



汽车空调HFCs制冷剂

减排绿皮书



北京大学环境科学与工程学院

2018年12月

汽车空调 HFCs 制冷剂 减排绿皮书



北京大学环境科学与工程学院

主编

胡建信

副主编

张剑波

其他参编人员

别鹏举 苏燦燦 万丹 张兆阳 高丁 李一希 安民得 伊丽颖 许伟光

致谢

北京大学自 1990 年代，持续、深入地开展了系列 HFCs（氢氟碳化物）的研究，本报告是系列重要成果之一。本研究得到了生态环境部和科技部的大力支持与指导，相关管理部门、高校、科研院所、行业协会、企业、以及领域专家、学者为本研究的开展给予了关注与大力支持，为本报告的编制和完善提供了宝贵意见。在此谨向这些机构与个人表示真诚的谢意！

特别感谢：

陈士华 中国汽车工业协会

陈江平 上海交通大学

薛庆峰 中国汽车工业协会空调分会

张建君 浙江化工研究院

姚 波 中国气象局气象探测中心

梅胜放 中国石化工业协会

目 录

摘要

中国汽车空调 HFCs 制冷剂应用现状和排放	3
中国汽车空调行业未来 HFC-134a 排放预测	6
主要发达国家减少汽车空调 HFCs 排放的法规	9
汽车空调 HFCs 制冷剂的减排替代技术	12
中国汽车空调行业减排温室气体的气候效益	18
汽车空调行业减排 HFC-134a 的机遇	21

缩略语表

AGAGE	Advanced Global Atmospheric Gases Experiment	先进的全球大气实验监测网
ASHRAE	American Society of Heating Refrigerating and Airconditioning Engineer	美国采暖、制冷与空调工程师学会
CAFÉ	Corporate Average Fuel Economy Standard	燃料有效性标准
CFCs	Chlorofluorocarbons	氟氯化碳
EPA	United States Environmental Protection Agency	美国国家环境保护局
GWP	Global Warming Potential	全球变暖潜势
HFCs	Hydrofluorocarbon	氢氟碳化物
HFOs	Hydrofluoroolefins	氟烯烃
IGSD	Institute for Governance & Sustainable Development	管理和可持续发展研究院
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	政府间气候变化专门委员会
IPCC/TEAP	Technology and Economic Assessment Panel	技术与经济评估专家委员会
LCCP	Life-Cycle Climate Performance	生命周期气候特性
MAC	Mobile Air Conditioner	汽车空调
MEPC	Maritime Environment Protection Committee	海洋环境保护委员会
MVP	Multi-Purposed Vehicle	多用途车辆
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration	美国国家公路交通安全管理局
ODP	Ozone Depletion Potential	损耗臭氧潜势
ODS	Ozone Depletion Substance	损耗臭氧物质
REACH	REGULATION concerning the Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals	欧盟法规《化学品的注册、评估、授权和限制》
SAE	Society of Automotive Engineers	美国汽车工程师学会
SNAP	Significant New Alternatives Policy Program	新替代品政策计划
SUV	Sports Utility Vehicle	运动型多功能车
UNEP	United Nations Environment Programme	联合国环境署

摘要

中国汽车空调行业是保护臭氧层和减缓气候变化行动的重要贡献者。自 20 世纪 90 年代，1,1,1,2- 四氟乙烷 (HFC-134a) 作为汽车空调制冷剂二氟二氯甲烷 (CFC-12) 的替代品得到广泛应用。截止到 2017 年，汽车空调行业制冷剂 CFC-12 的替代，累计减少和避免了 10 万 (ODP) 吨以上消耗臭氧层物质的排放以及相当于 10 亿吨以上二氧化碳当量温室气体的排放。

然而，国际社会于 2016 年 10 月达成的《蒙特利尔议定书（基加利修正案）》对 HFC-134a（全球变暖潜势 GWP=1430）的减排提出了要求。中国汽车产销量位居全球第一，未来 HFC-134a 减排潜力巨大，以《基加利修正案》HFC-134a 最低减排要求预测，中国在 2024-2050 年之间至少可以避免 10.95 亿吨（年均约 4100 万吨）二氧化碳当量温室气体的消费（排放）；如果替代技术条件允许，采取更为积极的减排行动（如 2020 年开始替代 HFC-134a），则预计可累计减少 HFC-134a 消费约 132.0 万吨，折合 18.87 亿吨二氧化碳当量温室气体（年均约 7000 万吨）。

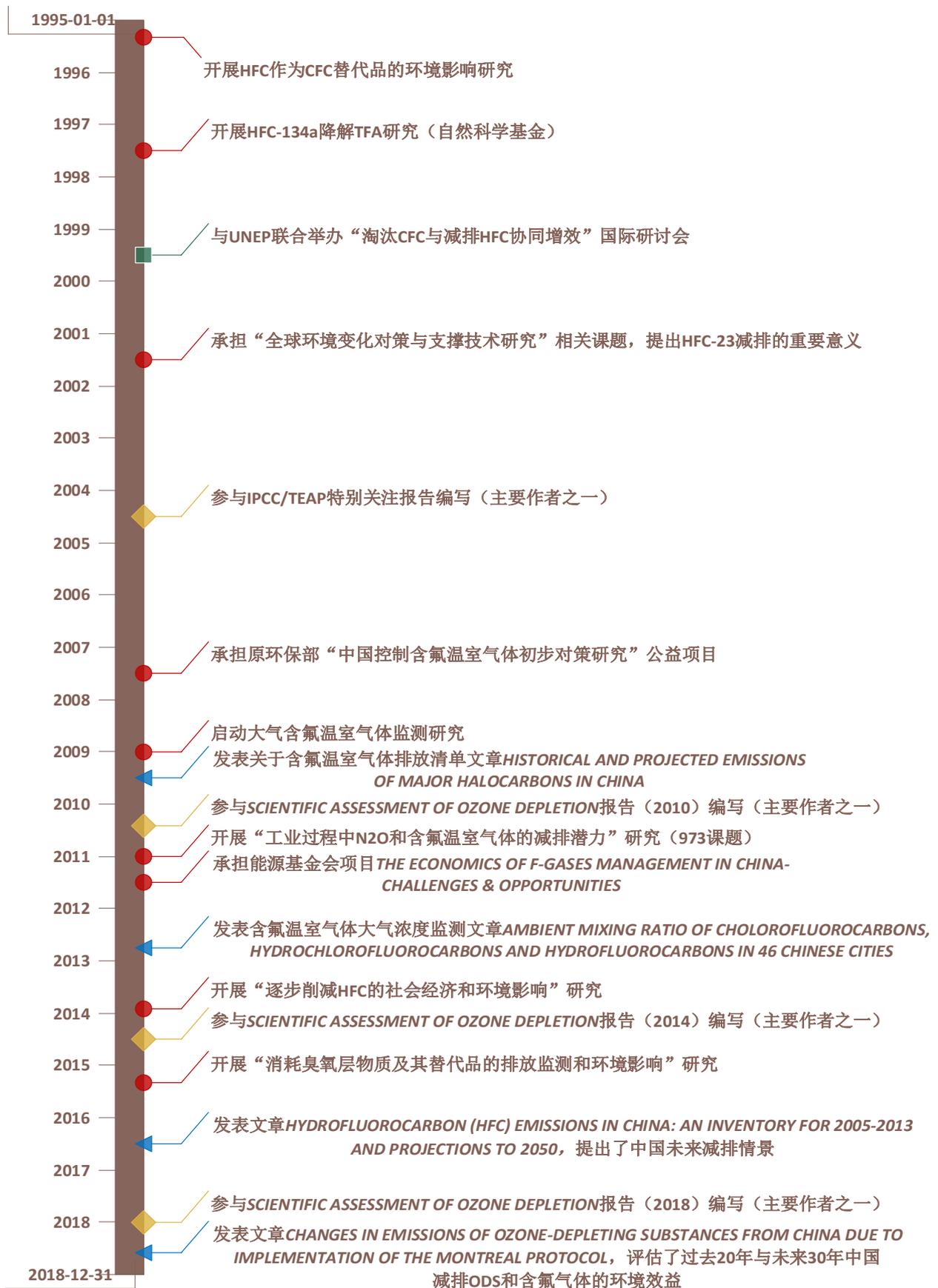
HFC-134a 作为汽车空调制冷剂目前已有多种可替代的低 GWP 值替代品，如 2,3,3,3- 四氟丙烯 (HFO-1234yf)、1,1- 二氟乙烷 (HFC-152a)、二氧化碳 (CO₂) (R744) 等工质，其中 HFO-1234yf 已经进入市场化应用阶段，其它工质的开发也取得了显著进展。针对汽车空调采用上述工质的生命周期气候性能 (LCCP) 评估结果显示，HFC-152a 和 HFO-1234yf 的生命周期温室气体排放最低。已有市场化技术显示，采用 HFO-1234yf 替代技术，预计每辆汽车生产成本将增加约 350 元人民币；但伴随着 HFO-1234yf 的市场应用规模持续扩大和规模化生产，则可降低上述增加成本。而其它技术，如 HFC-152a 或者 R744 等正处于研究阶段或市场化过程，增加成本尚难以估算。

