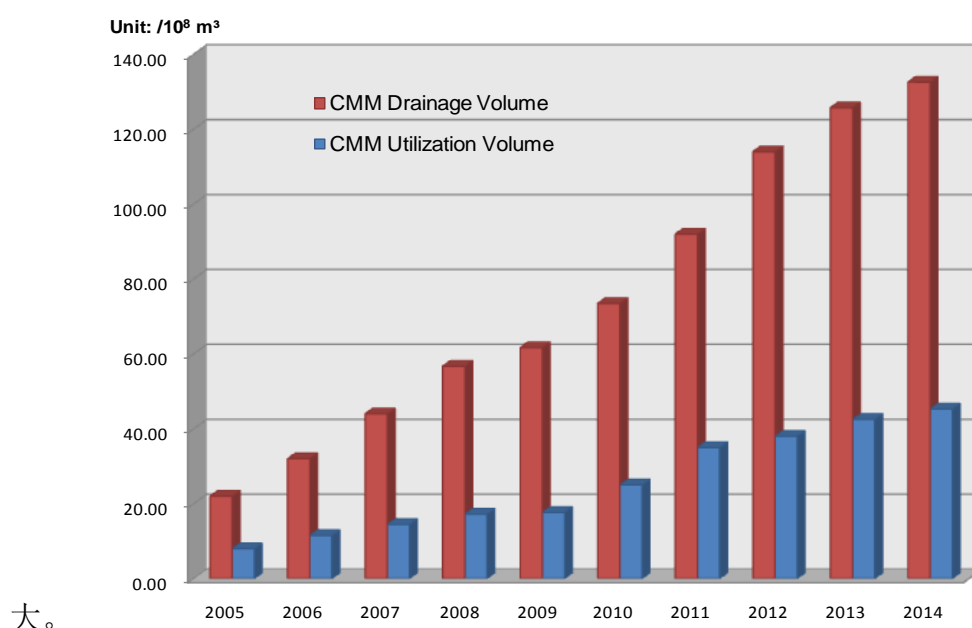


图 2-3 中国瓦斯开采量和利用量（2005-2014 年）

由于中国煤层赋存条件较为复杂，煤层渗透率较低，各矿区普遍存在煤矿瓦斯抽采难度大、抽采率偏低等问题。尽管近年来瓦斯抽采量大幅上升，但矿井瓦斯抽采率和抽采浓度整体偏低。据统计资料，目前中国瓦斯抽采率平均约为 30%，瓦斯抽采浓度小于 30% 的部分约占全部抽采量的 70%。2014 年中国瓦斯利用率仅为 34.2%，与 2007 年前后基本持平，约有 87.3 亿  $\text{m}^3$  未被利用直接排放到大气中。抽采率偏低导致大量瓦斯随通风系统排出，产生数量巨大、浓度极低（小于 1%）的风排瓦斯。2014 年全国由通风系统排放到大气中的甲烷约 200 亿  $\text{m}^3$ 。

## 2、农业活动排放的甲烷

2010年，农业部门的甲烷排放358 MtCO<sub>2</sub>e，占中国甲烷排放总量的39%，成为中国甲烷排放的第二大排放源，其中来自肠道发酵、水稻种植、粪便管理和生物质燃烧（作物秸秆燃烧）的甲烷排放分别为212.5 MtCO<sub>2</sub>e, 124.6 MtCO<sub>2</sub>e, 20.1 MtCO<sub>2</sub>e和1 MtCO<sub>2</sub>e，分别相当于当年甲烷排放总量的23%、14%、2.2% 和0.1%。

### 3、城市固体废弃物排放的甲烷

Zhang 和 Chen (2014)估计 2007 年中国城市固体废弃物甲烷排放占当年甲烷排放总量的 14%，主要来源包括城市固体废弃物填埋、工业废水和城市污水，这几种排放源的甲烷排放分别占到当年中国甲烷排放总量的 8.2%、4.1%和 1.5%。

## （四）部分氢氟碳化物（HFCs）

本报告提到的中国 HFCs 的排放主要包括：（1）汽车空调行业 HFC-134a；（2）房间空调行业 HFC-410A（HFC-125 和 HFC-32 以等比例混合配制而成的混合工质）；（3）HCFC-22 生产行业无意生产和排放的 HFC-23。

### 1、汽车空调行业 HFC-134a

HFC-134a 的 100 年 GWP 值为 1300，主要用于汽车空调、少量用于电冰箱和其它制冷设备，以及医用气雾剂行业，本报告只关注中国汽车空调行业 HFC-134a 的排放。

图 2-4 展示了中国自 1995-2010 年汽车空调行业 HFC-134a 的年排放量及其生命周期过程中即充灌、运行、维修（含保养）和报废各个过程中的排放量（Su et al., 2015）。从 1995 年的 30 t 增加至 2010 年的 16700 t, 平均年增长率为 53.3%。当前汽车空调整个生命周期中维修（含保养）过程的 HFC-134a 排放所占比例最大，约为 80%，这与高维修率以及在维修过程中残留的制冷剂的即时排放有关。

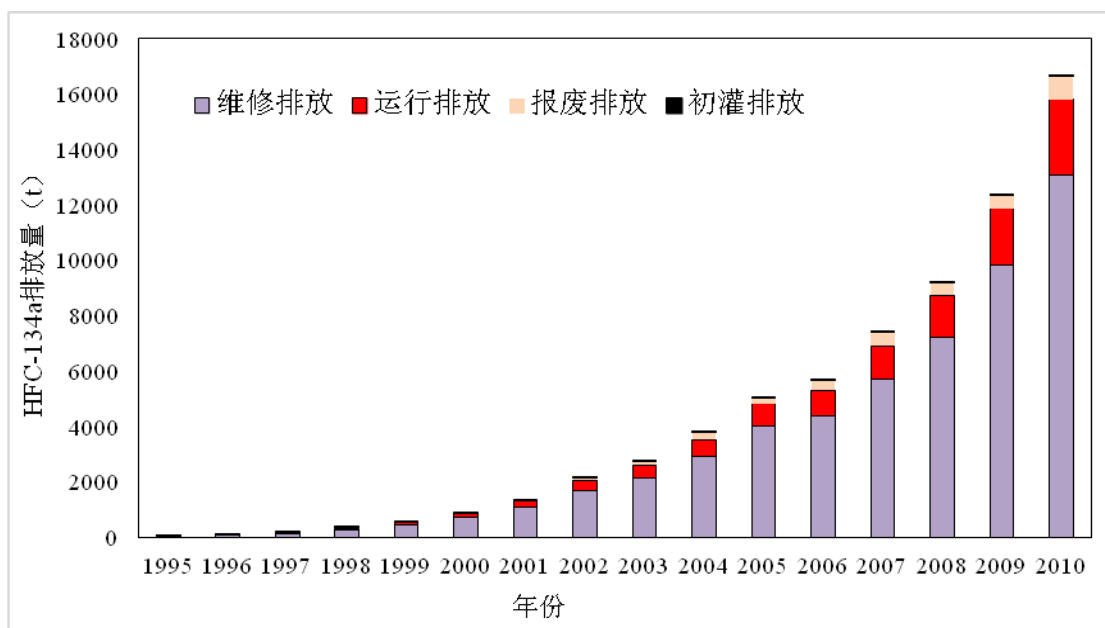


图 2-4 中国 1995-2010 年汽车空调行业 HFC-134a 各个生命周期排放量（吨）

## 2、房间空调行业 HFC-410A

HFC-410A 是由 HFC-125 和 HFC-32 以等比例混合配制而成的混合工质，100 年 GWP 值相当于 2060，主要用作房间空调器等各种制冷空调设备的制冷剂。

图 2-5 显示了中国 2006-2014 年房间空调行业 HFC-410A 的年排放量及其生命周期过程中即生产、运行、维修（含保养）和报废各个过程中的排放量。从 2006 年的 127 t 增加至 2014 年的 11000 t，平均年增长率为 175%。这是由于近年来 HCFC-22 制冷剂的加速淘汰，出口欧美发达国家的空调被要求使用 HFC-410A 制冷剂，以及国内家用空调的快速发展，使得对 HFC-410A 的需求量大幅增加，其排放量也随之升高。当前房间空调 HFC-410A 的排放结构中，维修排放占比最大，达到 59.6%；而运行排放、报废排放和生产排放则各占 HFC-410A 总排放量的 30.6%、6.7%和 3.1%。

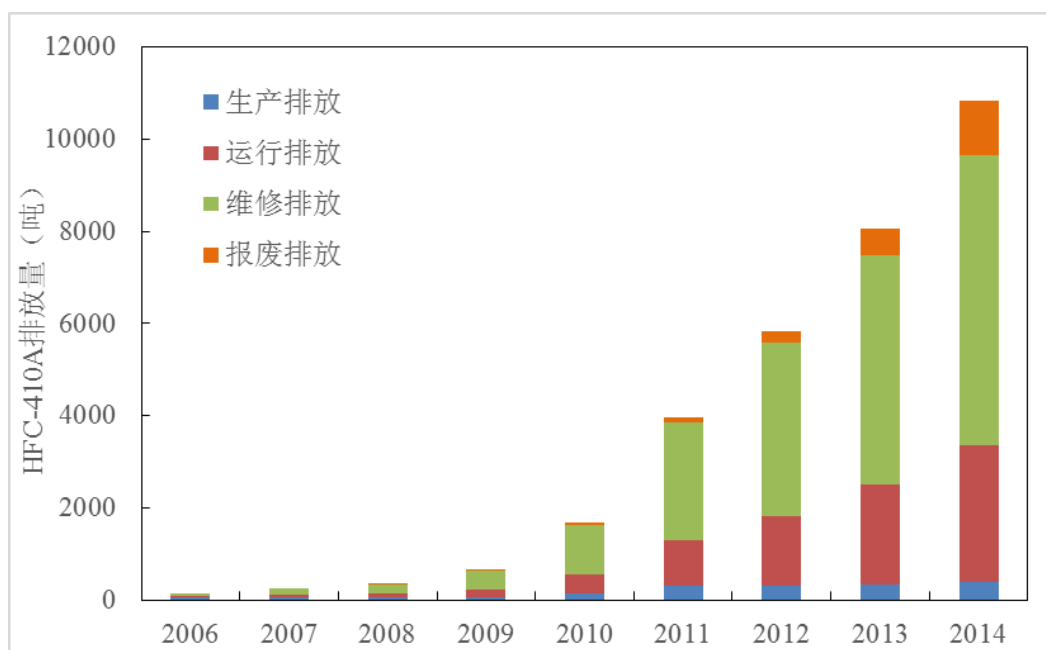


图 2-5 中国 2006-2014 年房间空调行业 HFC-410A 各个生命周期排放量 (吨)

### 3、HFC-23

中国 1980–2012 年每年 HFC-23 产生量、销毁量和排放量 (Fang et al., 2014) 如图 2-6 所示。图中全球的 HFC-23 排放量来自自上而下估算 (1980–1989) 和自下而上估算 (1990–2008) (Miller et al., 2010)，以及对未来的预测 (2009–2012) (Miller and Kuijpers, 2011)。结果表明，HFC-23 的产生量由 1980 年的  $0.08 \pm 0.05$  Gg/yr 增加到 2012 年的  $15.4 \pm 2.1$  Gg/yr，特别是 HFC-23 的每年产生量从 1990s 末期开始加速增长。1980–1990 年期间年增长速率为 0.04 Gg/yr；1990–2000 年期间年增长速率为 0.18 Gg/yr；2000 年后年增长速率变为 1.1 Gg/yr。

HFC-23 产生量和排放量并非总是相等。在 2006 年之前，HFC-23 的产生量几乎等于其排放量。CDM 项目在 2006 年启动之后，部分 HFC-23 被销毁，因此产生量开始大于排放量。1980–2012 年期间，HFC-23 的排放在 2006 年达到最高值， $10.5 \pm 1.8$  Gg/yr，然后下降到 2008 年和 2009 年的  $7.3 \pm 1.3$  Gg/yr，之后逐年增长到  $8.5 \pm 2.1$  Gg/yr。在 2012 年约有 45% 的 HFC-23 进行了销毁（焚烧）。

