

# 制冷剂绿色低碳转型替代路线

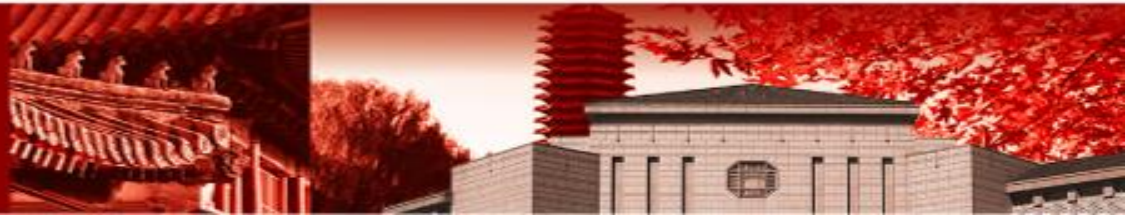
胡建信 姜鹏南 白富丽 陈子薇 赵星辰 张旭

北京大学环境科学与工程学院

2023年12月22日于海口



北京大学



# 报告的内容

制冷剂的绿色低碳问题

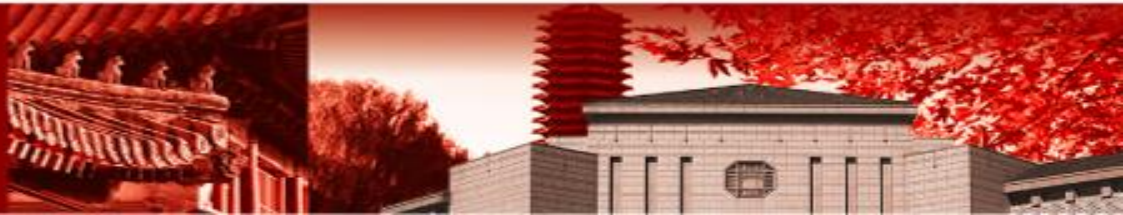
面临的形势（风险评估）

制冷剂替代与社会、经济和环境的影响

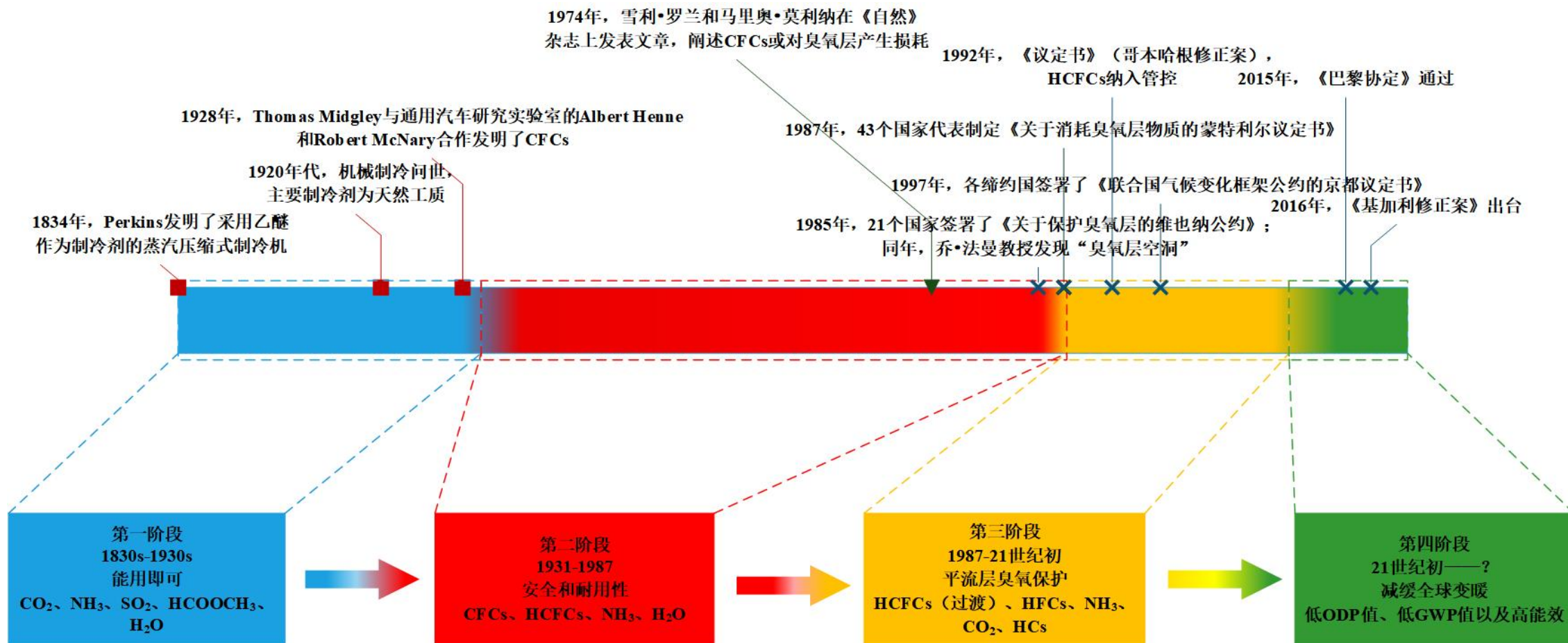
结论和建议



北京大学



# 制冷剂发展阶段



# 除CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O

国际公约管控的温室气体均为**含氟温室气体**

替代过程

ODS

CFC-11 CCl<sub>3</sub>F  
CFC-12 CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>  
CTC CCl<sub>4</sub>  
哈龙1211 CF<sub>2</sub>ClBr  
哈龙1301 CF<sub>3</sub>Br  
甲基溴 CH<sub>3</sub>Br  
HCFC-22 CHF<sub>2</sub>Cl

CFC-113 C<sub>2</sub>F<sub>3</sub>Cl<sub>3</sub>  
三氯乙烷 C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>Cl<sub>3</sub>  
HCFC-123 C<sub>2</sub>HF<sub>3</sub>Cl<sub>2</sub>  
HCFC-124 C<sub>2</sub>HF<sub>4</sub>Cl  
HCFC-141b C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>FCl<sub>2</sub>  
HCFC-142b C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>F<sub>2</sub>Cl

HCFC-225ca C<sub>3</sub>HF<sub>5</sub>Cl<sub>2</sub>  
HCFC-225cb C<sub>3</sub>HF<sub>5</sub>Cl<sub>2</sub>

—

