

**Summary and analysis report on the baseline and the Kigali
Amendment scenarios, and the energy demand of cooling**

《基加利修正案》基线与控制情景和相关电力需求预测



北京大学环境科学与工程学院

2018 年 12 月 28 日

摘 要

制冷空调行业是温室气体氢氟碳化物（HFCs）的主要消费行业。当前，国际社会已经就 HFCs 的逐步削减达成了《蒙特利尔议定书（基加利修正案）》。在履行《基加利修正案》的同时提高制冷空调设备的能效，减少制冷空调行业的温室气体排放总量，实现协同效益，已成为当前全球制冷空调行业的共同目标。

本报告旨在（1）明确在《基加利修正案》下中国的 HFCs 消费基线，并通过情景分析，评估我国 HFCs 的减排潜力；（2）预测制冷空调行业未来的电力需求，评估行业在使用低 GWP 值制冷剂替代品或（和）提高能效的情景下，能实现的环境和能源效益。

由于当前家用制冷空调子行业对制冷空调行业电力消费总量的贡献极大，本报告首先完成了对家用制冷空调子行业电力需求基线的预测。现阶段，本报告（草稿）包含以下两项核心内容：（1）我国 HFCs 消费基线和减排潜力；（2）家用制冷空调行业在基线情景下未来的电力需求。

目 录

摘 要	2
1. 研究背景	1
2. 基线和控制情景的建立（研究）方法	3
2.1. HFCs 消费基线与减排情景分析	3
2.1.1. HFCs 消费量估算与预测	3
2.1.2. HFCs 排放量估算	6
2.1.3. 情景分析	7
2.2. 家用制冷空调行业电力需求预测	8
2.2.1. 保有量的估算与预测	8
2.2.2. 耗电量的估算与预测	10
3. 《基加利修正案》基线与 HFCs 减排潜力	11
3.1. 中国 HFCs 历史消费量和排放量	11
3.2. 《基加利修正案》基线	13
3.3. 中国 HFCs 减排潜力	16
3.4. 削减 HFCs 消费量的政策与技术建议	17
4. 家用制冷空调行业电力需求预测	19
4.1. 行业历史耗电量	19
4.1.1. 变化趋势	19
4.1.2. 区域差异	21
4.2. 驱动因素预测	22
4.3. 基线情景的电力需求	26
5. 主要结论	27
参考文献	28

1. 研究背景

氢氟碳化物（Hydrofluorocarbons, HFCs）是一类含氟的烃类化合物。由于不含氯、溴原子，HFCs 不会破坏平流层臭氧，因此被认为是理想的消耗臭氧层物质（Ozone Depleting Substance, ODS）的替代品，于上世纪 80 年代末引入市场，目前被广泛用作制冷剂、发泡剂、灭火剂、喷雾剂和清洗剂等。HFCs 能吸收地表反射的长波辐射，具有较高的全球变暖潜势（Global Warming Potential, GWP），多数 HFCs 的 GWP 值是 CO₂ 的千倍甚至上万倍^[1]，因此其在 1997 年被纳入《京都议定书》附件 A，成为受控的六类温室气体之一。2009 年已有研究表明^[2]，若不对 HFCs 的消费加以限制，可能在本世纪末造成全球升温 0.5°C，而这一预测在近些年得到了进一步地确认^[3]。

在 ODS 的淘汰进程中，替代品 HFCs 的生产消费量和排放量都不可避免地呈现快速增长趋势。2015 年，世界主要 HFCs 的产量已达 56.7 万吨/年，其中，中国产量占比约 70%^[4]。作为 HFCs 的生产消费大国，中国 HFCs 的产量和表观消费量目前正以 20% 的年均增长率迅速上涨。与此同时，中国 HFCs 排放量占世界 HFCs 排放量的比重也由 2005 年的 3% 增长至 2012 年的 17%（以 CO₂ 当量计）^[5]。相应地，AGAGE 的观测数据见证了 HFCs 大气浓度的抬升^[6]，如 HFC-134a、HFC-125 和 HFC-32 的全球平均浓度正分别以 5.6、2.3 和 1.6 pptv/yr 的速率上升，至 2015 年分别达 83.3、18.4 和 10.5 pptv。我国城镇地区的主要 HFCs 浓度普遍高于北半球背景浓度，且增长速率略快于全球平均水平^{[7],[8]}。根据预测，在不受控的情景下，至 2050 年全球 HFCs 排放量将高达 4.0-5.3 Gt CO₂-eq/yr，相当于当年全球 CO₂ 排放量的 6-9%，产生的辐射强迫达 0.22-0.25 W/m²，其中，中国对累计排放量的贡献将超过 30%^[9]。

为了减缓因 HFCs 排放导致的气候变化，国际社会于 2016 年达成了《基加利修正案》，其核心内容是将 ODS 的替代品 HFCs 纳入《蒙特利尔议定书》的管控物质名单，并规定了各缔约国的替代和减排时间表。非第 5 款国家（发达国家为主）中的美国、日本、加拿大和欧盟等国将率先于 2019 年开始削减 HFCs 的使用，俄罗斯等国则于 2020 年启动减排。第 5 款国家（发展中国家为主）也分两组，中国、巴西和阿根廷等国应于 2024 年将 HFCs 的消费冻结在基准水平，印度以及海湾国家等则于 2029 年冻结消费。按照规定，我国应在 2024 年冻结

HFCs 的消费，基准水平为 2020-2022 年间 HFCs 的平均消费量与 HCFCs 基准量（2009-2010 年均值）的百分之六十五的总和。

值得注意的是，对于 HFCs 的主要消费行业——制冷空调行业而言，HFCs 只是其排放的温室气体总量的一部分，削减 HFCs 的使用并不能完全有效地减少其对全球变暖的贡献。联合国环境署技术与经济评估组（UNEP TEAP）的报告^[10]显示，在制冷空调行业，80%的温室气体来自于设备运行的能源消耗（即间接排放），制冷剂的排放（即直接排放）仅占温室气体排放总量的 20%，且这个比例因制冷剂 GWP 值的降低还将继续减少。因此，在按《基加利修正案》路线削减 HFCs 的同时提高设备能源效率，降低制冷空调行业的总体温室效应，实现协同效益，是当前全球制冷空调行业的共同目标。

国际能源署（International Energy Agency, IEA）的报告称^[11]，若保持当前能效水平，到本世纪中叶，全球建筑供冷能耗将达到 6200TWh，间接排放的 CO₂ 达 1135Mt，而中国对此的贡献仅次于印度；若实现全球能效的显著提升，能耗将降低 45%，而 CO₂ 的排放量将下降 93%。作为制冷空调设备的生产和消费大国，中国制冷空调产品的平均能效水平远低于市场上的最高能效水平，仍有较高的提升空间和相应的减排潜力，若能在履行《基加利修正案》的同时提高制冷空调产品的能效，将有效地降低行业总体温室气体的排放，减缓全球气候变化。

2. 基线和控制情景的建立（研究）方法

2.1. HFCs 消费基线与减排情景分析

本报告研究的 HFCs 包括 HFC-134a、HFC-125、HFC-32、HFC-143a、HFC-227ea、HFC-236fa 和 HFC-245fa，这些物质被广泛应用于汽车空调、家用空调、工商制冷空调、泡沫塑料和消防灭火等行业。我国的 HFC-152a 虽然产量高，但大部分用作出口和原料用途，因此不列入本报告的研究范围。此外，由于 HFC-23 主要作为 HCFC-22 副产物排放，HFC-161、HFC-365mfc 等物质消费量占比很小，也不对其进行估算。本报告根据上述各行业产品的产销量及其对 HFCs 的消费特点，估算各行业的 HFCs 历史（1995-2017 年）消费量；基于宏观经济和行业的发展前景，预测未来（2018-2050 年）各行业的 HFCs 消费量；在消费量的基础上利用自下而上的方法计算排放量。

2.1.1. HFCs 消费量估算与预测

制冷空调行业的 HFCs 消费量包括产品生产和维修两个环节的 HFCs 制冷剂灌注量，如式 1 所示。泡沫和灭火装置不考虑维修，仅在生产环节使用 HFCs。

$$C_{i,j,t} = C_{pro_{i,j,t}} + C_{ser_{i,j,t}} \\ = n_{pro_{i,j,t}} \times m_{pro_{i,j}} + \sum_{k=1}^{life} n_{own_{i,j,t,k}} \times r_{ser_{i,j,k}} \times m_{ser_{i,j}} \quad (1)$$

式中， C 、 C_{pro} 、 C_{ser} 分别表示 HFC 消费总量、生产环节消费量和维修环节消费量。 n_{pro} 为产品产量，若不考虑进出口，则可用国内需求量（销量）代替。 n_{own} 为产品的保有量。 m_{pro} 指单位产品的 HFC 灌注量， r_{ser} 表示产品的维修率， m_{ser} 表示单位产品的维修灌注量。下标 i 、 j 分别表示行业和 HFC 类型， t 为观察年， k 为产品年龄， $life$ 为产品寿命。

由式 1 可知，HFCs 消费量的估算与预测依赖于对各行业产品需求的估算和预测。下面将分行业介绍相关参数的设置和产品需求的预测方法。

（一）汽车空调行业

在 1994 年以前，国内生产的绝大多数汽车均使用 CFC-12 作为汽车空调制

冷剂。受《蒙特利尔议定书》的管制，中国汽车空调行业从 1994 年开始淘汰 CFC-12，逐步使用 HFC-134a 作为替代品。依据调查结果，本报告假设轿车、客车和货车的空调安装率分别为 100%、75%和 30%，自 1995 年起所有新生产的汽车空调均采用 HFC-134a 制冷剂^[12]，其余参数如表 1 表 1 汽车空调行业 HFC-134a 消费量估算所用参数所示。

表 1 汽车空调行业 HFC-134a 消费量估算所用参数

车型	轿车	客车	货车
生产灌注量 ^{[13][14]} (kg/辆)	0.8 (1995-2002 年) 0.536 (2005 年后)	3.2 (1995-2002 年) 2.1 (2005 年后)	0.8 (1995-2002 年) 0.536 (2005 年后)
维修灌注量 ^[15]	生产灌注量的 90%		
维修率 ^[15]	5%		
寿命 ^[16]	10 年		

