

NDC系列简报

中国含氟温室气体 减排努力和前景展望

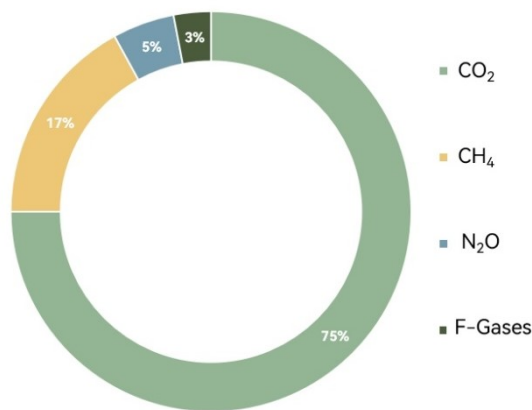
2024年11月

1. 作为“超级温室气体”的含氟温室气体

世界气象组织《2023 全球气候状况》报告显示，2023 年是有记录以来最暖的一年，全球近地表平均温度比工业化前约高出 1.45 (±0.12) °C，逼近《巴黎协定》的 1.5°C 红线¹。随着气候变化加剧，采取更具雄心的应对气候变化行动刻不容缓。

《京都议定书》所管控的含氟温室气体包括氢氟碳化物 (HFCs)、全氟化碳 (PFCs)、六氟化硫 (SF₆) 和三氟化氮 (NF₃)²。由于这些气体具有高升温潜势 (Global Warming Potential, GWP)，虽然它们在排放总量中仅占比 3% (图 1)³，但所能引发的温室效应却极高。例如，在 100 年的时间框架内，SF₆ 的温室效应高达二氧化碳的 25200 倍，是最强效的温室气体之一 (表 1)。据 IPCC 第六次评估报告指出，含氟温室气体贡献了约 0.1 摄氏度的全球历史升温，而作为温室气体主要来源的二氧化碳，其温升贡献也不过 0.8 摄氏度⁴。

图 1 全球温室气体排放占比 (2023)



数据来源: UNEP, Emissions Gap Report 2024

表 1 部分含氟温室气体 GWP 数值
(二氧化碳 GWP100=1)

气体名称	生命周期 (年)	GWP100
HFC-23	228	14600
HFC-32	5.4	771
HFC-125	30	3740
HFC-134a	14	1530
PFC-14	50000	7380
PFC-116	10000	12400
SF ₆	3200	25200
NF ₃	569	17400

数据来源: IPCC, AR6 Report

¹ World Meteorological Association. (2024). State of the global climate 2023.
² 1997 年通过的《京都议定书》中并未涵盖三氟化氮 (NF₃)；但 2012 年通过的《京都议定书<多哈修正案>》将 NF₃ 纳入了管控范围，该修正案于 2020 年 12 月 31 日生效。中国最近一次国家温室气体清单为 2018 年数据，尚未纳入 NF₃ 气体。
³ United Nations Environment Programme. (2024). Emissions Gap Report 2024.
⁴ Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report.

2. 含氟温室气体排放现状和趋势

2.1 全球含氟温室气体排放

HFCs、PFCs、SF₆ 以及 NF₃ 的排放主要由人为活动导致，包括生产、储运和使用过程中泄露、排空等，排放源涉及制冷、电子、电力、冶金、化工等多个行业（表 2）⁵。

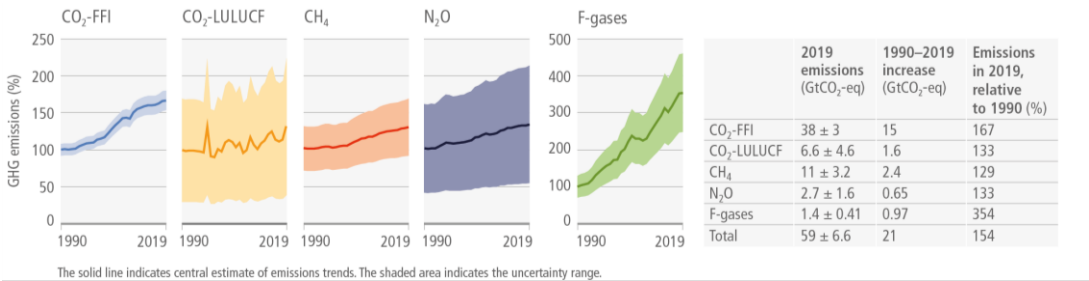
表 2 含氟温室气体主要排放源

HFCs	制冷剂、发泡剂、灭火剂、医用气雾剂等在生产、储运和使用过程中的泄露
PFCs	电解铝生产，半导体制造，光伏制造等
SF ₆	电力工业，镁冶炼，电子工业等
NF ₃	半导体制造，电子工业，光伏制造等