蒙特利尔议定书

人为生产的化学品

C

2C

3C

4-5C

HFCs  
等替代品

HFC-23 CHF<sub>3</sub>  
HFC-32 CH<sub>2</sub>F<sub>2</sub>  
HFC-41 CH<sub>3</sub>F

HFC-134 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>F<sub>4</sub>  
HFC-134a C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>F<sub>4</sub>  
HFC-143 C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>F<sub>3</sub>  
HFC-125 C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>F<sub>5</sub>  
HFC-143a C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>F<sub>3</sub>  
HFC-152 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>F<sub>2</sub>  
HFC-152a C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>F<sub>2</sub>

HFC-245fa C<sub>3</sub>H<sub>3</sub>F<sub>5</sub>  
HFC-227ea C<sub>3</sub>H<sub>3</sub>F<sub>5</sub>  
HFC-236cb C<sub>3</sub>H<sub>2</sub>F<sub>6</sub>  
HFC-236ea C<sub>3</sub>H<sub>2</sub>F<sub>6</sub>  
HFC-236fa C<sub>3</sub>H<sub>2</sub>F<sub>6</sub>  
HFC-245ca C<sub>3</sub>H<sub>3</sub>F<sub>5</sub>  
HFO-1234yf C<sub>3</sub>H<sub>2</sub>F<sub>4</sub>  
HFO-1234ze C<sub>3</sub>H<sub>2</sub>F<sub>4</sub>