分车型的汽车产量、进出口量的历史数据分别可从《中国统计年鉴》、《中国汽车工业年鉴》中获取。由于汽车的需求量主要受人口增长和经济发展影响，本报告选用国内生产总值（GDP）作为预测未来汽车需求量的主导因子^[17]，建立如式所示的回归方程。此外，根据汽车工业协会的预测，随着中国汽车行业规模不断扩大、市场逐渐成熟，汽车需求量的增长将逐步放缓，最终趋于饱和。由此，本报告假设 2025 年起增速减慢，至 2035 年达到饱和，如式 2。

$$n_{MAC,t} = \begin{cases} a \times GDP_t + b, & t \leq 2020 \\ (1 - (t - 2025) \times 2\%) \times (a \times GDP_t + b), & 2025 < t \leq 2035 \\ n_{MAC,2035}, & 2035 < t \leq 2050 \end{cases} \quad (2)$$

式中， n_{MAC} 表示汽车空调的需求量； a 、 b 为回归系数；下标 t 表示时间。

（二）家用空调行业

我国家用空调行业起步与上世纪 60 年代，随着经济的增长和城镇化水平的不断提高，家用空调的需求也在急速增长，采用的制冷剂逐步从 CFC-12、HCFC-22 过渡到 HFCs。2017 年，HCFC-22、R410A 和 HFC-32 型家用空调在国内的市场份额（按销量计）分别为 38%、44%和 18%。R410A 和 R32 型家用空调的制冷剂生产灌注量约为 0.96kg/台^[18]。根据行业预测，随着 HCFC-22 的逐步淘汰，R410 型产品将主导市场；同时，由于 2013 年来格力等主流厂商强力推广 HFC-

32 型产品，可以预见，HFC-32 型空调的需求量也将持续上涨。由此，本报告以城镇化率估算国内家用空调需求总量并假设其在 2040 年达到饱和（如公式 3 所示），同时假设 R410A、HFC-32 型空调比重逐步增加，求得此两种家用空调的需求量。城镇化率的预测采用联合国常用的方法^[19]，如式 4 所示。

$$n_{RAC,t} = \begin{cases} a \times U_t + b, & t \leq 2040 \\ n_{RAC,2040} \times 0.99^{t-2040}, & 2040 < t \leq 2050 \end{cases} \quad (3)$$

$$\frac{U_t}{1 - U_t} = \left(\frac{U_{2010}}{1 - U_{2010}} \right) \times e^{k(t-2010)} \quad (4)$$

式中， n_{RAC} 为家用空调需求量； U_t 表示第 t 年的城镇人口比重（即城镇化率）， $U(2010)$ 表示 2010 年我国人口普查时统计的城镇人口比重，历年城镇人口比重的数据从《中国统计年鉴》中获取； a 、 b 、 k 为回归系数。

（三）商业空调行业

商业空调指的是除家庭之外其它室内场所使用的空调设备。国际应用系统分析研究所（IIASA）的研究结果显示，公共建筑面积的扩张将推动对商业空调的需求^[20]。因此，本报告选用公共建筑竣工面积对当年的商业空调制冷剂生产灌注量进行预测，回归方程如式 5 所示。当前我国商业空调行业常用的制冷剂有 HCFC-22、HFC-134a、R410A 和 R407C，其中，HFC-134a 主要用于中大型冷水机组，而 R410A、R407C 则多用于多联机以及小功率的冷水机组。本报告假设 HCFC-22 型空调至 2030 年全部淘汰，三种 HFC 型商业空调之间的需求比例与当前保持一致，进而预测商业空调行业 HFCs 制冷剂消费量。

$$C_{proCAC,t} = a \times S_t + b \quad (5)$$

式中， C_{proCAC} 表示商业空调制冷剂生产灌注量； S_t 表示公共建筑竣工面积，数据来自《中国建筑业统计年鉴》，这里的公共建筑包括办公、批发和零售、住宿和餐饮、居民服务业、教育、文化体育和娱乐、卫生医疗、科研及其他商业用途但不属于以上领域的用房； a 、 b 为回归系数。

（四）冷链行业

本报告的冷链行业包含商业和运输制冷，前者包括在超市、餐馆及其它服务行业所使用的制冷设备，后者则指商品在完成生产和终端销售之间的运输、储存环节所使用的制冷设备。由于冷链行业的设备种类繁多，本报告并未通过预测各

类设备需求量估算 HFCs 消费总量，而是参考 IIASA 的方法^[20]以相关行业的增加值预测 HFCs 消费量（公式 6）。当前我国冷链行业使用的 HFCs 制冷剂主要为 R404A。

$$C_{pro_{CC},t} = a \times GDPVA_t + b \quad (6)$$

式中， $C_{pro_{CC}}$ 表示冷链行业制冷剂生产灌注量； $GDPVA$ 等于批发和零售业、住宿和餐饮业及交通运输、仓储和邮政业三个冷链设备集中应用行业的增加值之和，行业增加值数据来自《中国统计年鉴》； a 、 b 为回归系数。

（五）泡沫行业和消防行业

在泡沫行业，依据《蒙特利尔议定书》的要求，HFC-245fa 逐步替代 CFC-11、HCFC-141b，作为聚氨酯硬泡的发泡剂，应用于冰箱冰柜保温层、保温管道、保温板材等的生产。在消防行业，随着 Halon-1211、Halon-1301 灭火剂退出市场，HFC-236fa、HFC-227ea 在移动式灭火器和固定灭火系统中的应用已初具规模^[21]。由于与其它常用 HFCs 相比，我国 HFC-245fa、HFC-236fa 和 HFC-227ea 的产能相对较小，详细数据也难以获取，本报告采用较为简单的方式，直接以 GDP 预测三者未来的消费量。

2.1.2. HFCs 排放量估算

本报告参考 2006 年 IPCC 发布的《国家温室气体排放清单指南》，通过自下而上的方法，基于 HFCs 在各行业的消费数据，估算其排放量。制冷空调、泡沫塑料和消防灭火行业均属于延迟排放行业，即 HFCs 的排放发生在产品寿命期内的生产、运行、维修和报废等各个环节，消费量和排放量之间的差异累积形成库存（Bank）。本研究采用排放因子方式，计算了各行业在各环节的排放量，方法如式 7-12 所示。

$$Bank_{i,j,t} = Bank_{i,j,t-1} + C_{i,j,t-1} - E_{i,j,t-1} \quad (7)$$

$$E_{i,j,t} = E_{pro_{i,j,t}} + E_{ope_{i,j,t}} + E_{ser_{i,j,t}} + E_{dis_{i,j,t}} \quad (8)$$

$$E_{pro_{i,j,t}} = C_{pro_{i,j,t}} \times f_{pro_{i,j}} \quad (9)$$

$$E_{ope_{i,j,t}} = Bank_{i,j,t} \times f_{ope_{i,j}} \quad (10)$$

$$E_{ser_{i,j,t}} = \sum_{k=1}^{life} Bank_{i,j,t,k} \times r_{ser_{i,j,k}} \times f_{ser_{i,j}} \quad (11)$$

$$E_{dis_{i,j,t}} = \sum_{k=1}^{life} (Bank_{i,j,t,k} - E_{ope_{i,j,t,k}} - E_{ser_{i,j,t,k}}) \times r_{dis_{i,j,k}} \times f_{dis_{i,j}} \quad (12)$$

式中, $Bank$ 表示 HFCs 库存量; C 和 C_{pro} 分别表示 HFCs 消费量和产品生产灌注量; E 、 E_{pro} 、 E_{ope} 、 E_{ser} 、 E_{dis} 分别代表 HFCs 的排放总量和在生产、运行、维修、报废环节的排放量; f_{pro} 、 f_{ope} 、 f_{ser} 、 f_{dis} 分别为生产、运行维修、报废环节的排放因子; r_{ser} 、 r_{dis} 为维修比例和报废概率。下标 i 、 j 分别表示行业和 HFCs 类型, t 为观察年 (年初), k 和 $life$ 为产品年龄和寿命。

依据行业调查和相关文献, 本报告对各行业排放因子的设置如表 2 所示。

表 2 各行业在各环节的排放因子及产品平均寿命

行业类型	生产环节 排放因子	运行环节 排放因子	维修环节 排放因子	报废环节 排放因子	产品 平均寿命
汽车空调	0.5%	6.25% ^[22]	100% ^[15]	100% ^[15]	10 年 ^[16]
家用空调	0.6%	3%	100%	100%	10 年 ^[18]
商业空调	1%	10%	100%	100%	15 年 ^[23]
冷链	1%	10%	100%	100%	10 年 ^[23]
泡沫	4%	0.5%	-	100%	15 年 ^[24]
消防	-	2%	-	100%	20 年 ^[25]

注: 若无引用, 则排放因子取自 IPCC (2006) ^[13]

2.1.3. 情景分析

为估算中国履行《基加利修正案》的减排义务, 本报告设置了两种情景, 即不受《基加利修正案》控制的消费量情景 (BAU 情景) 和按《基加利修正案》路线控制消费量的情景 (KA 情景)。

根据《基加利修正案》的要求, 中国 (属于第 5 款国家) 应从 2024 年起对有意生产和使用的 HFCs 进行控制, 具体的控制路线如表 3 所示。其中, 消费基准为 2020-2022 年间 HFCs 的平均消费量与 HCFCs 基准量 (2009-2010 年均值) 的百分之六十五的总和。取 BAU 情景下 2020-2022 年 HFCs 消费量均值计算消费基准, 即可得到 KA 情景下各时间段的 HFCs 消费水平, 进而估算出 HFCs 排放量与减排量。

表 3 《基加利修正案》对第 5 款国家 HFCs 消费量的控制要求

年份	控制水平
2024-2028 年	基准水平 ¹
2029-2034 年	基准水平的 90%
2035-2039 年	基准水平的 70%
2040-2044 年	基准水平的 50%
2045 年及以后	基准水平的 20%

2.2. 家用制冷空调行业电力需求预测

某地区制冷空调行业的能源需求，主要受到以下四个因素驱动：气候变化、经济发展、人口增长和能源效率。本报告参考美国劳伦斯伯克利国家实验室（Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL）的相关研究^[26]，目前已完成对家用制冷空调行业基线情景电力需求的预测：充分考虑气候、经济和人口因素，对我国各省（不包括港、澳、台）的家用制冷空调行业的历史（2000-2016 年）和未来（2017-2050 年）保有量进行估算和预测，同时结合对市场产品能效的调查，使用自下而上的方法，对该行业终端能耗（即耗电量）进行估算和预测。