欧美日等发达国家已经开始了汽车空调领域 HFC-134a 的减排行动，其策略是率先在新认证车型限制 HFC-134a 的消费，之后逐步扩展到所有新生产车型限制 HFC-134a 的消费使用。除此之外，各国还针对在用汽车空调的 HFCs 排放做出了限制规定。不完全统计，目前全球采用非 HFC-134a 空调制冷剂的小型乘用车已达 6 千万辆。

作为汽车生产大国，中国制订了到 2020 年逐步实现向发达国家出口中国品牌汽车并逐步提升中国品牌影响力的战略目标，在车辆配置上装配低 GWP 值制冷剂空调是实现上述目标的基本要求之一。中国是最早生产 HFO-1234yf 的国家之一，中国企业也正在研究开发其它替代品，有能力满足替代市场的需求，这为中国汽车空调行业开展替代 HFC-134a 的行动创造了条件。

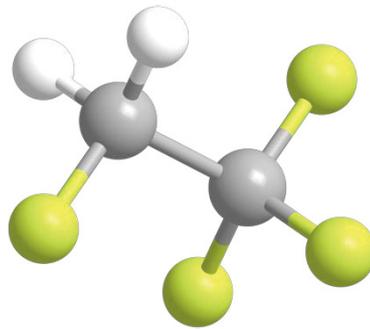
限制 HFC-134a 的供应（如配额控制）是《基加利修正案》的要求，中国汽车行业在技术条件成熟的情况下也应尽早开展 HFC-134a 作为汽车空调制冷剂替代行动，为《巴黎协定》下国家温室气体减排承诺做出行业应有的贡献。首先，中国企业已经有条件开展替代 HFC-134a 的行动，也正在加大研究开发其它替代品的力度，有望在 HFC-134a 替代品开发和替代品应用方面取得更大的进展。其次，未来中国可以通过采取限制新车型到进而限制全部新车采用高 GWP 值制冷剂 (HFC-134a) 的阶段化措施，同时限制 HFC-134a 的生产和市场供应，以减少汽车空调行业的 HFC-134a 排放。此外，进一步开展 HFC-134a 制冷剂的回收再利用也具有广阔的减排空间，并且可以产生巨大的环境效益。这些举措的实现需要政策推动、市场拉动以及全社会的共同参与。

北京大学开展含氟温室气体研究历程



汽车空调 HFCs 制冷剂减排绿皮书

减排温室气体，减缓气候变化是国际社会的共同意愿，而减排 HFCs 是全球共同关注的热点之一，HFCs 已成为目前唯一一类世界各国都设定了减排时间表的温室气体。从 2006 年欧盟公布《含氟温室气体法案》(F-Gas 法规，EC, No842/2006) 开始管控 HFCs、2013 年 6 月中美两国达成关于控制 HFCs 的减排协议，到 2016 年全球在《蒙特利尔议定书》下形成的减排 HFCs 的《基加利修正案》，全球实质性 HFCs 减排行动已经开始。按照《蒙特利尔议定书(基加利修正案)》的实施目标，全球可以避免 0.3-0.5℃ 的升温，这对于减缓气候变化意义重大。在《基加利修正案》的要求下，80% 以上的 HFCs 的应用将被逐步替代，而汽车空调采用的 HFC-134a(1,1,1,2- 四氟乙烷， $GWP_{100}=1430$) 将是最早被替代的该类温室气体之一；这是基于技术、成本和减排效益综合评估的结果，也是目前欧美日等国已做出的选择。



HFC-134a(1,1,1,2- 四氟乙烷)

中国汽车工业近年来发展迅速，从 2011 年汽车年产量跨上 2000 万辆的台阶，到 2017 年汽车产销量已达约 2900 万辆，连续九年蝉联全球第一。预计 2018 年中国汽车保有量将超过 2 亿辆。在 2001 年之前，中国的汽车主要采用 CFC-12 作为空调制冷剂，为保护臭氧层并淘汰消耗臭氧层物质，从 2002 年起中国新生产乘用车全部采用 HFC-134a 作为空调的制冷剂。

汽车空调行业，是中国最早完成 CFCs 淘汰的制冷空调行业。但受此驱动，具有高全球变暖潜力 (GWP) 值的 HFC-134a 成为中国最早生产的 HFCs 之一，也一直是年生产量最高的 HFCs 品种，2016 年其产量超过 14 万吨 (以其 GWP_{100} 折算超过 2 亿吨 CO_2 当量)，约占全球产量 56%。中国 HFCs 的消费和排放正在快速增加且位居全球第一，并将在全球 HFCs 减排行动中承担重要责任，同时扮演前所未有的重要角色。替代汽车空调 HFC-134a 将是中国 HFCs 消费领域率先开展的减少温室气体的行动，这不仅仅是由于该领域具有相当大的减排空间，而且因为中国有责任引领全球开展这一领域的减排行动。