来源：iGDP 整理

2023 年，全球温室气体排放量为 571 亿吨 CO₂e，其中含氟温室气体约为 17 亿吨 CO₂e⁶，占比 3%。尽管占总量极小，但其增长速度却是几种温室气体中迄今最高的：1990 年到 2019 年间，含氟温室气体增长了 254%⁷，接近同期二氧化碳增速的 4 倍；2023 年，全球温室气体排放量增长率是 1.3%，而含氟温室气体的增速仍达到 4.2%⁸。

图 2 全球人为非二氧化碳温室气体排放趋势（1990-2019 年）



来源：IPCC, AR6 Report

⁵ 非二氧化碳温室气体减排技术发展研究组. (2022). 非二氧化碳温室气体减排技术发展评估与展望.

⁶ United Nations Environment Programme. (2024). Emissions Gap Report 2024.

⁷ Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report.

⁸ Ibid.

2.2 我国含氟温室气体排放

2018 年，我国排放了 2.84 亿吨 CO₂e 含氟温室气体（不包括 NF₃），约占全球含氟温室气体排放的 1/4 和我国温室气体排放的 2.2%⁹。其中，HFCs 占比超过 66%，为 1.89 亿吨 CO₂e，PFCs、SF₆ 则分别达到了 0.22 和 0.73 亿吨 CO₂e¹⁰。

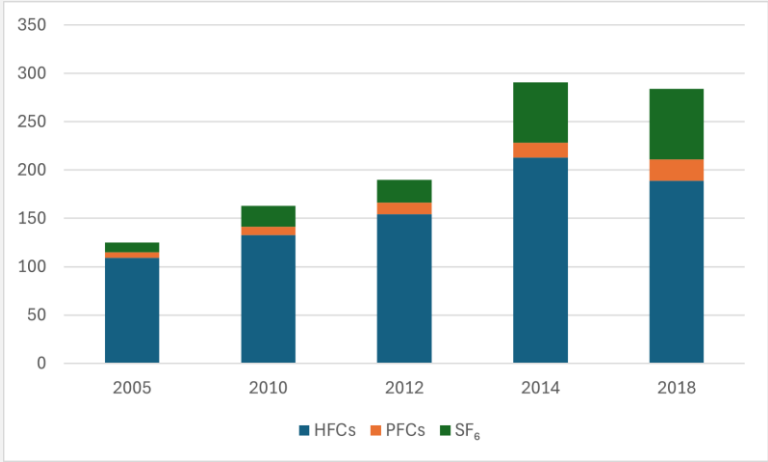
HFCs 的突出排放与我国庞大的制冷行业有关：我国家用空调和电冰箱产量占全球比重分别超过了 80% 和 60%¹¹，空调社会保有量达到 5.4 亿台，全球领先¹²，而市场近年来最主流的制冷剂当属第三代 HFCs 制冷剂。根据生态环境部相关数据，我国生产的 11 种 HFCs 产量占全球 HFCs 总产量的 80% 以上¹³。此外，我国 PFCs 最大的排放源是电解铝生产，而 SF₆ 则是电力行业，研究指出，我国有超过 95% 的 SF₆ 排放由电力工业产生¹⁴。

从排放趋势看，近年来，我国含氟温室气体排放上涨非常显著。2005 年到 2018 年，中国含氟温室气体增长达到了 127.2%（图 3）。多项研究对含氟温室气体未来的排放趋势进行了预测，结果均显示，尽管《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书〈基加利修正案〉》会对 HFCs 的生产和消费进行约束，但由于延迟排放的特性，我国 HFCs 的排放量仍将保持一段时间的快速上涨，在 2030 年代达到峰值，超过 6 亿吨 CO₂e，并到 2050 年缩减至 4 亿吨 CO₂e 以下^{15、16、17}。此外，由于排放约束机制相对有限，SF₆、PFCs 的排放量仍有上升空间^{18、19、20}，甚至可能超越 HFCs，给含氟温室气体进一步减排带来挑战。

以上研究表明，在按照《基加利修正案》时间表推进 HFCs 生产和消费削减的过程中，如果能有其他含氟温室气体减排政策协同发力，将有利于实现含氟温室气体的近零排放，助推我国碳中和目标的达成。