2.2.1. 保有量的估算与预测

家电类产品的保有量通常可以通过式 13 进行估算。考虑到我国城乡居民消费水平和家庭结构存在较大差异，因此需要对城镇和农村家庭制冷空调设备保有量分别进行估算，如式 14。由此可见，人口增长和城镇化直接推动了家用制冷空调设备的需求。

$$Own_{i,j,t} = Dif_{i,j,t} \times \frac{Pop_{j,t}}{size_{j,t}} / 100 \quad (13)$$

$$Own_{i,j,t} = Dif_u_{i,j,t} \times \frac{Pop_{j,t} \times U_{j,t}}{size_u_{j,t} \times 100} + Dif_r_{i,j,t} \times \frac{Pop_{j,t} \times (1 - U_{j,t})}{size_r_{j,t} \times 100} \quad (14)$$

式中， Own 表示设备保有量； Dif 、 Dif_u 和 Dif_r 分别表示居民家庭每百户保有量、城镇居民家庭每百户保有量和农村居民家庭每百户保有量； Pop 为人口

¹ 《基加利修正案》：“按本条第 1 款行事的每一缔约方，为计算第 2J 条规定的消费基准，有权使用 2020 年、2021 年和 2022 年消费附件 F 受控物质的计算数量均值，加上本条第 8 款之三所列附件 C 第一类受控物质基准消费量的百分之六十五的总和。”

数； U 为城镇化率（即城镇人口比重）； $size$ 、 $size_u$ 和 $size_r$ 分别为户规模、城镇户规模和农村户规模；下标 i 、 j 、 t 分别代表设备类型、地区和年份。

估算我国各省家用空调、家用冰箱（柜）的历史保有量时，所使用的人口数、城镇人口比重、户规模以及城乡家庭家庭消费品每百户保有量等历史数据可从《中国人口和就业统计年鉴》和《中国统计年鉴》获取。而预测设备的未来保有量时，假设各省人口比重、城乡家庭户规模保持不变，全国人口总数选用联合国经济与社会事务部（UN DESA）预测数据^[27]，各省城镇化率按式 4 的方法预测。各省城乡家庭每百户保有量则需要通过建立回归模型作更细致的预测。

LBNL 的研究结果^[28]表明，从微观上看，在发展中国家，居民家庭购买制冷空调设备的行为受其支付能力主导；而在发达国家，这一行为不再受支付能力限制，而是由外部气候条件驱动。由此，本报告参照 LBNL 的方法，对我国城乡家庭每百户保有量和城乡居民收入建立 Logistic 回归模型，如式 15 所示。

$$Dif_{i,j,t} = \frac{\alpha_{i,j}}{1 + \gamma \times \exp(\beta_{i,j} \times I_{j,t})} \quad (15)$$

式中， Dif 为城镇或农村居民家庭每百户保有量； I 为城镇居民人均可支配收入或农村居民人均纯收入，历史数据从《中国统计年鉴》获取，未来趋势通过灰色模型 GM(1,1) 预测； α 表示每百户保有量的饱和水平；下标 i 、 j 、 t 分别表示设备类型、地区和年份； γ 和 β 为回归系数。

模型中家用空调保有量的饱和水平 α 由当地气候条件（气温）决定，而气温因素用冷度日（Cooling Degree Days, CDD）表征。假设以省会城市 CDD 值代表全省，如式 16 计算可得我国各省的年 CDD，暂不考虑未来 CDD 因全球变暖而升高，假设某一地区的 CDD 为常数。

$$CDD(T_c)_j = \sum_{i=1}^{365} \sigma(T_{i,j} - T_c) \quad (16)$$

式中， T 为日平均温度，从中国气象局发布的《中国地面气候资料日值数据集》获取； T_c 为阈值温度，当 T 高于 T_c 时， σ 取 1，反之取 0； $CDD(T_c)$ 表示以 T_c 为阈值温度计算的年 CDD 值；下标 i 、 j 表示天数和地区。在美国， T_c 通常取 18°C ，而中国《采暖通风与空气调节设计规范》和《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》均以 26°C 为阈值。

LBNL 的研究中假设，在给定 CDD 值下，美国每百户家庭家用空调的保有量水平代表最高水平 α 。利用美国 39 个城市 2001 年居民能源消费调查 (RECS) 数据，对美国每百户家庭空调保有量和 CDD(18)的关系进行拟合，得到式 17。由于我国居民家庭对空调的购买行为和使用习惯与美国存在一定差别，本报告使用各省的年 CDD(26)对利用式 17 得到的 α 进行校正。

$$\alpha_j = 100 - 94.9 \times \exp[-0.00187 \times CDD(18)_j] \quad (17)$$

家用冰箱保有量受气温因素的影响相对较弱，因此，模型中的饱和水平 α 取发达国家最高观察值，且全国各省取同一值。

2.2.2. 耗电量的估算与预测

各省家用制冷空调设备的逐年耗电量可以通过式 18 计算得到。

$$EC_{i,j,t} = Own_{i,j,t} \times P_{i,t} \times OT_{i,j} \quad (18)$$

式中， EC 表示设备的耗电量， Own 为设备保有量， P 表示设备运行功率， OT 表示设备的年运行时间。下标 i 、 j 、 t 分别表示设备类型、地区和年份。

由于缺乏详细的市场数据，难以获知我国各类家用空调、冰箱（柜）的运行功率。本报告根据中国标准化研究院^[29]和中国家电协会^[30]等发布的产品能效调查报告，获得当前不同能效等级产品的市场份额、定变频产品的市场占有率，计算得到我国家用空调、冰箱（柜）运行功率的平均水平，如表 4 所示。各省家用空调的年运行时间参考文献^[31]，而冰箱的运行时间假设为全年。

表 4 我国家用空调、冰箱（柜）的平均功率

设备类型	平均功率/kW		
家用空调	2004 年：1.49	2012 年：1.22	2016 年：1.13
家用冰箱（柜）	2000 年：0.05	2008 年：0.04	2016 年：0.03

为了评估未来能效提升所节省的能源和减少的温室气体排放，可分别设置基线情景（即能效保持当前水平不变）和能效提高情景对电力需求进行预测。本报告假设能效水平与 2016 年保持一致，完成了对电力需求的基线预测。

3. 《基加利修正案》基线与 HFCs 减排潜力

本章对 HFCs 的历史消费和排放特点进行了总结，在此基础上，预测了中国履行《基加利修正案》的基线，同时，通过对比受控和不受控情景下未来的消费和排放量，评估了我国履行《基加利修正案》的减排潜力。

3.1. 中国 HFCs 历史消费量和排放量

如图 1 所示，我国 HFCs 消费量正处于快速增长阶段。从 1995 年仅少数汽车企业使用 HFC-134a 作为汽车空调制冷剂，到 2006 年制冷空调、泡沫和消防各行业均逐步使用 HFCs 替代 ODS 类制冷剂、发泡剂和灭火剂，到如今我国已成为 HFCs 的生产和消费大国。据估算，2006 年至 2017 年，我国 HFCs 消费量的年均复合增长率约为 30%，2006 年我国共消费 HFCs 约 9.12kt，而 2017 年 HFCs 消费量已达 163.58kt。

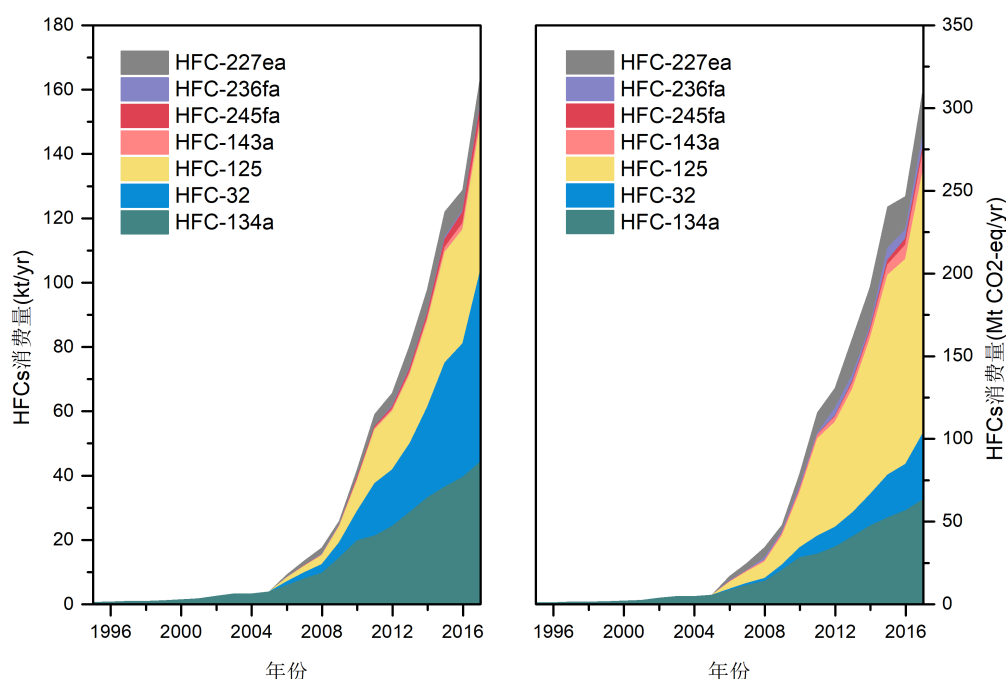


图 1 主要 HFCs 的历史消费量

HFC-134a 是我国应用最早的一类 HFCs，其消费量从 2006 年的 5.76kt/yr 稳步上涨至 2017 年的 44.23kt/yr，但其对 HFCs 消费总量的贡献一直呈现下降趋势，

从 2006 年的 63% 跌至 2017 年的 30%。随着 R410A、R407C 等混配制冷剂需求的快速增加，HFC-32 和 HFC-125 的消费量实现了大幅度增长，逐步赶超 HFC-134a。以实物计，2006 年，HFC-32 和 HFC-125a 的消费量均在 1kt/yr 左右；2017 年 HFC-32 消费量最高，达 59.34kt/yr，其次是 HFC-125，消费量约 45.51kt/yr，两者对 HFCs 消费量的贡献分别为 36% 和 27%。由于 HFC-125 的 GWP 值为 3500，高于 HFC-134a 和 HFC-32，因此，以 CO₂ 当量计算时，2017 年 HFC-125 的消费量为 159.29Mt CO₂-eq/yr，远高于其它 HFCs，在当年 HFCs 消费总量（310.65Mt CO₂-eq/yr）的占比超过 50%。HFC-143a、HFC-245fa、HFC-236fa 和 HFC-227ea 在 2017 年的消费量虽不足万吨，但这四种物质的 GWP 值均高于 3000，且 HFC-227ea 灭火剂和 HFC-245fa 发泡剂的消费量近年有较快增长，因此也应给予重视。

