

文章编号:0253-4339(2026)02-0012-08
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20250221002

欧美 HFCs 配额制度分析及启示

刘金森¹ 张彬¹ 李丽平¹ 范薇²

(1 生态环境部环境与经济政策研究中心 北京 100029; 2 中国制冷学会 北京 100142)

摘要 系统研究了欧盟和美国 HFCs 配额管理制度与实践经验,重点分析了欧美 HFCs 管控思路、HFCs 配额分配机制和核算规则,并对比了两者的制度特点。研究表明:欧美在 HFCs 管控中均注重协同推进《基加利修正案》履约与气候中和目标的实现,通过经济手段和市场机制促进 HFCs 削减。其中,欧盟率先采用付费配额模式,强化市场约束;美国则采用免费配额和配额转让抵消相结合的模式,灵活运用市场工具。此外,两者均建立了基于物质 GWP 值的配额核算方法,美国还专门开发了 HFCs 配额分配的工具箱。我国自 2024 年起对 HFCs 实施配额许可管理,欧美 HFCs 配额制定经验可为我国《基加利修正案》履约提供一定参考。

关键词 HFCs; 配额; 基加利修正案; 欧盟; 美国

中图分类号: X32; X50; TB64

文献标识码: A

Analysis and Implications of the Hydrofluorocarbon Allowance Allocation Systems in the European Union and United States

Liu Jinmiao¹ Zhang Bin¹ Li Liping¹ Fan Wei²

(1. Policy Research Center for Environment and Economy, Ministry of Ecology and Environment, Beijing, 100029, China; 2. Chinese Association of Refrigeration, Beijing, 100142, China)

Abstract Although hydrofluorocarbons (HFCs) do not deplete the stratospheric ozone layer, a few of these have high Global Warming Potentials (GWPs) ranging from 12 to 14 000. At present, these chemicals are widespread in air conditioners, refrigerators, aerosols, foams, and other products. This study systematically analyzed HFC allowance allocation systems and the practical experiences from the European Union and United States. The focus is on analyzing HFC control concepts, quota allocation mechanisms, and calculation rules in the EU and US, as well as the characteristics of the two systems. It has been observed that both the EU and US have adopted synergistic approaches to protect the ozone layer and address climate change. They jointly promote the implementation of the Kigali Amendment and achievement of climate neutrality goals, and reduce HFCs through economic measures and market mechanisms. Specifically, the EU was the first to adopt paid quotas, thereby strengthening the market constraints. Meanwhile, the US flexibly used market tools, including free quotas with a quota transfer offset system. Additionally, both have established quota-accounting methods based on the GWP values of substances, and the US has developed a toolbox for HFC quota allocation. China implemented the HFCs quota licensing system in 2024. The experiences of the HFC allowance allocation systems in the EU and US can provide references for China's compliance with the Kigali Amendment.

Keywords HFCs; quota; Kigali Amendment; the European Union; the United States

作为消耗臭氧层物质的常用替代品,氢氟碳化物(HFCs)是一类强效温室气体,主要应用于空调、冰箱、泡沫生产、消防、半导体等生产生活领域^[1]。随着《〈关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书〉基加利修正案》(简称:《基加利修正案》)将 18 种 HFCs 纳入管控范围,低全球变暖潜值(Global Warming Potential, GWP)的 HFCs 替代技术愈发受到关注^[2-5]。配额管理作为 HFCs 的主要管控措施,能够有效促进低 GWP 制冷剂替代技术的应用。欧盟于 2024 年 3 月

11 日实施修订的《含氟温室气体法规》(F-gas, No2024/573),首次采用付费配额制度^[6]。美国依据《美国创新与制造法案》(American Innovation and Manufacturing Act, AIM 法案)采用免费配额和配额转让抵消制度,我国自 2024 年起对 HFCs 实施配额许可管理。本文重点研究欧盟和美国 HFCs 管控的思路,解读欧盟和美国 HFCs 配额分配机制和核算规则,分析两者制度特点,以期为我国《基加利修正案》履约提供一定参考。

收稿日期:2025-02-21;修回日期:2025-04-11;录用日期:2025-04-15

1 欧美 HFCs 排放情况及管控思路

1.1 欧盟和美国 HFCs 排放情况

1990—2014 年,欧盟含氟温室气体排放量增长了 1 倍。2014 年欧盟颁布实施《含氟温室气体法规》(No 517/2014),完善 2006 年法规,对含氟温室气体实施全面统一管理,扭转了欧盟含氟温室气体排放量增长的趋势(图 1)。从 2015 年到 2023 年,投放至欧盟市场的 HFCs 数量下降了 69%^[7]。2024 年,新修订的《含氟温室气体法规》(No2024/573)加严 HFCs 管控。目前,欧盟含氟温室气体占欧盟温室气体总排放量的 2.5%。