经过几十年的发展，中国汽车产销量已稳列世界首位，保有量也在快速增加；而汽车空调是乘用车、货车和商用车的必要装备。中国汽车空调行业在 2001 年完全替代 CFC-12 制冷剂之后，自 2002 年开始中国乘用车全部选择了 HFC-134a 作为空调制冷剂，而商用车中部分客车和全部货车也采用了 HFC-134a 作为空调制冷剂。

根据中国汽车工业协会 2016 年的研究报告《中国汽车空调行业高 GWP 值的 ODS 替代品 (HFCs) 行业管控战略研究》，中国汽车空调制冷剂的消费量在 2016 年超过 3 万吨（其中新车灌注近 2 万吨，维修再灌注约 1 万余吨），这一消费量折合 GWP 值已经超过 4000 万吨 CO₂ 当量。

表 1 中国各类车型近年生产量（单位：万辆）

年份	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
1、乘用车	1,449	1,552	1,809	1,992	2,108	2,442	2,481
轿车	1,014	1,077	1,210	1,248	1,163	1,211	1,194
MPV	51	49	132	197	213	249	205
SUV	160	200	303	417	624	915	1,029
交叉型	224	227	164	130	108	67	53
2、商用车	393	375	403	380	342	370	421
客车	48	51	56	61	59	57	53
大型客车		8	8	8	9	9	9
中型客车		9	9	8	8	10	9
轻型客车		34	39	45	43	36	35
货车	345	324	347	320	283	315	368
重型货车		59	76	75	54	74	115
中型货车		29	29	25	20	23	23
轻型货车		183	189	166	155	155	174
微型货车		54	53	54	54	63	56
汽车总计	1,842	1,927	2,212	2,372	2,450	2,812	2,902

* 数据来自《中国汽车工业年鉴》

HFC-134a 作为汽车空调的制冷剂，其排放主要存在于 4 个环节 (见图 1):

- (1) 生产 HFC-134a 和汽车空调安装时产生的初始排放。
- (2) 汽车运行中使用汽车空调时产生的运行排放。
- (3) 汽车空调在故障维修过程中产生的维修排放。
- (4) 汽车报废时产生的处置排放。

参考《IPCC2006 年温室气体排放计算导则》和调查结果，不同环节的制冷剂排放因子如图所示。

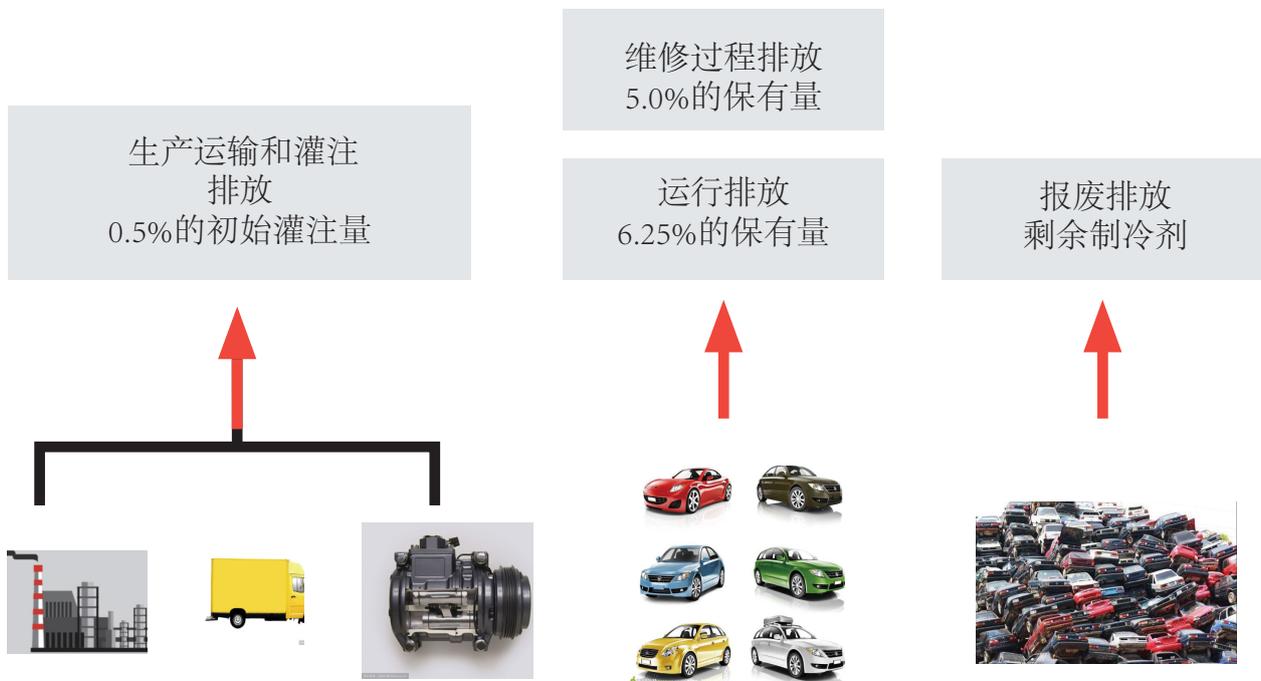


图 1 汽车空调制冷剂排放环节及其排放因子

HFC-134a 作为制冷剂排放具有一定的延迟性。北京大学自 2005 年以来根据不同的方法针对中国汽车空调的 HFC-134a 排放进行了估算 (见图 2)。主要估算方法和部分结果见 Su 的文献所述;沿用 Su 的方法进行估算，中国目前由于汽车空调产生的温室气体年排放量超过 2000 万吨 CO₂ 当量。由于中国汽车保有量的快速增加导致汽车空调制冷剂维修需求叠加新车空调的罐装需求，HFC-134a 的需求量增长速率超过新车增长速率，从而导致温室气体排放量快速增长。

