

中国汽车空调温室气体减排措施及政策建议

作者：杨柳含子、何卉、解奕豪、毛世越（国际清洁交通委员会）

任家宝、王超前（中汽数据有限公司）马冬、尹洁、吴倩（中国环境科学研究院）

关键字：温室气体减排、汽车空调、制冷剂

汽车空调和制冷设备中使用的氢氟碳化物（HFCs）是汽车温室气体排放的重要贡献源。北京大学对中国汽车空调制冷剂HFC-134a排放的估算表明，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（胡建信等，2018）。目前，国际社会对汽车空调温室气体减排高度重视，作为全球主要汽车产地的美国和欧盟都已明确实施了针对汽车空调HFCs和其它温室气体的减排措施。2016年10月，《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书（基加利修正案）》（下称《基加利修正案》）将18种HFCs列入受控物质清单，旨在在未来几十年内逐步减少这一温室气体类别的生产和使用。2021年6月，中国宣布接受《基加利修正案》，成为该修正案第122个缔约方。同时，该修正案还提到了提升空调能效的问题，在逐步淘汰HFCs的同时，缔约方还同意采取措施，提升空调设备的能效。当前，中国已经提出了在2030碳达峰和2060年碳中和的目标和愿景，《基加利修正案》也已于2021年9月15日正式生效。中国制定针对汽车空调温室气体减排的政策已经刻不容缓。

本报告将从以下六个方面展开：第一章简述汽车空调温室气体排放的种类和来源；第二章总结汽车空调温室气体减排的措施，包括各类替代制冷剂的特点以及提升汽车空调能效的手段；第三章通过文献回顾和市场调研，分析中国汽车空调技术和制冷剂的发展现状和挑战；第四章总结国际经验和最佳实践，重点介绍美国和欧洲的汽车空调温室气体减排管控体系和政策；第五章梳理了中国目前针对汽车空调温室气体管控的措施及政策缺口；最后一章在前文分析的基础上，对中国未来的汽车空调温室气体管控提出了政策建议。

致谢：作者在此感谢能源基金会和德国联邦环境、自然保护和核安全部对这项工作的大力支持。本报告是NDC-TIA国家自主贡献亚洲交通倡议项目的一部分。NDC-TIA是国际气候倡议（IKI）的一部分。联邦环境、自然保护和核安全部（BMU）根据德国联邦议院通过的一项决定支持该倡议。更多信息请访问：<https://www.ndctransportinitiativeforasia.org>。本文所提及的观点仅代表作者的看法和立场，并不代表资助方的观点。作者还要感谢胡建信（北京大学）、薛庆峰（中国第一汽车集团有限公司）、赵立金（中国汽车工程学会）和王佳（中国汽车技术研究中心有限公司政策研究中心）等外部审稿人提供的指导和意见。此外，作者还要感谢Gary Gardner和Jessica Chu对本文的审阅编辑和设计构思。本文内容仅代表作者个人观点，内部评审及外部审稿人不对本文内容质量及观点负责。

免责声明

- 若无特别声明，报告中陈述的观点仅代表作者个人意见，不代表能源基金会的观点。能源基金会不保证本报告中信息及数据的准确性，不对任何人使用本报告引起的后果承担责任。
- 凡提及某些公司、产品及服务时，并不意味着他们已为能源基金会所认可或推荐，或优于未提及的其他类似公司、产品及服务。

Supported by:



Federal Ministry
for the Environment, Nature Conservation
and Nuclear Safety

based on a decision of the German Bundestag

www.theicct.org

communications@theicct.org

[twitter @theicct](https://twitter.com/theicct)

icct
国际清洁交通委员会

汽车空调温室气体排放概述

汽车空调的温室气体排放包括两部分：直接排放和间接排放。如图1所示，直接排放指的是和空调制冷剂的生产、使用、维修以及报废相关的排放，其中最主要的部分来自使用过程中空调制冷剂泄漏所带来的HFCs排放。间接排放指的是空调运行过程中消耗的能量所产生的温室气体排放，包括二氧化碳（CO₂）、甲烷（CH₄）、氧化亚氮（N₂O）和黑碳。间接产生的温室气体排放量占到了汽车空调系统温室气体排放总量的81%到88%，剩余部分是直接排放（Blumberg & Isenstadt, 2019）。

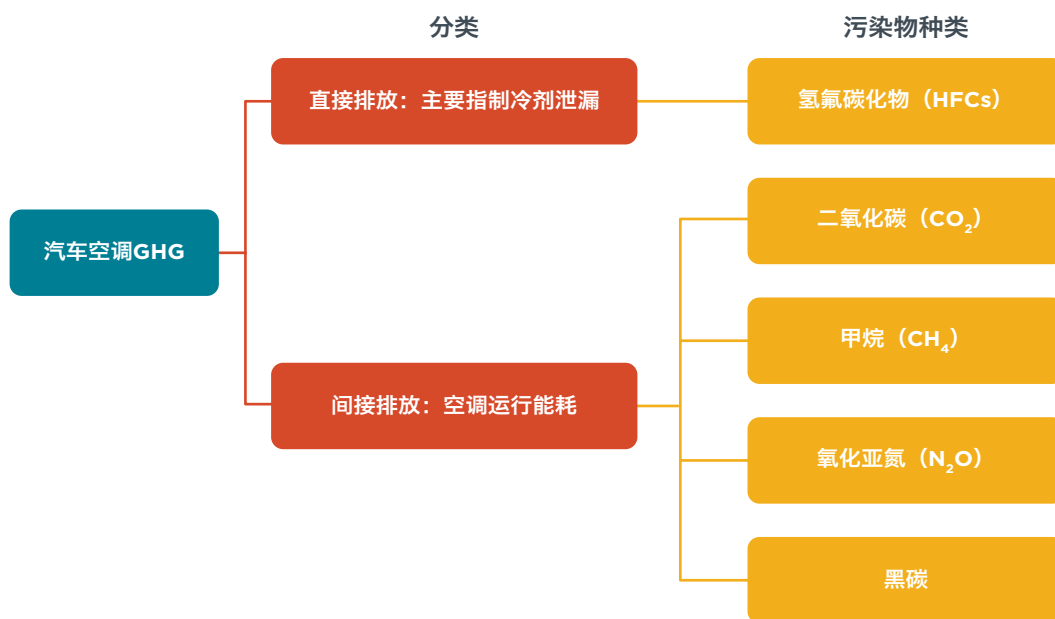


图 1 汽车空调的温室气体排放组成

上个世纪90年代起，依照《蒙特利尔议定书》，各国启动了对消耗臭氧层制冷剂的削减行动。自此，HFCs开始取代氯氟碳化合物（CFCs）和氢氯氟碳化合物（HCFCs）制冷剂，逐渐被大规模使用。但是，作为一种强效的温室气体，HFCs的副作用日益突出，亟需用其它对气候变化有协同控制作用的制冷剂进行替代。

全球变暖潜能值（Global Warming Potential, GWP）用于衡量温室气体相对于二氧化碳对全球变暖的影响力，即温室气体吸收地球反射的长波辐射的能力。由于不同的温室气体在大气中的存留时间不同，GWP的讨论通常限定在一个固定的时间范围内。根据联合国政府间气候变化委员会（IPCC）第五版评估报告，目前市场上应用最为广泛的汽车空调制冷剂HFC-134a的100年GWP为1430。如果采用20年为周期，则一吨HFC-134a的全球变暖影响会高达等量CO₂的3710倍。因此，减少包括HFCs在内的短寿命气候污染物，可以显著延缓气候变化。

除了空调制冷剂泄漏所导致的直接排放外，空调运转所消耗的能量也会带来大量的温室气体排放。在全世界轻型燃油车消耗的燃料中，有3%至7%是由车辆的空调系统消耗的。在炎热潮湿的环境下，这一数字会上升到20%（Chidambaram, 2010）。实验室测试显示，在WLTP工况下，轻型燃油车使用空调大约会增加10%的二氧化碳排放（Yang & Yang, 2018）。在实际运行中，电动公交车的能