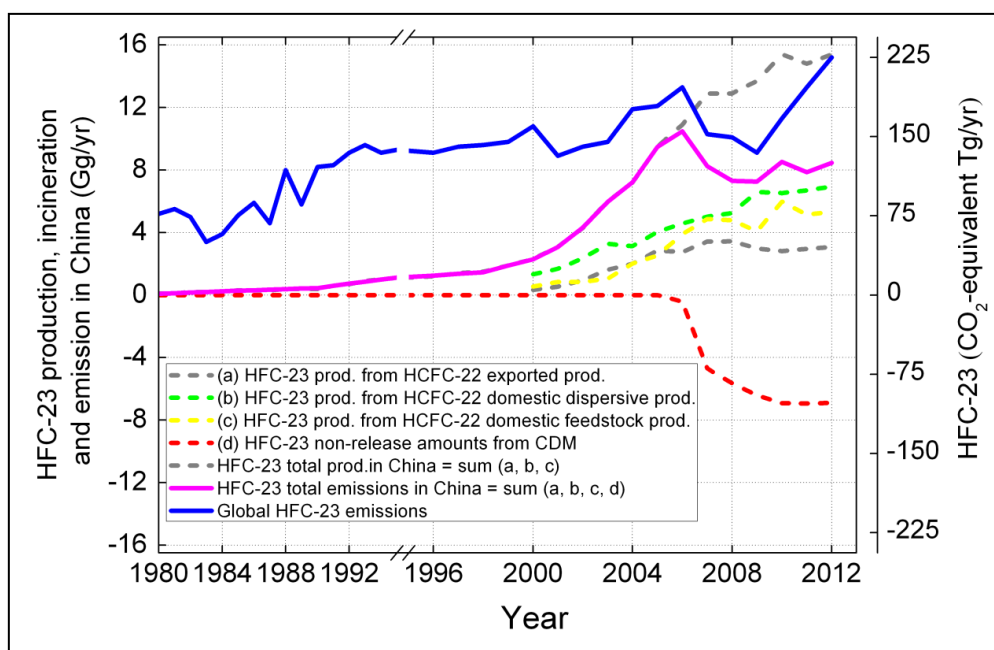


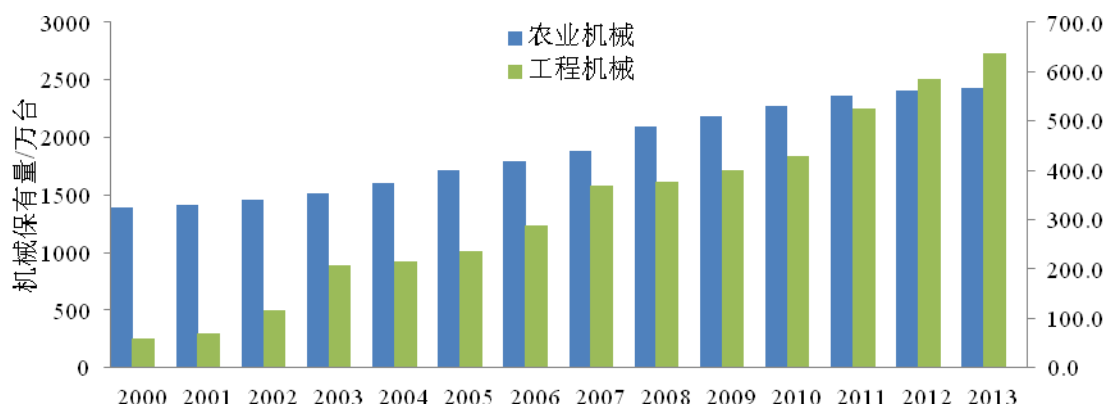
图 2-6 1980–2012 年中国 HFC-23 产生量、销毁量和排放量 (Fang et al., 2014)

## 二、非道路移动源排放现状和行业现状

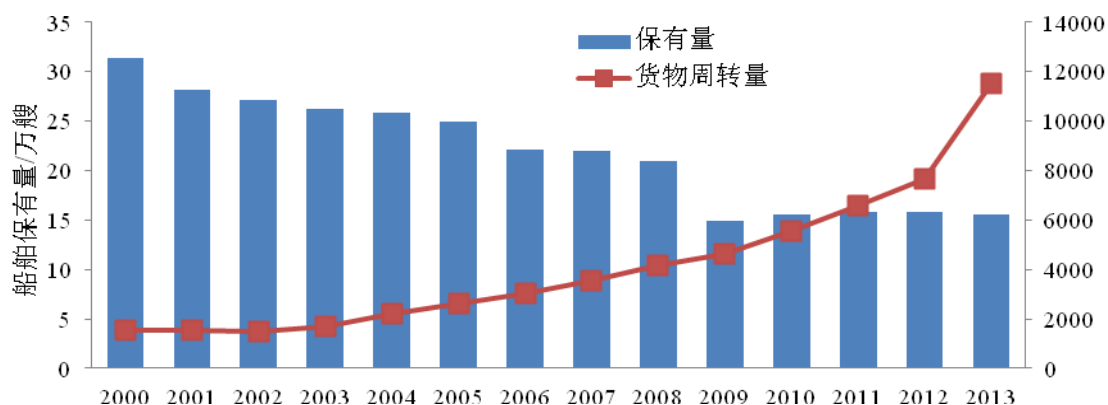
非道路移动源的种类繁多，包括工程机械、农业机械、内河和远洋船舶、铁路内燃机、移动式发电机组、航空器、林业机械及小型通用汽油机等。我国正处于快速城镇化的进程中，全国各地施工工地以及将要开工建设的工地数量庞大，工程机械总作业时间每年都在大幅度增长。农业机械主要包括农用动力机械、土壤耕作机械、农田建设机械、农田排灌机械、植物保护机械、作物收获机械、种植和施肥机械、畜牧业机械、农产品加工机械和农业运输机械等。我国农业机械保有量大，排放控制水平落后。我国民用船舶大类可以分为渔船和水路运输船舶，水路运输船舶按用途可以进一步分为客船、普通货船、集装箱船、油船和化学品船等；按航行区域可以分为内河船舶、沿海船舶和远洋船舶等。我国主要沿海港口和内河港口大都位于人口密集的发达城市，船舶柴油机排放对城市空气质量和公众健康产生重要影响。

2013 年底中国工程机械保有量约为 610-660 万台，2000-2013 年期间我国工程机械的保有量见图 2-7(a)，呈快速增加的趋势。2013 年中国农业机械保有量约为 2435 万台。2000-2013 年农业机械保有量见图 2-7(a)。2013 年中国内河船舶保有量为 15.5 万艘，2000-2013 年内河船舶保有量及货物周转量见图 2-7(b)，虽然内河船舶的保有数量逐年下降，但是其货物周转量却呈现上升的趋势，说明船舶朝着大型化发展。





(a) 农业机械和工程机械保有量分布/万台

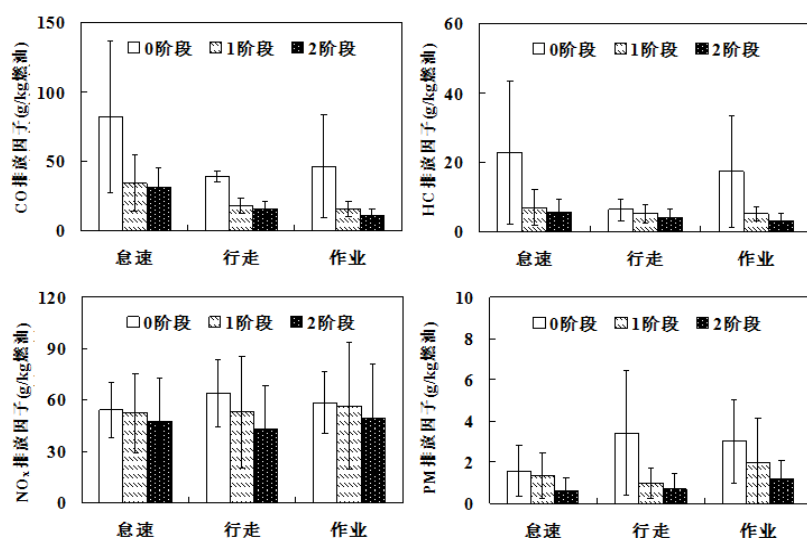


(b) 内河船舶保有量（万艘）和货物周转量（亿吨公里）分布

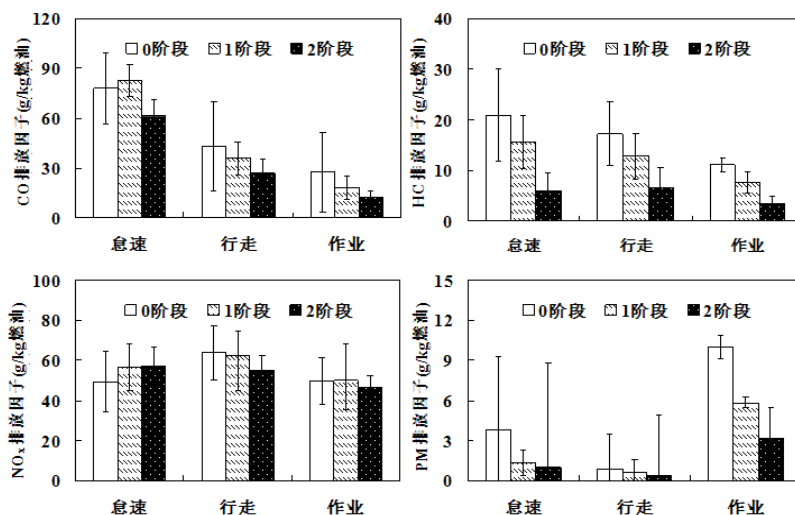
图 2-7 典型非道路机械保有量分布（2000-2013 年）

近年来，我国对移动污染源排放的研究主要是围绕机动车展开的，对非道路机械排放的研究基本处于起步阶段。随着机动车排放得到有效的控制，非道路机械排放问题开始得到关注。为系统评估中国非道路机械排放状况，北京理工大学等单位分别选取了 45 辆不同类型、不同功率的典型工程机械（16 辆挖掘机、19 辆装载机、7 辆压路机，2 辆推土机和 1 辆平地机）进行了实际工作状态下的排放测试。根据农村实际使用情况选取了较为常见的旋耕拖拉机和联合收割机进行实际工作状态下的排放测试。根据我国水系丰富，河流密集，湖泊众多的特点，选取了水路运输最为发达的水系长江流域、京杭大运河江苏段、珠江广州段，以及大连丹东海域的近海渔船进行调研，并进行实船排放测试。通过上述实验，获得了我国非道路机械的实际工作状态下的排放因子。根据基于油耗的排放因子实验结果可知（见图 2-8），工程机械在怠速工况下  $\text{CO}$ 、 $\text{HC}$  的排放因子最高，而作业工况下的  $\text{NO}_x$  和  $\text{PM}$  排放因子高于其他工况，各种污染物的排放因子随功率的升高呈增加趋势。随着非道路机械用柴油机排放法规的实施和不断加严，各污染物基于油耗的排放因子均有显著的降低。从国 I 到国 II 排放阶段， $\text{CO}$ 、 $\text{HC}$ 、 $\text{NO}_x$  和  $\text{PM}$  的实测排放因子分别降低了 8.5-29.1%、17.8-36.7%、8.9-19.3% 和