⁹ 中华人民共和国生态环境部.(2023). 中华人民共和国气候变化第三次两年更新报告.
¹⁰ Ibid.
¹¹ 中华人民共和国国家发展和改革委员会.(2019). 绿色高效制冷行动方案.
¹² 石飞月. (2021). 中国空调社会保有量 5.4 亿台. 北京商报. <https://www.bbtnews.com.cn/2021/0827/409021.shtml>.
¹³ 中华人民共和国生态环境部.(2024). 《关于严格控制第二批氢氟碳化物化工生产建设项目的通知（征求意见稿）》编制说明.
¹⁴ Zhou, S., Teng, F., & Tong, Q. (2018). Mitigating sulfur hexafluoride (SF₆) emission from electrical equipment in China. Sustainability, 10(7), 2402.
¹⁵ Bai, F., An, M., Wu, J., Fang, X., Jiang, P., Yao, B., ... & Hu, J. (2023). Pathway and Cost-Benefit Analysis to Achieve China's Zero Hydrofluorocarbon Emissions. Environmental Science & Technology, 57(16), 6474-6484.
¹⁶ Teng, F., Su, X., & Wang, X. (2019). Can China peak its non-CO₂ GHG emissions before 2030 by implementing its nationally determined contribution?. Environmental Science & Technology, 53(21), 12168-12176.
¹⁷ 清华大学气候变化与可持续发展研究院. (2020). 《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告.
¹⁸ iGDP. (2024). Energy Policy Simulator. <https://energypolicy.solutions/home/china-igdp/en>.
¹⁹ Guo, L., Yang, Y., Fraser, P. J., Velders, G. J., Liu, Z., Cui, D., ... & Fang, X. (2023). Projected increases in emissions of high global warming potential fluorinated gases in China. Communications Earth & Environment, 4(1), 205.
²⁰ Song, R. (2019). Opportunities to advance mitigation ambition in China: Non-CO₂ greenhouse gas emissions. In World Resources Institute Washington, DC Working Paper.

图 3 中国含氟温室气体排放历史趋势 (Mt CO₂e)



来源：中国国家温室气体排放清单数据

3. 含氟温室气体减排行动

3.1 其他国家含氟温室气体减排政策与行动

从全球范围看，有相当数量的国家和地区正在针对含氟温室气体减排采取行动。截至目前，共有 160 个国家和地区批准了《基加利修正案》²¹；欧盟、日本等都出台了较为严格的含氟温室气体排放控制政策和管理措施。

表 3 欧盟、日本含氟温室气体排放控制政策和管理措施

国家/地区	政策要点	政策来源
欧盟	●市场禁令：依据用途或 GWP 值设定产品禁入市场的时间，到 2050 年实现 HFCs 消费的完全淘汰； ●配额制度：在配额分配期前连续三年有化学品贸易活动经验的进口商和生产商可获得配额分配，并购买配额； ●生产者延伸责任计划：到 2027 年底，含氟温室气体生产商为 2012/19/EU 指令所约束的产品和设备中气体的收集、处理、回收和销毁提供资金； ●此外，该法规还在进出口管制、数据报告、泄露控制等多个领域都加强了管控……	《含氟气体法规 2024/573》 ²²
	●铝生产过程的 PFCs 排放纳入欧盟碳市场²³	欧盟碳市场
日本	（对含氟温室气体的生产、消费、回收、再生/销毁进行全生命周期管理） ●主体责任确定：1) 气体生产商须减少含氟温室气体生产，并推进低 GWP 物质的使用。2) 使用者须定期检查泄露；回充/回收气体时委	●《家电回收法》 ●《机动车回收法》 ●《氟碳化合物合理使用和妥善管理法》^{24、25}

²¹ United Nations. (2016). Amendment to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer.

²² European Union. (2024). Regulation (EU) 2024/573 of the European Parliament and of the Council.

²³ European Commission. Scope of the EU ETS.

²⁴ Ministry of the Environment, Japan. Act on Rational Use and Proper Management of Fluorocarbons.

²⁵ 潘寻，胡俊杰，李仓敏 & 林军. (2022). 日本制冷剂回收管理模式的启示与借鉴.