耗中有超过30%和空调的使用有关（Basma et al, 2020）。油耗的影响很大程度上取决于车速和车辆性能。对于纯电动汽车而言，使用空调会大幅降低续航里程，增加电耗，从而增加上游温室气体排放。

汽车空调温室气体的减排措施

汽车空调系统的温室气体减排可通过多种路径实现：通过使用低GWP的制冷剂和降低空调系统的泄漏率来减少直接排放，以及通过提高汽车空调系统的能效来间接减少空调运行过程产生的排放（见图2）。本节将简要介绍目前市场上主流的汽车空调技术、主要的替代制冷剂以及提高汽车空调的技术和其减排潜力。

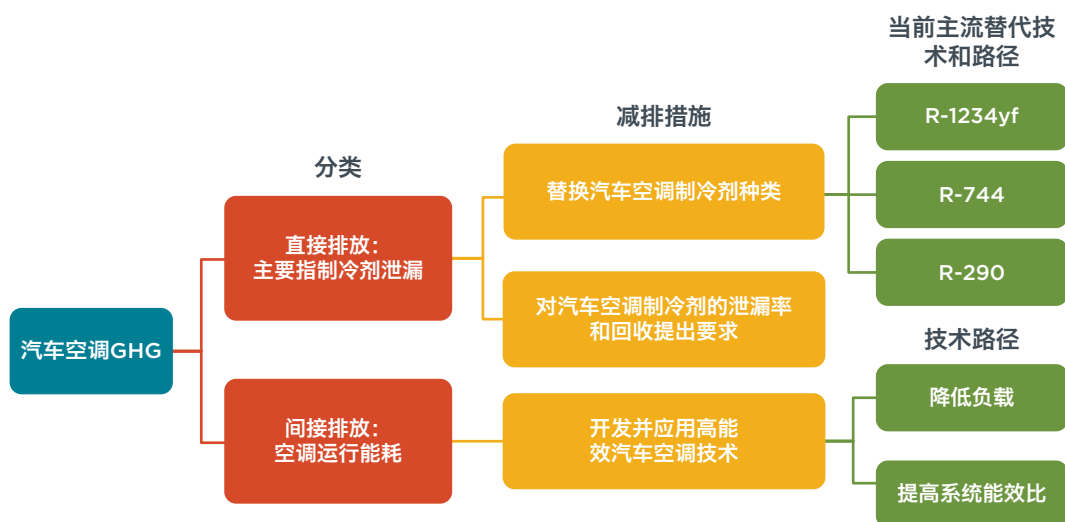


图 2 汽车空调温室气体减排策略及技术路径

目前，中国国内销售的乘用车、货车及大巴主要使用**HFC-134a**（R-134a）作为制冷剂，由于电动大巴冬季制热量需求较大，部分采用热泵的电动大巴使用制热性能较好的**R407C**（23%HFC-125、25%HFC-32、52%HFC-134a）及**R410A**（50%HFC-125、50%HFC-32）制冷剂。各类制冷剂需要设计与之匹配的空调系统，目前汽车空调常用制冷剂的GWP见表1。

表 1 目前汽车空调常用制冷剂及其GWP

制冷剂名称	R134a	R410A	R407C
GWP	1430	2100	1700

汽车空调技术包括了单冷型空调、热泵空调、正温度系数热敏电阻（Positive Temperature Coefficient, PTC）加热器、燃油加热器四大类。

单冷型空调是以制冷剂为介质为汽车提供制冷功能的空调系统，适用于燃油车及电动车制冷。燃油车（包括燃油乘用车、货车、大巴）可使用内燃机余热为车厢供暖，因此燃油车通常只采用单冷型空调。单冷型空调采用蒸气压缩方式制冷，工作循环包含四个过程：a) 压缩；b) 放热；c) 节流；d) 吸热。

热泵空调是以制冷剂为介质为汽车提供制冷及供暖功能的空调系统，适用于电动车制冷及制热。热泵空调制冷循环与单冷空调循环过程相同，其制热时通过四通阀等阀件使制冷剂反向运行，即压缩机将高温高压气态制冷剂送入内部换热器冷

凝（放热），然后经膨胀阀降压进入外部换热器，制冷剂在外部换热器中汽化（吸热）后进入压缩机，进入下一工作循环。

PTC加热器是通过电-热转换为汽车提供热量的加热器系统，不使用制冷剂，适用于纯电动车辅助加热。PTC加热器具有灵敏度高、性能可靠等优点，但是其制热效率 <1 ，使用PTC加热器将增加动力电池放电深度，从而降低电动车续航里程并损耗电池寿命。

燃油加热器通过燃烧柴油、乙醇等燃料为汽车供暖，不使用制冷剂，适用于纯电动车辅助加热。燃油加热器无需使用动力电池电量，不影响汽车续航里程，但其能量转换效率仅为70%左右，低于PTC及热泵系统，同时会产生 CO_2 、 NO_x 等有害气体¹，对环境造成危害。

目前的替代制冷剂技术包括：

HFO-1234yf（2,3,3,3-四氟丙烯，R-1234yf）的GWP小于1，与R-134a相比降低了99.9%。R-1234yf几乎可以直接替代R-134a，制冷剂加注剂量与R-134a系统相仿，两款制冷剂的物理性质也比较接近，因此R-1234yf和R-134a系统的硬件基本是相同的。虽然R-1234yf的易燃性略高于不可燃的R-134a，但由于这两种空调系统都会使用易燃的润滑剂，因此在进行空调系统设计时已经考虑了如何减轻系统的可燃性风险。R-1234yf燃烧会产生两种剧毒化学物质氟化氢和羰基氟化物，但国际自动机工程师学会（SAE）和欧盟委员会联合研究中心都分别确认了R-1234yf的安全性，认为R-1234yf即使在发生车辆碰撞的情况下也较为安全（Blumberg & Isenstadt, 2019）。此外，R-1234yf较容易降解为三氟乙酸，产生的降解量为R-134a的五倍，但总体上仍处于相对较低的水平。目前，R-1234yf已在超过1亿辆汽车中使用，欧美日等地区的乘用车新车R-1234yf加注率分别达到了100%、70%及30%，中国部分车企也具备了R-1234yf的应用经验。但是在低温下，R-1234yf系统的热泵制热循环性能差，还不满足低温下的采暖需求，这是R-1234yf系统应用受限的最主要原因。

CO_2 （R-744）也是一种替代制冷剂，GWP为1，其气候的影响强度要比R-134a小99.9%，如果在报废环节对R-744进行回收，则可实现气候影响强度比R-134a降低100%。R744系统低温制热能效比较高，适用于电动车热泵系统。但是，其制冷性能较差，还需要进一步的技术攻关。另外，该系统需要使用更高的压力来实现R-744制冷所需的跨临界热力学循环。在高压和跨临界循环下，R-744空调系统可以在常规环境条件下实现非常高效的制热循环。当然，更高的压力意味着必须要有更加安全可靠的硬件，在密闭设计方面也要加强。因此，该系统会需要更多的维护保养次数，预期在整个使用寿命周期内需维护保养2-4次。目前，R-744系统在乘用车及大巴上均有小批量应用，例如德国大众推出了搭载R-744系统的ID.4电动汽车，比亚迪也在部分出口大巴上采用了R-744系统。

¹ 这部分的污染物并没有涵盖在汽车尾气后处理的范围内。

R-290（丙烷）的GWP为3，是一种制冷及制热能效比都较高的制冷剂，适用于单冷型及热泵空调。但是，R-290制冷剂安全性等级为A3，极易燃，可燃性较R-152a更高。为降低R-290系统燃烧风险，部分中国企业正在研发R-290模块化空调系统及二次回路系统，减少制冷剂充注量及避免R-290泄漏入驾驶舱，以确保即使在汽车碰撞时也足够安全。目前欧洲AURORA公司的一款电动大巴采用了R-290系统，乘用车R-290系统尚处于研发阶段，无商业化案例。