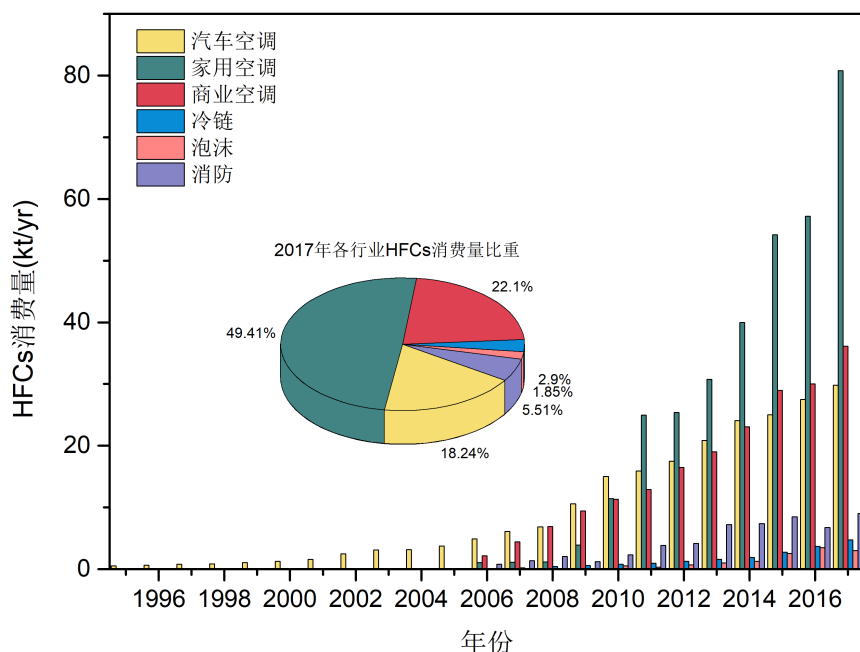


图 2 各行业的 HFCs 历史消费量

从行业的角度分析，如图 2 所示，家用空调行业的 HFCs 消费量增幅最大，以 48% 的年均增长率从 2006 年的 10.92kt/yr 上涨至 2017 年的 80.82kt/yr。在家用空调领域，HCFC-22 型产品的主导地位虽尚未改变，但 R410A 和 HFC-32 型产品的比重也在逐步提升，尤其是 HFC-32 型空调，受主流厂商的大力推广，HFC-32 制冷剂在家用空调行业的消费量（不包括用于配制 R410A 的部分）已从 2013 年的 674t/yr 大幅增长至 2017 年的 15.93kt/yr。其它行业的 HFCs 消费量也在稳步增长中。2017 年，商业空调和汽车空调行业的 HFCs 消费量分别达 36.14kt/yr

和 29.83kt/yr，占比分别达 22%和 18%；消防行业的消费量即将突破万吨；冷链和泡沫行业的消费量相对较低，分别约为 4.7 和 3kt/yr。

随着我国 HFCs 产能的提高和应用的扩展，其排放量也在迅速增加，但由于所涉及的行业具有延迟排放的特点，排放量的增长滞后于消费量。如图 3 所示，根据本研究的估算，2009 年以前我国 HFCs 的排放量尚不足 10Mt CO₂-eq/yr，而 2017 年的排放量已超过 100Mt CO₂-eq/yr，增长了近 10 倍。2017 年我国排放的 HFCs 约 107.66Mt CO₂-eq/yr。其中，HFC-125 和 HFC-134a 的贡献最大，分别排放 48.79 和 32.78Mt CO₂-eq/yr；接下来依次是 HFC-32、HFC-227ea 和 HFC-143a，排放量远低于前两者，分别为 9.27、8.55 和 6.23Mt CO₂-eq/yr；HFC-236fa 和 HFC-245fa 的排放量占比极低，约 2%。除泡沫行业排放量较少外，HFCs 排放量在其它行业的分布较为均匀。2017 年，家用空调的 HFCs 的排放量最高，达 34.28Mt CO₂-eq/yr；商业空调与汽车空调行业分别排放 28.41 和 23.86 CO₂-eq/yr。冷链和消防行业的排放水平相当，均在 10Mt CO₂-eq/yr 左右。

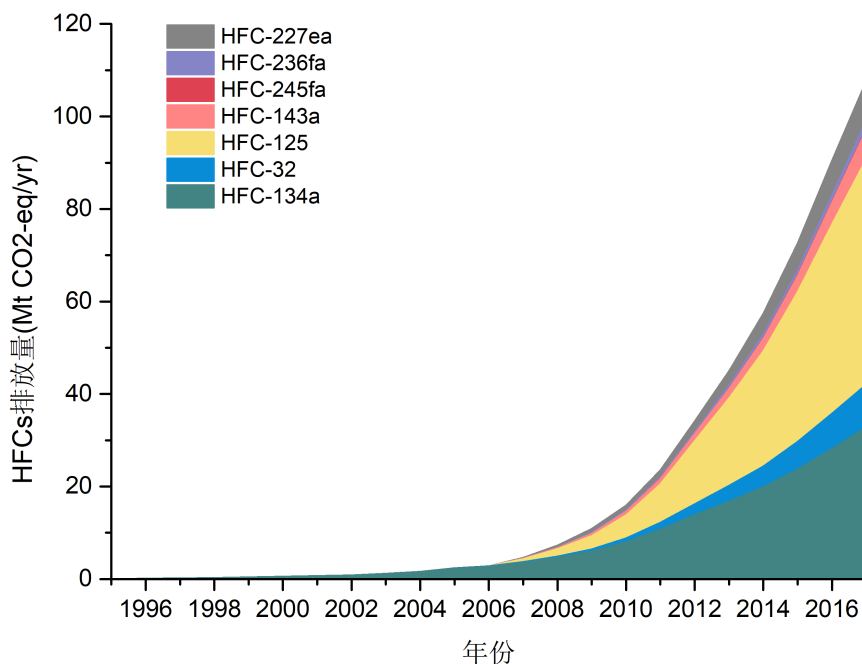


图 3 主要 HFCs 的历史排放量

3.2. 《基加利修正案》基线

如表 5 所示，根据本报告对不受控情景（BAU 情景）下消费量的预测，我

国在 2020-2022 年的 HFCs 消费量均值约为 419.32Mt CO₂-eq/yr。同时，HCFCs 的消费量已于 2013 年冻结在 2009-2010 年的平均水平，约 469.47Mt CO₂-eq/yr。因此，根据《基加利修正案》的要求，我国应在 2024 年将 HFCs 消费量冻结在基准水平 724.47 Mt CO₂-eq/yr。此后的控制时间表如图 4-1 所示，即 2024-2028 年维持基准水平；2029-2034 年消费量削减至 90%，不得超过 652.02Mt CO₂-eq/yr；2035-2039 年削减至 70%，约 507.13 Mt CO₂-eq/yr；2040-2044 年削减至 50%，约 362.24 Mt CO₂-eq/yr；2045 年及以后，消费量削减至基准水平的 20%，约 144.89 Mt CO₂-eq/yr。

表 5 HFCs 消费量基准水平估算

物质	年份	消费量（Mt CO ₂ -eq/yr）
HCFCs	2009 年	450.05
	2010 年	488.88
	2020 年	383.76
HFCs	2021 年	419.45
	2022 年	454.74
	2024 年	724.47（基准水平）

由于 BAU 情景下 2024-2028 年 HFCs 实际消费量低于《基加利修正案》所设定的基准水平，本报告假设为控制 HFCs 提供充足的缓冲时间，各行业自 2029 年起开始削减消费量，具体路线如图 4 中所示 KA 情景。在 BAU 情景下，虽然因经济发展速度放缓、产品保有量趋于饱和，我国 HFCs 消费量的增长也随之减速，但增幅依然可观，其在 2024 年将突破 500Mt CO₂-eq/yr，在 2050 年将突破 1000Mt CO₂-eq/yr，截至 2050 年的累计消费量将高达 27Gt CO₂-eq。而在 KA 情景下，2030 年我国 HFCs 的消费量即可下降至 BAU 情景的 89%，2040 年的消费量为 BAU 情景下消费量的 38%，2050 年的消费量则仅占 BAU 情景的 14%，相当于 2012-2013 年的平均消费水平。至本世纪中叶，KA 情景下的累计消费量为 BAU 情景下的 60%，即我国因履行《基加利修正案》所实现的 HFCs 消费量的削减累计可达 10.85Gt CO₂-eq，显示出巨大的削减潜力。

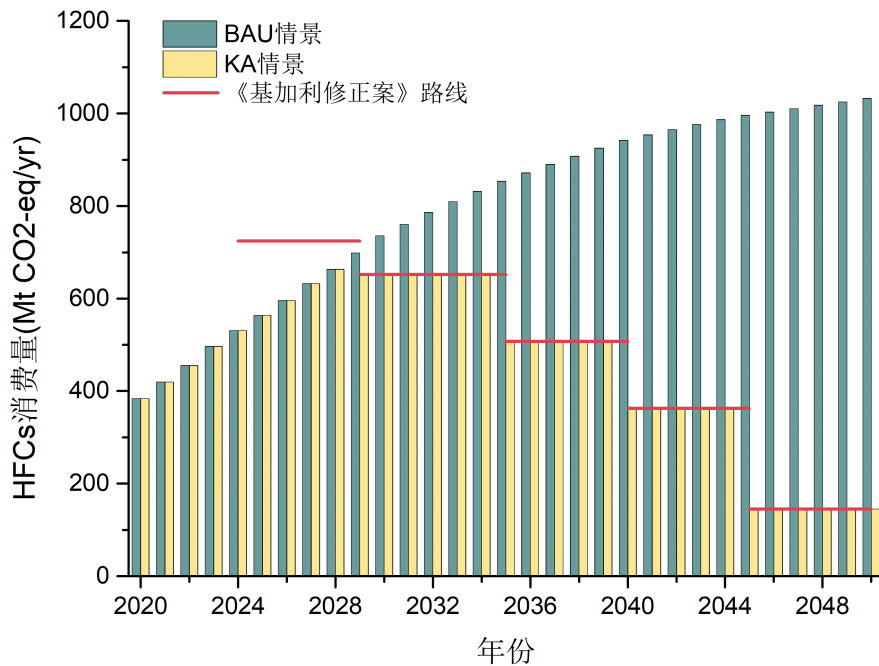


图 4 HFCs 控制时间表与 BAU、KA 情景下的消费量

如图 5，为满足《基加利修正案》的要求，各行业所承担的削减义务有所不同。家用空调和商业空调行业需完成的削减量最高，至 2050 年累计分别达 3.25 和 3.02Gt CO₂-eq。冷链、消防和汽车空调行业次之，消费量累计削减 1.67、1.54 和 1.16Gt CO₂-eq。泡沫行业需削减的消费量仅 0.19Gt CO₂-eq。