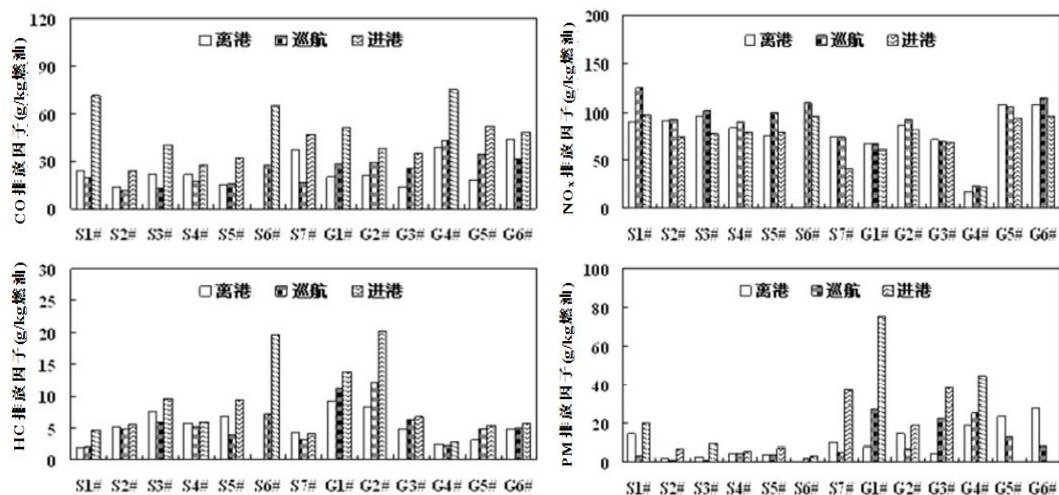
31.2-53.3%。农田作业机械主要是在实际农田中进行怠速、行走和作业 3 种工况测试。基于油耗的排放因子中，CO 和 HC 在怠速工况下最高，NO<sub>x</sub> 在行走工况下较高，PM 则是在作业工况下最高。由于作业工况柴油机的负荷相对较大，NO 在 NO<sub>x</sub> 排放中的比例占到 93% 以上。比较国 I 和国 II 的农业机械实验结果不难看出，在旋耕工况下，CO、HC、NO<sub>x</sub> 和 PM 的排放因子分别降低了 32.4%、56.9%、7.2% 和 44.9%。



(a) 工程机械基于燃油消耗的排放因子(g/kg 燃油)



(b) 农业机械基于燃油的排放因子(g/kg 燃油)



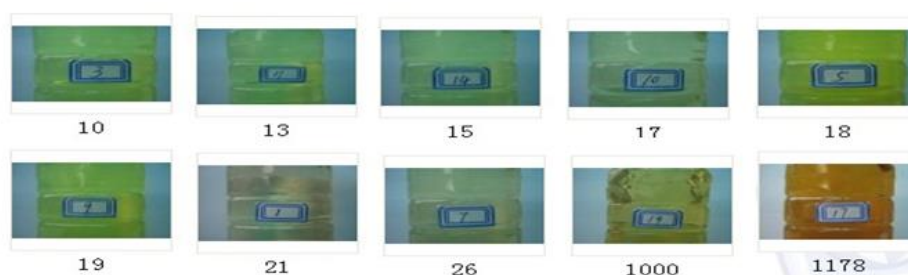
(c) 内河船舶基于燃油的排放因子(g/kg 燃油)

图 2-8 中国典型工程机械、农业机械和内河船舶实测的排放因子

需要指出的是,我国各类非道路机械的实测排放因子与国外实验结果相比普遍偏高,除了柴油机排放控制水平相对落后之外,另外一个主要的原因是我国非道路柴油机使用的油品质量较差,北京及周边地区非道路柴油机实际使用柴油中硫含量的抽样检测结果见专栏 2-1。

### 专栏 2-1 非道路机械用柴油市场现状调研

对北京地区 30 家加油站市售柴油硫含量进行抽样调查，油样采集地点分布在四、五、六环路沿线；G110 国道北京至延庆段；G107 国道北京至涿州段等地（部分样品柴油样品见下图）。此外，对在用工程机械实际使用柴油进行了硫含量调研，20 个采样点分布在北京市、天津市、河北省等地，柴油样品直接从各类工程机械中抽取，采样对象覆盖了各个种类的工程机械。结果表明，各地柴油价格差异明显，劣质油价格显著便宜，成品油市场混乱，小作坊油较多，油品质量难以保证。绝大多数样品中硫含量都大于 400 ppm，低硫柴油只在北京样品中出现。但是，即使在北京的抽检样品中，也依然存在高硫柴油。



根据上述实验测试获得的排放因子，VECC 和北京理工大学结合中国各类非道路移动源燃油消耗的情况，计算得到非道路移动源主要污染物的排放清单，如图 2-9 和图 2-10 所示。根据计算结果可以看出，非道路移动源与道路移动源  $\text{NO}_x$  的排放量相当。其中工程机械、农业机械和内河船舶是主要的贡献者。非道路移动源排放的一次  $\text{PM}_{2.5}$  甚至超过了道路移动源。其中农业机械、工程机械和内河船舶的排放比例较高，进一步加强非道路柴油机的排放控制刻不容缓。

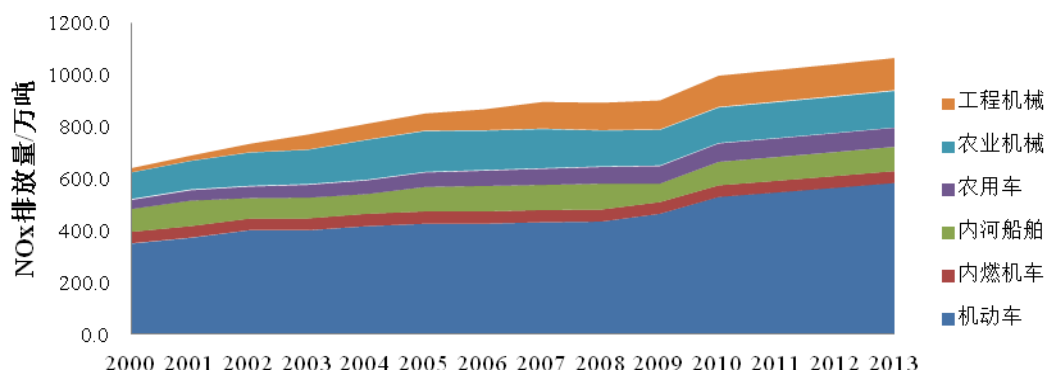


图 2-9 中国柴油机械  $\text{NO}_x$  排放量估计（万吨）（2000-2013 年）

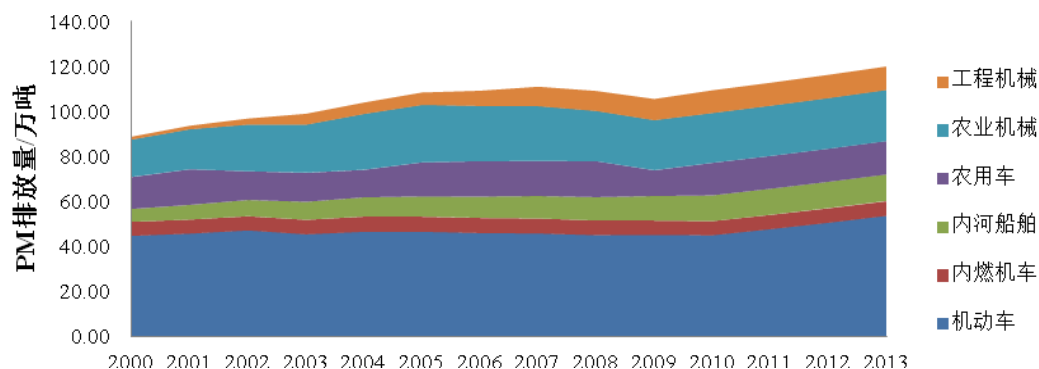


图 2-10 中国柴油机械 PM 排放量估计（万吨）（2000-2013 年）

### 三、小结

#### （一）建立和完善 SLCPs 和非道路移动源基础数据编制和核算体系

SLCPs 和非道路移动源的排放清单尚未纳入我国污染物统计列表，相关的数据散见于各项研究中，缺乏系统性和可比性，很难为政策的制定提供科学、全面的数据支持。因此，需建立和完善 SLCPs 和非道路移动源基础数据编制和核算体系，与其他大气污染物和道路移动源的统计核算体系保持一致，并加强多污染物和多污染源减排协同收益的定量评估和分析方法研究。

此外，还要加强有关不同气候效应污染物（SO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>/POA/BC）联合脱除后综合气候效应方面的研究。

#### （二）加强环保部门能力建设，强化排放标准达标管理

环保部门应加强能力建设，建立针对 SLCPs 主要排放源和重要非道路移动源的排放监测与监管网络，建立非道路移动源油品质量监管网络，提高对 SLCPs 和非道路移动源环境监管的管理水平，加大对超标或违规排放源的处罚力度，确保更严格排放标准的防控措施实施到位。

建立 SLCPs 和非道路移动源的大数据监管和控制决策平台，并完善相关科研和监管数据的公开和共享机制。

#### （三）大力减少重点行业和部门的 SLCPs 排放

针对黑碳减排，民用部门应以减少散煤燃烧为主；交通部门应以减少柴油机黑碳排放为主；工业部门应着重减少中小工业锅炉黑碳排放。针对甲烷减排，要提高乡镇煤矿瓦斯抽采和利用率。

#### （四）加强非道路移动源的管理

加快非道路柴油机排放标准的升级步骤，通过强化标准导入各种有效的柴油机排放控制技术，降低新生产非道路柴油机的排放量，

建议建立非道路移动源登记注册制度和非道路柴油机排放定期检验制度，明确非道路移动源全生命周期监管责任主体，加快老旧机械淘汰更新，开展非道路柴油机排放治理技术改造研究和试点。

加强非道路柴油机使用柴油油品质量的管理，减小普通柴油与车用柴油标准之间的差距，加强船用燃料油品质量升级和使用管理。

# 第三章 短寿命气候污染物和非道路移动源 控制技术和减排潜力分析

## 一、短寿命气候污染物排放控制技术和减排潜力分析

### （一）黑碳

联合国环境规划署和世界气象组织（UNEP/WMO，2011）识别了全球在民用、工业和交通等领域的9项黑碳减排措施，包括柴油颗粒过滤器、禁止高排放汽车的使用、用块煤替代烟煤、炉灶改进、燃料替代、禁止露天燃烧等。这些排放控制措施可划分为三类：一是减少化石能源使用；二是提高化石能源使用效率；三是末端黑碳减排技术的应用措施。这些措施也在很大程度上对减缓全球变暖和保障公众健康具有积极影响。

民用部门的黑碳减排技术与措施主要归纳为五项：一是炉具改进（燃烧更充分的炉具）；二是煤型优化，从块煤变为蜂窝煤；三是尽量避免使用中等成熟度烟煤；四是在郊区和农村推广采取集中供暖，即采用燃烧效率高的新型粉煤锅炉；五是使用清洁能源替代农村散煤燃烧，如电、太阳能、沼气等。支国瑞等人（2009）的研究显示，通过使用改进过的炉灶燃烧蜂窝煤能够显著降低颗粒物、有机碳和黑碳的排放；中国如果能够在民用部门改进炉灶并使用蜂窝煤替代块煤，能够分别减少颗粒物、有机碳和黑碳的排放63%、61%和98%，而且能降低黑碳/有机碳的排放比率，有助于减缓气候变暖。