HFC-152a（1,1-二氟乙烷，R-152a）也是一种试验性的替代制冷剂，它仍然属于HFCs，但其GWP为138，并且与R-134a的初次加注量相比，R152a制冷剂的整体使用量大幅降低（其加注量为R-134a的50%-80%），相当于在相同系统下，可以减少89.4%的R-134a使用量。考虑到R152a系统后期使用环节的加注量减幅，整体可相当于减少95%以上的R-134a使用量。此外，R152a的能效比也较高，不会产生破坏大气环境的副产品三氟乙酸。由于R152a的易燃性要高于R-134a和R-1234yf，出于安全原因，R152a应该用于二次回路空调系统，如果R152a应用于直接膨胀式空调系统，则应配备可靠的泄漏检测系统并通过驾驶室外循环来释放制冷剂压力。目前R-152a系统还处于试验阶段，尚未商业化。另外，HFC-152a也是《基加利修正案》中管控的18种HFCs之一，不是主流的替代制冷剂技术。

表2总结了R-134a及以上四种替代制冷剂的特性、成本和市场状态。汽车行业目前在用制冷剂及替代品的价格在20-300元/kg之间（见表2）。除R-1234yf外，其它所有的替代制冷剂价格均低于在用制冷剂价格。这主要是由于R-1234yf生产工艺相对于R-134a更加复杂，并且其应用专利受到限制所致。预计随着R-1234yf的使用量逐步增长及专利限制的放开，其价格将逐渐降低。

表 2 汽车空调系统的替代制冷剂性能、成本和市场状态比较

类型	GWP-100	相对能效比	成本 (元/kg)	使用寿命期内保养次数	安全性	市场状态
原有制冷剂R-134a	1430	/	30	2	A1不可燃	主流制冷剂
R-1234yf	<1	相当	300	2	A2L弱可燃	已广泛商业化
R-152a	138	提高10%	18	2	A2可燃	试验性
R-744	1	低温下制热能效比较高，但高温下制冷能效较差	6	2-4	A1不可燃	在乘用车及大巴均有小批量应用
R-290	3	提高约20%	20	2	A3极易燃	一款电动大巴已商业化，乘用车无商业化案例

世界上的许多国家已经设置了明确禁用高GWP制冷剂的时间表。但是，大部分国家还未提出通过提高汽车空调能效来减少间接排放的政策。尽管乘用车的实验室测试油耗随着燃料消耗和温室气体排放法规的加严而逐渐改善，汽车空调的能耗却没有被涵盖在实验室测试规程内。换言之，空调的耗能水平并不影响汽车的

油耗达标情况。因此，传统汽车制造商并没有足够的动力来提升空调系统的能效。当车辆整体的能效提升时，空调能耗在车辆总体能耗中的比例在不断增加。

改善汽车空调能效主要有两种途径：降低负载和优化传动系统。

降低空调负载的核心是通过其它温控手段减少空调的使用，具体措施包括：在车身涂装阳光反射涂层以及在车窗安装太阳光透射率较低的玻璃，减少外部阳光对车身内部的热辐射；在车门和横梁内加装隔热层进一步加强反光涂料的效果，减少空调运行时通过车体内壁产生的冷量损失；将冷气定向输送至乘客处，而非将冷气在整个车内循环，进而降低制冷需求；应用环境温度控制座椅，通过坐垫和座椅靠背来吹出或吸入空气，利用座椅通风将热量从乘客身上转移出去，或利用电动装置冷却空气使乘客感到凉爽。这些技术都能够降低空调的燃油消耗量，在不同的气候条件下，可实现乘用车空调能耗节省18-31%（Blumberg & Isenstadt,2019）。

除了降低负载外，还可以通过**提高空调系统能效比**、改进系统硬件来减少压缩机工作量，从而提高系统能效。从系统硬件角度来提升能效的措施包括：使用低渗透性软管、密封件和密封接头以及改进压缩机轴封来降低制冷剂泄漏（即便不考虑制冷剂的影响，减少泄漏也可以帮助保持空调系统的制冷能力，从而提高汽车空调系统的能效，同时还可以提高空调系统的可靠性并降低维修成本）；通过使用可变排量压缩机来减少或消除空气制冷过度的问题，改进鼓风机和风扇电机的控制；在保证新风量的前提下尽量使用内循环而不是外循环，避免已经冷却的车内空气被外部空气稀释；通过改进表冷器的结构设计以提升其换热性能等。除此之外，在应用了启停技术的车型上，某些空调技术可以在发动机关闭时短时间内保持稳定制冷，应用了这些技术的车辆在城区行驶时可以更多地启用自动启停装置，从而进一步降低燃油消耗量。

表3总结了乘用车空调能效提升的主要手段以及带来的温室气体减排潜力。在上述各项技术组合叠加下，乘用车空调的间接温室气体排放可以减少约40%（Blumberg & Isenstadt,2019）。

表 3 乘用车空调系统能效提升的主要手段和温室气体减排潜力

方案	主要技术手段	温室气体减排潜力
降低负载	减少热吸收、热隔绝、定向输送冷气等。	18% - 31%
提高空调系统能效比	改进压缩机轴封、改进鼓风机和风扇电机、改进表冷器的换热性能等。	3% - 10%

中国汽车空调和制冷剂发展现状和挑战

随着消费者对汽车驾驶舒适性的追求，中国汽车空调装配率不断提升。根据行业调研及相关文献结果（国家环保总局，2001；胡建信等，2013），中国汽车各车型空调装配率见图3。其中乘用车是最早普及空调的车型，其空调装配率在2000年即达到90%以上，并于2013年左右达到100%。大巴及货车空调装配率自2000年以来也在逐步增长，目前大巴空调装配率已经接近100%，货车空调装配率也达到90%左右，其中中型、重型货车空调装配率已达100%。

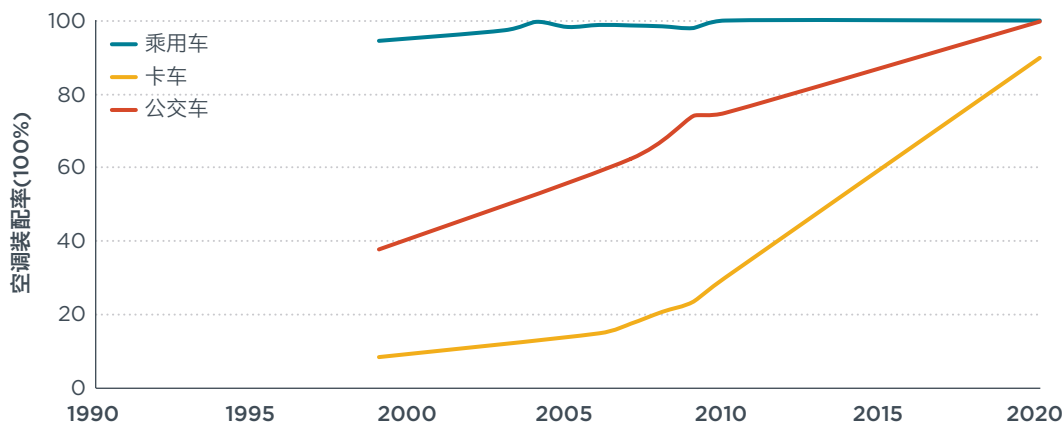


图 3 中国汽车空调装配率随年份变化情况

中国汽车空调技术市场现状

对于燃油车，无论是燃油乘用车、燃油货车，还是燃油大巴车，其主要靠发动机冷却液的余温来制热，因此基本全部使用单冷型空调。

对于电动乘用车，由于电动机的余热不足以制热，大多需要采用PTC技术辅助制热。其中，95%的电动乘用车车型采用单冷+PTC技术，剩余5%采用热泵+PTC方案。为尽可能提升电动乘用车续航里程，个别部分乘用车企业也采用燃油加热器为汽车提供热量，仅有一款威马车型采用热泵+燃油加热器方案，市场占比<1%。

中国的电动货车多用于港口货物转运、园区内货物转运、工地物料转运等方面，运行路线较短且具备完善的充电设施，因此电动货车对续航里程要求较为宽松，目前中国电动货车基本全部采用单冷型空调+PTC的解决方案。