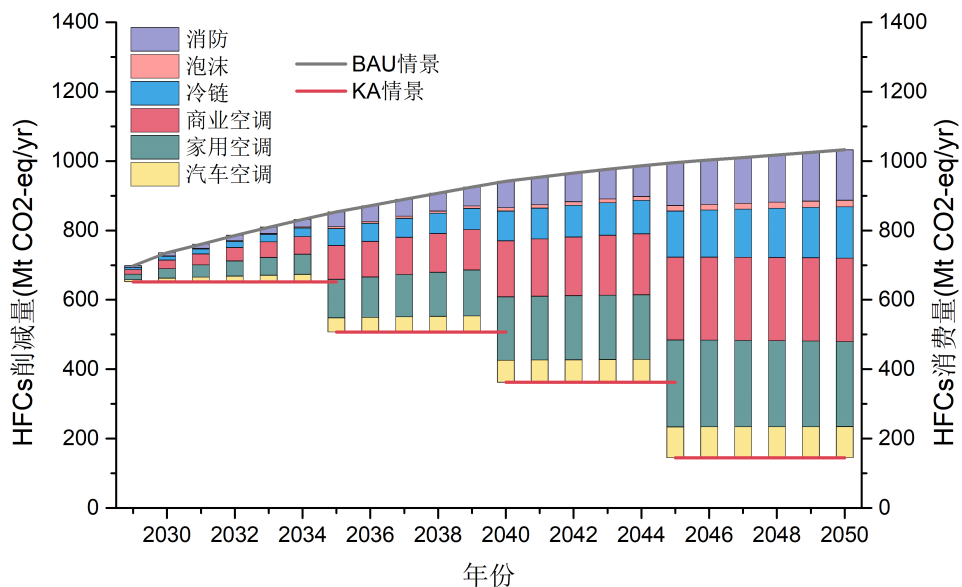


图 5 各行业 HFCs 削减任务

3.3. 中国 HFCs 减排潜力

在 KA 情景下，我国 HFCs 的排放量呈现“双峰”分布，如图 6 所示。排放量爬升至 2035 年达到第一个峰值 615.40Mt CO₂-eq/yr，在 2036 年经历微幅的回落后继续增长至 2039 年达到第二个峰值，约 633.70Mt CO₂-eq/yr，随后开始快速下降，至 2050 年 HFCs 排放量与 2020 年水平相当，约 200Mt CO₂-eq/yr。这种分布是由于各行业在 KA 情景下的减排路径不同导致的。家用空调行业的排放量高于其它行业，在 2039 年达到峰值 232.97Mt CO₂-eq，达峰后排放量迅速降低，至 2050 年排放量仅为 45.40Mt CO₂-eq，相比 BAU 情景累计减排 870.48Mt CO₂-eq。商业空调行业的排放量仅次于家用空调行业，但早于家用空调行业于 2035 年达到峰值 184Mt CO₂-eq，至 2050 年累计减排 1803.31Mt CO₂-eq，是累计减排力度最大的行业。与商业空调行业类似，冷链行业和汽车空调行业也于 2035 年达峰，峰值分别为 91.05 和 81.35Mt CO₂-eq，两者至 2050 年的累计减排量分别为 1343.55 和 750Mt CO₂-eq。消防行业和泡沫行业的排放量增长缓慢，其中，消防行业于 2039 年前后达到平台期，排放量保持在 66Mt CO₂-eq 左右；聚氨酯硬泡产品使用的 HFCs 较少且大部分于产品报废时排放，因此泡沫行业的排放量最低且达峰最晚，于 2049 年达到峰值 9.18Mt CO₂-eq。

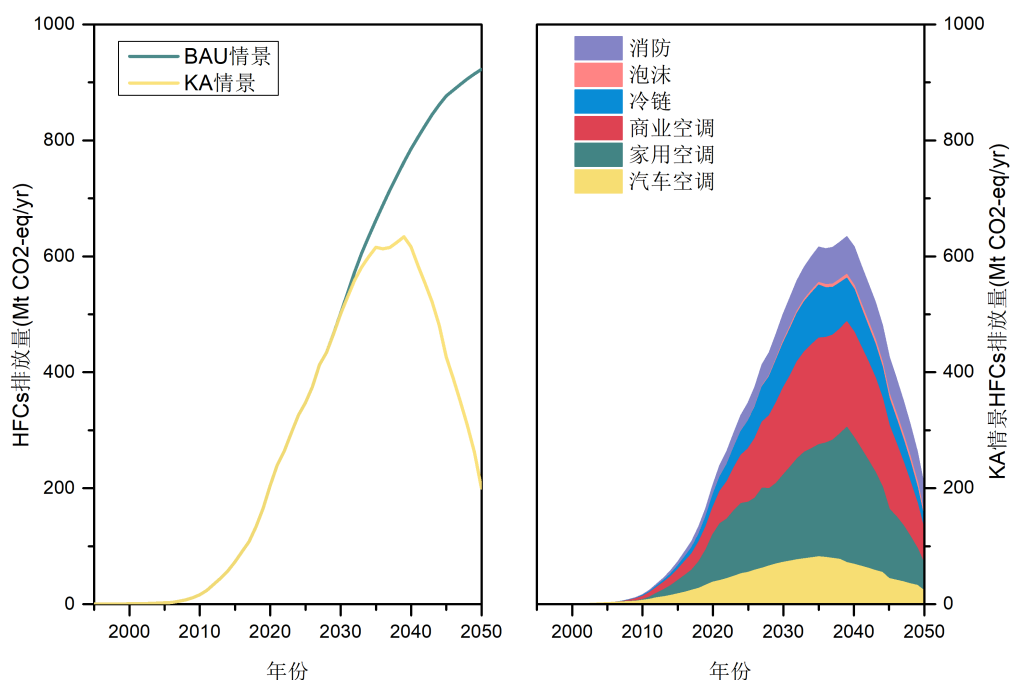


图 6 BAU 情景和 KA 情景下 HFCs 排放量

KA 情景下, 2018-2050 年累积排放 HFCs 约 14.22Gt CO₂-eq。而若不对 HFCs 的消费进行控制, 我国 HFCs 的排放量将一直抬升至 2050 年趋近饱和 (年增长率降至 0.8%), 达到 922.42Mt CO₂-eq/yr, 2018-2050 年累积排放量约 19.60Gt CO₂-eq。如表 6, 对比两种情景下排放量的变化路径可以发现, 若我国履行《基加利修正案》, 将在 HFCs 排放量达峰后的短时间内实现巨大的气候效益: 2045 年 KA 情景的排放量约为 BAU 情景的 48%, 累积减排约 2.36Gt CO₂-eq; 2050 年 KA 情景的排放量仅占 BAU 情景的 22%, 累计减排量约为 5.38Gt CO₂-eq。

表 6 KA 情景下各阶段的累计减排量

年份	累计减排量 (Mt CO ₂ -eq)
2035 年	127.40
2040 年	713.07
2045 年	2359.69
2050 年	5375.87

3.4. 削减 HFCs 消费量的政策与技术建议

在过去 20 余年里, 我国为 ODS 的淘汰建立健全了管理体系和政策法规, 并积累了丰富的工作经验^[32]。作为 ODS 的替代品, HFCs 的生产企业和应用行业与 ODS 高度一致, 因此可以在现行的 ODS 政策管理体系下, 充分借鉴 ODS 的淘汰机制, 在短时间内启动对 HFCs 的有效管控, 具体建议如下:

(1) 坚持在 ODS 淘汰进程中建立的《生产配额许可证制度》、《进出口许可证制度》与《消费配额许可证制度》, 控制 HFCs 的供应渠道, 鼓励国内氟化工企业依据自身情况安排有序减产和停产, 并通过出口管控促进其它国家和地区削减 HFCs。

(2) 坚持费用有效的削减机制, 在行业整体减排任务的框架下, 以招投标的方式, 鼓励企业以合理价位自主自愿申报减排量, 以此分配多边基金给予我国的经济资助。

(3) 借鉴欧盟针对制冷剂的全生命周期管理模式, 对设备的生产、运行、维修和退役进行全程监管, 在其生命周期的各环节落实减排。尤其需要重视设备的

定期检漏和制冷剂的回收利用，以改善当前“减产强减排弱”的低效局面。

HFCs 替代技术的发展对 HFCs 的控制具有决定性的作用。如表 7 所示，HFO 和碳氢化合物类低 GWP 值替代品是当前的主流，如 HFO-1234yf 和 R600a 已经在汽车空调和家用制冷行业实现了市场化。随着对可燃性的限制放松，碳氢化合物在未来的应用极具潜力。需要提醒的是，考虑到制冷空调行业的间接温室效应，制冷剂的能效也应该成为替代品评估中不可忽视的指标。寻求 GWP 值、可燃性和能效的最佳折中，是 HFCs 替代技术发展的关键思路。

表 7 各行业 HFCs 的替代品

行业	当前使用的 HFCs	主要替代品
汽车空调	HFC-134a	HFO-1234yf 等
家用空调	HFC-410A	HFC-32、R290 等
商业空调	HFC-134a、R410A、R407C	HFC-32、HFO-1234yf、HFO-1234ze、HFO-1233zd、HFC-32/HFO 混合物等
冷链	HFC-134a、R404A	R717、R744、R290、R1270、R600a、HFO-1234yf 等
泡沫	HFC-245fa、HFC-365mfc	HCFO-1233zd、HFO-1336mzz 等
消防	HFC-236fa、HFC-227ea	全氟己酮、全氟-2-甲基-3-戊酮等

4. 家用制冷空调行业电力需求预测

本章报告了我国家用制冷空调行业电力消费的增长趋势与空间差异，并预测了基线情景下该行业未来的电力需求。本报告设定的基线情景，暂不考虑气候变化的影响，仅描述在保持当前能源效率水平的条件下，家用制冷空调行业能耗随经济发展和人口增长的变化趋势。