工业部门的黑碳减排措施可以集中在焦炭生产、制砖业、工业柴油使用和其他工业用煤等领域。就焦炭行业而言，在中国，焦炭生产所排放的黑碳超过排放总量的一半以上。根据工业和信息化部2014年4月正式实施的炼焦行业准入标准，要求焦炉使用煤气清洁措施，主要包括脱硫脱硝措施，这将极大提高PM<sub>2.5</sub>和黑碳的减排效率；同时该标准也倡导要大力推动干熄焦和减少细颗粒物排放等黑碳减排技术的使用。就制砖业而言，根据《砖瓦工业大气污染物排放标准》（GB 29620-2013），砖瓦窑炉须在工艺尾端安装静电除尘器和纤维过滤设备，以减少PM<sub>2.5</sub>的排放，并有效推进黑碳减排。电力部门脱硫脱硝除尘相关技术措施的推广应用对于黑碳减排也发挥了重要作用。此外，工业柴油使用和其他工业用煤等领域的黑碳减排措施主要包括燃料转换、清洁化能源利用、优化燃烧工艺、加装末端处理设施（如风力除尘、静电除尘、湿法除尘、纤维除尘等）（CLRTAP, 2012）等。中国于2015年1月开始限制灰分高于30%、硫分高于1.5%的煤炭使用，这给未来燃料转换和燃料清洁度提高提供了很好的政策支持，同时也将促进黑碳减排。

交通部门的黑碳减排技术措施主要包括新机动车和非道路移动设备的排放管理、控制在用重型柴油车、通过燃料和能源转换减少重型机动车的黑碳排放等。就排放管理而言，目前中国正在执行重型柴油发动机国IV排放标准，这项措施主要适用于新车。从国III升级到国IV，中国的柴油发动机颗粒物排放标准从0.1 g/kWh 提高到0.02 g/kWh，下降率达到80%（Shao等人, 2014）。对于在用车的黑碳减排，主要措施是加速淘汰老旧、高排放机动车，以及加装壁流式柴油微粒过滤器（DPF），其中加装DPF可减少90%以上的黑碳和85%以上的颗粒物排放。还有，改进重型卡车的操作方式也有助于减少黑碳排放，如广东省实施了“绿色货运”计划，通过选择使用节能发动机、抗震轮胎、以及风阻较小的配件等相关措施，旨在提高货运服务的效率，同时减少燃料消费。此外，中国针对在用车实施的“检测与维修（IM）”计划，有利于机动车运行效果维持在最佳排放水平。在清洁燃料替代方面的措施主要包括发展天然气和纯电动汽车，使用低硫燃油等。根据《大气污染防治行动计划》中相关规定，到2015年底，中国主要城市将推行汽油和柴油的国V标准（含硫率 $\leq 10$  ppm）；到2016年底全国范围全面实施10 ppm的低硫汽柴油，预计届时油品标准升级能有效减排黑碳20%。

在控制生物质燃料的黑碳排放方面，中国为遏制生物质露天燃烧做出了巨大努力。现阶段，环保部主要通过卫星监测全国范围内的每日秸秆燃烧火点分布变化，为禁止生物质露天燃烧相关规定的实施提供了有力的技术保障。总体来说，目前有一些技术可以取代生物质的露天燃烧，从而减少黑碳的排放，具体包括秸秆还田、生物制煤、生物制气、生物柴油、土地深耕（将生物质深埋地下）等。

## （二）甲烷

中国的甲烷排放主要来源于化石能源开采，具体包括油气（含页岩气）开采和煤炭开采过程中的甲烷排放。畜牧业也是中国重要的甲烷排放源，且该领域的甲烷排放也在不断增加，但相关控制措施尚不成体系。不过相关研究表明，施肥管理、改变牲畜喂养方式以及旨在可以减少单位畜产品甲烷排放的各类畜牧业管理措施等，均可以促进该领域的甲烷减排。本研究主要讨论煤矿生产过程的甲烷减排措施。

中国非常重视煤矿甲烷（俗称煤矿瓦斯）的开发利用，通过积极开展清洁发展机制项目、参与全球甲烷行动倡议等合作机制，逐步形成了一套适合中国国情的煤矿瓦斯抽采和输送利用技术体系。其中，煤矿瓦斯民用、工业利用、高浓度瓦斯发电技术得到广泛应用，低浓度瓦斯发电利用技术逐渐成熟，通风瓦斯利用和低浓度瓦斯提纯技术获得重大突破，具体如表3-1所示。

此外，根据Shindell等人的研究（Shindell et al., 2012），对于中国而言，稻田的间断灌溉、俘获填埋场地的逸出甲烷排放等措施，是具有很大效益的甲烷减排



措施。

表 3-1 中国煤矿瓦斯主要减排技术

技术名称	技术描述	技术经济参数	应用情况
民用燃料	民用燃料技术是指将矿井中抽采浓度高于 40% 的煤矿瓦斯气收集存储、铺设管道系统、调压输送到城镇居民区，为居民生活提供燃气，用于烧水、做饭、烧锅炉、取暖等。		在安徽、贵州、山西等许多地区有应用。
工业化工	工业利用包括替代燃煤锅炉和生产炭黑、甲醇和甲醛等化工产品，其中浓度为 40%-90% 的煤矿瓦斯均可用做生产炭黑，且浓度越高，炭黑的产率越高；煤矿瓦斯生产甲醛的方式包括直接氧化成甲醛，或先将瓦斯制成甲醇，然后氧化成甲醛。		目前由煤矿瓦斯直接生产甲醇划入国家禁止类项目。
煤矿瓦斯发电技术	不同浓度的煤矿瓦斯可以通过燃气内燃机、燃气汽轮机等进行发电。其原理是将甲烷与空气混合至爆炸极限(5%-15%)，在防爆气缸内爆燃做功，推动活塞运动，从而带动同步发电机发电。	投资一般为 3000-4000 元/kWh	高浓度瓦斯（浓度>30%）及低浓度瓦斯（浓度<30%）发电已成为煤矿瓦斯利用的主要方式。
煤矿瓦斯提纯压缩技术	高浓度及低浓度煤矿瓦斯经过提纯、压缩可制成压缩天然气(CNG)产品，这样扩大了煤矿瓦斯应用范围。目前煤矿瓦斯加工提纯方法主要有吸附与解析分离、渗透分离和低温分离。	对于 2000 万 m <sup>3</sup> 纯瓦斯的压缩气厂，投资成本约为 2200 万元。	
煤矿瓦斯提纯液化技术	煤矿瓦斯一般采用吸附与解析分离、渗透分离和低温分离等技术加工分离后进行液化及 LNG 产品生产，LNG 大大降低了运输成本，且可随气源和用户不同需求改变运输路线，甚至可用现有的天然气管道作调峰资源使用。	对于年产量为 2 万吨的液化煤矿瓦斯厂，大约年消耗 3200 万 m <sup>3</sup> 纯瓦斯，大约投资 9000 万元。	
风排瓦斯利用技术	甲烷浓度小于 1% 的风排瓦斯目前采取的措施以排空为主，现有可利用技术主要有热氧化、催化氧化和作为辅助燃料三种利用方式。其中热氧化技术较为成熟且已实现工业化运行。		中国胜利动力机械集团公司、美国 Megtec 公司、英国 Harworth 公司等设备厂商的风排瓦斯热氧化技术均已成功建设示范项目。

（三）部分氢氟碳化物

1、汽车空调HFC-134a减排技术与潜力

针对汽车空调制冷剂HFC-134a的减排主要采用替代技术，目前存在多种低GWP的替代物质，如HFO-1234yf、HFC-152a、CO<sub>2</sub>和碳氢化合物（HCs）等，其中仅有HFO-1234yf系统目前被商业化，但其生产和使用均受到专利保护，具有最高的成本；选择替代技术时需要考虑其经济成本 and 市场化可行性，以及由于其轻微可燃性所引发的安全风险。此外，中国幅员辽阔，对汽车空调系统的要求将是多样化的，研究开发的替代品技术非常重要。

表 3-2 主要汽车空调行业 HFC-134a 的替代技术

替代品	GWP-100yr	制冷剂成本 (US\$/kg)	市场状态	商业化地区
HFC-134a (基准)	1300	\$3-\$4	完全商业化	各个地方
HFO-1234yf	<1	\$20-\$30	商业化	欧盟、日本、韩国、 美国、加拿大
HFC-152a	138	\$11	实验	无
CO <sub>2</sub>	1	~\$1	实验	无
HCs	1.8~5.5	\$1-\$10	被拒绝	无
AC6 混合物	~130	高于 HFC-134a, 低 于 HFO-1234yf	测试	无

高 GWP 值 HFCs 的替代技术 (由 Institute for Governance & Sustainable Development 与联合国环境署保护臭氧层工作组联合出版。)

胡建信等（2015）的研究将中国汽车行业不淘汰HFC-134a的情景假设为基线情景（BAU）。在基线情景下，HFC-134a消费量逐年增加，2037年达到最大值，之后稳定在16.6万吨左右；排放量稍滞后于消费，即在2038年达峰值，之后稳定在16.0万吨水平。同时设置两种淘汰替代情景，即以2021年作为中国的淘汰时间起点，并将2025年新车全部淘汰作为淘汰情景A，将2040年全部淘汰作为淘汰情景B。研究表明，若采用HFC-152a作为替代技术时，在情景A中到2050年累计减排45亿吨CO<sub>2</sub>当量，在情景B中累计减排41亿吨CO<sub>2</sub>当量左右；若采用HFO-1234yf替代技术，在情景A中到2050年可以累计减排53亿吨CO<sub>2</sub>当量，情景B中可以累积减排48亿吨CO<sub>2</sub>当量。由此可以看出，HFO-1234yf的减排量高于HFC-152a。

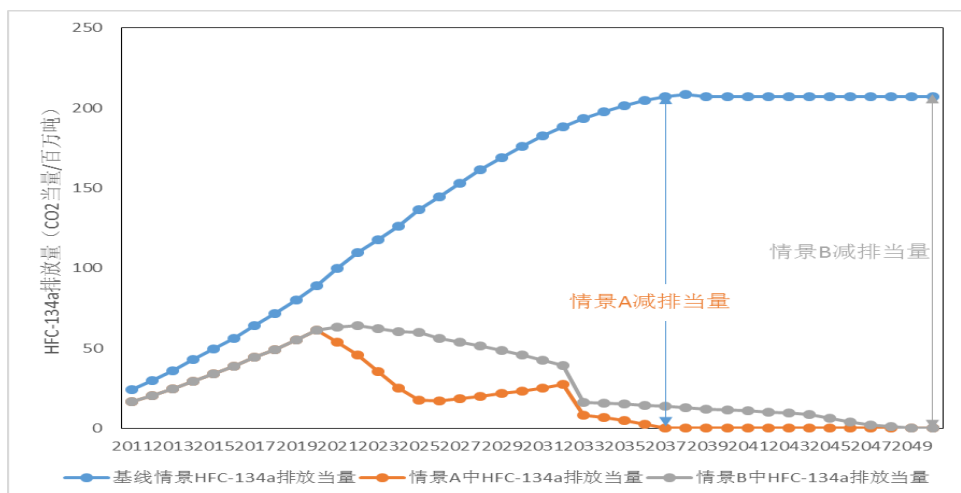


图 3-1 中国 2016-2050 中国汽车空调行业 HFC-134a 减排潜力

## 2、房间空调制冷剂 HFC-410A 减排技术与潜力

现阶段中国的家用空调替代品主要为碳氢化合物--丙烷。丙烷制冷剂的 GWP 仅为 3.3。未来几年，目前正在试验阶段的含有 HFOs 和 HFCs 的低 GWP 值制冷剂有望进入市场，且可以预期，部分替代品将可能在蒙特利尔议定书多边基金的支持下，进入示范项目阶段。此外，部分国家，包括中国已经采用 GWP 值更低的 HFC-32 取代 HFC-410A，即便如此，需要说明的是，HFC-32 的 GWP 值虽然较低，但依然是在 675。