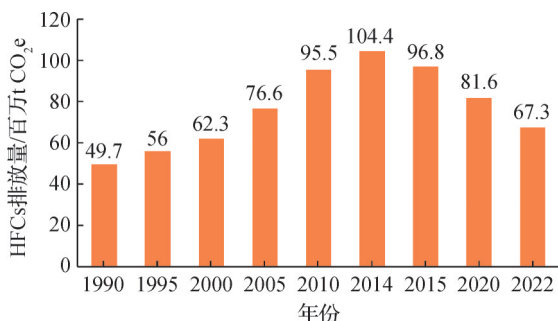


图 1 1990—2022 年欧盟(27 国)含氟温室气体排放情况
Fig.1 The emissions of fluorinated greenhouse gases in the European Union (27 countries) from 1990 to 2022

美国 HFCs 排放量从 1990 年的 47.7 百万 t 二氧化碳当量(CO₂e)迅速增长至 2010 年的 151.9 百万 t CO₂e(根据 2013 年政府间气候变化专门委员会第五次评估报告给出的 100 年 GWP 计算),此后随着美国加强 HFCs 管控,HFCs 年均排放量增长放缓(图 2)^[8]。2023 年,美国 HFCs 净生产量(净生产量=总产量-原

料生产量-销毁量)为 163.8 百万 t CO₂e、消费量(消费量=净生产量+进口量-出口量)为 253 百万 t CO₂e,较 2022 年分别下降 8.8、0.4 个百分点^[9]。

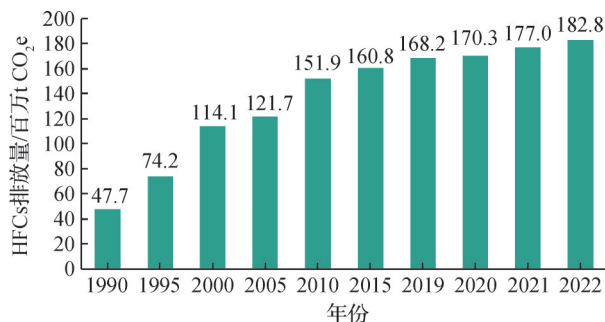


图 2 1990—2022 年美国 HFCs 排放情况

Fig.2 The emissions of HFCs in the United States from 1990 to 2022

1.2 欧盟 HFCs 削减目标与其 2050 年气候中和目标一致

欧盟很早就开始对 HFCs 进行管控^[10],特别是在《基加利修正案》通过以来,不断加强 HFCs 管控力度,同时注重协同保护臭氧层和应对气候变化工作。为确保履行《基加利修正案》的国际义务和 2019 年“欧洲绿色新政”中到 2030 年在 1990 年基础上至少减排 55% 和 2050 年实现气候中和的目标,欧盟修订了《含氟温室气体法规》(简称“法规”),进一步加强对 HFCs 等含氟温室气体的管控。2024 年 3 月 11 日法规正式生效,提出到 2050 年完全淘汰 HFCs 的目标,该目标大大提前于欧盟在《基加利修正案》下的履约目标,与其气候中和目标的时间表一致(图 3)。2023 年,欧盟 HFCs 消费量低于《基加利修正案》履约上限的 43%。