4.1. 行业历史耗电量

4.1.1. 变化趋势

如图 7 所示，2000-2016 年，我国家用制冷空调行业的保有量和年耗电量均呈现直线上涨趋势。其中，家用冰箱（柜）保有量的涨势相对平缓，由 2000 年的 1.4 亿台增长至 2016 年的 4.4 亿台，相应地，其年耗电量由 60TWh 增长至 127TWh。而家用空调保有量由 2000 年的 5400 万台激增至 2016 年的 5.2 亿台，上涨近十倍；家用空调的年耗电量则由 2000 年的 61TWh 增长至 2016 年的 444TWh。2000 年，全国家用空调的保有量尚不足家用空调的一半，年耗电量与家用冰箱（柜）基本持平；截至 2016 年，家用空调的年耗电量已是家用冰箱的三倍余。由于这期间国内能效标准不断提高，变频产品市场占有率上升，空调产品整体能效水平也随之提升，因此近年来家用空调的保有量虽在大幅上扬，但行业能耗的上涨趋势却逐渐放缓。

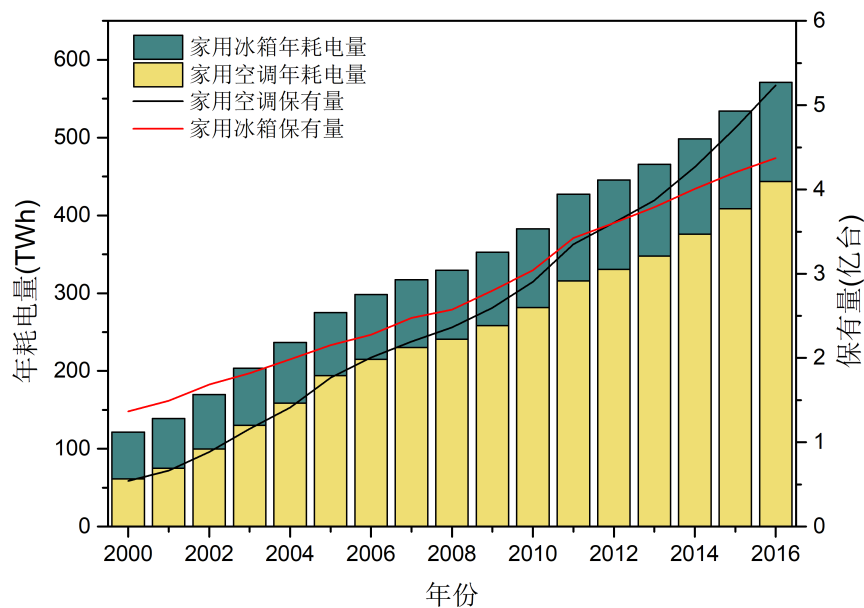


图 7 家用空调、冰箱（柜）的逐年保有量及年耗电量

IEA 发布的报告^[1]称, 2016 年中国建筑供冷设备（包含空调、冷水机组、风扇和除湿机）的保有量为 5.9 亿台, 占全球保有量的 54%, 耗电量约 450TWh, 占全球总耗电量的 22%, 但人均耗电量远低于美国和日本等发达国家。本报告对家用空调的估算结果显示, 2016 年我国家用空调保有量 5.2 亿台, 耗电量 444TWh, 人均耗电量 321KWh。对比可知, 本报告对家用空调的估算高于 IEA 的结果。

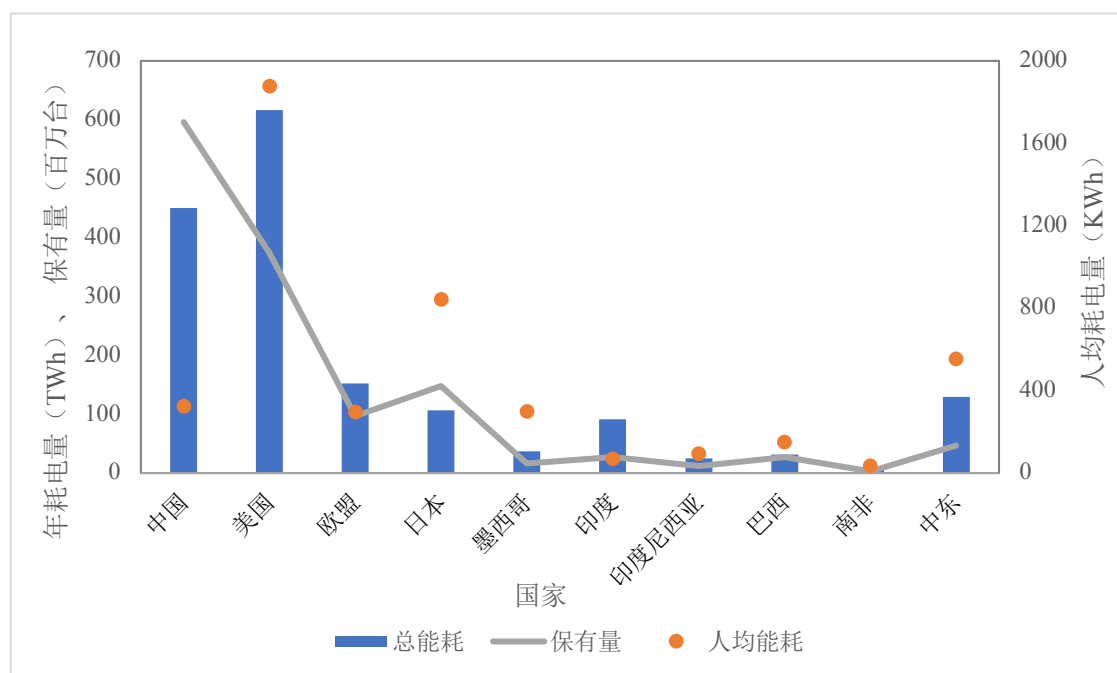


图 8 2016 年世界各国建筑制冷设备保有量、总能耗、人均能耗
数据来源：IEA(2018)

4.1.2. 区域差异

从空间分布上看，如图 9 所示，当前家用空调的高能耗地区分布在经济发达且气候炎热的地区，如广东、江苏和浙江，此三省在 2016 年的人均可支配收入位于全国前列，其城镇家庭每百户空调保有量均已超过 200。2016 年广东省家用空调的年耗电量约 64TWh，远超全国其它省市，除经济和气候因素外，还与该省人口众多有关。江苏和浙江省的年耗电量分别为 41 和 36TWh。如图 10 所示，家用冰箱（柜）的高能耗地区则主要分布在人口较为集中的地区，如广东、山东、河南、四川、江苏等地，受经济和气候的影响相对较小。前三名广东、山东和河南 2016 年家用冰箱（柜）的年耗电量分别达 9.9、9.7 和 8.0TWh。综合分析，如表 8 所示，广东、江苏和浙江省为当前我国家用制冷空调行业能耗最高的地区。

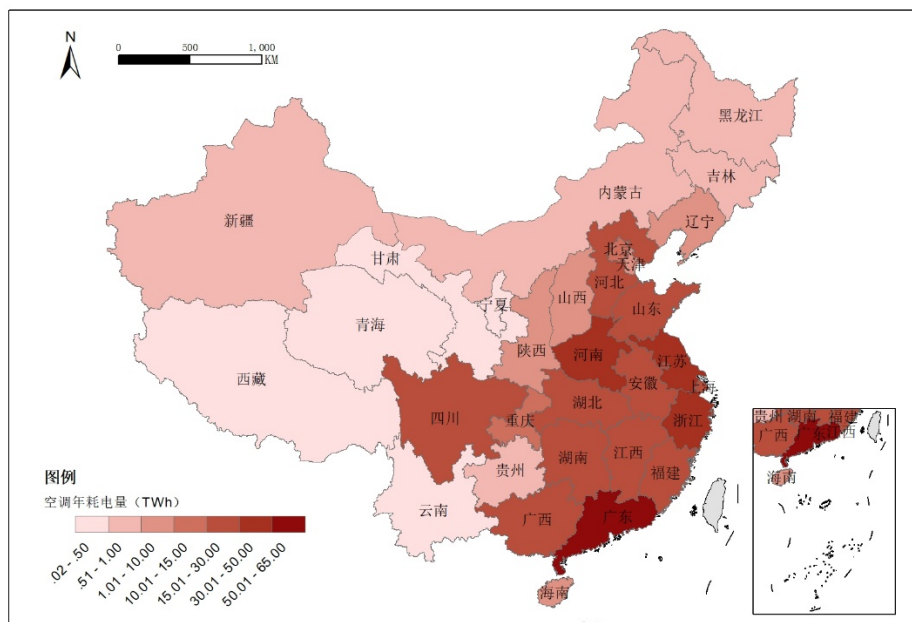


图 9 2016 年各省家用空调耗电量

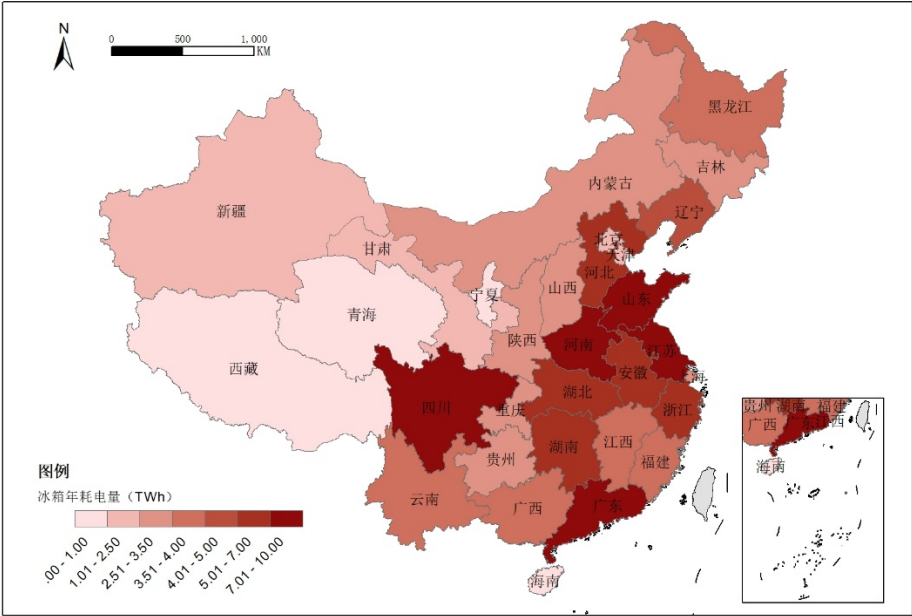


图 10 2016 年各省家用冰箱耗电量

表 8 2016 年家用制冷空调行业高耗能地区

排序	地区	2016 年耗电量 (TWh)	排序	地区	2016 年耗电量 (TWh)
1	广东	74	6	湖南	33
2	江苏	48	7	安徽	30
3	浙江	42	8	湖北	29
4	河南	40	9	河北	28
5	山东	38	10	四川	27