中国最大的空调生产商格力公司 2011 年开启了生产量为 10 万台的丙烷家用空调生产线，目前各大企业正在积极推进市场化这类产品。空调领导企业 Godrej 已经开发 HC-290 房间空调，即使在没有使用逆变器的条件下，效率比印度能源署规定的 5 星能源效率的最小值高 11%。本研究主要选用 HC-290 作为替代品对 HFC-410A 未来淘汰进行预测。假设 MIT-A 情景下，HFC-410A 的排放量将逐年增加，在 2031-2037 年间达到高峰，维持在 15 万吨（300 Mt CO<sub>2</sub>-eq）水平上；此后开始大幅下降，至 2050 年，HFC-410A 排放量小于 5 万吨（100 Mt CO<sub>2</sub>-eq）。MIT-B 情景下，在 2018 年之后 HFC-410A 的排放量增长速率开始小于 BAU 情景，在 2030 年排放量达到最高约 86000 吨（166 Mt CO<sub>2</sub>-eq），此后逐年下降。不同减排（MIT）情景下 HFC-410A 排放量如图 3-3 所示。对于房间空调行业，在各淘汰情景下，HFC-410A 的排放趋势不同，减排效果也有差异。采用 HC-290 作为替代品，在情景 A 下，到 2050 年累计减排量达到 32.9 亿 tCO<sub>2</sub>e。在情景 B 下，可以累积减排 77.4 亿 tCO<sub>2</sub>e。需要提及的是，在家用空调中推广碳氢化合物制冷剂广泛使用的前提和保障条件是严格实施确保安全的各种标准和措施。

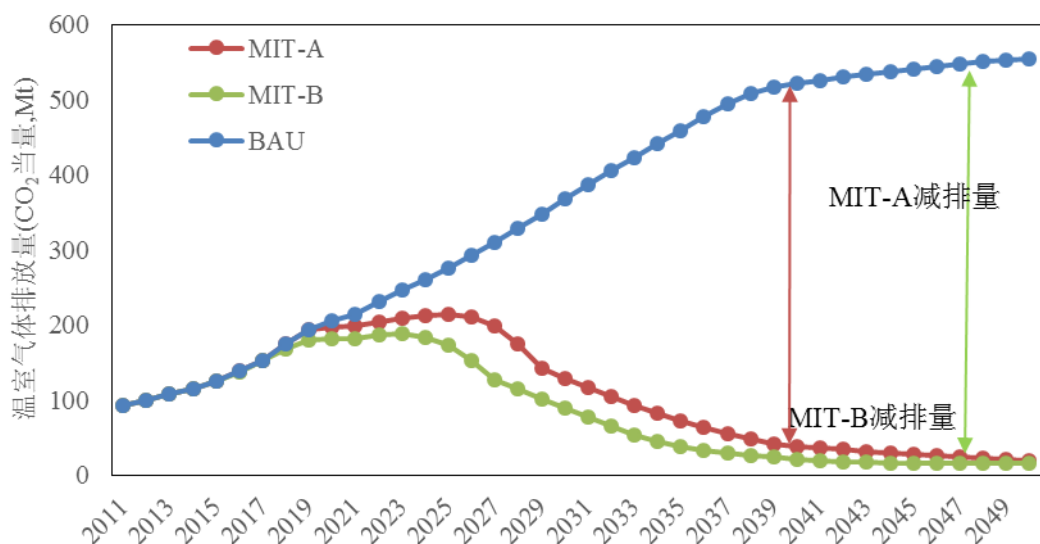


图 3-2 中国 2016-2050 中国房间空调行业 HFCs 减排量潜力

### 3、HFC-23减排技术

HFC-23的减排技术主要包括高温分解和转化利用两大类(Han et al., 2012)。高温分解法已经有成熟的技术和实际应用，而转化利用方法尚在探索阶段(杨礼荣 et al., 2014;韩文锋 et al., 2014)。具体技术评价如表3-3。

表 3-3 HFC-23 主要减排技术

	具体方法	基本原理	特点
高温分解法	燃气热分解技术	在氧化容器中以 1200℃ 的温度对 HFC-23 进行分解	由于 HFC-23 热值较低，需要添加补充燃料以保持温度；分解温度超过 1200℃ 的，不会产生二噁英。
	过热蒸汽分解技术	使用电热装置，替代化石燃料来获得所需温度	可以在温度相对较低（800-1000℃）和小规模的燃料器中使用；兼有高安全性、良好的可维护性、所占空间小、高能源效率。
	等离子体高温分解技术	利用氩气等离子弧设施，在超高温下对 HFC-23 进行分解	包含迅速冷却过程，可以阻止二苯并二噁英、呋喃等不必要的有机分子的形成；在压缩反应器内高温条件下大量分解非降解性气体；洗涤系统更加经济。
转化利用	裂解转化为 C <sub>2</sub> F <sub>4</sub> （四氟乙烯）和 C <sub>3</sub> F <sub>6</sub> （六氟丙烯）	与现有的利用 HCFC-22 作为原料，原理相似	需要的温度相对较高，收率偏低，难以与现有的工业路线竞争；在适当催化剂作用下，可以大幅降低反应温度，提高收率。关键问题是开发合适的催化剂。
	与 CH <sub>4</sub> 反应合成 VDF（偏氟乙烯，CH <sub>2</sub> =CF <sub>2</sub> ）	与目前通过氢氟氯烃气相裂解合成 VDF 工艺路线相类似	C-F 键相比 C-Cl、C-Br 更加稳定，难以活化 CH <sub>4</sub> 产生反应所需的 CH <sub>3</sub> 自由基。副产物较多。
	与 I <sub>2</sub> 反应合成 CF <sub>3</sub> I	HFC-23 与 I <sub>2</sub> 在催化剂条件下气相反应，合成 CF <sub>3</sub> I	CF <sub>3</sub> I 与哈龙 1301（CBrF <sub>3</sub> ）性能最为接近；CF <sub>3</sub> I 用作灭火剂和制冷剂的成本偏高；已有日本公司实现工业化中试生产。

	作为三氟甲基化原料，用于制药及其他有机中间体合成	尚处于实验室初步探索阶段，其过程条件较为苛刻及成本较高，作为 HFC-23 处理路线还需长时间探索。
--	--------------------------	--

## 二、非道路移动源排放控制技术和污染物减排潜力分析

现有的非道路移动源排放控制措施主要包括先进减排技术的应用、油品质量升级、清洁能源及其他措施。

### （一）先进减排技术的应用

#### 1、非道路机械

一般认为，通过机内净化，优化燃烧过程可以满足我国非道路移动机械柴油机第 III 阶段排放标准，甚至是第 IV 阶段排放标准的要求。但是为满足未来更严格排放法规要求，就必须采用机内净化+排气后处理装置联合控制的技术路线。柴油机排气后处理装置一般指在排气系统中安装使用的催化转化器或者颗粒物过滤装置，通过使用后处理装置，达到进一步降低柴油机排放的各种污染物的排放量~~错误!未找到引用源。~~。后处理装置在重型车用柴油机上已经实现了产业化，技术已经十分成熟。为控制柴油机排放的主要污染物  $\text{NO}_x$  和 PM，一般采用两种不同的技术路线：废气再循环系统（EGR）+柴油机颗粒物捕集（DPF），以及选择性催化还原（SCR）技术。EGR+DPF 技术路线是通过废气再循环控制  $\text{NO}_x$  排放，利用 DPF 拦截排气中的细颗粒物，从而达到净化目的。DPF 应用的关键问题是再生问题和防止催化剂中毒失效问题，因此必须控制柴油中的硫含量。SCR 技术路线则是通过大幅度提高喷油压力，优化燃烧过程达到机内净化 PM 的目的，然后利用 SCR 进一步控制排气中的  $\text{NO}_x$ ，以满足排放法规的要求，SCR 技术需要解决尿素水溶液的供应问题。

#### 2、船舶

船舶大气污染物减排的先进技术应用主要集中在靠港船舶使用岸电技术、船舶发动机改进技术和船舶发动机排气后处理技术三个方面。

##### 1) 靠港船舶使用岸电技术

靠港船舶使用岸电是指船舶在靠港以后，利用电缆连接岸上供电系统和船舶受电系统，关停船舶自身辅机燃油发电，以达到减少排放的目的。自 2000 年瑞

典哥德堡港开始率先实施靠港船舶使用岸电之后，船舶岸电目前在国外已有较广泛的应用。美国加州强制要求从 2014 年 1 月起挂靠的集装箱船、邮船和冷藏货物运输船靠泊期间须不断加大使用岸电的比例<sup>1</sup>。欧盟发布指令强制要求 2025 年底之前成员国港口建设完成岸电供电设备设施，保证向靠港远洋和内河船舶供应岸电。目前，我国上海港、连云港港、深圳港、广州港和宁波港等都已建成船用岸电系统，但两大原因使得岸电系统的使用不尽如人意。首先是港口建设岸电供电设备设施的投入大，港口企业难以从靠港船舶使用岸电中获得直接经济效益。其次是国际航行船舶缺乏使用岸电的动力，因为近期低迷的油价使得辅机消耗燃油发电成本低于使用岸电。

新修订的《大气污染防治法》要求：新建码头应该配套建设岸电设施，现有码头应该逐步改造增加岸电设施，船舶应该优先使用岸电。中国交通运输部日前颁布的《船舶港口污染防治专项行动实施方案（2015-2020）》中也提出了到 2020 年主要港口 90% 的港作船舶、公务船舶靠泊使用岸电，50% 的集装箱、客滚和邮轮专业化码头具备向船舶供应岸电的能力。经测算，此项措施可使环渤海、长三角和珠三角区域内船舶排放的  $\text{SO}_x$ 、 $\text{NO}_x$  和 PM 分别减排 2%、7% 和 8%。

## 2) 船舶发动机改进技术

随着船舶发动机技术的进步，更多的机内净化技术得以采用以减少污染物排放。新船发动机的技术升级主要依靠排放标准的加严来实现，随着船舶的更新换代体现出其减排效果，此外，对渔船等小型船舶可以采用换装新型发动机的方式改善排放水平。我国的沿海和内河船舶检验技术规范都明确要求，2015 年 3 月或以后建造的船舶上安装的柴油机，其  $\text{NO}_x$  排放量应达到 IMO Tier II 排放标准。

《大气污染防治法》提出，国家鼓励和支持高排放机动车船提前报废。按照 2015--2020 年之间我国淘汰老旧船舶和新造船舶数量预测结果粗略估算，IMO Tier II 标准的实施可使环渤海、长三角和珠三角区域 2020 年的船舶  $\text{NO}_x$  排放比 2015 年减少约 20%。而中国目前正在制定的《船舶发动机排气污染物排放限值及测量方法（中国第一、二阶段）》则可能比 IMO Tier II 标准更加严格，预计会产生更好的减排效益。

## 3) 船舶发动机排气后处理技术

对于在用船舶，研发和推广 SCR、 $\text{SO}_x$  洗涤塔、DPFs 等船舶发动机排气后处理技术能够起到很好的减排效果<sup>2</sup>。由于  $\text{NO}_x$  减排需求迫切且其他前端减排措施效果有限，国际上对船用 SCR 的研究和实践进展较快。在用船舶加装 SCR 系统，对船舶设备改动较小，不影响燃油经济性，对燃油、滑油品质要求相对较低，不会增加船舶油耗和颗粒物排放，可减少柴油机 90% 以上的  $\text{NO}_x$  排放。但是 SCR 技术全面推广还面临一系列需要解决的问题，如初装成本高，设备尺寸大导致机

舱内布置困难等。现阶段 SCR 技术发展仍受排烟温度控制、催化剂失活、尿素定量喷射、与废气混合均匀性等因素制约，国内还需进一步加大设备研发和国产化力度。

## （二）油品质量升级

油品质量对非道路用柴油机的排放影响非常大，特别是柴油中的含硫量，不仅直接影响排放，而且限制了先进排放控制技术的使用。降低柴油中硫的含量，可使尾气中的 PM 降低 10-15%。中国非道路用柴油质量参差不齐，比如农用机械用柴油目前主要有普通柴油、重柴油和农用柴油等。船舶用油主要包括船用馏分燃油、船用渣油或混合油等。其中，船用大型低速机用燃料质量最差，燃油来源甚至包含回收利用油、工业废油等，且由于没有强制的船用燃料油国家标准，燃油质量无法保证。经调查，这部分燃料中硫含量高达 2.0-3.5%，远高于现有道路车用柴油标准的要求（50 ppm）<sup>3</sup>。可以说，提高非道路用燃油品质是提高非道路移动源排放标准和发动机技术的第一步。