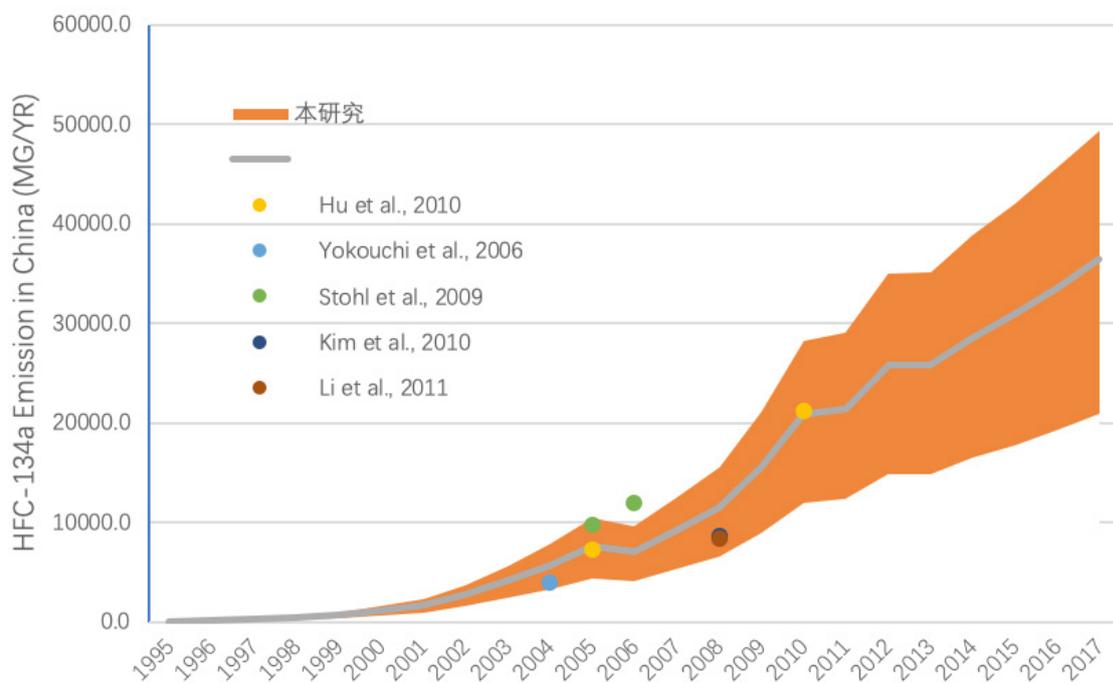


图 2 中国汽车空调不同方法 HFC-134a 排放估算结果 (改自 Su. 2015)

在汽车空调排放量逐年增大的情景下，全球 HFC-134a 的大气浓度正在升高，全球 AGAGE 监测网以及中国监测站的数据 (HFC-134a 大气浓度) 都显示了同样的增长趋势。

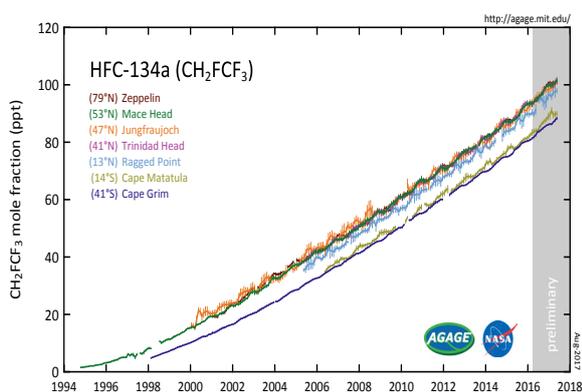


图 3 全球背景站点观测大气中 HFC-134a 浓度变化

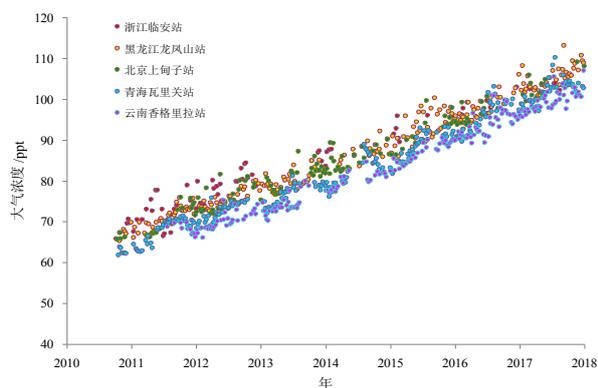


图 4 中国气象局 5 个本底站 HFC-134a 本底浓度

数据来源：AGAGE 网站 (<https://agage.mit.edu/>) 和中国气象局气象探测中心

未来 HFC-134a 排放取决于汽车保有量和未来的汽车需求，以及采用的制冷剂及其不同应用环节的泄漏情况。

根据 2017 年工业和信息化部、发展改革委和科技部发布的《汽车产业中长期发展规划》，预计中国汽车产销量仍将保持平稳增长，将于 2020 年和 2025 年分别达到 3000 万辆和 3500 万辆左右。按照上述目标，中国汽车保有量将持续上升，对空调制冷剂的需求也将持续增加。北京大学 Su 基于中国经济增长预测和不同发达国家处于不同经济发展阶段人均汽车保有量的水平预测，预测在 2030 年之后中国汽车保有量将达到峰值并稳定在一定水平，2025 年汽车产量将达到 3500 万辆，2030 年新车产量将接近 4000 万辆。

基于上述预测，可计算汽车空调在不同环节的 HFC-134a 排放（计算参数见表 2）。假设没有《基加利修正案》，除大型客车之外，其它车辆继续采用 HFC-134a 作为制冷剂，中国汽车空调行业的 HFC-134 排放量将逐年增加，在 2040 年前后达到稳定的排放水平（相对于保有量达到稳定水平的 2030 年延迟 10 年），HFC-134a 年排放约折合 7700 万吨 CO₂ 当量；2021-2050 年累计排放折合 19.42 亿吨 CO₂ 当量。不受控情景下汽车空调领域不同环节 HFC-134a 的逐年排放如图 5 所示。

表 2 汽车空调行业所用参数

	本报告采用值	进入市场年份	逐年报废率 ^f
汽车平均寿命 ^a	10年	第一年	0.0000
轿车/货车灌装量	0.800千克/辆 (1995-2002) ^b	第二年	0.0000
	0.536千克/辆 (2005以后) ^c	第三年	0.0000
客车灌装量	3.2千克/辆 (1995-2002) ^b	第四年	0.0000
	2.1千克/辆 (2005以后) ^c	第五年	0.0000
初次灌装排放率 ^b	0.5%	第六年	0.0000
运行过程排放率 ^d	6.25%	第七年	0.0000
维修率 ^e	5%	第八年	0.1000
维修排放率 ^e	100%	第九年	0.1000
维修充注饱和度 ^e	90%	第十年	0.8000
报废排放率 ^e	100%		

a:MEPC,2003. b:IPCC,2006. c: 刘杰等, 2008.(2002-2005 之间制冷剂灌装量线性递减)
d: 陈江平等, 2008. e: 《汽车行业氢氟碳化物 (HFCs) 减排路径研究》中国汽车技术研究中心
f: 根据统计年鉴中数据计算所得。