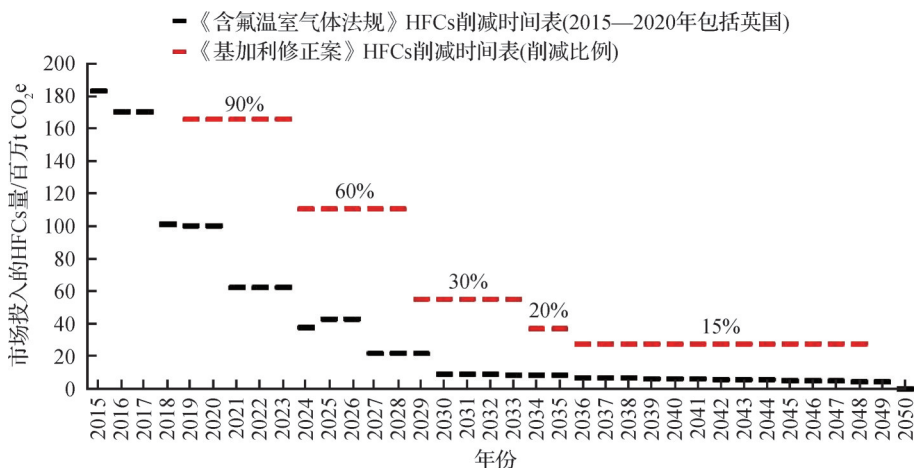


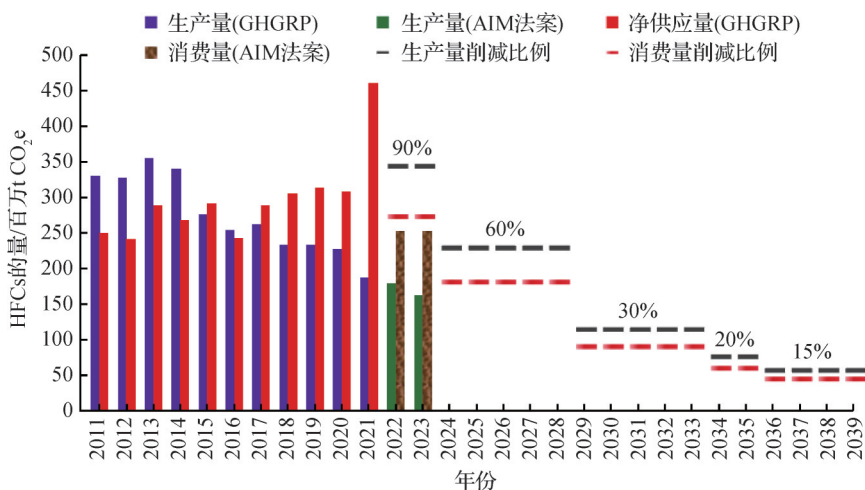
图 3 欧盟《含氟温室气体法规》和《基加利修正案》HFCs 削减时间表对比

Fig.3 Comparison the timeline of the HFCs phase down under the EU's F-Gas and the Kigali Amendment

1.3 美国 2035 年 NDC 中 HFCs 削减目标与其《基加利修正案》履约目标一致

美国同样重视臭氧层保护和应对气候变化工作,但在 HFCs 减排思路与欧盟有所不同。2024 年 12 月 19 日,美国向《联合国气候变化框架公约》秘书处提交了最新的 2035 年国家自主贡献(nationally

determined contribution, NDC)^[11],明确到 2035 年温室气体排放较 2005 年降低 61%~66%,覆盖全经济范围、所有温室气体。同时指出,将基于 AIM 法案,按照《基加利修正案》要求,逐步控制 HFCs 的生产和消费,到 2024 年比基线削减 40%,到 2036 年削减 85% (图 4)。该减排目标与美国在《基加利修正案》下的履约目标一致,在减排力度上不如欧盟。



GHGRP: Greenhouse Gas Reporting Program, 温室气体报告计划。

图4 美国《基加利修正案》下 HFCs 削减时间表

Fig.4 The phasedown limit of HFCs production and consumption in United States under the Kigali Amendment

2 欧盟 HFCs 配额制度

2.1 将免费配额改为付费配额的模式

欧盟新法规首次取消了免费配额制度,分配给生产商和进口商的 HFCs 配额按每吨 CO₂e 收取 3 欧元,并授权欧盟委员会根据通货膨胀情况适时修改配额定价^[6]。而且,只有在配额分配期之前连续 3 年具有相关贸易活动的生产商和进口商才具有获得配额的资质。虽然生产商或进口商可将获得的全部或任意数量的配额转让给欧盟境内的另一生产商或进口商,或转让给欧盟境外但在境内有唯一代理商的企业,但转让的配额不得进行第 2 次转让。自 2028 年 1 月 1 日起,欧盟政府将取消没有被购买的配额。此外,对于配额的申请、授权、付费、转让等均在含氟气体门户网(F-gas Portal)上操作。

2.2 按物质 GWP 进行配额分配

欧盟 HFCs 配额是按物质的 GWP 进行分配,即将 HFCs 换算为 CO₂e 来进行分配。对于混合物的 GWP 计算方法,除非另有说明,由单个物质的质量分数乘以其 GWP 的总和得出,包括不含氟温室气体的物质,如式(1)所示。

$$GWP_{total} = \sum X \times GWP_1 + \sum Y \times GWP_2 + \dots + \sum N \times GWP_n \quad (1)$$

式中: GWP_{total} 表示混合物的 GWP; $\sum X$ 、 $\sum Y$... $\sum N$ 分别表示不同物质在混合物中的百分数, $\sum X + \sum Y + \dots + \sum N = 100\%$; GWP_1 、 GWP_2 ... GWP_n 分别表示不同物质的 GWP。

例如:将式(1)应用于由 60% 二甲醚、10% 1,1-二氟乙烷和 30% 异丁烷组成的气体混合物, $GWP_{total} = 60\% \times 1 + 10\% \times 124 + 30\% \times 0 = 13.0$,即 1 t 该混合物等同 13 t CO₂e。