对于电动大巴，由于中国地域辽阔，不同地区环境温度条件差异大，导致不同地区的大巴对制冷制热需求差异较大，采用的技术也不尽相同。目前，单冷型空调主要应用在全年最低气温高于10°C的海南、珠三角等地区，热泵、单冷+PTC、热泵+PTC则使用于冬季环境温度较低的中部和北部地区。中国东北等极寒地区基本都会采购使用燃油加热器方案的电动大巴，或者在采购电动大巴后加装燃油加热器。电动大巴车型中，热泵+PTC方案市场总占比达76%，单冷型空调、单冷型空调+PTC共占比20%，约4%电动大巴采用燃油加热器技术路线。但是在东北等极寒地区，电动大巴车型中燃油加热器技术占比50%以上。目前的空调技术制热/制冷能力有限也是电动汽车在极寒/极热地区发展缓慢的重要因素之一。

中国汽车行业制冷剂生产和消费现状

目前，中国国内销售的乘用车、货车及大巴主要使用R-134a作为制冷剂。由于电动大巴冬季制热量需求较大，部分采用热泵的电动大巴使用制热性能较好的R407C及R410A制冷剂。同时，出口至欧美的乘用车为满足当地限制使用高GWP制冷剂的要求，采用R-1234yf作为制冷剂。

为应对《基加利修正案》的HFCs削减要求，中国部分乘用车及大巴企业已经开展了替代制冷剂筛选评估工作。目前，中国部分车企已经具备了R-1234yf空调系统设计及应用能力，特斯拉、一汽、吉利、长城等品牌已有搭载R-1234yf的出口车型。三花、东风、上汽、蔚来、宇通、比亚迪、法雷奥等企业也针对R-744

及R-290等制冷剂的热泵系统开展了研发工作。目前，R-744系统在乘用车及大巴上均有小批量应用，例如德国大众推出了搭载R-744系统的ID.4电动汽车，比亚迪也在部分出口大巴上采用了R-744系统。在R-290系统应用方面，欧洲AURORA公司推出了一款电动大巴R-290系统，乘用车R-290系统尚处于研发阶段，无商业化案例。

汽车空调制冷剂消费环节包含新车加注及维修加注两个环节，由于维修端制冷剂销售数据缺失，本研究根据制冷剂加注量、汽车保有量、维修率等数据对2020年汽车行业HFCs消费量进行了核算，具体核算基础数据见表4。乘用车及货车制冷剂加注量较小，平均加注量小于1kg，而大巴车空调系统尺寸更大，制冷剂加注量在1kg-10kg之间。同时，中国出口至欧盟地区的新车在中国当地加注R-1234yf制冷剂，根据2020年乘用车出口及单车制冷剂加注量数据对R-1234yf制冷剂消费量进行了核算（见表5）。2020年汽车行业HFCs（R-134a，R407A，R407C）消费量达3.2万吨左右，其中新车加注1.8万吨，维修加注1.4万吨，R-1234yf消费量约67吨。随着中国HFCs削减工作的开展，R-1234yf制冷剂的需求将逐步增长，预计2030年中国汽车行业对R-1234yf的需求将增长至2万吨以上²。

表 4 中国汽车行业2020年HFCs制冷剂消费量核算基础数据

车型	2020年产量 (万辆)	2020年保有量 (万辆)	制冷剂加注量 (kg)
乘用车	1999.4	24800	0.6
货车	477.8	3134	0.9
传统动力大巴	37.4	206	2.1
电动及插电混动大巴	7.9	44	5
冷藏车	7.2	25	0.5
驻车空调	97.5	312	0.5

表 5 中国汽车行业2020年主要制冷剂消费量

制冷剂类型	2020年制冷剂使用量 (吨)
R-134a	32055
R-410A	22.7
R-407C	432.1
R-404A	44.8
R-1234yf	67

中国是世界上最大的HFCs生产国及出口国，生产量约占全球70%左右，其中一半以上用于出口。2020年中国制冷剂生产行业R-134a、R-32、R-125主要产能分别为23.8、27.2、10.6万吨以上，可以完全满足中国汽车行业HFCs制冷剂需求量。图4展示了中国汽车行业HFCs制冷剂供应链的示意图，中国汽车行业消费的HFCs制冷剂80%来自于中化蓝天、浙江巨化、浙江三美、蓝色星球、美希化工、科慕公司等大型生产企业。20%来自于其它中小型制冷剂生产企业。大型制冷剂生产企业将产品供应给配套服务商和代理商，代理商将制冷剂销往汽车制造

² R-1234yf是目前技术最成熟的制冷剂，假设新车加注的R-134a全部替换为R-1234yf。

工厂。中小型制冷剂生产企业通过代理商和分销商，将制冷剂产品销往汽车维修店，少部分制冷剂进入市场，个人通过购买制冷剂自行加注和维修。

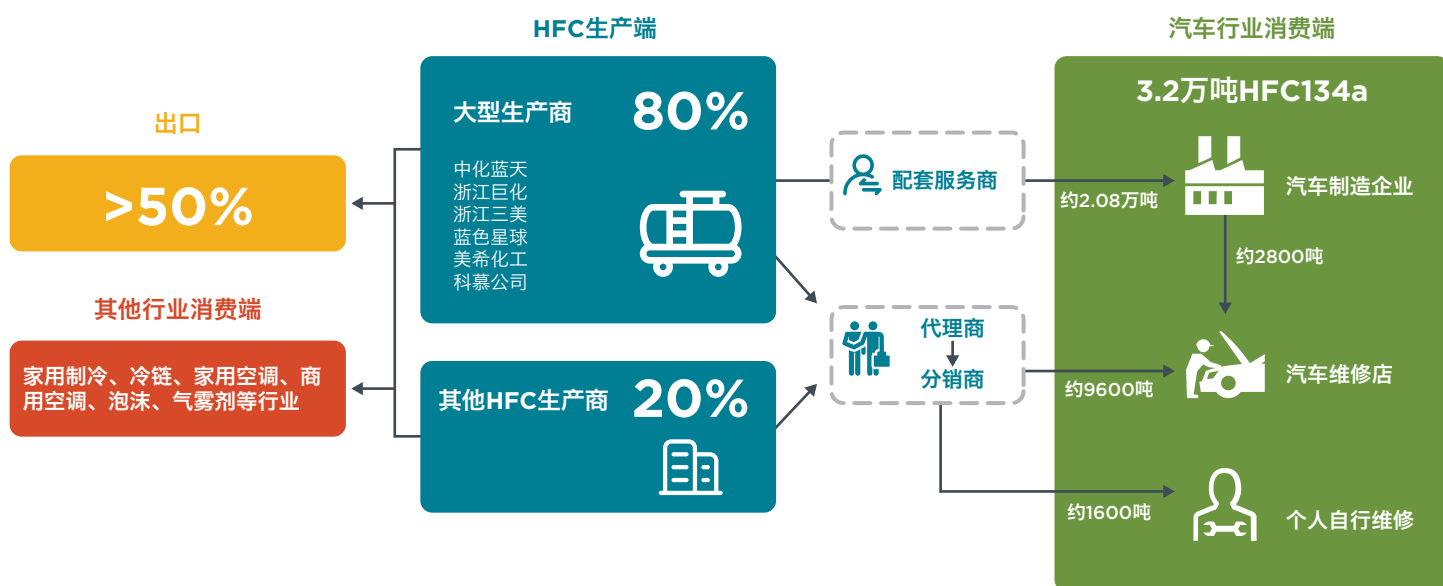


图 4 中国汽车行业HFCs制冷剂供应链示意图

替代制冷剂方面，中国已有R-1234yf、R-152a、R-290、R-744等替代制冷剂生产能力。其中，霍尼韦尔、科慕、环新氟材等企业也已具备约2万吨R-1234yf产能，可满足目前中国替代制冷剂需求。随中国HFCs替代进程的推进，科慕、霍尼韦尔等制冷剂生产企业将迅速扩大R-1234yf及其它替代制冷剂产能，满足新增替代制冷剂需求。