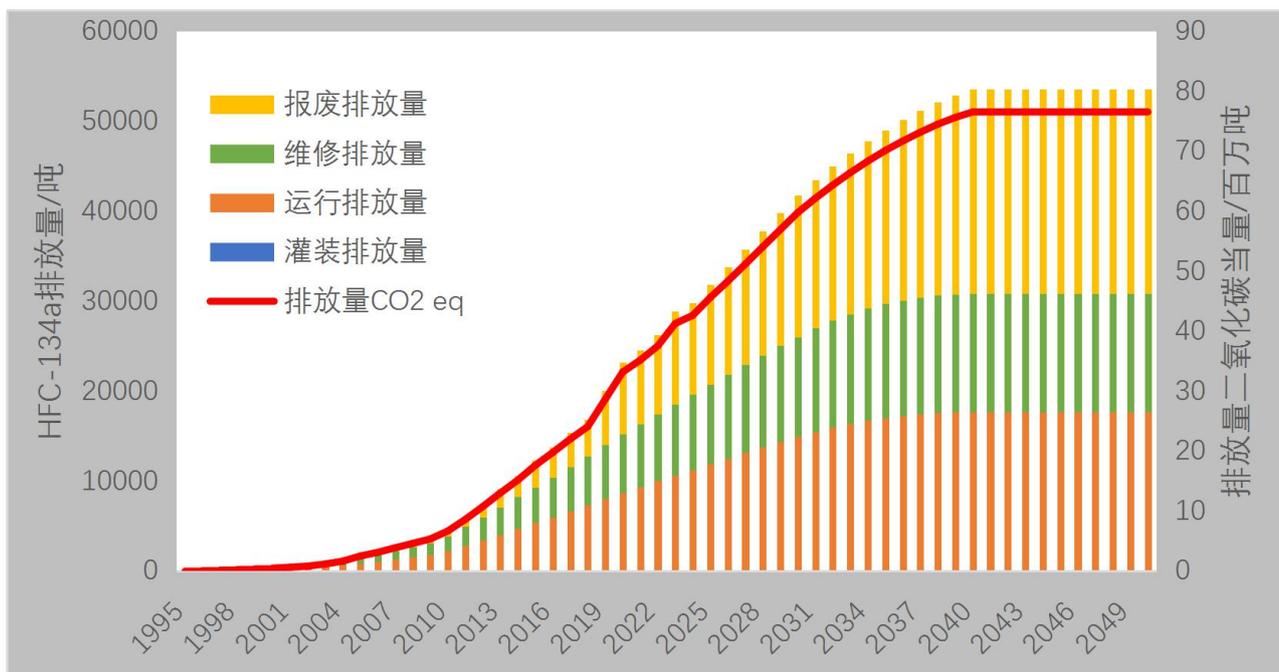


图 5 汽车空调行业预测不受控情景下 HFC-134a 排放

在已经开展的控制 HFCs 行动中，各国均采用率先减排汽车空调制冷剂 HFC-134a 的策略，这主要包括欧美日等发达国家和地区。

3.1 欧盟

欧盟于 2006 年颁布了《含氟温室气体法案》，并率先公布《关于机动车空调系统温室气体排放控制指令 (2006/40/EC)》。指令对汽车空调减排 HFCs 分为两步：(1) 减少泄漏。对使用全球变暖潜能值 GWP>150 制冷剂的汽车空调系统，要进行氟化物泄漏量控制，单蒸发器系统每年排放的含氟温室气体不超过 40 克，或者双蒸发器系统每年排放的含氟温室气体不超过 60 克。新认证车型从 2008 年 6 月 21 日起强制执行，新生产车辆从 2009 年 6 月 21 日起强制执行。(2) 禁止使用全球变暖潜能值 GWP>150 的氟化物制冷剂。其中，新认证车型从 2011 年 1 月 1 日起强制执行，新生产车辆从 2017 年 1 月 1 日起强制执行。

3.2 美国

美国控制 HFCs 排放的法规和政策主要依据《美国清洁空气法案》，美国环保署 (EPA) 2015 年 7 月修订发布的《重要新替代品清单 (Significant New Alternatives Policy, SNAP)》中，将 HFC-134a 列入汽车空调的不可接受之替代品之中，并规定从 2021 年开始实施；这一规定由于对替代品存在争议而面临修改。另外，美国国家公路交通安全管理局 (NHTSA) 和环保署 (EPA) 联合颁布的法令《燃料有效性标准 (CAFE)》规定，自 2017 年起，汽车空调采用低 GWP 制冷剂可以积分抵消一定量油耗估算，从而提升了汽车评估的气候友好性。2010 年，美国加州制订了针对 2017 年车型的第三代“低排放车”标准。

该标准要求从 2017 年起，全部车型必须采用 GWP<150 的空调制冷剂；同时还要求控制制冷剂泄漏，标准要求第三代“低排放车”空调系统制冷剂泄漏率小于 9 克 / 年。

3.3 日本

2014 年日本对《碳氟化合物回收与销毁法》进行了修订，并更名为《碳氟化合物合理使用和妥善管理法》，法律明确规定从 2023 年开始对新生产十座或以下乘用车车型的空调系统禁止使用 HFC-134a 作为制冷剂。修订版本于 2015 年 4 月 1 日生效实施。

此外，日本法律在制冷剂回收方面要求严格。依据 2002 年 4 月 1 日生效的《碳氟化合物回收与销毁法》，其相关的《关于已使用汽车再资源化的法律》于 2005 年 1 月 1 日开始实施。法律规定汽车再资源化机构负责汽车空调制冷剂的回收处理，其主要职责包括 (1) 为实现氟里昂类废品的接收和再资源化 (分解) ，建立物流和回收再利用 (分解) 体制；(2) 向氟里昂类回收单位和汽车拆解厂支付回收费；(3) 向氟里昂类分解工厂支付处理费。

表 3 欧美日汽车空调系统 HFCs 法规对比

国家	管控范围	内容及淘汰时间
欧盟	M1类及N1类产品空调系统	禁止使用GWP>150的制冷剂，新认证车型从2011年1月1日起强制执行，新生产车辆从2017年1月1日起强制执行。
美国	轿车和轻型卡车空调系统	2017年，低GWP制冷剂可以作为积分抵扣油耗水平；2021年开始淘汰，2026年新生产车型全面禁止使用HFC-134a。
日本	十座或以下乘用车空调系统	2023年新生产车型开始禁止使用HFC-134a。

3.4 小结

欧美日的相关法规对比如表 3 所示。欧美日等发达国家已经开始了汽车空调领域 HFC-134a 的减排行动，其策略都是率先在新认证车型限制 HFC-134a 的消费，之后逐步扩展到所有新生产车型限制 HFC-134a 的消费使用。除此之外，各国还针对在用汽车空调的 HFCs 排放做出了限制规定。

根据管理和可持续发展研究院 (IGSD) 和联合国环境署 (UNEP) 保护臭氧层公约秘书处发布的报告《替代高 GWP 值 HFCs》(Alternatives to High-GWP Hydrofluorocarbons), 基于汽车使用区域的气候条件和汽车运行工况, 包括夏天的时间长度和平均温度水平、交通状况、甚至汽车的颜色, 可以估算出汽车空调耗能约占汽车整体能耗的 3-20%。因此, 制冷剂的 GWP 值及其能效对气候变化的影响均十分重要。中国幅员辽阔, 从南到北气候条件差异大, 预计汽车空调耗能情形与上述报告数据相似。

自 2006 年欧盟发布 MAC 指令后, 开发应用替代 HFCs 制冷剂的行动已取得重要进展, 首要替代品为 HFO(氟烯烃)类产品。到 2018 年, 采用低 GWP 值制冷剂(主要是 HFO-1234yf, 2,3,3,3-四氟丙烯)的汽车已经超过 6000 万辆, 部分中国品牌产品尤其是出口欧美的车型也开始采用 HFO-1234yf 作为空调制冷剂。

历经十余年的发展, 替代汽车空调制冷剂 HFC-134a 的产品开发取得了巨大进展, 基本信息归纳如下表所示。

表 4 中所描述的替代品均为低 GWP 值替代品, 目前被广泛商业化的是采用 HFO-1234yf 作为制冷剂的空调系统。采用 CO₂ 的汽车空调研究从 1990 年开始, 采用 HFC-152a 作为空调制冷剂的研究始于 2002 年; 上述两类替代技术研发虽然已经取得积极进展, 但目前还没有规模化商业化的应用产品。