欧盟 HFCs 配额计算分为 2 个步骤。首先,依据某生产商或进口商此前 HFCs 年平均市场投放量作为分配给该生产商或进口商的一个参考值;其次,参考值乘以相应年份占 2015 基准年比例再乘以给定的系数得到配额(图 5)。乘以系数,是考虑到新企业进入市场或现有企业扩大活动,预留年最大配额的一部分给以前未将 HFCs 投放市场的生产商和进口商以及具有参考值并希望增加配额的生产商和进口商。值得注意的是,新法规的配额计算方法与此前 2014 年版的法规有所不同^[12]。

具体而言,欧盟委员会于 2024 年 10 月 31 日及此后至少每 3 年计算一次参考值和配额。参考值分为 2 类:第 1 类为自 2015 年 1 月 1 日起根据 2014 年《含氟温室气体法规》第 19 条(有效期至 2023 年 12 月 31 日)

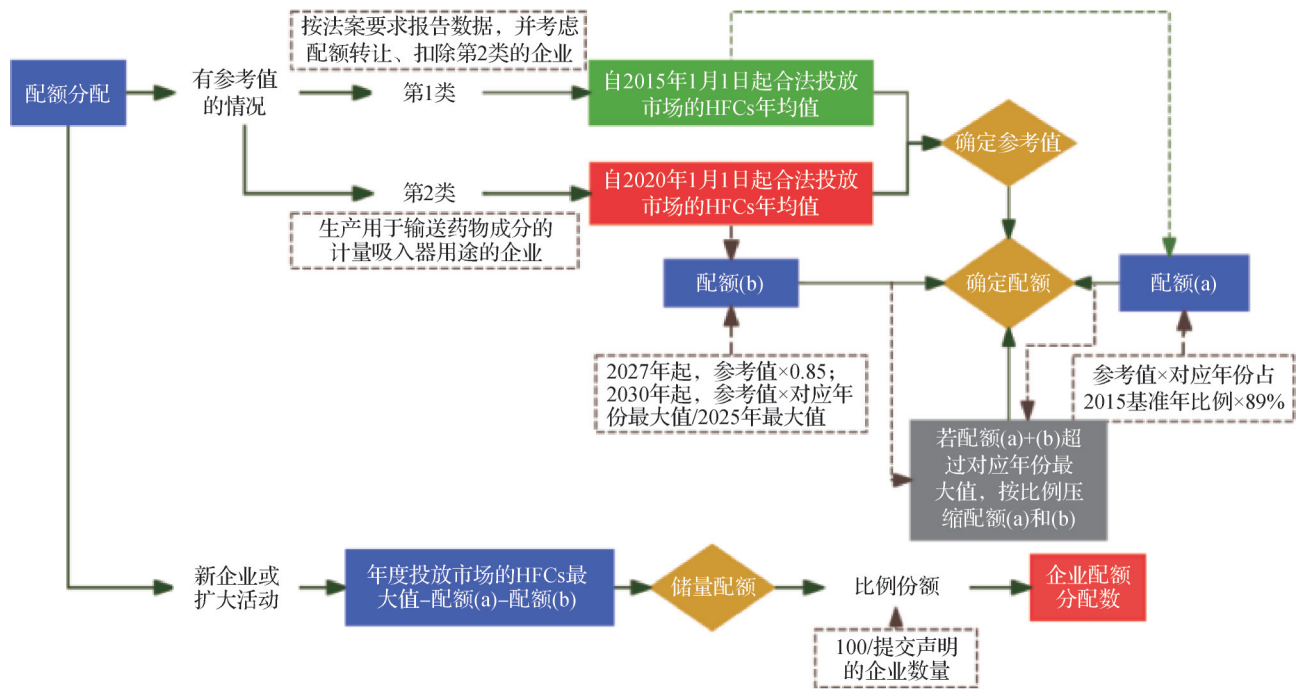


图 5 HFCs 配额分配流程

Fig.5 The quota allocation process for HFCs

和本法规第 26 条(表 1 所示)报告的合法投放市场的 HFCs 数量的年平均,并考虑接收的配额转让以及扣除生产用于输送药物成分的计量吸入器用途的 HFCs 数量;第 2 类生产用于输送药物成分的计量吸

入器用途的,参考值为自 2020 年 1 月 1 日起根据 2014 年《含氟温室气体法规》第 19 条和本法规第 26 条报告的合法投放市场此类用途的 HFCs 数量的年平均。