使用替代制冷剂需要匹配适用的空调系统，除R-1234yf可通用R-134a系统大部分零部件外，其它制冷剂的匹配系统均需要进行大幅度调整，成本也会相应增加。因此，在考虑替代制冷剂的成本时，不仅需要考虑不同制冷剂的加注量不同，还需要考虑相应匹配系统的成本增加。表6综合分析了采用不同制冷剂后单车的成本变化。

表 6 中国市场单车制冷剂替代及系统匹配的成本变化（正数表示增加，负数表示降低）

车型 ^a	变化	R-1234yf	R-744	R-152a	R-290
乘用车	制冷剂加注量 (kg)	0.57	0.35	0.38	0.16
	制冷剂价格增加 (元)	152	-17	-12	-16
	匹配系统价格增加 (元)	约100元	约9000	约180	NA ^b
大巴 ^c	制冷剂加注量 (kg)	NA ^d	6	NA ^d	1.5
	制冷剂价格增加 (元)	NA	-96	NA	-102

^a暂无关于货车替代制冷剂及相应匹配系统价格信息。

^bR-290匹配系统商业化案例较少，未获得其匹配系统价格信息。

^c以10m长大巴车型为例。

^d该制冷剂暂无适用于大巴车型的商业化系统。

虽然中国部分车企已经在替代制冷剂匹配系统方面积累了一定的研发应用经验，替代制冷剂的产能也可以满足市场需求，但是替代制冷剂的广泛应用仍存在一些挑战：

1. 替代周期长：制冷剂替代需要与车型开发、系统匹配、排放验证等工作相匹配，汽车企业导入替代制冷剂平均需要5年的替代周期。
2. 替代改造成本高：制冷剂的替代需要改造汽车生产线及维修线，企业单条生产线需要投入300万以上额外成本。
3. 燃油车替代技术应用专利受限：R-1234yf是燃油车较为理想的替代制冷剂，但其应用专利主要掌握在霍尼韦尔及科慕手中，中国制冷剂生产企业无R-1234yf销售权，中国汽车企业仅能从霍尼韦尔、科慕及其授权企业购买R-1234yf。
4. 新能源车替代技术不成熟：新能源车无内燃机余热可用，需要依靠空调系统供暖。R-1234yf制热能力不足，需要使用PTC加热器进行补充加热，严重降低电动汽车续航里程。而制热能效高的R-744系统及R-290系统目前分别处于小批量生产及研发阶段，尚不能满足大规模使用条件。同时，由于R-744系统零部件批量化生产程度不足，导致R-744系统价格上升，目前R-744系统价格为现有系统的1.3-5倍。
5. 缺乏相关政策标准：中国尚未出台明确的汽车行业HFCs削减要求，企业自主替代意愿低。同时，汽车空调制冷剂替代需要制定一系列标准规范替代系统设计、系统安全限制、制冷剂检测认证，目前中国相关标准体系尚不完善。

汽车空调温室气体管控国际经验

中国今年正式接受的《基加利修正案》是全行业管控制冷剂直接排放的重要措施，它对全行业HFCs的生产和消费进行了限制。除此之外，一些区域性或国家性的政策或法律，也专门针对汽车空调制冷剂的种类、泄漏率、回收进行了具体的规定。另一方面，鼓励汽车空调系统提高能效，也是减少汽车空调GHG排放的重要措施。通过在汽车油耗或二氧化碳排放标准中增加对高效空调的激励积分，能够有效鼓励高效空调技术的开发和广泛应用（见图5）。本节将简要介绍基加利修正案，并总结美国和欧盟两地管控汽车空调温室气体排放的经验。

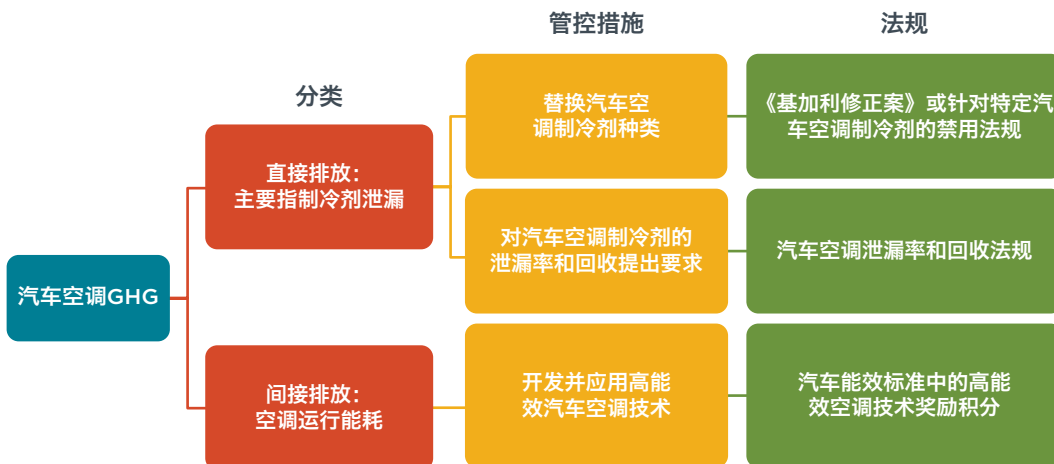


图 5 汽车空调系统温室气体管控措施总结

《基加利修正案》

根据《基加利修正案》，不同组别的国家有不同的HFC淘汰时间表（见表7）。大部分发达国家，即非A5国家已从2019年开始淘汰HFCs，5个国家从2020年开始淘汰。根据蒙特利尔议定书第五条，发展中国家有更多的时间完成HFCs的淘汰工作，包括中国在内的大多数发展中国家将从2024年开始将HFCs生产和使用冻结在基线水平，个别A5国家将从2028年开始削减HFCs。《基加利修正案》已于2021年9月15日开始对中国生效。

表 7 《基加利修正案》中各国淘汰HFCs时间表

	A5国家第一组	A5国家第二组 ¹	非A5国家第一组	非A5国家第二组 ²
基准年	2020-2022	2024-2026	2011-2013	2011-2013
冻结年	2024	2028		
第一步	2029:90%	2032:90%	2019:90%	2020:95%
第二步	2035:70%	2037:80%	2024:60%	2025:65%
第三步	2040:50%	2042:70%	2029:30%	2029:30%
第四步			2034:20%	2034:20%
最后一步	2045:20%	2047:15%	2036:15%	2036:15%

¹ 巴林，印度，伊朗，伊拉克，科威特，阿曼，巴基斯坦，卡塔尔，沙特和阿联酋

² 白俄罗斯，哈萨克斯坦，俄罗斯，塔吉克斯坦和乌兹别克斯坦

研究显示，如果配合采取相应的提升空调和制冷系统能效的措施，逐步淘汰HFCs带来的减缓气候变化的好处将会翻倍（Blumberg & Isenstadt, 2019）。因此，在逐步淘汰HFCs的同时，《基加利修正案》缔约方还同意采取措施，保持或提升低GWP甚至零GWP的替代技术及设备的能效。

美国

美国是拥有最全面的汽车空调温室气体管控政策的国家之一。美国将轻型车空调系统作为一个整体来管控，在其轻型车燃油经济标准中针对空调温室气体减排设定了多维度的激励积分，并提供了相对系统的管理手段。制造商可以选择通过不同的方式获得丰厚的温室气体减排积分，其中包括：减少制冷剂的泄漏率、改用GWP较低的制冷剂、提高汽车空调系统的效率以及减少制冷需求。在美国的轻型车CO₂排放标准中，积分激励是帮助厂商达到严格的车队平均CO₂标准的策略之一，具体的技术及积分列表见附件。在这种管理方案下，汽车制造企业或空调零部件企业会最优化制冷剂配套系统，协同实现HFCs直接减排和CO₂间接减排，且合理降低成本。