表 4 主要汽车空调制冷剂替代品

制冷剂	GWP	可燃性	相对能效	制冷剂成本 (元/kg)	市场状态	采用该技术的企业	已商业化地区
原有工质 HFC-134a	1430	1	基线	48			所有国家
HFO-1234yf	4	2L	相等	400	商业化	阿尔法·罗密欧, 宝马, 克莱斯勒雪铁龙, 通用, 本田, 现代, 罗孚, 起亚, 莲花, 玛莎拉蒂, 马自达, 三菱, 日产, 标致, 雷诺, 特斯拉, 丰田, 斯巴鲁, 铃木	欧洲、日本、韩国、美国、中国等
HFC-152a	138	2	10%提高	13	试验性	菲亚特, 通用汽车, 塔塔, 沃尔沃	尚没有
CO ₂	1	1	在高温环境下更差	<7	试验性	戴姆勒等	尚没有
‘AC6’ blend (CO ₂ /HFC/HFO)	~130		相等	?	测试中	美西, 捷豹路虎, 雷诺日产, 罗宾娜, 博世	尚没有

* ASHRAE 34 标准 :1- 不可燃 ;2L- 弱可燃 ;2- 可燃 ;3- 极易燃 / 易爆。

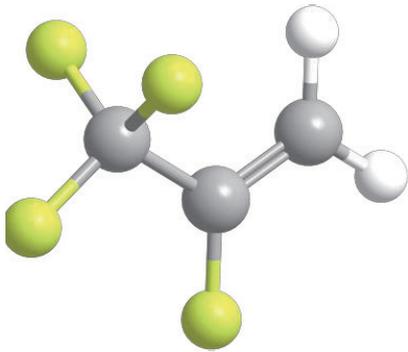
表 5 主要工质的大气寿命、消耗臭氧潜值 (ODP) 与 GWP

	分子式	ODP	GWP	会降解产生三氟乙酸?
CFC-12	CCl ₂ F ₂	1	10,900	会
HFC-134a	CF ₃ CH ₂ F	0	1,430	会
HFC-152a	CH ₃ CHF ₂	0	140	不会
HFO-1234yf	CF ₃ CF=CH ₂	0	4	会
CO ₂	CO ₂	0	1	不会

4.1 HFO-1234yf

HFO-1234yf($\text{CH}=\text{CF}_2\text{CF}_3$, 2,3,3,3-四氟丙烯)具有轻微的可燃性,作为一种新型化学品,HFO-1234yf先后通过了SNAP、欧洲REACH和中国新物质登记等法规评估。

受欧洲《关于机动车空调系统温室气体排放控制指令(2006/40/EC)》的影响,欧洲汽车生产商率先采用HFO-1234yf作为空调制冷剂。美国汽车商为响应燃料有效性标准(CAFE)和EPA的SNAP计划,大量新生产的汽车空调也采用了HFO-1234yf。日本也开始生产采用HFO-1234yf作为制冷剂的汽车空调。据报道,采用HFO-1234yf作为空调制冷剂的汽车品牌有奥迪、BMW、别克、雪佛兰、福特、通用、本田、现代、捷豹和陆虎、凌志、林肯、丰田和大众等。



HFO-1234yf

HFO-1234yf的环境影响也一直被广泛关注,尽管其温室效应低($\text{GWP}=4$)且不破坏臭氧层,但其大气降解可产生比HFC-134a多5倍的三氟乙酸。根据目前的估算和预测,如果采用HFO-1234yf完全替代HFC-134a,环境中三氟乙酸的积蓄将显著增加。虽然目前认为三氟乙酸的显著增加还不会对生态环境系统产生影响,但这一现象值得高度关注,以防范其尚未确定的影响。

采用HFO-1234yf的汽车空调与原HFC-134a的空调技术最接近,但制造HFO-1234yf空调系统会增加制造成本,其中包括制冷剂填充设备需要针对轻微可燃性气体增加的设备、升级的蒸发器、新的特制阀门和相对昂贵的制冷剂(HFO-1234yf)。对装载填充量为600克的汽车空调车而言,每辆汽车增加成本约为40-75美元(折合人民币约350元);对填充量为1.2千克的空调,每辆汽车的增加成本为75-100美元。由于与HFC-134a能效接近,燃油成本不变。在汽车的整个生命周期过程中,空调维修成本也会相对增加,这将取决于维修时HFO-1234yf的价格。

4.2 CO₂(R744)

早在 2007 年戴姆勒公司曾承诺开发商业化的 CO₂ 空调系统。CO₂ 是非可燃高压制冷剂，CO₂ 空调系统的设计需要满足国际上通用的高压气体标准以避免压缩机系统发生爆炸。CO₂ 空调系统的增加成本主要是因为高压要求导致涉及的零部件成本增加，而 CO₂ 作为制冷剂其自身成本较低。目前由于缺乏商业化数据，无法确切评估每台汽车空调的增加成本。另外由于压缩机的总重量增加，也将增加汽车运行的额外能耗。



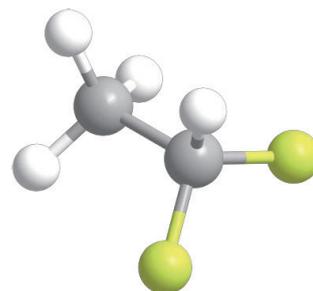
R744(CO₂)

由于在相对高温环境下 CO₂ 作为制冷剂的能效下降，尤其是为满足高压防爆要求导致压缩机系统重量增加，目前来看，CO₂ 空调系统并不比 HFO-1234yf 空调系统造价便宜，在制冷能效方面也不占优势。另外，空调系统由于运行气压高，也会产生昂贵的零部件替换和维修成本。而对中国正在大力发展的电动汽车而言，预计 CO₂ 空调系统在其空调制热过程相对具有能效优势。

4.3 HFC-152a

HFC-152a(CH₃CHF₂, 1,1-二氟乙烷) 作为制冷剂的优势之一是价格便宜，也不像 HFC-134a、HFO-1234yf 和 AC6 等在大气中可降解产生三氟乙酸从而可能导致其他环境问题；且相对具有能效优势。

但是 HFC-152a 具有可燃性，同时 HFC-152a 空调系统的增加成本来自于增加的零部件（热交换器、冷却液泵和额外控制设备）。不考虑制冷剂的成本，每台汽车的增加成本约为 30 美元。



HFC-152a

HFC-152a 作为制冷剂具有可节省燃油、制冷剂价格低、系统效率更高和可利用减速达到制冷的潜力。但目前 HFC-152a 的 SAE(Society of Automotive Engineers) 标准尚不完善,其作为汽车空调制冷剂的产品也没有市场化。

4.4 Mexichem AC6 (混合工质)

AC6 是具有适度可燃性的混合制冷剂,包括 CO₂、HFC-134a 和 HFO-1234ze (6/9/85)。相比于 HFO-1234yf, 其优势是具有更低的可燃性和可能更高的冷却能力,但是由于其为混合物,存在制冷能力出现滑移的可能性。