	托已注册企业开展相关作业；对回收、运输、循环利用和销毁等环节付费。3) 制冷剂回收/再生/销毁企业须在当地政府注册、认证。 ● 报告制度： 气体生产商或进口商须报告每财年的出货情况；使用者须报告一定规模的泄漏情况；制冷剂维修/销毁企业须开具回收/回充/销毁证明书记录数据。该制度使日本国内制冷剂信息有了明确监督和统计。	
--	---	--

来源：iGDP 整理

3.2 中国含氟温室气体的减排行动

我国也已出台多项针对含氟温室气体管控的减排政策，并且，由于 HFCs 在含氟温室气体排放中的高占比，目前的减排行动侧重在对 HFCs 排放进行管控。

表 4 中国推进含氟温室气体减排的主要政策行动

含氟温室气体减排战略规划		
气体种类	政策描述	政策来源
非二/含氟温室气体	●加大甲烷、氢氟碳化物、全氟化碳等其他温室气体控制力度。 ●继续推动 HFC-23 销毁，推广低增温潜势电力设施，强化氢氟碳化物、六氟化硫排放控制。 ●研究实施非二控排行动方案，继续完善非二监测、报告和评估技术体系，逐步建立健全非二排放统计核算、政策和管理体系。 ●将温室气体管控纳入环评管理。 ●强化非二氧化碳温室气体管控，研究制订重点行业温室气体排放标准。	●《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》 ●《中国本世纪中叶长期温室气体低排放发展战略》 ●《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》 ●《中共中央国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见》 ●《减污降碳协同增效实施方案》
HFCs	●从 2024 年起将受控用途 HFCs 生产和使用冻结在基线水平，2029 年起 HFCs 生产和使用不超过基线的 90%，2035 年起不超过 70%，2040 年起不超过 50%，2045 年起不超过 20%。	●《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书<基加利修正案>》
	●积极履行《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》基加利修正案，严格要求全部二氟一氯甲烷生产企业无害化处置其副产物三氟甲烷；加大低碳环保替代技术研发和应用，在替代减排氟氯烃的过程中积极采用低全球增温潜势值替代技术；推动受控物质回收、再利用和无害化处理，支持相关企业创建绿色工厂，严格控制生产过程中受控物质泄漏和排放。优先在替代技术相对成熟的行业开展替代减排氢氟碳化物行动。	●《中国本世纪中叶长期温室气体低排放发展战略》
	●加强消耗臭氧层物质和氢氟碳化物管理，加快使用含氢氯氟烃生产线改造，逐步淘汰氢氯氟烃使用。	●《减污降碳协同增效实施方案》

含氟温室气体减排政策		
HFCs	(将 18 种氢氟碳化物纳入管控范围) • 逐步削减并最终淘汰作为制冷剂、发泡剂、灭火剂、溶剂、清洗剂、加工助剂、杀虫剂、气雾剂、膨胀剂等用途的消耗臭氧层物质。 • 对消耗臭氧层物质的生产、使用、进出口实行总量控制和配额管理。 • 鼓励、支持消耗臭氧层物质替代品和替代技术的科学研究、技术开发和推广应用。	• 《消耗臭氧层物质管理条例》 • 《中国受控消耗臭氧层物质清单》 • 《中国进出口受控消耗臭氧层物质名录》 • 《消耗臭氧层物质进出口管理办法》
	• 不得新建、扩建受控用途的 HFCs 化工生产设施。 • 已建成的用作受控用途的 HFCs 化工生产设施，需要改建或异址建设的，不得增加原有 HFCs 生产能力，也不得新增用作受控用途的 HFCs 产品种类。	• 《关于严格控制氢氟碳化物化工生产建设项目的通知》
	• 二氟一氯甲烷（HCFC-22）或氢氟碳化物（HFCs）生产过程中副产的 HFC-23 不得直接排放。 • 除作为原料用途和受控用途使用外，副产 HFC-23 应采用《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》缔约方大会核准的销毁技术尽可能销毁处置。	• 《关于控制副产三氟甲烷排放的通知》
	• HFCs 生产基线值为 18.53 亿吨二氧化碳当量、使用基线值为 9.05 亿吨二氧化碳当量（含进口 0.05 亿吨）。	• 《2024 年度氢氟碳化物配额总量设定与分配方案》
	• 加速淘汰 HCFCs 制冷剂、限控 HFCs 使用，严格控制生产过程中制冷剂的泄露和排放，开展回收、再生利用和无害化处置。	• 《绿色高效制冷行动方案》 • 《制冷设备更新改造和回收利用实施指南》 • 《“十四五”冷链物流发展规划》
SF ₆	• 2023 年起，新建站 110、220 千伏 GIS 母线、隔离开关全面推广混合气体设备，力争 2028 年实现公司 SF₆ 气体使用总量“零增长”； • 年 SF₆ 泄漏率标准提升至 0.1%。	• （企业制度-中国国家电网）《关于开展混合气体 GIS 设备推广应用工作的通知》²⁶