4.2. 驱动因素预测

如前文所述，气候变化、经济发展、人口增长和能效提高是决定未来制冷空调行业能耗的关键驱动因素。

在本报告的预测方法中，气候因素（CDD 值）将直接决定居民家庭每百户空调保有量的饱和水平。如图 11，我国各省年 CDD 差异悬殊，海南省年 CDD(18)可高达 2442℃·d，而青海和西藏省的年 CDD(18)不足 60℃·d，这表明我国的制冷需求水平存在明显的地域差异。海南、广东、广西等气候炎热的省份饱和水平接近 250，而青海、西藏等制冷需求低的省份的饱和水平不足 20。

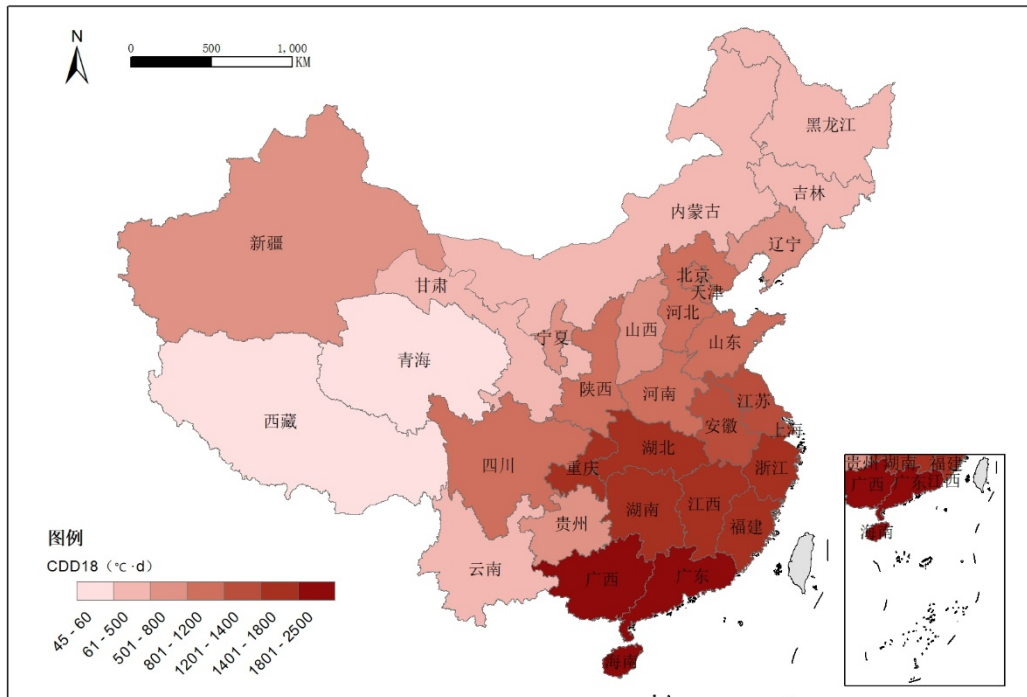


图 11 各省年 CDD(18)

决定家用制冷空调设备每百户保有量的另一个因素是家庭的支付能力，随着家庭收入的增长，家用制冷空调设备每百户保有量将呈 S 型曲线趋势增长。以家用冰箱为例，分别对 2000-2016 年我国城镇、农村家庭的每百户冰箱保有量与人均收入建立 Logistic 方程，拟合度 R^2 均高于 0.9。如图 12，目前我国城镇家庭每百户冰箱保有量已接近饱和，增长速度明显放缓；而农村家庭每百户冰箱保有量仍处于快速增长阶段，在未来一段时间仍有较大的发展空间。家用空调每百户保有量的增长趋势与冰箱类似，但由于气候条件的不同，各省的增长模式存在较大差异，如图 13 显示了部分省市城镇家庭的情况。

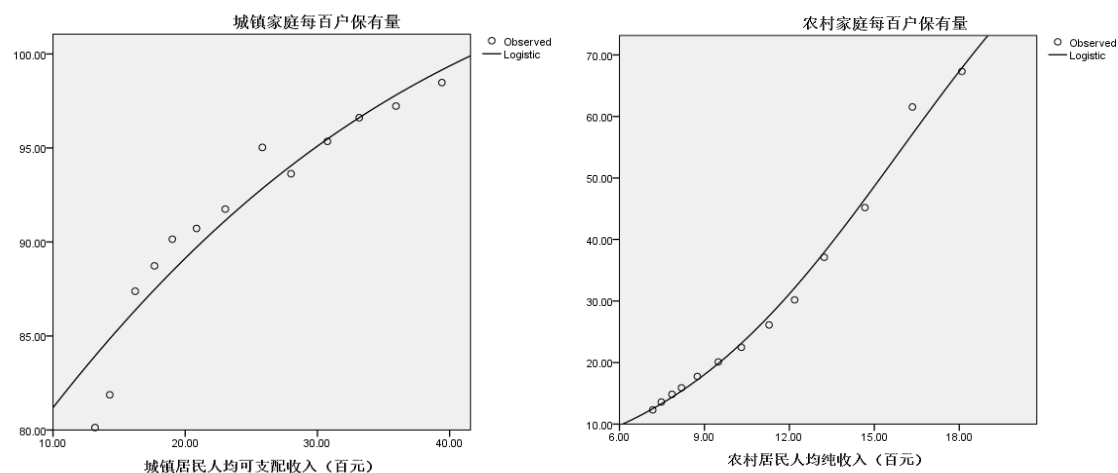


图 12 城镇、农村家庭每百户冰箱保有量与人均收入的 Logistic 曲线

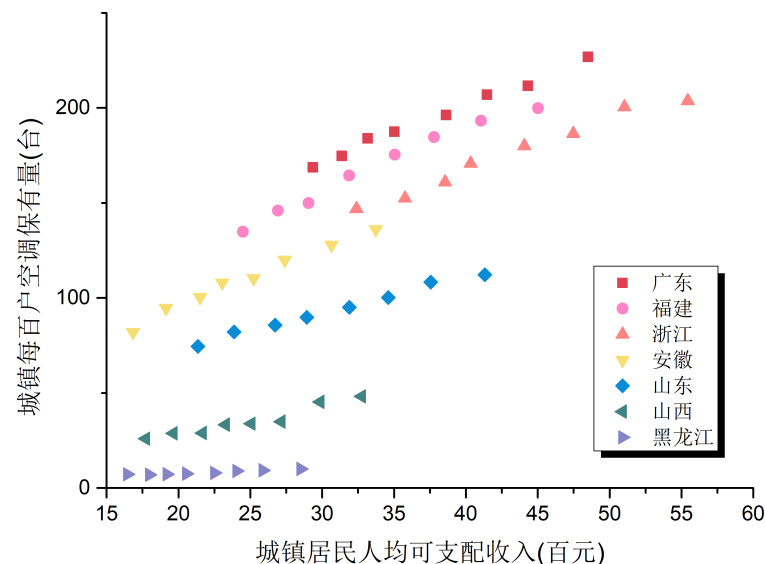


图 13 部分省市城镇家庭每百户空调保有量与人均可支配收入的关系

本报告对短期内（2018-2030 年）城镇居民人均可支配收入、农村居民人均纯收入采用灰色模型 GM(1,1)进行预测，对 2031-2050 年的人均收入进行线性外推。如图 14 所示，在 2050 年，去除通胀的城镇居民人均可支配收入将接近 35000 元，农村居民人均纯收入将接近 20000 元。根据本报告的研究，居民收入的增长，将推动居民家庭每百户制冷空调设备在 2040-2050 年内达到或接近饱和水平。

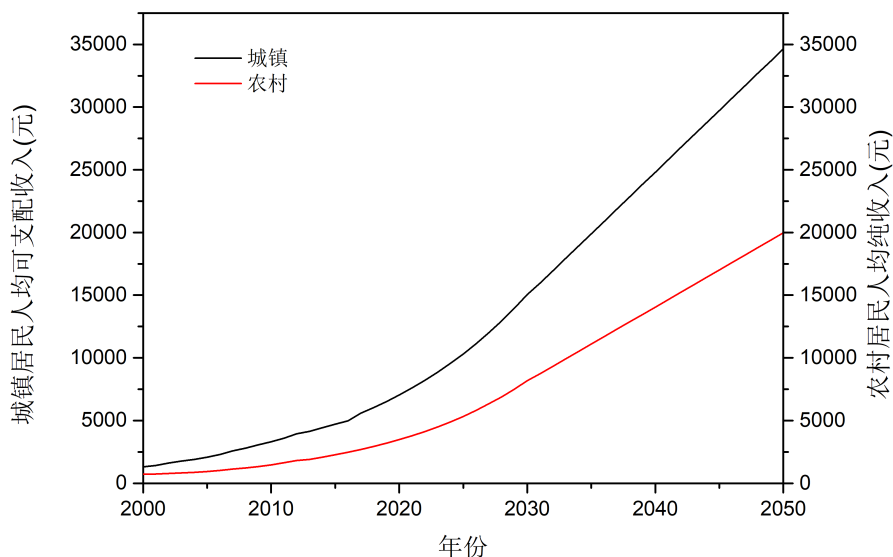


图 14 我国城镇居民人均可支配收入、农村居民人均纯收入预测
（去通胀，CPI₁₉₇₈=100）

如图 15，根据 UN DESA 对中等生育率情景下世界各国人口的预测，中国的总人口数将增长至 2029 年达到峰值，约 14.42 亿，随后将逐步下降，至 2050 年达 13.64 亿。若不考虑家庭结构的变化，全国总户数也将在 2029 年达到峰值水平，约 4.6 亿户。随着城镇化进程的推进，我国城镇人口比重将稳步提升，根据本报告的预测，2050 年我国城镇人口比重将达到 88%。各省的城镇化速度和水平并不一致，这里不一一展开。