### （1）设立船舶排放控制区

设立船舶排放控制区，要求船舶在特定区域内使用含硫量较低的燃油，降低 SO<sub>2</sub> 和 PM 排放，是发达国家普遍采用的做法。根据国际海事组织 MARPOL 公约规定，当前全球船用燃油含硫量限值为 3.5%，这个限值将在 2020 年或 2025 年下调至 0.5%。此外，当前 MARPOL 公约框架下波罗的海海域、北海海域、北美海域、美国加勒比海域等 4 个船舶排放控制区对船舶燃料硫含量的限值已低至 0.1%<sup>4</sup>。北美排放控制区还将实施对 NO<sub>x</sub> 排放的控制要求。

换用低硫燃油在减少船舶 SO<sub>x</sub> 排放的同时，对 PM 也有很好的减排效果。新修订的《大气污染防治法》规定内河船舶和江海直达船舶必须使用符合标准的普通柴油，还授权交通运输主管部门可以在沿海划定排放控制区，这些要求和措施可以大幅提升船舶使用油品质量。经测算，如果在我国沿海船舶运输繁忙的环渤海、长三角和珠三角三个区域设立排放控制区，按照要求沿海船舶使用含硫量不大于 0.5% 的燃油、内河船舶使用含硫量不大于 0.001% 的普通柴油进行测算，2020 年排放控制区内船舶排放的 SO<sub>x</sub> 相比 2015 年可减排约 65%，PM 则可减排 30% 左右，效益十分显著。2020 年后排放控制区可以考虑增加对 NO<sub>x</sub> 排放的控制要求。

## （三）清洁能源动力替代

面对全球气候变化和日益严重的能源紧缺问题，生物柴油作为可再生的清洁

替代燃料具有巨大的潜力和发展空间，是石化柴油的重要补充。生物柴油具有无毒、可再生、可生物降解等优点，使用生物柴油能够降低柴油机的有害排放。与车用柴油机相比，由于非道路用柴油机移动范围小，使用生物柴油在储存、添加方面更为方便，因此也更便于推广。

使用液化天然气（LNG）动力船舶是另一种公认的清洁能源减排手段。国际现有 LNG 动力船舶主要使用新造双燃料发动机，技术较为成熟。近年，中国也在 LNG 船舶、港口应用以及配套加注设施等方面积极推进。目前，中国已对 30 余艘内河船舶完成了 LNG 动力改造，还新建 10 余艘 LNG 动力船舶，正在开工建造的有 70 余艘。在港口应用方面，中国已有接近 700 辆港口车辆应用 LNG 作为燃料，并在尝试龙门吊、港作拖船等使用 LNG 作为燃料的相关研究工作。LNG 配套加注系统也在逐步完善。

但是目前 LNG 动力船舶配套法规和标准还不完善，加注设施建设推进缓慢。尤为重要的一点是，随着油价的不断下跌，LNG 的价格优势被削弱，船东建造 LNG 船舶动力明显不足。上述因素制约了 LNG 动力船舶的大规模推广。

#### （四）其他控制措施

码头油气回收针对的污染物是油轮装卸过程中从货仓排放出的油气，主要成分是 VOCs。目前，码头油气回收技术在部分发达国家已有应用，荷兰和韩国的部分港口已强制要求到港邮轮开展油气回收，美国和欧盟也已制定了严格的码头、船舶油气排放标准和油气回收技术法规。相比而言，中国码头油气回收尚处于起步探索阶段，已安装的油气回收装置仅十余套，大部分因安全、资金等原因从未使用或中途停用。

由于船舶主机所消耗的燃油与转速的立方成正比，降低船速可大量节约燃油消耗，因此船速控制也是有效的节能减排措施。经测算，降低 10% 的船速可减少 15-20% 的燃料消耗，相应地也减少  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$ 、PM 和  $\text{CO}_2$  的排放，同时还可以节省 8-10% 的运营成本。因船速控制带来的节能效果明显，大部分航运企业已将船速控制在合理范围。同时，由于中国港口进出港船舶繁忙，存在拥堵现象，客观上船速已被限定在一定范围内，这导致未来进一步开展船速控制的减排潜力有限。

### 三、小结

#### （一）短寿命气候污染物



### 1、统筹考虑SLCPs与常规污染物的协同管控

控制常规污染物与SLCPs多数情况下是协同增效的。因此，在大气污染防治和应对气候变化的整体战略方面，要统筹SLCPs减排和空气质量改善的总体目标，将SLCPs控制目标纳入大气污染防治和应对气候变化目标体系之中，实现协同管控。

### 2、制定和完善控制 SLCPs 相关法规标准及政策

有效降低黑碳等 SLCPs 的排放，有赖于能源利用政策、减少农村散煤燃烧、推动工业和民用终端燃煤设施向高效和清洁能源转变、推动秸秆综合利用、降低机动车 SLCP 排放等一系列政策。针对煤矿瓦斯，要研究和评估煤矿瓦斯利用的各类补贴政策的作用；填埋场以及稻田的甲烷排放需要给予重视。

### 3、研究提出减排技术措施推荐清单

梳理 SLCPs 领域的现有技术和措施，结合联合国环境署推荐的 16 种 SLCPs 减排技术措施，对我国 SLCPs 减排的技术措施进行分析和研判，并结合我国相关领域的减排计划，提出我国 SLCPs 减排的技术措施推荐清单。

## （二）非道路排放源

### 1、加快非道路移动源发动机技术改进

加快我国非道路移动机械柴油机排放标准升级进程，减少非道路柴油机与车用柴油机技术水平和排放控制水平的差异，尽快导入我国车用柴油机中已经广泛采用的先进柴油机排放控制技术，如高压共轨技术、高压喷射技术、燃烧优化技术，冷却 EGR 技术、可变增压器、多级增压器，以及 SCR 和 DPF 等排气后处理技术等，实现进一步降低排放和油耗的目的。

对于船舶发动机，中国即将出台并实施涵盖远洋、沿海和内河船舶的《船舶发动机排气污染物排放限值及测量方法（中国第 I、II 阶段）》，应同步启动船舶发动机排气污染物排放限值第 III、IV 阶段标准的研究和制定工作，还可参考发达国家的做法，对内河船舶和内贸船舶实施更严格的排放标准。通过提升标准，促进船舶发动机，特别是沿海和内河船舶发动机在节油和机内净化技术方面的进步；通过对环保标识、排放信息铭牌等方式推广并规范船舶发动机使用。推动船

用 SCR 等技术的研发，提高装备国产化水平；逐步推广船用 SCR 等技术应用。

## **2、加快油品质量升级**

加强工程机械及农业机械使用油品质量的规范化，严格市场监督管理。加大高硫分重油脱硫技术研发力度，加快开展重油脱硫生产线建设。

出台政策措施确保高品质低硫船舶燃料油供应充足，逐步推广船用低硫燃油使用。尽快在大气污染联防联控重点区域设立覆盖我国领海和内水范围的船舶排放控制区，要求控制区内航行的船舶使用低硫燃油 2020 年后可向国际海事组织（IMO）申请设立涵盖我国全部沿海专属经济区的船舶排放控制区（ECA），使用全球最严格的燃油质量和排放控制标准。

## **3、加快岸电设施相关技术研发推广**

针对国际航行、沿海船舶的高压岸电供电系统和内河、港作、公务船舶的低压岸电供电系统，开展岸电设备、岸船接口、船上油路电路切换等关键技术的研发和推广，制定相关技术标准规范。理顺港口码头转售电机制。加快船舶使用岸电技术的推广应用，力争在十年内沿海和内河码头全面具备向船舶供应岸电的能力，到 2025 年实现靠港货船岸电使用率达到 70-80%、港作船和公务船岸电使用率达到 100%。

## **4、加快清洁能源替代技术研发推广**

推广生物柴油在工程机械和农业机械领域的技术攻关，推动生物柴油应用试点和示范；加大 LNG 船舶发动机研发，尽快实现符合 IMO Tier III 阶段或更严格排放标准的 LNG 船舶发动机设计制造的国产化；开展 LNG 动力船舶整船技术研发，规范 LNG 动力船舶的安全设计，提高 LNG 动力船舶续航能力；加快沿海和内河水域 LNG 加注设施建设、管理、运营相关政策和技术研究，规范 LNG 加气设施的安全设计和运营管理。从内河起步，大力推广清洁能源动力船舶应用和配套设施建设。

## 第四章 中国短寿命气候污染物和非道路移动源减排的多部门协调机制和政策分析

### 一、中国短寿命气候污染物和非道路排放源的多部门协调机制现状

#### （一）短寿命气候污染物

长期以来，中国的大气污染防治工作所关注的主要问题集中在城市空气质量和酸雨等方面，并未把对气候的影响作为一种大气污染的后果纳入大气污染防治的视野。而随着中国的复合型大气污染在近年来日益突出，国内外各界对中国城市空气质量的关注日益提高，使得中国在控制常规大气污染方面面临着空前的压力。在这样的情况下，中国的管理资源和研究资源都大幅向常规大气污染防治倾斜，对SLCPs的关注程度远低于常规大气污染物。从政策和管理基础上来看，我国控制SLCPs的不足主要体现在以下几个方面：

一是缺乏专门控制SLCPs的法规和标准。在我国目前的《环境保护法》和《大气污染防治法》这两项大气污染防治的基本法律中，都没有专门提出对SLCPs的控制要求；在大气污染物排放标准中，除了《生活垃圾填埋场污染控制标准》（GB16889-2008）中提出了对CH<sub>4</sub>排放的控制标准外，对BC、CH<sub>4</sub>和HFCs排放的主要污染源均未提出控制要求；在油气开采（包括页岩气开发）过程中，CH<sub>4</sub>尚未被列入环境监管范畴。

二是现有的控制技术没有完全考虑SLCPs的减排。由于SLCPs没有被纳入中国大气污染防治工作的视野，中国现有的控制政策以及推广的控制技术并未把SLCPs排放控制作为工作目标。在控制技术的选择过程中，没有从SLCPs减排的角度进行考虑，仅是在某些政策和技术评估中，对涉及BC等有限的SLCPs减排效果进行了简要分析。

三是缺乏有效的排放统计数据支撑。中国现有的统计体系并未把SLCPs纳入污染物排放量的统计范围。虽然在《气候变化国家信息公报》等政府文件中，报告了CH<sub>4</sub>的排放量，但是并没有纳入年度排放统计工作，时效性也相对较差；对于其他SLCPs，甚至没有国家层面的排放量报告。在科研项目的支持下，清华大学、北京大学等高校和一些科研单位研究了中国SLCPs的排放总量和分布特

征，但是由于研究方法学和基础数据的限制，这些排放清单尚不能给政策制定和效果评估提供足够的支撑。

## （二）非道路排放源

非道路移动源种类繁多、数量庞大、应用广泛，是重要的生产生活工具，主要包括非道路移动机械、船舶、内燃机车、飞机等。与机动车相比，由于长期以来，我国对非道路移动源排放缺乏有效的监督管理，普遍存在技术水平低、使用年限长、维护保养差、燃油消耗高、燃油质量差、排放污染大等特点。非道路移动源主要以柴油机为动力源，排放以  $\text{NO}_x$  和  $\text{PM}$  为主。非道路移动源正逐渐成为影响我国城市和区域空气质量的另一重要来源。由于非道路移动源点多面广，流动性强，监管困难，在排放控制方面面临诸多挑战。

目前，我国仅对非道路移动机械用发动机进行了型式核准管理，尚未对在用非道路移动机械排放进行有效管理。对额定净功率 37kW 以上的内河及沿海船舶用发动机、铁路内燃机车等也尚未进行有效管理。远洋船舶及飞机排放主要遵守相关国际公约，国内尚未制定相关排放法规。