来源：iGDP 整理

²⁶ 该通知为企业发布的计划而非国家政策规定。中国国家电网公司是我国重要的 SF₆ 消费来源之一，根据中国工业新闻网，截至 2020 年，国家电网公司 10-1000kV 电网用配电开关设备和变电开关设备的 SF₆ 使用量，共计约 31786 吨。

4. 中国含氟温室气体减排机遇与挑战

含氟温室气体、尤其是 HFCs 的减排将助力我国双碳目标推进。对此，各种含氟温室气体在生命周期的不同环节，从源头的替代品研发到生产工艺改善，再到使用后的循环利用和销毁，所面临的减排机遇和挑战如下。

4.1 HFCs 减排机遇与挑战

HFCs 的减排重点在制冷行业。在制冷剂产品报废前，环保型替代品的研发与制冷剂回收再生技术是减排关键。

环保型制冷剂研发与使用：研发与使用 HFCs 的低 GWP 值替代品是从源头降低 HFCs 排放的核心举措之一。在制冷剂行业，氢氟烯烃制冷剂（HFO，如 HFO-1234yf）、碳氢制冷剂（HC，如 HC-290）、以及部分天然工质制冷剂（如 R744，即 CO₂）等都是具有潜力的制冷剂替代品，但这些产品往往会面临来自安全性、成本或能效方面的挑战。例如，R1234yf、R290 具有易燃性，增加了使用时的安全风险²⁷；R744 运行压力高，增加了设备的耐高压要求、成本，并引发对安全性的担忧²⁸。

我国仍处于从消耗臭氧层的第二代制冷剂（HCFC）向第三代（HFC）过渡的进程中，如果部分企业能直接向第四代制冷剂转型，将在一定程度上减轻我国 HFCs 的减排压力。但这一挑战艰巨，我国在 HFO 研发上面临着严重的知识产权制约，且未来新的单工质筛选难度将越来越大。据统计，全球 HFO 专利总数超过 1600 项（合并同族后），而中国企业专利数量仅占总专利数的 14%，核心专利数仅 1.7%²⁹。

专栏-国内实践案例：目前国内 HFOs 产能多来自给国外代工或中外合资公司。例如，巨化股份为霍尼韦尔代工生产 4 种 HFO、中化蓝天霍尼韦尔合资公司生产 HFO-1233zd 等³⁰。部分国内企业虽已具备自主知识产权的 HFO 生产技术，但总体产能规模较小，例如，环新氟材通过三氟乙烯为原料制备 HFO-1234fy，并建成年产 3000 吨的产业化装置等。此外，行业也在通过开发混合工质，突破专利壁垒。例如，浙江省化工研究院开发的 HFO-1234ze（E）/HFE-143a/HFC-32 组合物，浙江大学开发的 HFO-1234fy/HFC-152a/HFC-134a 等³¹。

制冷剂回收再生技术：将设备中的制冷剂回收后，根据其纯度、单一或混合工质等特性，选择简易再生或蒸馏再生等技术，实现制冷剂的提纯再生³²。总体来说，制冷剂的回收再生有利于实现温室气体减排效益、缓解《关于消耗臭氧层物质的蒙

²⁷ Eiji Hihara. Research Project on Risk Assessment of Mildly Flammable Refrigerants.

²⁸ Zhang, X. P., Wang, F., Fan, X. W., Wei, X. L., & Wang, F. K. (2013). Determination of the optimum heat rejection pressure in transcritical cycles working with R744/R290 mixture. Applied thermal engineering, 54(1), 176-184.

²⁹ 张建君. 我国低 GWP 值制冷剂的研发进展.

³⁰ 国金证券研究所. 国内制冷剂企业四代制冷剂现有产能与在建项目进展.

³¹ 同上.

³² 韩晓红, 叶恭然. 制冷剂回收及再利用. <https://cms.myhuiyi.com/Annex/20230423140002731.pdf>.