同时，美国的《重要新替代品政策》也对汽车空调制冷剂的种类进行了规定。根据美国的《清洁空气法案》，《重要新替代品政策》起初是为了在各行各业减少产生消耗臭氧层物质的使用。2015年，美国更新了对《重要新替代品政策》中一些制冷剂替代品的要求，要求将其对气候的影响同样考虑在内。该政策规定，2021年起美国的轻型车应全面淘汰使用R-134a；在严格的使用量限额规定下，2025年以前，R-134a仍可继续用于出口车辆，这部分车辆将出口到没有足够的基础服务设施来使用其它制冷剂的国家；自2026年起，R-134a将不得再用于任何在美国新生产或进口的车辆。

在美国，很多车主选择自己维修车辆，因此汽车空调维修过程中的制冷剂泄漏量明显高于世界其它大多数地区。美国环保署也已经通过了旨在减少维修期间向大气泄漏制冷剂的规定。这些规定包括：1. 禁止故意向大气中排放制冷剂³；2. 维修机构维修汽车空调系统的技术人员需要通过培训和认证，使用的设备也需要通过认证；3. 空调系统或车辆寿命结束需要进行安全处置。美国加州也对家庭维修汽车空调时使用的小罐制冷剂的销售进行了限制。

欧盟

欧盟制定了针对全行业的《氟化气体条例》和针对汽车空调的《汽车空调指令》。欧盟最初的《氟化气体条例》于2006年通过。2014年，欧盟第517/2014号条例更新了相关规定，并于2015年起开始实施。新条例要求在2030年将氟化气体消费量降至2014年的三分之一。《氟化气体条例》通过向生产商和进口商分配氟化气体配额来限制欧盟内部氟化气体的总量。欧盟委员会目前正在研究下一步计划，并将在2021年底提出新的氟化气体管控规定。

2006年，欧盟通过了第一个关于汽车空调系统制冷剂的政策，即2006/40/EC号《汽车空调指令》。根据该指令，从2017年起，在欧盟市场上的所有新车中完全禁止使用GWP高于150的含氟气体。汽车空调系统中含有这些气体的新车不得在欧盟注册、销售或使用。此外，根据上文提到的《氟化气体条例》，现有车辆维修时供应R-134a也受到限制。

虽然欧盟在淘汰高GWP制冷剂方面表现出了领导力，但迄今为止，欧盟轻型车CO₂排放标准并没有包括针对低GWP制冷剂激励性积分，没有包括提升空调系统能效的要求，也没有在官方测试循环中使用空调，或以其它方式衡量空调使用对车辆燃料消耗的影响。对轻型车空调系统的能耗的核算的缺失，也是导致欧盟轻型车实际道路与型式核准CO₂排放差距越来越大的重要原因之一。ICCT的分析表明，欧盟轻型车官方实验室型式核准和实际道路的CO₂排放差距由2001车型年的8%，增长到了2017车型年的37%（Tietge et al, 2019）。

欧盟委员会对2025年后标准的草案将第一次允许将空调系统的改进计入“生态创新”积分。生态创新指的是可验证的、能带来标准测试循环中不包括的CO₂减排技术。为了获得这些积分，汽车制造商必须向欧盟委员会提交由第三方机构提供的核查报告。目前，生态创新积分的上限为7g/km，但2025年后的标准草案可能会修订这一上限。

在欧盟的重型车二氧化碳排放法规中，没有通过激励积分或工况外模拟的方式鼓励提升汽车空调系统效率的规定。欧盟2019/1242号法规规定了四类卡车的CO₂减排目标。制造商被要求在基线基础上在2025年将新车队的平均CO₂排放量减少15%，在2030年减少30%。基线是根据2019年下半年和2020年上半年注册车辆的认证CO₂排放量确定的。欧洲商用车的CO₂排放认证依赖于车辆能源消耗计算工具，即VECTO。在VETCO模型中，空调系统属于辅助设备的一部分。VECTO通过从预定的技术清单中选择被认证的车辆所配备的技术，来计算包括空调系统在内的辅助设备的能耗。输入VECTO模型的数值是基于这份技术清单的默认值，认证规范中也并不包括对测试、系族或生产一致性的规定。

³ 如果制冷剂是R-744，则不受此规定限制。

除了美国和欧盟外，其它国家也针对汽车空调温室气体减排出台了相关规定。表8总结了世界上11个国家和地区的汽车空调温室气体管控措施。

表 8 各国针对空调温室气体排放的管控措施

国家/地区	排放标准中涉及空调的部分			汽车空调HFCs减排政策
	针对空调的测试	积分	备注	
美国	仅用于积分	空调能效技术、热管理技术、使用替代制冷剂、低泄漏都有积分	积分根据技术清单和实际测试结果提供	禁用HFC-134a (2021)
加拿大				禁用 GWP>150 (2021)
墨西哥	未包括	对于一些高效空调技术、制冷剂替换和低泄漏率系统有积分	没有合规监管机制	无
巴西	仅在排放测试中包括	无积分	无	无
欧盟	未包括	无积分	HDV CO ₂ 模型中有高效空调选项	禁用 GWP>150 (2017)
澳大利亚	未包括	无积分	正在考虑加入	无
日本	未包括	无	无	禁用 GWP>150 (2023) 报废回收规定
中国	未包括	针对轻型车高效空调积分有积分，即将于2022年实施	无	无
印度	未包括	无积分	国家高效制冷行动计划正在制定中	无
韩国	未包括	包括高效空调积分，可能增加热管理技术积分	无	无
沙特阿拉伯	未包括	高效空调及热管理积分 (基于美国标准)	具体积分有调整	无

中国当前汽车空调温室气体管控措施及政策缺口

中国目前并未把汽车空调作为一个整体管理，而是单独对制冷剂和空调能效进行管理，难以反映空调系统对整车温室气体和污染物减排的影响。

直接排放管控措施

在落实《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》履约工作时，中国制定并实施了《消耗臭氧层物质管理条例》，首次将国际环境公约转化为国内法规，是中国实现淘汰及管控目标的法律基础和工作依据。同样，为应对《基加利修正案》的发布实施，充分借鉴中国淘汰和管控消耗臭氧层物质的成功经验，有效借助现有管控法规和体系，生态环境部正在组织对《消耗臭氧层物质管理条例》进行修订，将HFCs纳入条例的管控范围，并更名为《消耗臭氧层物质和氢氟碳化物管理条例》。目前，该条例已完成公开征求意见，正在进一步修订当中。《征求意见稿》提出国家将采取财政、税收、价格、政府采购等方面的措施，鼓励和支持HFCs替代品和替代技术及其检测、监测技术和方法的科学研究、技术开发和推广应用，鼓励对HFCs进行回收、循环利用和转化利用。同时使用HFCs作为制冷剂的汽车空调将根据其削减进展情况，纳入国家综合性产业政策目录。建立健全HFCs的数据信息管理系统，收集、汇总、发布其生产、使用、进出口等数据信息。《消耗臭氧层物质管理条例》的修订及实施，将为包括汽车空调制冷剂在内的HFCs削减提供重要的指导。

在制冷剂泄漏管控方面，目前中国有两项已发布的推荐性技术标准和汽车空调相关，另有一项标准正在制定中。已发布实施的标准包括：GB/T 21361-2017《汽车用空调器》（国家市场监督管理总局，2018a），已于2018年2月1日起实施，另一项为GB/T 37123-2018《汽车用电驱动空调器》（国家市场监督管理总局，2018b），已于2019年7月实施。此外，《汽车空调制冷剂（R-134a）泄漏测试方法及限值》团体标准已通过中国标准化协会立项论证，正在制定过程中。

《汽车用空调器》标准的适用范围为非纯电动汽车的汽车用空调器。《汽车用电驱动空调器》适用于汽车用电驱动空调器，不仅包括电动车，还涉及传统汽车的电气化改造。《汽车用空调器》中规定了两种密封性能实验方法，一种是SAE J 1628规定的操作规程进行检验，在此测试方法下蒸发器总成和冷凝器总成不应有泄漏。另一种是充注干燥氮气使其达到机组运行的最大压力时封口，此测试方法下的泄漏率应低于5g/年。《汽车用电驱动空调器》也规定，按照SAE J 1628规定的操作规程进行检验时，制冷系统各部分不应有制冷剂泄漏。由于两项标准均为推荐性国家标准，并非强制性标准，目前实施效果并不尽如人意。正在制定的《汽车空调制冷剂（R-134a）泄漏测试方法及限值》参考了欧盟委员会第706/2007号法规，规定了R-134a泄漏的测试规程及限值，目前尚未发布和实施。标准草稿规定的测试规程如图6所示。