AC6 空调系统的生产成本与 HFO-1234yf 空调系统接近,其制冷剂成本相对 HFO-1234yf 便宜;但在空调使用过程因为制冷剂组分的变化,会导致制冷能力或能源效率下降;而其维修过程中可能需要更换全部制冷剂,这也会带来额外的成本。

4.5 小结

2016 年 3 月,中国汽车技术研究中心针对上述制冷剂的生命周期气候性能 (LCCP) 进行了评估,从表 6 中数据可以看出,由于 HFC-152a 的 GWP 值相对于 HFC-134a 较低,而且制冷性能系数相对于 HFC-134a 较高,所以生命周期排放最低;HFC-1234yf 的 GWP 值相对于 HFC-134a 更低,但制冷性能系数较低一点,所以其运行环节间接排放略高,整个生命周期排放比 HFC-134a 较低,但比 HFC-152a 略高;而 R744 虽然直接排放接近于零,但由于制冷性能最差,间接排放最大,所以生命周期排放最大。综上所述,四种制冷剂生命周期排放对比为 R744>HFC-134a>HFC-1234yf>HFC-152a。需要说明上述分析结果是基于现有可获得参数,伴随技术的进步不同工质的参数可能变化,分析结果也可能同时变化。

表 6 四种制冷剂 LCCP 对比 (千克碳当量)

制冷剂	直接排放	间接排放		LCCP
		间接排放总量	其中, 运行间接排放	
HFC-134a	1080.00	6,937	6,900	8,017
HFC-152a	76.06	6,661	6,624	6,737
HFO-1234yf	2.43	7,213	7,176	7,215
R744	0	10,519	10,488	10,519

注：中型和大型客车在 2002 年之前并非都采用 CFC-12，之后也并不完全是采用 HFC-134a，因而没有纳入减排计算。

汽车空调制冷剂从使用 CFC-12 到 HFC-134a，再到 HFO-1234yf 等低 GWP 值制冷剂，都是一个减排温室气体的过程。由于从 CFC-12 到 HFC-134a，再从 HFC-134a 到 HFO-1234yf 或者其它低 GWP 值的制冷剂，制冷能效变化并不显著，故本部分只分析替换制冷剂所导致的直接减排效益。

5.1 已经实现的减排

中国为保护臭氧层从 2002 年禁止使用 CFC-12(CF₂Cl₂, ODP=1, GWP₁₀₀=10900) 作为汽车空调的制冷剂，采用了 HFC-134a(ODP=0, GWP₁₀₀=1430) 作为替代品；中国汽车空调行业为保护臭氧层做出了积极贡献，同时也已经避免了大量温室气体的排放。从 2002 年到 2017 年，中国累计生产并投入市场的新车约为 2.40 亿辆（其中轿车约 1.21 亿，货车约 0.40 亿）；采用 HFC-134a 替代 CFC-12，单位制冷剂的 GWP 值下降了 87%。此外，客车空调和各类汽车空调维修服务过程也避免了数亿吨 CO₂ 当量的制冷剂排放。相关参数和计算结果见表 7。

表 7 轿车和货车空调行业已经实现的温室气体减排估算

	单位	轿车	货汽	总计
单车制冷剂灌注	克/辆	536	750	
2002-2017 累计车产量	万辆	12,072	3,999	
制冷剂初始灌注量	实物吨	64,706	29,991	94,697
维修再灌注量（假设初始灌注量的 20%）	实物吨	12,941	5,998	18,939
折合 GWP（假设灌注为 CFC-12）	亿吨 CO ₂ 当量	8.46	3.92	12.38
折合 GWP（实际灌注为 HFC-134a）	亿吨 CO ₂ 当量	1.12	0.52	1.63
避免温室气体消费（排放）	亿吨 CO ₂ 当量	7.34	3.41	10.75

也就是说中国汽车空调行业通过替代 CFC-12 制冷剂，不但保护了臭氧层，同时在 2002-2017 年间也避免了超过 10.75 亿吨以上 CO₂ 当量的温室气体排放，为减缓气候变化做出了巨大贡献。

5.2 未来的减排潜力

在汽车空调行业制冷剂使用方面依然具有进一步减排高 GWP 物质 HFCs 的潜力。替代汽车空调制冷剂 HFC-134a 的行动在欧美日已经开始，2016 年 10 月达成的《基加利修正案》也明确了各国减排 HFCs 的时间表。中国作为全世界最大的 HFCs 生产和消费国，具有巨大的 HFCs 减排潜力，而在汽车空调领域减排 HFC-134a 将是首要任务之一。

根据《基加利修正案》要求，采用低 GWP 值的替代品可以减少汽车行业温室气体排放。在此可以设定 2 个减排情景，减排情景 1 假设采用激进的管控措施，即在 2020 年起禁止新型乘用车采用高 GWP 制冷剂，2024 年全面禁止新生产汽车采用高 GWP 值 (HFC-134a) 制冷剂 (激进减排情景)；减排情景 2 则完全按照《基加利修正案》所设定的时间表管控 HFC-134a 的消费量 (MP 减排情景)。2 种情景的替代技术均采用 HFC-1234yf 等低 GWP 值制冷剂。在 2024-2050 年之间，上述减排情景 1 和减排情景 2，分别可以避免 HFC-134a 消费量达 132.0 万吨和 76.6 万吨，折合 CO₂ 当量为 18.87 亿吨 (年均 7000 万吨) 和 10.95 亿吨 (年均 4100 万吨) 温室气体。

根据 IGSD 的报告，对制冷剂填充量为 600 克的机动车而言，每辆汽车增加成本约为 40-75 美元；对制冷剂填充量 1.2 千克的机动车每辆增加成本为 75-100 美元。根据刘杰等和陈江平等的数据，中国轿车空调的平均灌注量为 536 克 / 辆。预计采用 HFO-1234yf 作为制冷剂将增加汽车成本约为每辆 350 元人民币。实际上伴随替代品的规模化生产和扩大应用，其成本必然将逐步降低。