表 1 本法规第 26 条所述情况

Tab.1 Reporting by undertakings in Article 26

序号	规定的内容
1	至 2025 年 3 月 31 日及此后每年,在前一日历年生产、进口或出口超过 1 t HFCs 或 100 t CO ₂ e 其他含氟温室气体的生产商、进口商和出口商,应向欧盟委员会报告相关数据
2	至 2024 年 3 月 31 日及此后每年,获配额的生产商或进口商,或已转让配额的生产商或进口商,但在前一日历年未向市场投放任何数量 HFCs 的,应向欧盟委员会提交“零报告”
3	至 2025 年 3 月 31 日及此后每年,在上一日历年销毁 HFCs 的数量或其他含氟温室气体超过 1 t 或 100 t CO ₂ e 的企业,应向欧盟委员会报告相关数据
4	至 2025 年 3 月 31 日,在上一日历年使用附件一列 1 000 t CO ₂ e 以上含氟温室气体作为原料的企业,应向欧盟委员会报告相关数据
5	至 2025 年 3 月 31 日,在上一日历年将产品或设备中含有 10 t CO ₂ e 以上 HFCs 或 100 t CO ₂ e 以上其他含氟温室气体投放市场的企业,应向欧盟委员会报告相关数据
6	至 2025 年 3 月 31 日及此后每年,接收第 16 条第 2 款所述任何数量 HFCs 的企业,均应向欧盟委员会报告相关数据
7	至 2025 年 3 月 31 日及此后每年,生产用于输送药物成分的计量吸入器用途的 HFCs 生产商或进口商,应向欧盟委员会报告相关数据
8	至 2025 年 3 月 31 日及此后每年,回收数量超过 1 t 或 100 t CO ₂ e 含氟温室气体的企业,应向欧盟委员会报告相关数据
9	至 2025 年 4 月 30 日,将至少含 1 000 t CO ₂ e HFCs 的设备投放市场的进口商,且这些 HFCs 在设备充注前未投放市场,应向欧盟委员会提交有关验证报告
10	至 2025 年 4 月 30 日及此后每年,在上一日历年投放市场 1000 t CO ₂ e 以上的企业,应确保其报告的真实性和进行独立审计

在确定参考值后,进行配额分配计算:

(a) 前述第 1 类对应的配额,其参考值乘以相应年份占 2015 基准年比例(表 2),再乘以 89% 系数;

(b) 前述第 2 类对应的配额,从 2027 年起,该配

额是通过将参考值乘以 0.85 系数获得;从 2030 年起,该配额为参考值乘以当年配额的 2025 年配额的 100% 除以 2025 年配额的 100%。

但需注意,如按上述(b)款规定分配完全全部配额

表 2 允许投放到欧盟市场的 HFCs 最大数量

Tab.2 The maximum amount of HFCs allowed to be placed on the Union market in a given year

年份区间	年最大值/(t CO ₂ e)	占 2015 基准年比例/%
2025—2026	42 874 410	24.3
2027—2029	21 665 691	12.3
2030—2032	9 132 097	5.2
2033—2035	8 445 713	4.8
2036—2038	6 782 265	3.8
2039—2041	6 136 732	3.5
2042—2044	5 491 199	3.1
2045—2047	4 845 666	2.7
2048—2049	4 200 133	2.4
2050 及以后	0	0

注: 占 2015 基准年比例=配额分配年度的最大值/2015 年基准值 176 700 479 t CO₂e。

后,超过年最大值,则按比例减少全部配额。

对于新企业或现有企业扩大活动,某一年生产商和进口商允许获得的配额数是该年配额的最大值减去前述(a)和(b)计算所得的配额,该部分配额作为储量。然后将 100 除以提交声明的企业数量得到比值,该比值作为比例份额。每个企业获得与储量比例份额相对应的配额。

3 美国 HFCs 配额制度

3.1 实施免费配额和配额转让抵消制度

美国实施免费配额制度,HFCs 基线水平参考了 2011—2019 年度最高的 3 个年份的平均值,生产基线为 382.5 百万 t CO₂e,消费基线为 302.5 百万 t CO₂e^[13]。配额分为“通用池”配额和特定配额(AIM 法案所列的 6 种用途)2 种,并按履约削减比例进行削减。2020 年 HFCs 生产/进口商有资格获得 2022 年、2023 年的配额,2021 年和/或 2022 年生产/进口商有资格获得 2024—2028 年的配额^[14]。对于新进入者,根据前一年全年分配的配额数量,以及配额持有者该年份相对其最高 3 年消费量的平均值减少的百分比,为每个新进入者确定一个最高值。

美国允许配额持有者对配额进行转让,且转让为商业行为,实体之间任何的配额转让按双方确定的价格进行。美国环保局(Environmental Protection Agency,EPA)作为主管部门,不会为配额转让设定价格,但设定了转让规则。通常“通用池”生产和消费配额的转让需承担 5% 的额外削减,特定配额为