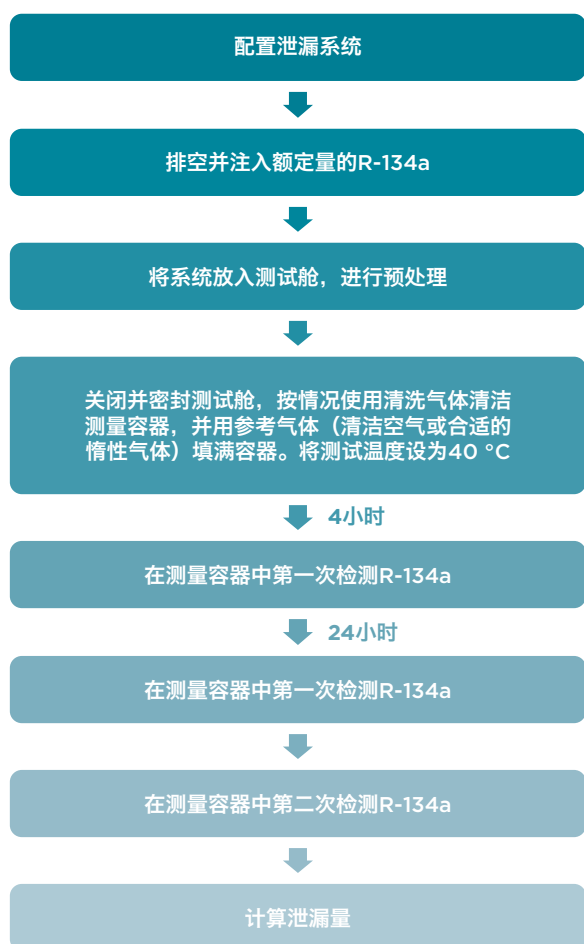


图 6 R-134a泄漏测试规程

间接排放管控措施

目前，在中国的乘用车油耗标准中，针对有节能效果的循环外技术和装置有额外的油耗奖励。循环外技术和装置指的是在现有试验方法中无法体现或体现不完全，但在实际使用中具有明显效果的节能技术或装置，其中就包括高效汽车空调。对于采用了高效汽车空调的车辆，在计算企业平均燃料消耗量时，可根据其节能效果相应减少车型燃料消耗量。评价标准《乘用车循环外技术/装置节能效果评价方法 第3部分：汽车空调》已于2021年10月11日发布，即将于2022年5月1日起开始实施（国家市场监督管理总局，2021）。这一标准只适用于燃油乘用车，不适用于商用车和电动车。

为了获取空调系统改善对实际燃油节省的贡献值，标准采用了整车底盘测功机测试的方法。测试规程包括：车辆准备、预处理（90km/h）、浸车（30min）、开启空调试验、数据分析、预处理（90km/h）、关闭空调试验、数据分析。其中，车辆试验前在开启光照的条件下浸车30分钟，模拟夏天车辆停放在室外的过程。在整车底盘测功机测试中，分别测试在车辆开启空调下和关闭空调下的燃料消耗量，将开启空调后增加的燃料消耗量与该车型的燃料消耗量目标值进行对比。如该车型空调燃料消耗量大于或等于相应目标值，则该车型空调不具有节能效果。如该车型空调燃料消耗量小于相应目标值，则按一定比例计算该车型空调的节能效果值，并在核算企业平均油耗时给予相应的优惠。为促进多项节能技术的同步发展，高效空调技术的鼓励上限设定为0.2L/100 km。

表9梳理了汽车空调温室气体减排的国际经验及中国的政策缺口。总的来说，中国尚未将空调作为一个整体来管控。直接排放方面，中国尚未制定针对汽车空调的温室气体排放管控政策；间接排放方面，中国已制定了针对乘用车的高效空调油耗奖励积分，但尚未应用于商用车及电动车。

表 9 国际最佳实践和中国政策缺口分析

国际最佳实践	中国政策缺口
在汽车二氧化碳排放标准中，将空调作为一个整体来管控。	中国尚未将空调作为一个整体来管控，尚未制定针对汽车空调制冷剂的禁用及替代规定。缺乏新车空调制冷剂及空调系统的技术信息，缺乏生产、使用、维修环节的数据统计。
对采用低GWP制冷剂、低制冷剂泄漏率、提高汽车空调系统效率以及减少制冷需求技术的车型给予激励积分。在此管控措施下，汽车制造企业或空调零部件企业会最优化制冷剂配套系统，协同实现HFCs直接减排和CO ₂ 间接减排，且合理降低成本。	乘用车高效空调油耗奖励积分已发布，但尚未应用于商用车及电动车。
对汽车空调维修、回收和报废环节有具体的规定。	缺乏针对汽车空调维修、回收、报废的相关规定。

对中国下一步汽车空调温室气体管控的建议

当前，中国汽车空调的HFCs削减和能效提升面临各种机遇和挑战。中国是最早生产低GWP制冷剂的国家之一，其生产能力可以满足替代市场的需求。虽然减排初期低GWP制冷剂相对成本较高，但与其它行业相比，减排单位温室气体的

成本更低；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。此外，采用低GWP空调制冷剂可以为汽车行业开辟全新的、低成本的车辆温室气体减排路径。另一方面，世界上许多国家和地区已经禁用汽车空调采用高GWP制冷剂。加快开发低GWP制冷剂的车型有利于中国本土企业生产满足其它国家进口标准的汽车，是中国迈入世界汽车强国行列的重要一步。

同时，中国汽车行业空调系统温室气体削减仍存在诸多挑战：

- » 制冷剂替代需要与车型开发、系统匹配、排放验证等工作匹配，替代周期长；
- » 制冷剂泄漏及回收管控不足，导致额外的制冷剂排放及消费；
- » 制冷剂替代需要改造汽车生产线、维修线，企业需投入额外成本；
- » 新能源汽车制冷剂替代品及技术成熟度不足，R-1234yf不能很好满足新能源车的制热需求，低温制热性能好的R-744技术成熟度还未达到批量应用标准。

借鉴国际经验，并结合中国现状，我们对未来汽车空调行业温室气体管控提出以下政策建议：

1. **将汽车空调信息纳入机动车环境管理系统，收集、汇总行业制冷剂使用数据及空调技术信息。**中国已初步形成了事前信息公开、事中达标监管、事后环保召回的机动车全生命周期环保达标监管体系。建议将车用空调系统及制冷剂相关信息，如制冷剂类型、空调技术、泄漏率、空调能效、空调开启后温室气体排放数据等信息纳入信息公开平台和随车清单，加强公众参与监督。
2. **建立汽车空调排放标准体系，系统开展温室气体和污染物减排。**建议中国将汽车空调作为一个整体进行管控，系统地看待空调系统的直接和间接减排，制定整车温室气体排放标准及排放限值，并将空调测试纳入排放测试规程。在排放标准中增加空调测试工况，考虑空调开启对温室气体和污染物排放的影响。在排放标准中，建立积分管理体系，将低GWP制冷剂、低泄漏率、高效空调技术纳入积分体系，给予达标优惠，通过奖励性积分，鼓励企业开展替代制冷剂、替代制冷剂空调系统、高效空调技术的研发应用工作，推动新技术的成熟及规模化应用。引导汽车行业开展技术研发、车型设计、产线改造、回收技术等应对工作，整合行业资源，利用供应链优势，降低成本。
3. **建立车用空调排放监管体系，加强车用空调生命周期排放控制。**建议以机动车环保达标监管体系为基础，建立汽车空调制冷剂及温室气体排放测试、信息公开和环保监管体系。在新车生产一致性、在用符合性检查时，纳入空调开启状态温室气体排放检测内容，并对空调技术及制冷剂种类进行登记核查，对空调维修保养数据进行收集。对在新车生产一致性、在用符合性过程中发现的批量不合格问题，依据大气法进行处罚，对不合格产品进行环保召回。强化企业主体责任，建立生产者责任延伸制度，加强制冷剂生命周期管理。制定车用空调维修、报废和回收相关政策，制定车用空调维修技术规范，加强汽车空调维修技术人员的培训和认证，加强对汽车维修市场使用假冒伪劣制冷剂的监管与惩罚，减少汽车空调制冷剂在维修过程中的泄漏排放；制定《报废车辆制冷剂回收及处理办法》，发挥汽车生产、进口企业在制冷剂回收、循环利用和妥善处理方面的作用。