特利尔议定书》(后称《蒙约》)下配额削减压力、降低环境安全风险。然而,我国制冷剂回收再利用仍处在起步阶段,技术相对落后。据统计,我国空调、冰箱中的制冷剂在回收时,仅能分别回收其所含制冷剂的 40% 和 14%,对比欧美等发达国家技术水平还有一定差距³³。此外,制冷剂处置费用可能达到 4-10 万元/吨,成本较高。

专栏-国内实践案例:天津澳宏环保材料有限公司是目前国内最大的制冷剂回收再生企业,其主要技术性能指标已达到国际先进水平,并具有成本优势。2020 年,该企业回收再生制冷剂 815 吨,折合减排约 160 万吨 CO₂e; 2021 年回收再生制冷剂 1200 余吨,折合减排约 240 万吨 CO₂e。

4.2 HFC-23 减排机遇与挑战

HFC-23 是 HCFC-22 生产过程的副产物,也是《蒙约》规定的应尽量销毁的气体。《蒙约》核准了 8 种 HFC-23 销毁技术,目前最主流的是高温焚烧,但这一方式能耗高且浪费氟资源。因此,我国鼓励企业探索降低副产率、资源化利用等解决方案³⁴。

改进生产工艺:可以通过提高催化剂寿命,优化反应压力、温度、催化剂浓度,调整原料供给配比和进料方式等降低 HFC-23 的副产率。目前,中国多数企业 HFC-23 副产率仍处于 2-3% 水平,通过产业化装置技术改进和过程优化可以实现副产率降低至 1% 以下³⁵。

资源化利用:目前最具经济和社会效益的 HFC-23 资源化利用路径是将之与氯仿(CHCl₃)进行氟氯交换,转化回 HCFC-22。该转化流程短、安全性高,能实现 HFC-23 的近零排放,且该技术与 HCFC-22 生产工艺耦合、投资成本相对较低^{36、37}。

专栏-国内实践案例:浙江省化工研究院与中昊晨光完成了与 HCFC-22 生产装置完整耦合的 HFC-23 转化工艺技术开发。该装置于 23 年 12 月正式投料运行,按年转化 1.5 万吨 HFC-23 计算,采用该转化技术每年可实现减排 2.2 亿吨 CO₂e³⁸。

4.3 SF₆ 减排机遇与挑战

电力行业 SF₆ 减排同样可以通过气体替代技术、回收净化技术实现。

电力设备 SF₆ 减少或替代技术:寻找 SF₆ 的替代气体,通过将 SF₆ 与其他气体混合或完全使用其他气体替代 SF₆ 可以实现减排。研究显示,在混合气体替代领域,当 SF₆

³³ 生态环境部固体废物与化学品管理技术中心.(2022). 蒙特利尔议定书受控物质制冷剂回收再用管理模式研究报告.

³⁴ 中华人民共和国生态环境部.(2021). 关于控制副产三氟甲烷排放的通知.

³⁵ 生态环境部固体废物与化学品管理技术中心.(2022). 蒙特利尔议定书受控物质制冷剂回收再用管理模式研究报告

³⁶ Ibid.

³⁷ 绿色低碳创新大会专班.(2024). 2023 年度中国碳达峰碳中和十大科技创新.

³⁸ 中国昊华化工集团.(2024). 国内首套副产物 HFC-23 资源化利用项目取得新进展.

/N₂ 中的 SF₆ 含量为 30%，气压为 0.7MPa 时，全球变暖值（GWP）约能降低 50%；而在气体完全替代领域，全氟异丁腈（C₄F₇N）等展现出了相对较好的综合性能^{39、40}。

专栏-国内实践案例：2017 年以来，中国国家电网在河北、山东、安徽等多地开展了 SF₆/N₂ 混合气体母线、隔离接地开关试点；2023 年起开展了 SF₆/N₂ 混合气体 GIS 设备推广应用工作。从 2023 年下半年起，国家电网公司已不再采购含 SF₆ 的配电开关设备⁴¹。

此外，无氟设备 GIS 设备也在我国不断推广。西门子 Blue 环保型 GIS 设备超过 100 台已投入运行⁴²。2020 年，平高集团和西安交通大学自主设计开发了我国首台具有应用价值的 126kV 无氟环保型气体绝缘金属封闭开关设备⁴³。

SF₆回收净化技术：对设备中尚未达到退役年限的 SF₆ 气体进行回收、净化和循环利用，2015 年《国家重点推广的低碳技术目录》中采取的综合净化处理技术能达到 95% 以上的净化处理回收率。此外，由于 SF₆ 的净化回收成本要低于购买新气的成本，所以该减排方式甚至能带来相当程度的经济效益。

专栏-国内实践案例：国家电网研发了 SF₆ 气体回收处理和循环再利用成套技术与装备，建成 26 家省级 SF₆ 回收处理中心。截至 2020 年底，国家电网 SF₆ 气体回收率超过 96.5%，累计回收 SF₆ 气体 732.3 吨，相当于减排二氧化碳 1750.2 万吨⁴⁴。