### 1、非道路移动机械排放管理

我国对非道路移动机械的排放管理由环保部负责，对新生产非道路移动机械用发动机实施环保型式核准管理。企业按要求提交相关资料，合格后，由环保部发放环保型式核准证书。截至 2013 年底，全国共有 14000 余个非道路移动机械用柴油机型，1280 个非道路移动机械用小型汽油发动机型通过环保型式核准，达到国家相关排放标准的要求。对于在用非道路移动机械尚未开展有效管理。

非道路移动机械种类很多，最主要包括农业机械、工程机械和园林机械等，国家质监部门对内燃机产品进行监督管理，各类机械所在行业也分别由各自的主管部门进行管理（如农业机械主要由农业部农业机械化管理局进行管理）。同时，各类机械行业都分别成立了行业协会（如工程机械行业的中国机械工业联合会、小型点燃式发动机行业的中国内燃机工业协会下属的小汽油机分会等），协助主管部门开展工作。

### 2、船舶排放管理

目前，我国仅对额定净功率小于 37 kW 的船用发动机进行了型式核准管理，额定净功率大于 37 kW 船用发动机标准正在制定中，尚未进行有效管理。远洋船舶排放主要遵循 IMO（国际海事组织）MARPOL 公约（国际防止船舶污染海洋公约）附则 VI 的规定。从使用性质来看，我国民用船舶主要包括运输船舶及

渔业船舶两大类。其中，运输船舶主要由交通运输部海事、水运、船级社等部门管理，负责船舶的检验、发证、监督和管理等工作如图 4-1 所示。



图 4-1 中国运输船舶管理体系

渔业船舶主要由农业部渔政、船检等部门管理，负责渔船的检验、发证、监督和管理等工作，如图 4-2 所示。

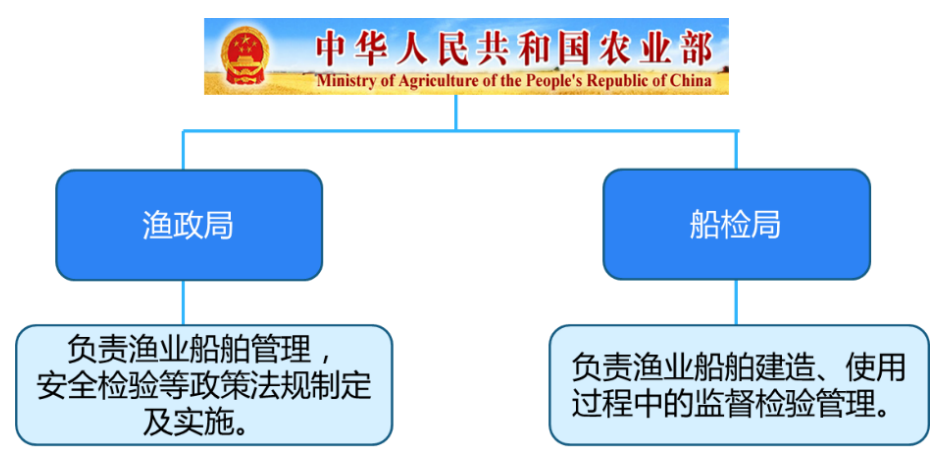


图 4-2 中国渔业船舶管理体系

### 3、油品质量管理

非道路移动机械主要以普通柴油为主，技术标准应符合 GB252-2011《普通柴油》，硫含量不大于 350ppm。船用燃油比较复杂，主要包括三类：一类为船用馏分燃油，另一类为船用渣油或燃料油，再一类为混合油（混合油由轻质油和重质油按一定的比例混合而成）。目前，我国现行的船用燃料油标准为 GB / T 17411-2012

《船用燃料油》，该标准为推荐性标准，对船用馏分油硫含量要求在 1.0%-1.5% 之间，对船用残渣燃料油硫含量要求在 2.0%-3.5% 之间。

与车用燃料相比，非道路用燃料硫含量普遍较高，同时缺乏有效监管，品质无法保证，直接影响 SO<sub>2</sub> 及 PM 排放水平及先进后处理技术的应用。2015 年 5 月，发展改革委等七部门印发《加快成品油质量升级工作方案》，指出 2017 年 1 月起全国供应国 V 标准车用汽柴油；2017 年 7 月起，全国全面供应国 IV 标准普通柴油，2018 年 1 月起实现与车用柴油并轨，如图 4-3 所示。船用燃料油强制性国家标准力争 2015 年底前发布。东部地区 11 个省市提前供应优质汽柴油。油品质量升级的时间进程大大加快，为实施更严格的排放标准提供了保障。

年度 项目	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
车用汽油	II	III				IV			V	
车用柴油	II		III			IV		V		
普通柴油	II				III				IV	V

图 4-3 油品质量改善进程 2009-2018 年

## 二、中国短寿命气候污染物减排的多部门协调机制和政策建议

### （一）将 SLCPs 控制纳入大气污染防治管理和规划

在中国开展SLCPs排放控制与目前的大气污染防治工作有着高度的相关性。从控制的污染源对象和主要控制措施来看，现有的很多大气污染防治工作都能取得一定的SLCPs减排效果。因此，将SLCPs控制纳入已有的大气污染防治管理体系，不会显著增加现有的大气污染防治工作负担，反而有助于中国政府塑造积极应对全球气候变化问题的负责任大国形象。在将SLCPs控制纳入大气污染防治管理和规划的过程中，需要着重关注以下三方面的问题：

一是构建SLCPs管理的基础。在现有的污染物排放统计体系基础上，建立系统、可靠的全国SLCPs排放量统计分析方法。利用此方法摸清全国SLCPs排放基数，了解排放源分布，为下一步管理打下坚实基础。

二是将SLCPs控制纳入全国节能减排和污染防治规划。在节能减排和大气污

染防治规划中明确提出SLCPs的减排目标，并制定相应的政策措施。

三是制定SLCPs减排的国家路线图。提出与应对气候变化及大气污染防治目标衔接的SLCPs减排目标和时间表，明确在未来的不同阶段，各种SLCPs减排的主要地理区域和行业领域，以及实现SLCPs减排的主要协同控制措施。

## （二）建立协同减排战略

由于SLCPs与中国目前关注的常规大气污染物来源在很大程度上具有一致性，中国政府应当尽早对SLCPs和常规污染物进行统筹考虑，建立协同减排SLCPs和常规污染物的战略。

在大气污染控制的整体战略方面，统筹SLCPs减排和空气质量改善的总体目标，提出气候友好型的大气污染防治战略，在此基础上细化主要目标指标，并以此引领全国大气污染防治实践。

在具体的控制措施方面，优先推动对改善空气质量和减少SLCPs排放协同效益最高的措施。在近期尤其需要关注提高能源使用效率和改善能源结构的措施，包括减少煤炭消费量、减少煤炭在小型燃煤设施中的使用、提高清洁能源比重等。这些措施既能降低大气颗粒物污染，又能减少黑碳等SLCPs排放。

## （三）强化部门间的协作

在“大气污染防治行动计划”的实施过程中，部门协作机制的建立是诸多政策措施得以落地实施的重要保障。在SLCPs的控制过程中，也需要依靠部门间合作，推动SLCPs控制目标的实现。在国家的大气污染防治规划中，需在确定的控制目标基础上，提出明确的SLCPs控制要求，并明晰各部门在落实控制要求过程中的分工；在实施过程中，根据进度要求检查措施的实施情况，落实各部门责任。

针对不同的SLCPs，要根据其主要来源确定主要的协作部门。对于黑碳，进一步明确能源、农业、城建、环保、交通等各部门的职责，从减少煤炭的终端使用、减少秸秆等生物质直接燃烧、控制各种移动源排放等角度入手，进行控制；对于甲烷，进一步健全现有体制机制，充分发挥各有关部门的作用，着重从减少能源开采过程和废物处置过程中的甲烷释放量入手，进行控制；对于氢氟碳化物，在现有的联合履约机制下，按既有任务进一步开展工作；对于对流层臭氧，在现有的大气污染防治体系下，进一步明确与氮氧化物、挥发性有机物排放控制有关的部门责任。

#### （四）制定和完善相应法规标准及政策

在相关法律法规的修改中，将SLCPs管理纳入大气污染防治体系，进一步授权政府部门对SLCPs实施减排。并在此基础上，完善排放标准体系，针对黑碳、甲烷等的主要排放源，在排放标准的修订过程中，可基于减排的最佳实用技术，规定相应的排放限值。

近期，以黑碳为主要对象，结合对PM<sub>2.5</sub>控制的要求，完善黑碳控制的技术政策。一是进一步完善能源使用政策，推动煤炭使用从低效、分散的终端燃煤设施向高效、集中的能源转换设施转换，减少小型锅炉和煤炉的煤炭消费量；二是进一步推动秸秆综合利用政策，促进使用秸秆制造生物质成型燃料，减少秸秆直接燃烧。

与此同时，还要逐步引入经济政策和激励机制，通过有差别的污染物排放税费政策、金融政策等措施，激励SLCPs减排技术的广泛应用。

#### （五）加强科研和技术开发

加强SLCPs控制最佳实用技术的研究，并结合排放标准推进SLCPs排放的削减工作。推进SLCPs排放监测方法及设备的研发，用于评估SLCPs控制管理的实际工作进展和减排效果。推进SLCPs减排协同效益的定量评估和分析方法研究，建立气候变化与环境质量影响的评估模型方法，在此基础上及时对中国SLCPs控制的综合效益开展评估。

### 三、中国非道路移动源减排的多部门协调机制和政策建议

国务院及相关部门正逐步加大非道路移动源污染防治的工作力度，提出了一系列的要求。环保部、发改委、财政部联合发布的《重点区域大气污染防治“十二五”规划》（环发〔2012〕130号）中提出“开展非道路移动源排放调查，掌握工程机械、火车机车、船舶、农业机械、工业机械和飞机等非道路移动源的污染状况，建立移动源大气污染控制管理台账”。2013年9月国务院发布的《大气污染防治行动计划》（国发〔2013〕37号）中也提出“开展工程机械等非道路移动机械和船舶的污染控制”。2015年8月，新修订的《大气污染防治法》审议通过，对非道路移动源污染防治提出了明确的要求。非道路移动源污染防治工作正逐步提上日程，成为未来工作的重点。

为深入贯彻落实新修订的《大气污染防治法》，有效开展非道路移动源污染防治工作，加强非道路移动源污染防治，建议未来重点开展以下工作：



## **（一）尽快建立基于大气质量改善的非道路移动源污染防治管理体系**

### **1、加强环保部门对整个移动污染源的统一监管**

加强国务院环境保护主管部门对整个移动污染源的统一环保监管职能，明确非道路移动机械和船舶污染防治的相关部门责任和部门间职责分工。进一步强化生产企业应承担移动源大气污染控制的主体责任。给予主管部门和地方政府在空气污染严重地区实施更严格排放标准和建立排放控制区的授权。加强移动源颗粒物、氮氧化物等大气污染物和温室气体排放的协同控制及统一监管。

### **2、建立国家-地方分工明确的非道路移动机械环保管理模式**

环保部应建立国家新生产非道路移动机械环保达标管理体系，包括信息公开、型式核准、生产一致性、在用符合性、环保召回、环保标志等管理制度。地方环保部门应建立在用非道路移动机械环境管理体系，包括环保定期检验、环保抽查、低排放控制区、环保升级治理、加速淘汰等管理制度。

## **（二）尽快确定国家非道路移动源污染防治路线图**

### **1、制定并实施更严格的排放标准和燃料标准**

对于非道路移动机械，确保国家普通柴油标准按计划实施并强化油品质量监管，尽快制定和实施国家第 IV 阶段非道路移动机械排放标准，以导入氮氧化物和颗粒物排放后处理技术为目标，尽快明确全国和重点区域的标准实施时间表。