1%^[15]。例如,对于“通用池”配额,若 B 公司从 A 公司获得 100 个配额,则实际 A 公司需要削减 105 个配额。

3.2 采用物质交换值当量计算配额

美国将交换值当量(exchange value equivalent,EVe)用作 HFCs 之间的计量单位^[15]。EVe 是通过将 HFC 的质量乘以该 HFC 的交换值来确定的。其中,交换值与 2007 年政府间气候变化专门委员会第四次评估报告给出的 100 年 GWP 相同,即 1 个单位交换值与 1 个单位二氧化碳当量相同。政府以 0.1 MTEVe (即 0.1 吨交换值当量)为单位发放配额。例如,50 kg HFC-134a 等于 71.5 MTEVe (0.05 t×1 430) (表 3),因此,进口商进口 50 kg HFC-134a 需要消耗 71.5 个配额。考虑到交换值的不同,生产 100 kg HFC-152(1,1-二氟乙烷)需要消耗 5.3 个配额,生产 100 kg HFC-23(三氟甲烷)则需要消耗 1 480 个配额。具有较高 GWP 的 HFCs 需要更多的生产/进口配额。

表 3 受控 HFC 和混合物交换值

Tab.3 Exchange values of regulated HFCs and common blends

物质名称	交换值 (100年GWP)	物质名称	交换值 (100年GWP)
混合物		受控 HFCs	
R-401A	16	HFC-227ea	3 220
R-404A	3 922	HFC-236cb	1 340
R-407C	1 774	HFC-236ea	1 370
R-410A	2 088	HFC-236fa	9 810
R-448A	1 386	HFC-245ca	693
R-449A	1 396	HFC-43-10mee	1 640
R-449B	1 411	HFC-32	675
R-507A	3 985	HFC-125	3 500
受控 HFCs		HFC-143a	4 470
HFC-134	1 100	HFC-41	92
HFC-134a	1 430	HFC-152	53
HFC-143	353	HFC-152a	124
HFC-245fa	1 030	HFC-23	14 800
HFC-365mfc	794		

此外,对于 HFC 及 HFCs 混合物,EPA 开发了配额计算的工具箱——HFCs 生产/进口量配额计算器^[16],生产商或进口商只需在黄色单元格填写化学物质名称、数量、单位等(表 4 所示,表中黄色单元格所填数据为举例),即可自动计算出相应的交换值、所需的 HFCs 配额等,以供参考。

表 4 HFCs 生产/进口量配额计算器
Tab.4 The product/import HFCs and HFC blends allowance calculator
(a) 所需的 HFCs 配额

化学名称	数量	单位	交换值	HTS 码	HFC CAS 号	需要的 HFCs 配额/MTEVe	需要的 ODS 配额/kg
HFC-125	1	kg	3 500	2903.44.1010	354-33-6	3.5	—
HFC-134	1	MT	1 100	2903.45.1000	359-35-3	1 100.0	—
HFC-143	1	MMT	353	2903.44.1030	430-66-0	353 000 000.0	—
.....							
所需的总配额						353 001 103.5	—

(b) 生产/进口 HFCs 配额数

当前 HFC 剩余配额/ (t EVe)	生产和/或进口后剩余的未使用配额/ (t EVe)
20 000	352 987 103.5 (=353 001 103.5-20 000)

(c) HFCs 混合物计算

	化学名称	HFC 成分/%	数量	单位
混合的名字			200	kg
HFC 成分 1	HFC-32	50	100	kg
HFC 成分 2	HFC-125	50	100	kg
HFC 成分 3				
.....				

(d) 中英符号对照

符号	名称
kg	千克
MT	吨
MMT	百万吨
MTEVe	吨交换值当量

注:在黄色阴影的单元格中输入数据,白色阴影的单元格将自动填充,无法编辑。

4 欧美 HFCs 配额制度分析

4.1 注重协同臭氧层保护和应对气候变化

欧盟和美国均兼顾臭氧层保护和应对气候变化工作。欧盟指出,2014年的《含氟温室气体法规》不足以满足其 2030 年减排 55%、2050 年气候中和的目标,以及《基加利修正案》长期履约要求,为此修订出台了 2024 版法规,到 2030 年削减 94.8%、2050 年削减 100%。美国在其最新的 NDC 中明确非 CO₂ 温室气体减排路径,首次对标《基加利修正案》要求,提出 HFCs 的量化减排目标。臭氧层损耗和气候变化的协同应对是当前 HFCs 管控的主要思路 and 路径。

4.2 在配额管理中重视经济手段并展现灵活性

欧美均在配额制度中重视运用经济手段。与欧

盟碳市场的思路类似,欧盟以 3 欧元/t CO₂e 收费,配额申请者可选择全部或部分购买,并可进行一次配额转让,在降低 HFCs 配额的同时抬高 HFCs 价格,展现市场灵活性,使高 GWP 技术由于成本增加而降低吸引力。美国同样允许配额转让,买卖双方协商转让价格,虽不限定转让次数,但每次转让均需 5% 或 1% 的抵扣,以市场行为促进低 GWP 技术替代。此外,欧美均为新进入者或扩大活动预留部分配额,以适应市场需求。