4.4 PFCs 减排机遇与挑战

PFCs 的减排重点在电解铝行业，主要措施是通过改善设备、工艺降低产生 PFCs 的阳极效应。

电解铝降低阳极效应技术：铝生产过程的阳极效应是电解铝 PFCs 排放的主要来源。对此，通过纳米陶瓷基高温防氧化涂层保护技术对阳极形成保护⁴⁵，或低阳极效应设计及控制技术都可以实现 PFCs 的减排⁴⁶。两种技术在实现减排以外，还能带来额外的经济效益，具有良好的经济性。

专栏-国内实践案例：山东魏桥集团、黄河鑫业有限公司、广西华磊新材料有限公司等近十家大型电解铝企业应用了纳米陶瓷基高温防氧化涂层保护技术，累计电解铝产能 170 万吨。

³⁹ 颜湘莲, 高克利, 郑宇, 李志兵, 王浩, 何洁, & 刘焱. (2018). SF₆ 混合气体及替代气体研究进展. 电网技术, 42(6), 1837-1844.

⁴⁰ 周文俊, 郑宇, 杨帅, 覃兆宇, & 王宝山. (2016). 替代 SF₆ 的环保型绝缘气体研究进展与趋势. 高压电器, 52(12), 8-14.

⁴¹ 余娜. (2024). 严控六氟化硫! 电力设备加速无氟替代.

⁴² 同上.

⁴³ 澎湃新闻. (2020). 全国首台 126kV 无氟环保型气体绝缘金属封闭开关设备研制成功.

⁴⁴ 国家能源局. (2021). 关于十三届全国人大四次会议第 6052 号建议的答复摘要.

⁴⁵ 中华人民共和国生态环境部. (2022). 国家重点推广的低碳技术目录（第四批）技术简介.

⁴⁶ 非二氧化碳温室气体减排技术发展研究组. (2022). 非二氧化碳温室气体减排技术发展评估与展望.

低阳极效应设计及控制技术在山西华圣铝业有限公司、云南铝业股份有限公司等企业的 712 台 300kA 电解槽上已有应用，覆盖全国 3%的铝产量⁴⁷。

4.5 含氟气体无害化处理机遇与挑战

最后，对于已报废的含氟温室气体，则需要对其进行无害化处理。

等离子体技术：利用产生高温的等离子体破坏含氟温室气体分子，与传统的焚烧热解相比，该技术能效和去除率高，运行成本低⁴⁸。

专栏-国内实践案例：据统计，2021 年，我国直接销毁的制冷剂中，有 62.3%采用了等离子体方式⁴⁹。而针对 SF₆，南方电网贵州电力科学研究院研制的“低温等离子体降解强温室效应六氟化硫气体装置”已在贵州、湖北、重庆、安徽等地投入使用，该装置对 SF₆降解率达到 96%，已完成超过 77 万吨 CO₂e 的 SF₆气体降解工作⁵⁰。

5. 中国含氟温室气体减排展望

面对《巴黎协定》“将全球平均气温较前工业化时期上升幅度控制在 2°C 以内，并努力将温度上升幅度限制在 1.5°C以内”的目标，含氟温室气体控排需要更多国际双多边合作，通过合作制定更具雄心的减排承诺、采取更切实有力的减排行动。

2023 年 11 月，中美两国发布《关于加强合作应对气候危机的阳光之乡声明》，其中指出，“两国计划在基加利修正案下共同努力逐步减少氢氟碳化物，并致力于确保生产的所有制冷设备采用有力度的最低能效标准”，展现出中美双方对《基加利修正案》履约的积极态度以及对本国制冷行业未来发展的更高追求。

2023 年联合国气候变化大会（COP28）上发起的全球制冷承诺（Global Cooling Pledge）为进一步推动 HFCs 减排和发展可持续制冷提供了机遇。承诺提出，要实现“到 2050 年将全球所有部门的制冷相关排放量在当前基础上减少至少 68%，到 2030 年大幅增加可持续制冷的使用，并将全球新空调的平均效率提高 50%”。COP28 期间，有 63 个国家加入了该承诺，目前，这一数量已增长至 71 个⁵¹。

除了以上宣言、承诺外，作为《巴黎协定》缔约国指导自身减排行动的核心战略，国家自主贡献（NDCs）在促进各国合作履约、控制全球温升方面也发挥了重要作用。截至 2022 年，在 NDCs 减排总体目标中涵盖 HFCs 排放的国家占比达到了 53%，涵盖 PFCs、SF₆排放的达到了 36%，涵盖 NF₃排放的则为 26%⁵²；约有 13 个国家的 NDCs 中列举了具有 HFCs 减排效益的措施⁵³；但在

⁴⁷ 武汉节能协会. (2021). 降低铝电解生产全过程全氟化碳（PFCs）排放技术.