尽快制定涵盖沿海和内河船舶的新船国家强制排放标准，制定分阶段实施时间表。考虑到船舶发动机的技术水平和以往国内船舶排放管理上的缺失，对于新建船舶，应跨越式提高排放控制要求，尽早实现与美国第 IV 阶段标准等国际先进标准同步。于此同时，亟需制定相应的船用燃料油国家强制标准以确保上述更严格排放标准的顺利实施。

### **2、强化排放标准达标管理，创新标准实施机制**

环保部门应加强能力建设，提高对移动源开展环境监管的管理水平，确保严格实施排放标准。加强制度创新，开展移动源总量控制、绿色领跑者计划、排污交易、环境税费等政策研究，提高排放标准实施的灵活性和有效性。

在空气污染严重、船舶交通密集的水域和港口领海和内水区域尽快建立船舶排放控制区，并择机向国际海事组织（IMO）申请建立覆盖全国沿海专属经济区

的船舶排放控制区（ECA），实施全球最严格的船舶大气污染排放控制要求。

### （三）尽快组织实施“国家清洁柴油机行动计划”

借鉴美国在非道路移动机械污染防治领域的成功经验，结合我国“一带一路”和“中国制造 2025”国家战略，在“十三五”期间尽快组织实施“国家清洁柴油机行动计划”，由国务院牵头，环保部、交通部、住建部、农业部、发改委、工信部、财政部等部门参加，重点开展道路柴油车、工程机械、农业机械、船舶等关键柴油机领域的清洁化专项工程。具体目标是在符合条件的前提下，尽可能多的车辆和发动机、尽可能快地安装颗粒物捕集器等先进技术，使细颗粒物质量浓度和粒数浓度、黑碳等污染物排放大幅削减。最新的道路和非道路低硫燃料控制进程为这些先进技术的应用创造了条件。进一步加快老旧柴油机淘汰进程，出台高排放柴油机限期强制淘汰制度，采取财政支持和市场扶持相结合的手段鼓励提前淘汰老旧柴油机，使用 DPF 等先进技术改善符合条件的在用柴油机排放水平，优化现有非道路移动源车队结构，从本质上减少颗粒物和黑碳排放。加快船舶岸电设施建设与使用力度，在港作船、公务船、短途固定航线船舶中推广天然气等清洁能源船舶应用。

此报告由“应对气候变化与大气污染治理协同控制政策研究”

专题政策研究项目组提供

## 参考文献

- [1] AEA. 2009. Cost Benefits Analysis to Support the Impact Assessment Accompanying the Revision of Directive 1999/32/EC on the Sulphur Content of Certain Liquid Fuels [R]. Report to European Commission.
- [2] Bond T C, Doherty S J, Fahey D W, et al. 2013. Bounding the role of black carbon in the climate system: a scientific assessment [J]. *Journal of Geophysical Research*, 118: 5380-5552.
- [3] Bond T C, Streets D G, Yarber K F, et al. 2004. A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 345:1149-1165.
- [4] Brink S, Godfrey H, Kang M, et al. 2013. Methane mitigation opportunities in China [R]. The Woodrow Wilson School's Graduate Policy Workshop.
- [5] Climate and Clean Air Coalition (CCAC) Annual Report 2013-2014. 2014. [EB/OL]. [http://ccacoalition.org/docs/pdf/CCAC\\_Annual\\_Report\\_2013-2014.pdf](http://ccacoalition.org/docs/pdf/CCAC_Annual_Report_2013-2014.pdf)
- [6] CCAC. 2015. Initiatives [EB/OL]. <http://www.unep.org/ccac/Initiatives>.
- [7] Fan, J., Rosenfeld, D., Yang, Y., Zhao. C., Leung, L.R., Li, Z. 2015. Substantial contribution of anthropogenic air pollution to catastrophic floods in Southwest China [J]. *Geophysical Research Letters*. 42 (14): 6066–6075
- [8] Guus J M, Velders G J, David W, et al. 2009. The large contribution of projected HFC emissions to future climate forcing [J]. *Proceedings of the national academy of sciences USA*, 106: 10949-10954.
- [9] IPCC Working Group I contribution to AR 5. 2013. Climate Change 2013: The physical science basis [EB/OL]. <http://www.climatechange2013.org/>.
- [10] Jacobson A, Lam N L, Bond T C, et al. 2013. Black Carbon and Kerosene Lighting: An Opportunity for Rapid Action on Climate Change and Clean Energy for Development [M]. Washington DC: The Brookings Institution.
- [11] Lim, S. S., Vos, T., Flaxman, A. D., Danaei, G., Shibuya, K., et al. 2012. A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990–2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010 [J]. *The Lancet*, 380(9859): 2224–60.
- [12] Litehauz, Daniel A. Lack, Jørgen Thuesen, et al. 2012. Investigation of appropriate control measures (abatement technologies) to reduce black carbon emissions from international shipping.
- [13] Lu Z, Zhang Q, Streets D G. 2011. Sulfur dioxide and primary carbonaceous aerosol emissions in china and India, 1996-2010 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11: 9839-9864.

- [14] Ni M J, Huang J X, Lu S Y, et al. 2014. A review on black carbon emissions, worldwide and in china [J]. *Chemosphere*, 107: 83-93.
- [15] Ohara T, Akimoto H, Kurokawa J, et al. 2007. An asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980-2020 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7: 4419-4444.
- [16] Olivier J G J, Van Aardenne J A, Dentener F, et al. 2005. Recent trends in global greenhouse gas emissions: Regional trends and spatial distribution of key sources, in: *Non-CO2 Greenhouse Gases (NCGG-4)*. A. van Amstel (coord.), Millpress, Rotterdam, 325-330.
- [17] Port of Long Beach. 2014. Air Emission Inventory-2013[EB/OL]. <http://www.polb.com/environment/air/emissions.asp>.
- [18] Port of Los Angeles. 2015. 2005-2014 Air Quality Report Card [EB/OL]. [https://www.portoflosangeles.org/pdf/2014\\_Air\\_Quality\\_Report\\_Card.pdf](https://www.portoflosangeles.org/pdf/2014_Air_Quality_Report_Card.pdf).
- [19] Shen G, Yang Y, Wang W, et al. Emission factors of particulate matter and elemental carbon for crop residues and coals burned in typical household stoves in china [J]. *Environ. Sci. Technol.*, 44: 7157-7162.
- [20] Subramanian R, Winijkul E, Bond T, et al. 2009. Climate-relevant properties of diesel particulate emissions: Results from a piggyback study in Bangkok, Thailand [J]. *Environ. Sci. Technol.*, 43:4213-4218.
- [21] Streets D G, Bond T C, Carmichael G R, et al. 2003. An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000 [J]. *Journal of geophysical research*, 108(D21): 8809.
- [22] UNEP. 2011. Integrated Assessment of Black Carbon and Tropospheric Ozone: Summary for Decision Makers [EB/OL]. [http://www.unep.org/dewa/Portals/67/pdf/BlackCarbon\\_SDM.pdf](http://www.unep.org/dewa/Portals/67/pdf/BlackCarbon_SDM.pdf), 2011.
- [23] UNEP. 2011. Near-Term Climate Protection and Clean Air Benefits for Controlling Short-Lived Climate Forcers [EB/OL]. [http://www.unep.org/pdf/Near\\_Term\\_Climate\\_Protection\\_&\\_Air\\_Benefits.pdf](http://www.unep.org/pdf/Near_Term_Climate_Protection_&_Air_Benefits.pdf).
- [24] UNEP. 2011. HFCs: A Critical Link in Protecting Climate and the Ozone Layer—A UNEP Synthesis Report [EB/OL]. [http://www.unep.org/dewa/Portals/67/pdf/HFC\\_report.pdf](http://www.unep.org/dewa/Portals/67/pdf/HFC_report.pdf).
- [25] USEPA. 2012. Report to Congress on Black Carbon: Department of the Interior, Environment, and Related Agencies Appropriations Act [EB/OL]. [http://www3.epa.gov/blackcarbon/2012report/fullreport.pdf#\\_ga=1.170403620.502094011.1445240443](http://www3.epa.gov/blackcarbon/2012report/fullreport.pdf#_ga=1.170403620.502094011.1445240443).
- [26] Velders G J, Ravishankara A R, Miller M K, et al. 2012. Preserving Montreal Protocol Climate Benefits by Limiting HFCs [J]. *Science*, 335: 922-923.
- [27] Wang R, Tao S, Wang, W, et al. 2012. Black carbon emissions in china from 1949 to 2050 [J]. *Environmental Science and Technology*, 46: 7595-7603.
- [28] Zhang B, Chen G Q. 2014. Methane emissions in china 2007 [J]. *Renewable and*

- [29] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, et al. 2009. Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission [J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 9: 5131-5153.
- [30] ZhaoY, Zhang J, Nielsen C. 2013. The effects of recent control policies on trends in emissions of anthropogenic atmospheric pollutants and CO<sub>2</sub> in china [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 13: 487-508.
- [31] 蔡博峰, 高庆先, 李中华, 等. 中国城市污水处理厂甲烷排放因子研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 4: 118-124.
- [32] 曹国良, 张小曳, 龚山陵, 等. 中国区域主要颗粒物及污染气体的排放源清单[J]. 科学通报, 2011, 03: 261-268.
- [33] 陈颖军, 姜晓华, 支国瑞, 等. 我国民用燃煤的黑碳排放及控制减排[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2009, 11: 1554-1559.
- [34] 伏晴艳, 沈寅, 张健. 上海港船舶大气污染物排放清单研究[J]. 安全与环境学报, 2012, 5: 57-63.
- [35] 高庆先, 刘俊蓉, 李文涛, 等. 中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示[J]. 环境科学, 2015, 04: 1141-1147.
- [36] 韩甲业, 应中宝. 我国低浓度煤矿瓦斯利用技术研究[J]. 中国煤层气, 2012, 6: 39-41.
- [37] 韩甲业. 我国报废煤矿瓦斯抽采利用现状及潜力[J]. 中国煤层气, 2013, 4: 23-25+12.
- [38] 胡建信, 方雪坤, 吴婧, 等. 中国控制和管理氢氟碳化物的机遇与挑战[J]. 气候变化研究进展, 2014, 2: 142-148.
- [39] 黄德生, 张世秋. 京津冀地区控制 PM<sub>2.5</sub> 污染的健康效益评估[J]. 中国环境科学, 2013, 1: 166-174.
- [40] 李丽平, 高颖楠, 周婷, 等. 借鉴美国经验控制我国船舶大气污染[J]. 环境保护, 2015, 1: 20.
- [41] 林慧, 崔永丽, 肖学智, 等. 三氟甲烷减排可行性分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, S3: 13-15.
- [42] 刘俊蓉, 马占云, 张艳艳, 等. 我国城市生活垃圾填埋处理 CH<sub>4</sub> 排放关键因子[J]. 环境科学研究, 2014, 9: 975-980.
- [43] 刘文革, 桑逢云, 刘馨, 等. 煤矿瓦斯抽采方法评估系统的研究与实现[J]. 中国煤层气, 2013, 2: 3-6+31.
- [44] 马占云, 李海玲, 岳波, 等. 生活垃圾填埋场覆盖层温室气体 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 释放规律及其相关性研究[J]. 环境工程技术学报, 2014, 5: 399-405.
- [45] 马东, 丁焰, 尹航, 等. 我国船舶港口空气污染防治现状及展望[J]. 环境与可持续发展, 2014, 6: 4-44.
- [46] 杨礼荣, 竹涛, 高庆先. 我国典型行业非二氧化碳类温室气体减排技术及对策[M]. 北京: 中国环境出版社, 2014.
- [47] 张楠, 覃栋, 谢绍东. 中国黑碳气溶胶排放量及其空间分布[J]. 科学通报, 2013, 58: 1855-1864.
- [48] 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾-霾成因及其治理的思考[J]. 科学通报, 2013, 13: 1178-1187.