4.3 以物质 GWP 为依据进行配额分配

欧美均以 GWP 为基础,使用 GWP 换算后的值进行配额分配,该算法可以一定程度满足 HFCs 之间的替代。以美国为例,某生产商生产 1 t R-410A(GWP 2 088)需要 208.8 个配额,若使用 HFC-32(GWP675)替代则需 67.5 个配额(不考虑替代带来的充注量变化)。虽然都生产 1 t 物质,但所需的配额减少,升温影响降低。

5 总结

欧美在 HFCs 管控方面积累了丰富的经验,形成成熟的 HFCs 配额分配制度。我国作为全球最大的 HFCs 生产和消费国,正处于已淘汰受控物质可持续履约、含氢氯氟烃(HCFCs)加速淘汰和 HFCs 管控三重任务叠加时期^[17]。欧美 HFCs 配额制度经验为我国相关工作带来启发。同时,应注意 HFCs 管控措施需要因地制宜、适应不同的市场环境和国家。发达国家和发展中国家各具特点,在市场特性、商品进出口情况等方面存在差异,需完善适应本国国情的政策措施,才能提升政策效能。

5.1 在国家 NDC 中明确 HFCs 削减目标协同臭氧层保护和应对气候变化

HFCs 既受《基加利修正案》管控,也是气候变化公约下受控温室气体之一,欧美坚持臭氧层损耗和气候变化协同应对,注重多目标协同。正如美国在

国家2035年NDC中明确HFCs削减目标。随着全球逐步进入HFCs削减阶段,协同推进保护臭氧层和应对气候变化,有助于推动实现绿色低碳高质量发展。从国家层面,将HFCs等强效温室气体的管控纳入气候行动,既可进一步树立负责任大国形象,又可助力气候中和目标的落实和臭氧层保护的双重胜利。

5.2 运用市场机制促进HFCs削减

将市场化手段与环境政策相结合,能够提高政策执行效率,降低减排成本,并激励企业创新。欧美在HFCs配额管理中注重灵活的市场机制,以进一步促进HFCs削减。深入探索如何优化配额分配机制、完善市场规则,并推动其在不同国家和地区的适用性,能够为全球HFCs管控和温室气体减排提供更具可操作性和经济性的解决方案。例如,在完善市场机制方面,鼓励在HFCs替代、回收再利用、销毁等领域开发温室气体自愿减排交易(China Certified Emission Reduction, CCER)方法学,推动将HFCs相关CCER减排量纳入全国碳市场抵销机制。

5.3 注重HFCs配额分配工具箱的使用

美国通过开发HFCs配额分配计算器,简化企业计算配额的过程,提高了效率和准确性,该实践将复杂的环境政策转化为可操作的数字化工具,降低了企业合规门槛并提升了配额管理的透明度和精准度。未来可进一步探索此类工具的应用,降低企业的合规成本,更好支持政策落地。

5.4 开展付费配额分配、配额转让、按GWP分配等储备性研究

开展付费配额分配、配额转让、按GWP分配等储备性研究,有助于为完善含氟温室气体(如HFCs)管控体系、提升政策科学性与灵活性做好支撑。参照欧美经验,可以探索开展付费配额和配额转让制度在不同国家、不同发展阶段、不同市场机制的适用性研究,包括付费配额分配的市场条件、配额定价、配额计算方法、配额支付等内容,以及按GWP配额分配模式的研究,助力《基加利修正案》目标落地。

本文受生态环境部生态环境国际合作与交流(2110106)和能源基金会(G-2411-36033)项目资助。(The project was supported by the International Cooperation and Exchange in Ecological Environment, Ministry of Ecology and Environment (No. 2110106) and the Energy Foundation (No. G-2411-36033).)

参考文献

[1] UN Environment Programme. Phase down of HFCs-the Kigali Amendment [EB/OL]. (2025-02-05) [2025-02-

05]. <https://www.unep.org/ozonaction/who-we-are/about-montreal-protocol>.