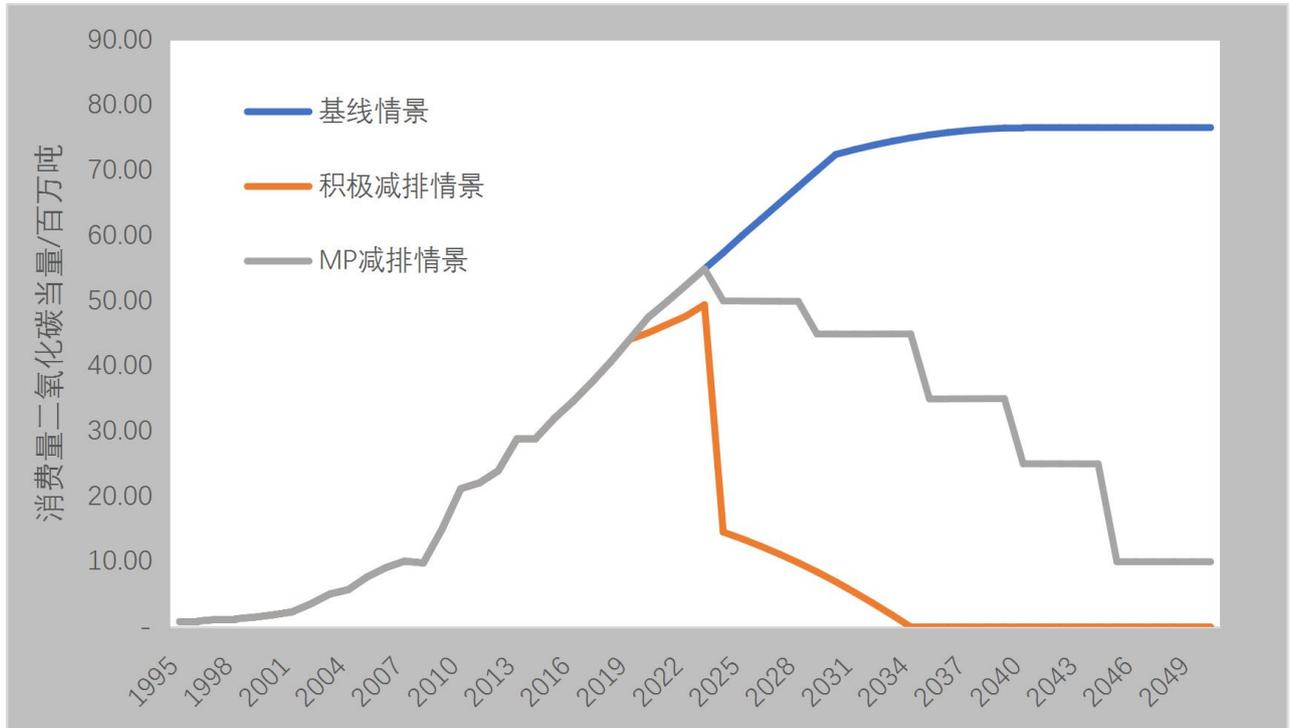


图 6 不同情景下汽车空调行业 HFC-134a 消费量预测

减排 HFCs 是 2013 年 6 月以来习近平主席与美国前总统奥巴马先生多次会谈所达成的共识，也是 2016 年 10 月国际社会协商一致的结果。积极减排温室气体符合“十九大报告”中关于“引导应对气候变化国际合作，成为全球生态文明建设的重要参与者、贡献者、引领者”和“积极参与全球环境治理，落实减排承诺”的战略构想。

依据《基加利修正案》的实施要求，全球共同努力可以避免全球气候 0.3-0.5℃ 的升温，实现这一目标的最大贡献将来源于中国的减排行动；而率先在汽车空调行业开展 HFC-134a 减排是发达国家普遍采取的策略，也应该成为中国的策略选择。根据 2017 年中国工业和信息化部、国家发展改革委和科技部发布的《汽车产业中长期发展规划》目标——“力争经过十年持续努力，迈入世界汽车强国行列”和“到 2020 年，中国品牌汽车逐步实现向发达国家出口”，减排 HFC-134a 也是必须实现的目标。只有采用更低 GWP 的制冷剂才能够满足世界品牌的标准，只有采用低 GWP 的制冷剂，中国汽车才能够满足出口至发达国家和部分率先控制了 HFCs 的发展中国家的要求。

替代 HFC-134a 作为汽车空调制冷剂的行动已经在全球开启，中国也具备了替代和减排汽车空调制冷剂 HFC-134a 的能力；中国是最早生产 HFC-134a 替代品 HFO-1234yf 的国家之一，其生产能力可以满足替代市场的需求。虽然减排初期 HFO-1234yf 相对成本较高，但相比其他行业减排单位温室气体的成本仍然具有优势；且伴随着替代品的规模化生产和技术进步，减排成本将逐步降低。

如果自 2021 年起限制新型汽车采用高 GWP 值 (HFC-134a) 并从 2024 年全面停止新生产汽车采用高 GWP 值 (HFC-134a) 制冷剂, 到 2050 年中国可以避免超过 18 亿吨 CO₂ 当量的温室气体排放; 而即使按照《基加利修正案》规定的时间表 (最低要求), 中国也可以避免超过 10 亿吨 CO₂ 当量的温室气体排放。

中国企业已经有条件开展替代 HFC-134a 的行动, 也正在加大研究开发其它替代品的力度, 有望在 HFC-134a 替代品开发和替代品应用方面取得更大的进展。未来中国可以通过采取限制新车型到进而限制全部新车采用高 GWP 值制冷剂 (HFC-134a) 的阶段化措施, 同时限制 HFC-134a 的生产和市场供应, 以减少汽车空调行业的 HFC-134a 排放。而进一步开展 HFC-134a 制冷剂的回收再利用也具有广阔的减排空间, 并且可以产生巨大的环境效益。

成功实现替代 HFC-134a 作为汽车空调制冷剂的目标需要政府、企业和公众的共同意愿和决心, 需要我们共同的努力和行动!

排放量

修正案时间表减排情景(A)

2050年预计排放0.15亿吨CO₂当量



情景A累计减排7.53亿吨CO₂当量

积极减排情景(B)

2050年预计排放量接近于0

情景B累计减排14.86亿吨CO₂当量

消费量

修正案时间表减排情景(A)

2050年预计消费HFC-134a
共0.1亿吨CO₂当量



情景A累计削减HFC-134a消费量
共10.95亿吨CO₂当量

积极减排情景(B)

2050年前已全部淘汰HFC-134a

情景B累计削减HFC-134a消费量
共18.87亿吨CO₂当量

图7 不同情景的减排量

参考文献

- 1.WMO/UNEP. Scientific Assessment of Ozone Depletion:2018.
2. 张建君等, 浙江省化工研究院有限公司. 中国氟化工行业 HFCs 逐步削减趋势研究. 2016
- 3.Fang X,Velders G J, Ravishankara A R, Molina M J, Hu J, Prinn R G. Hydrofluorocarbon(HFC) Emissions in China:An Inventory for 2005-2013 and Projections to 2050. Environ Sci Technol. 2016; 50:2027-2034.
- 4.Su S, Fang X, Li L, Wu J, Zhang J, Xu W, Hu J. HFC-134a emissions from mobile air conditioning in China from 1995 to 2030. Atmospheric Environment. 2015; 102:122-129.
- 5.Vehicle Service Pros. 2018. “Ask the Expert: How many light duty OEs use HFO-1234yf refrigerant?” at: <https://www.vehicle-service-pros.com/in-the-bay/tools-equipment/air-conditioning-a-c-repair-service/r-1234yf-tools-and-equipment/article/21005163/tech-tip-current-list-of-oes-that-use-hfo1234yf-refrigerant>.
- 6.WMO/UNEP. Scientific Assessment of Ozone Depletion:2014.
- 7.Wang Z,Wang Y, Li J, Henne S, Zhang B, Hu J, Zhang J.Impacts of the degradation of 2,3,3,3-tetrafluoropropene into trifluoroacetic acid from its application in automobile airconditioners in China, the United States and Europe. Environmental Science&Technology. 2018; 52(5)2819-2826.
8. 中国汽车技术研究中心. 《汽车行业氢氟碳化物 (HFCs) 减排路径研究》. 2016