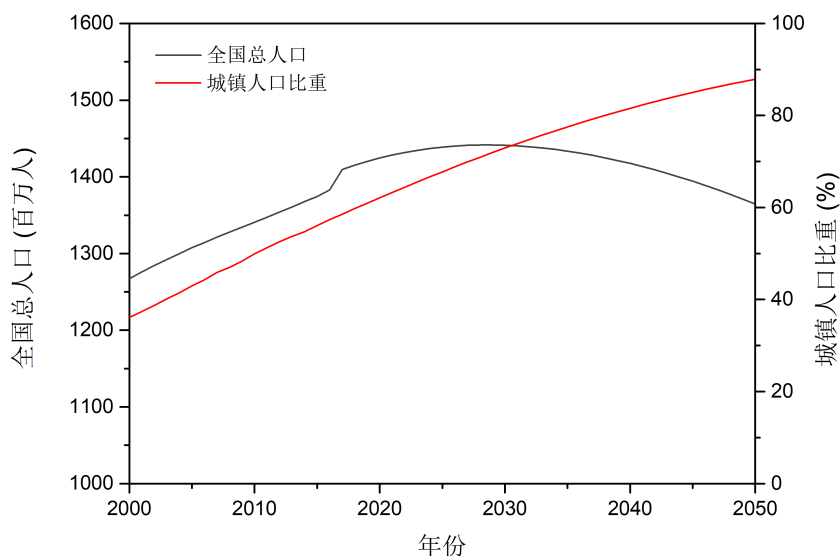


图 15 全国总人口及城镇人口比重预测

4.3. 基线情景的电力需求

如图 16，基线情景下，我国家用制冷空调行业的年耗电量将先经历快速增长，在 2025 年前后增速明显变缓，2033 年前后达到峰值，约 800TWh，随后耗电量随人口减少有微弱的下降趋势，2050 年的耗电量约 765TWh。其中，家用空调年耗电量的比重较大，在 2020-2050 年维持在 80%-82%。家用空调保有量和年耗电量在 2033 年前后达峰，峰值分别约为 7.8 亿台和 654TWh。而家用冰箱保有量和年耗电量在 2030 年前后达峰，峰值分别为 5.0 亿台和 145TWh。

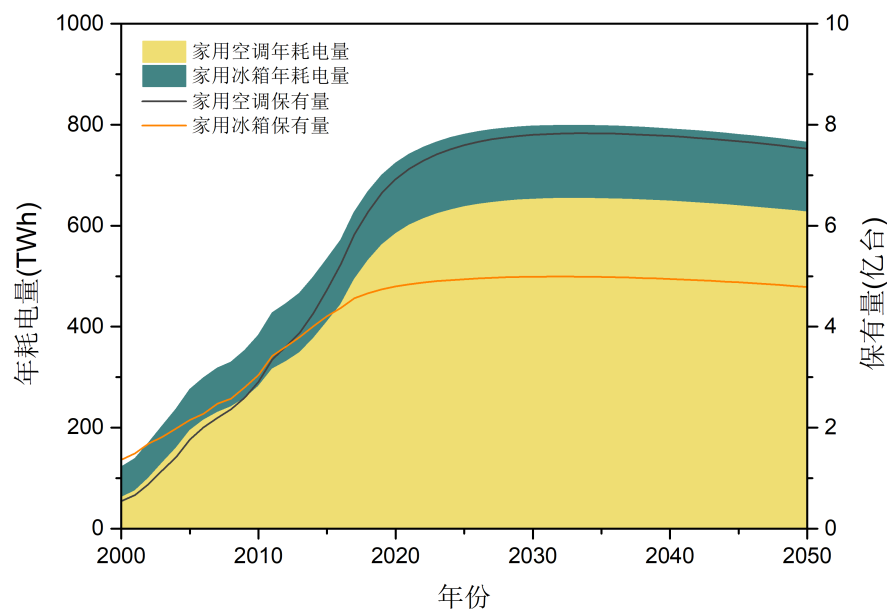


图 16 家用制冷空调行业基线情景

IEA 的预测结果显示，2050 年全球家用空调的保有量将达到 41 亿台，其中中国和印度的保有量将超过 20 亿台，当年全球居民住宅供冷设备（包括空调、电风扇和除湿机）能耗约 4030TWh。结合本报告的测算，在 2050 年，中国家用空调的保有量将占全球保有量的 18%，对全球居民住宅供冷设备耗电量的贡献达 16%。

5. 主要结论

(1) 2006-2017 年, 我国 HFCs 消费量以 30% 的年均增长率由 9.12kt 上升至 163.58kt, 其中, HFC-125、HFC-134a 和 HFC-32 是主要的消费物种, 家用空调行业是当前增长最快、贡献最大的行业。

(2) 2017 年我国排放的 HFCs 约 107.66Mt CO₂-eq/yr, HFC-125 和 HFC-134a 的比重最高, 分别排放 48.79 和 32.78Mt CO₂-eq/yr。

(3) 按照《基加利修正案》的要求, 我国 HFCs 消费量应按如下时间表进行削减: 2024-2028 年冻结在基准水平 724.47 Mt CO₂-eq/yr; 2029-2034 年消费量不得超过 652.02Mt CO₂-eq/yr; 2035-2039 年不得超过 507.13 Mt CO₂-eq/yr; 2040-2044 年应低于 362.24 Mt CO₂-eq/yr; 2045 年及以后, 消费量应低于 144.89 Mt CO₂-eq/yr。

(4) 至本世纪中叶, 我国因履行《基加利修正案》所实现的 HFCs 消费量的削减累计可达 10.85Gt CO₂-eq, 累计减排量约为 5.38Gt CO₂-eq。

(5) 2000-2016 年, 我国家用制冷空调行业的保有量和耗电量呈直线增长; 家用空调的年耗电量由 61TWh 增长至 444TWh, 家用冰箱的年耗电量由 62TWh 增长至 127TWh。

(6) 广东、江苏和浙江省为当前我国家用制冷空调行业能耗最高的地区, 2016 年耗电量分别为 74、48 和 42TWh。

(7) 随着经济发展和人口变化, 基线情景下我国家用制冷空调行业的年耗电量将先经历快速增长, 在 2025 年前后增速渐缓, 2033 年前后达到峰值, 约 800TWh, 随后微弱下滑, 至 2050 年达 765TWh; 其中, 家用空调的能耗占比约 80%。

参考文献

- [1] IPCC/TEAP. IPCC/TEAP Special Report on Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System: Issues Related to Hydrofluorocarbons and Perfluorocarbons[R]. New York, 2005.
- [2] Velders G J M, Fahey D W, Daniel J S, et al. The large contribution of projected HFC emissions to future climate forcing[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(27): 10949-10954.
- [3] World Meteorological Organization (WMO), Executive Summary: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018, World Meteorological Organization, Global Ozone Research and Monitoring Project-Report No.58, 67 pp., Geneva, Switzerland, 2018.
- [4] 浙江省化工研究院有限公司. 中国氟化工行业氢氟烃（HFCs）逐步削减趋势研究. 2016
- [5] Fang X K, Velders G J M, Ravishankara A R, et al. Hydrofluorocarbon (HFC) Emissions in China: An Inventory for 2005-2013 and Projections to 2050[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(4): 2027-2034.
- [6] Simmonds P G, Rigby M, McCulloch A, et al. Changing trends and emissions of hydrochlorofluorocarbons (HCFCs) and their hydrofluorocarbon (HFCs) replacements[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, 17(7): 4641-4655.
- [7] Fang X K, Wu J, Xu J H, et al. Ambient mixing ratios of chlorofluorocarbons, hydrochlorofluorocarbons and hydrofluorocarbons in 46 Chinese cities[J]. Atmospheric Environment, 2012, 54: 387-392.
- [8] Wu H X, Chen H, Wang Y T, et al. The changing ambient mixing ratios of long-lived halocarbons under Montreal Protocol in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 188: 774-785.
- [9] Velders G J M, Fahey D W, Daniel J S, et al. Future atmospheric abundances and climate forcings from scenarios of global and regional hydrofluorocarbon (HFC) emissions[J]. Atmospheric Environment, 2015, 123: 200-209.
- [10] UNEP, Technology and Economic Assessment Panel. TEAP decision XXVIII/3 Working Group Report on Energy Efficiency. 2017.
- [11] International Energy Agency. The future of cooling: Opportunities for energy-efficient air conditioning. 2018.
- [12] 胡建信, 万丹, 李春梅, 等. 中国汽车空调行业 HFC-134a 需求和排放预测[J]. 气候变化研究进展, 2009, 5(1):1-6.
- [13] IPCC. 国家温室气体清单指南. 2006.
- [14] 刘杰, 陈江平. 车用空调 R134a 的发展现状与替代情况[J]. 制冷技术, 2008, 28(1):39-41.
- [15] 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.
- [16] MEPC (Ministry of Environmental Protection of China). Strategy for CFCs phase-out in refrigeration serving sector in China. 2003

- [17] Su S S, Fang X K, Li L, et al. HFC-134a emissions from mobile air conditioning in China from 1995 to 2030[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 102:122-129.
- [18] 中国制冷空调行业协会. 中国房间空调器行业 HCFCs 淘汰管理计划. 2008.
- [19] 李迅, 许顺才, 朱文华, 等. 21 世纪初期我国城市化发展态势与对策的探讨[J]. *城市规划学刊*, 2000(4):55-62.
- [20] IIASA. Non-CO₂ greenhouse gas emissions, mitigation potentials and costs in the EU-28 from 2005-2050. 2013.
- [21] 程胜, 蒋琦. HFC-236fa 的生产与市场前景[J]. *化工科技市场*, 2005, 28(12):30-32.
- [22] 陈江平, 施骏业, 赵宇. 国内外汽车空调系统发展动向[C]// 中国汽车工程学会年会. 2008.
- [22] Öko-Recherche, Preparatory study for a review of Regulation (EC) No 842/2006 on certain fluorinated greenhouse gases, 2011.
- [24] Wang Z Y, Yan H H, Fang X K, et al. Past, present, and future emissions of HCFC-141b in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 109:228-233.
- [25] Wan D, Xu J H, Zhang J B, et al. Historical and projected emissions of major halocarbons in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(36):5822-5829.
- [26] Mcneil M A, Letschert V E, Can S R D, et al. Erratum to: Bottom-Up Energy Analysis System (BUENAS)—an international appliance efficiency policy tool[J]. *Energy Efficiency*, 2013, 6(2):191-217.
- [27] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2017). *World Population Prospects: The 2017 Revision, DVD Edition*.
- [28] Mcneil M A, Letschert V E. Modeling diffusion of electrical appliances in the residential sector[J]. *Energy and Buildings*, 2010, 42(6):783-790.
- [29] 中国标准化研究院. 中国用能产品能效状况白皮书 (2013). 2013.
- [30] 中国家用电器协会. 中国家用电器行业生产能耗与产品能效调查报告. 2018.
- [31] 刘援, 王雷, 韵晋琦. 中国房间空气调节器行业节能减排潜力分析[J]. *气候变化研究进展*, 2015, 11(3).
- [32] 胡建信, 方雪坤, 吴婧, et al. 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, 10(2):142-148.