- [2] 佟振,文欣然,韩泽坤,等. 绝热段阻力对CO₂、R134a和R410A分离式热管传热性能的影响[J]. 制冷学报, 2024, 45(4): 28-35. (TONG Zhen, WEN Xinran, HAN Zekun, et al. Effect of flow resistance in adiabatic part on the thermal performance of CO₂, R134a, and R410A two-phase thermosyphon loops [J]. Journal of Refrigeration, 2024, 45(4): 28-35.)
- [3] 张朝晖,王若楠,高钰,等. 由制冷剂替代历程探究产业新时期发展之路[J]. 制冷与空调(北京), 2023, 23(1): 1-10. (ZHANG Zhaohui, WANG Ruonan, GAO Yu, et al. Explore the industry development path of the New Era through the refrigerant substitution course [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2023, 23(1): 1-10.)
- [4] 刘思哲,张超. R32与R410A家用空调器性能对比分析[J]. 制冷与空调(四川), 2023, 37(1): 137-141. (LIU Sizhe, ZHANG Chao. Performance study of R32 and R410A in household air conditioners [J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2023, 37(1): 137-141.)
- [5] 郭晓林,陈敬良,李雄亚,等. 全球主要国家和地区制冷剂替代进展与展望[J]. 制冷与空调(北京), 2023, 23(7): 55-63. (GUO Xiaolin, CHEN Jingliang, LI Xiongya, et al. Progress and prospects of global refrigerant substitution [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2023, 23(7): 55-63.)
- [6] European Commission. Regulation (EU) 2024/573 of the European Parliament and of the Council of 7 February 2024 on fluorinated greenhouse gases, amending Directive (EU) 2019/1937 and repealing Regulation (EU) No 517/2014 (Text with EEA relevance) [EB/OL]. (2024-02-20) [2024-03-16]. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32024R0573>.
- [7] European Commission. Reduction of HFCs on the EU-market [EB/OL]. (2024-12-03) [2024-12-03]. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/fluorinated-greenhouse-gases/achievements_en.
- [8] United States Environmental Protection Agency. Inventory of U. S. greenhouse gas emissions and sinks: 1990-2022 [EB/OL]. (2024-08-13) [2025-02-17]. <https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks-1990-2022>.
- [9] United States Environmental Protection Agency. HFC data hub [EB/OL]. (2024-12-17) [2024-12-30]. <https://www.epa.gov/climate-hfcs-reduction/hfc-data-hub-0>.
- [10] 王倩. 欧盟含氟温室气体管控政策及对我国相关进出口管理的启示[J]. 化工环保, 2020, 40(6): 650-656. (WANG Qian. EU's control policy on fluorinated greenhouse gas and its enlightenment to China's import

- and export management [J]. *Environmental Protection of Chemical Industry*, 2020, 40(6): 650–656.)
- [11] The United States of America nationally determined contribution [EB/OL]. (2024–12–19) [2024–12–31]. <https://unfccc.int/sites/default/files/2024-12/United%20States%202035%20NDC.pdf>.
- [12] European Commission. Regulation (EU) No 517/2014 of the European Parliament and of the Council of 16 April 2014 on fluorinated greenhouse gases and repealing Regulation (EC) No 842/2006 Text with EEA relevance [EB/OL]. (2014–05–20) [2024–12–30]. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32014R0517&qid=1608306002561>.
- [13] United States Environmental Protection Agency. Federal Register link to HFC allocation final rule [EB/OL]. (2023–07–12) [2024–12–30]. <https://www.federalregister.gov/documents/2023/07/12/2023-14189/phasedown-of-hydrofluorocarbons-adjustment-to-the-hydrofluorocarbon-production-baseline>.
- [14] United States Environmental Protection Agency. Phasedown of hydrofluorocarbons: allowance allocation methodology for 2024 and later years [EB/OL]. (2023–07–20) [2024–12–29]. <https://www.federalregister.gov/documents/2023/07/20/2023-14312/phasedown-of-hydrofluorocarbons-allowance-allocation-methodology-for-2024-and-later-years>.
- [15] United States Environmental Protection Agency. Overview of allowances and exchange values (pdf) [EB/OL]. (2021–10–01) [2024–12–27]. <https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-11/hfc-allocation-rule-ev-fact-sheet.pdf>.
- [16] United States Environmental Protection Agency. HFC allowance calculator (xlsx) [EB/OL]. (2022–02–01) [2024–12–30]. <https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fwww.epa.gov%2Fsystem%2Ffiles%2Fdocuments%2F2021-10%2Fhfc-allowance-calculator.xlsx&wdOrigin=BROWSELINK>.
- [17] 中华人民共和国生态环境部. 冻结和削减氢氟碳化物, 持续推进气候行动——纪念2024年9.16国际保护臭氧层日 [EB/OL]. (2024–09–16) [2024–09–17]. https://www.mee.gov.cn/ywdt/hjynews/202409/t20240916_1086092.shtml. (Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Freezing and reducing hydrofluorocarbons, and continuously advancing climate action — Commemorating the International Day for the Preservation of the Ozone Layer 16 September 2024 [EB/OL]. (2024–09–16) [2024–09–17]. https://www.mee.gov.cn/ywdt/hjynews/202409/t20240916_1086092.shtml.)

通信作者简介

李丽平,女,正高级工程师,生态环境部环境与经济政策研究中心,13520659761,E-mail:li.liping@prcee.org。研究方向:减污降碳协同、全球环境政策、应对气候变化。

About the corresponding author

Li Liping, female, professor, Policy Research Center for Environment and Economy, Ministry of Ecology and Environment, 86-13520659761, E-mail: li.liping@prcee.org. Research fields: synergy between reducing pollution and controlling carbon emissions, international environmental policy, addressing climate change.