4. **加快制修订汽车空调零部件标准，降低车用空调单机排放。**基于新制冷剂及空调系统技术特征，尽快针对现有汽车空调及零部件标准进行修订，并新增必要的安全要求。同时，汽车空调对制冷剂有一定的纯度及组分要求，也应针对替代制冷剂提出纯度鉴别及应用标准。
5. **制定车用空调经济激励政策，加快低排放汽车空调推广应用。**根据汽车行业低GWP制冷剂、能效提升技术的发展成熟度以及经济成本，制定行业示范和鼓励政策，对提前淘汰高GWP制冷剂和采用高能效空调技术的汽车企业给予补贴、财税减免等。加强对新能源汽车制冷剂和空调技术的研发支持力度，引导企业加大投入、先试先行，推动成熟技术的应用推广。将采用低GWP制冷剂、低泄漏率的汽车空调纳入绿色产品环境标志体系及政府绿色采购，鼓励企业事业单位及消费者购买低排放车型。

附录

在美国的轻型车二氧化碳经济标准中，积分激励是帮助厂商达到严格的车队平均二氧化碳标准的策略之一。表10展示了通过**减少制冷剂泄漏**可获取的积分。美国环保署使用了SAE J-2727评分系统来计算泄漏评分。对于使用低GWP制冷剂的系统，如果泄漏率高于每年的初始平均值，车辆温室气体排放就会被加上高达1.8克/英里的高泄漏惩罚。尽管低GWP制冷剂的泄漏可能并无直接的温室气体影响，美国环保署还考虑到了潜在的风险，即消费者可能因制冷剂泄漏而加注高GWP制冷剂。

表 10 美国的减少泄漏和制冷剂积分最大值（克/英里）

车辆类型	皮带驱动压缩机, HFC-134a	电机驱动压缩机, HFC-134a	使用GWP=1制冷剂的积分最大值
汽车	6.3	9.5	13.8
轻型卡车	7.8	11.7	17.2

表11是美国环保署批准的**提升空调系统效率**的技术列表及其积分值。最新的燃油经济性标准扩大了空调效率积分列表中包括的技术（如带可变曲轴箱气门的先进空调压缩机），并简化了汽车制造商申请工况外积分的程序。和其它的工况外积分一样，厂商可以通过改变积分值批准手续为某个技术争取更高的积分，但是整个空调系统能效积分的最大值没有改变。轿车提升汽车空调系统能效可以获得的最高积分是5克/英里，轻型卡车的最高积分是7.2克/英里。装有该技术的车辆可以获得积分，并且只有当空调关闭、开启之间的二氧化碳排放差异等于或大于最高积分值时，才能获得全额积分。

表 11 美国空调能效技术的CO₂减排效果及积分

技术	汽车空调二氧化碳减排效果	轿车空调最高积分值(g/mi)	轻卡空调最高积分值(g/mi)
通过外控的可变容积式压缩机降低再加热	30%	1.5	2.2
通过外控的定量或气动可变容积式压缩机降低再加热	20%	1.0	1.4
当外部环境温度为24°C或更高时，默认使用再循环空气，并对空气供应进行闭环控制（传感器反馈控制）	30%	1.5	2.2
当外部环境温度为24°C或更高时，默认使用再循环空气，并对空气供应进行开环控制（无传感器反馈）	20%	1.0	1.4
限制浪费电能的鼓风机电机控制（如脉冲宽度调制功率控制器）	15%	0.8	1.1
内部热交换器（或吸气管道热交换器）	20%	1.0	1.4
改进的蒸发器和冷凝器（性能系数COP提升>10%）	20%	1.0	1.4
油分离器（压缩机内部或外部）	10%	0.5	0.7
通过增加可变曲轴箱进气气门实现的先进、高效空调压缩机技术		1.1	1.1
最大值		5	7.2

应用减少汽车空调需求或负荷的**热管理技术**也可产生积分。表12总结了此类技术和积分分值。

表 12 美国汽车空调热管理技术积分值

技术	轿车空调最高积分值(g/mi)	轻型卡车空调最高积分值(g/mi)
隔光车窗玻璃	≤2.9	≤3.9
主动座椅通风	1	1.3
反光车漆	0.4	0.5
被动座舱通风	1.7	2.3
主动座舱通风	2.1	2.8
积分上限	3.0	4.3

参考文献

- Basma, H., Mansour, C., Haddad, M., Nemer, M., & Stabat, P. (2020). Comprehensive energy modeling methodology for battery electric buses. *Energy*, 207, 118241. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118241>
- Blumberg, K., & Isenstadt, A. (2019). *Mobile air conditioning: The life-cycle costs and greenhouse-gas benefits of switching to alternative refrigerants and improving system efficiencies*. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publications/mobile-air-conditioning-cbe-20190308>
- Chidambaram, S. (2010). India's mobile air-conditioning (MAC) study [slides]. India Policy Workshop on the Status of MAC Replacement Technologies, New Delhi, India. Retrieved from <https://www.slideshare.net/ozonation/indias-mobile-air-conditioningmac-study-pdf>
- Tietge, U., Díaz, S., Mock, P., Bandivadekar, A., Dornoff, J., & Ligterink, N. (2019). *From laboratory to road: A 2018 update*. International Council on Clean Transportation. Retrieved from <https://theicct.org/publications/laboratory-road-2018-update>
- Yang, Z., & Yang, L. (2018). *Evaluation of real-world fuel consumption of light-duty vehicles in China*. International Council on Clean Transportation. https://theicct.org/publications/real_world_fuel_consumption_ldv_china
- 胡建信、张剑波、吴婧、方学坤、苏樂樂、胡瑕、韩佳蕊. (2013). 控制管理氢氟碳化物 (HFCs) 影响研究—机遇与挑战. 北京大学环境科学与工程学院. http://scholar.pku.edu.cn/sites/default/files/jianxin_hu/files/the_economics_of_f-gases_management_in_china_-_challenges_opportunities20130122.pdf
- 胡建信, 等. (2018) 《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. http://scholar.pku.edu.cn/sites/default/files/jianxin_hu/files/green_book_for_mac_0.pdf
- 国家环境保护总局. (2001). 中国汽车空调行业CFCs替代行动[M]. 天津, 中国汽车技术研究中心, 1-254.
- 国家市场监督管理总局. (2018a) 《汽车用空调器》: GB/T 21361-2017. <http://c.gb688.cn/bzgk/gb/showGb?type=online&hcno=711D263FC1C112BDC11C4C559BAB0A6E>
- 国家市场监督管理总局. (2018b) 《汽车用电驱动空调器》: GB/T 37123-2018. <http://c.gb688.cn/bzgk/gb/showGb?type=online&hcno=5D5DFC6259B0020D7FC1B3E9E0969CA0>
- 国家市场监督管理总局. (2021). 关于批准发布《数据中心能效限定值及能效等级》等602项国家标准和1项国家标准修改单的公告. <http://www.samr.gov.cn/bzjss/tzgg/202110/P020211011403907260642.pdf>
- 生态环境部. (2020). 《消耗臭氧层物质和氢氟碳化物管理条例 (修订草案征求意见稿)》. http://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk06/202005/t20200521_780130.html