⁴⁸ 非二氧化碳温室气体减排技术发展研究组. (2022). 非二氧化碳温室气体减排技术发展评估与展望.

⁴⁹ 生态环境部固体废物与化学品管理技术中心. (2022). 蒙特利尔议定书受控物质制冷剂回收再用管理模式研究报告.

⁵⁰ 中国能源新闻网. (2023). 贵州电网投用新型降解六氟化硫装置.

⁵¹ Climate & Clean Coalition. Global Cooling Pledge. <https://coolcoalition.org/global-cooling-pledge/>.

⁵² UNFCCC Secretariat. (2022). Nationally determined contributions under the Paris Agreement.

⁵³ Climate & Clean Air Coalition. (2024). Leveraging the Benefits of non-CO₂ Pollutants and Air Quality in NDC 3.0.

量化的具体目标方面，暂时只有日本提出了计划：到 2030 年在 2013 年基础上减少 17.3Mt CO₂e，其中 HFCs 减少 17.6Mt CO₂e、NF₃ 减少 1.1Mt CO₂e，但 PFCs 和 SF₆ 排放会有所上升。日本环境省最新发布的报告显示，日本含氟温室气体排放在 2022 年出现了 2009 年以来的首次下降⁵⁴。

按照《巴黎协定》，各缔约国即将提交面向 2035 年的 NDCs 目标，在此轮更新中，预计将有更多国家把含氟温室气体或 HFCs 的减排目标和措施纳入其中。这一预测与逐渐迫近的《基加利修正案》减排时间表以及越加普遍的减排行动有关：2024 年，非 A5 国家（如美国、日本、欧盟等）需要满足 HFCs 生产和消费在基线水平上削减 40% 的目标，而 A5 第一组国家（如中国、泰国、巴西等）也正式进入履约进程。

此次 NDCs 更新同样也可能成为我国含氟温室气体减排的重要机遇。在联合国气候变化巴库大会（COP29）世界领导人气候行动峰会上，我国表示“将提交覆盖全经济范围、包括所有温室气体的 2035 年国家自主贡献”⁵⁵，展现出进一步推进非二氧化碳温室气体控排的积极信号。并且，我国在 HFCs 减排领域已经采取的系列行动，也可以为 NDCs 更新提供坚实的政策依据。随着 HFCs 减排政策的率先推进，加之企业层面 SF₆、PFCs 减排行动的铺垫，未来我国还可以考虑进一步加强 SF₆ 和 PFCs 的管控和减排战略布局。

⁵⁴ Ministry of the Environment, Japan. (2024). Japan's Progress on Climate Change Measures and International Cooperation.

⁵⁵ 中华人民共和国外交部. (2024). 丁薛祥在联合国气候变化巴库大会世界领导人气候行动峰会上的发言.

报告作者：马 越 绿色创新发展研究院 助理分析师 邮箱：mayue@igdp.cn

排 版：包林洁

免责声明

本报告内容和观点仅代表作者的个人理解和观点，旨在加强相关领域的讨论交流，不代表支持方、作者所属机构、调研专家学者的立场和观点。本报告内容采用数据和信息均来自公开的信息和渠道，我们力求准确和完整，但难免偶有疏漏，敬请谅解并指正。

引用建议

马越. 2024. NDC 系列简报：中国含氟温室气体减排努力与前景展望. 工作论文. 北京: 绿色创新发展研究院.

关于绿色创新发展研究院

绿色创新发展研究院 (Institute for Global Decarbonization Progress), 简称:研究院 (iGDP), 是专注绿色低碳发展的战略咨询平台, 2014 年成立于北京, 旨在成为具领先专业素养和独立影响力的国际化智库。研究院根植我国地方绿色低碳实践, 面向全球应对气候变化进程, 为决策者、投资者和社区提供具有国际视野和前瞻思考的解决方案及公益性知识产品。

联系方式：

电话：86-10-8532 3096

传真：86-10-8532 2632

邮箱：igdpoffice@igdp.cn

网站：www.igdp.cn

地址：中国北京市朝阳区秀水街 1 号建外外交公寓 6-2-62