HFC-365mfc  
C<sub>4</sub>H<sub>5</sub>F<sub>5</sub>

HFC-43-10mec  
C<sub>5</sub>H<sub>2</sub>F<sub>10</sub>

气候变化公约

潜在管控F-gas

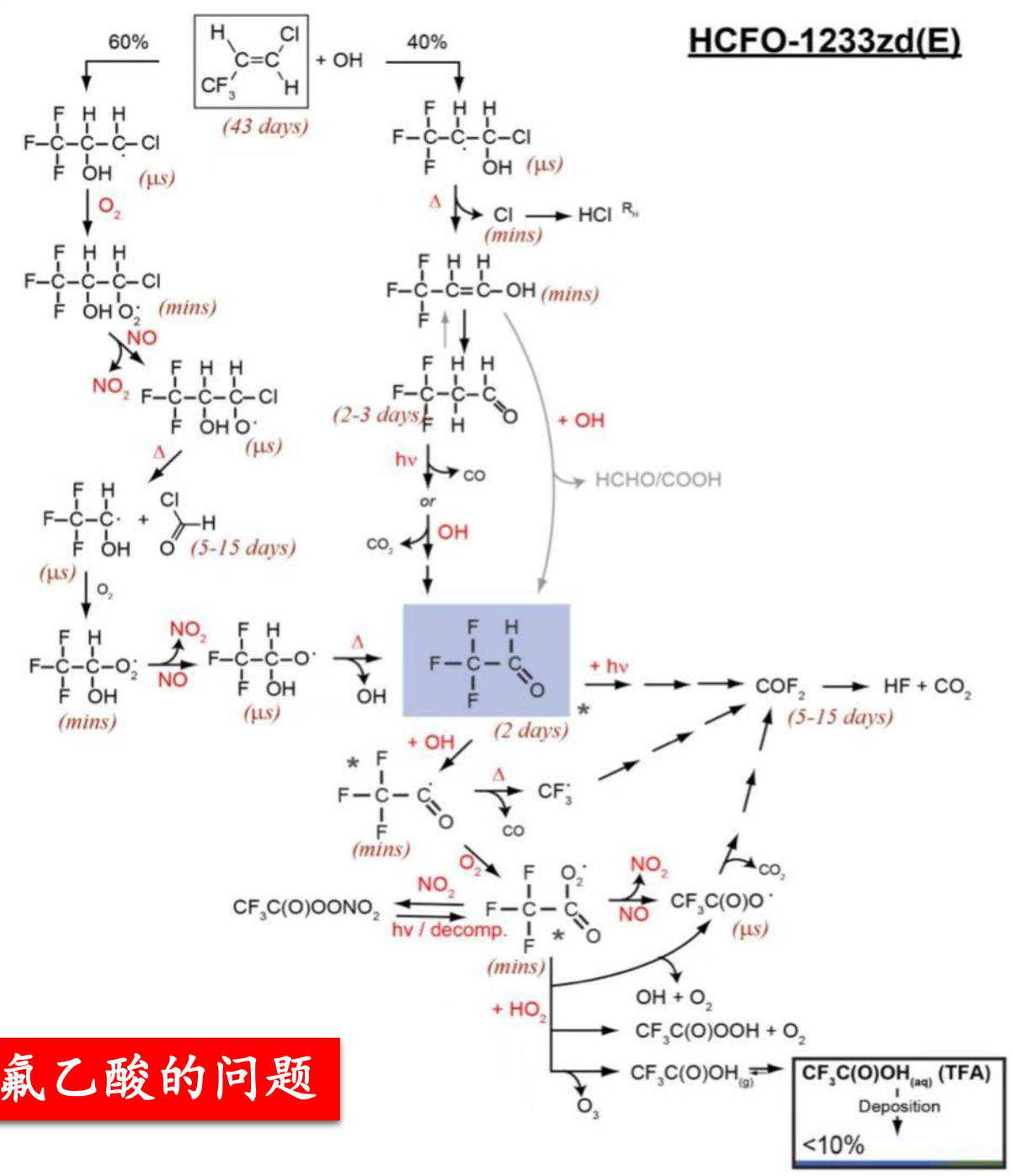
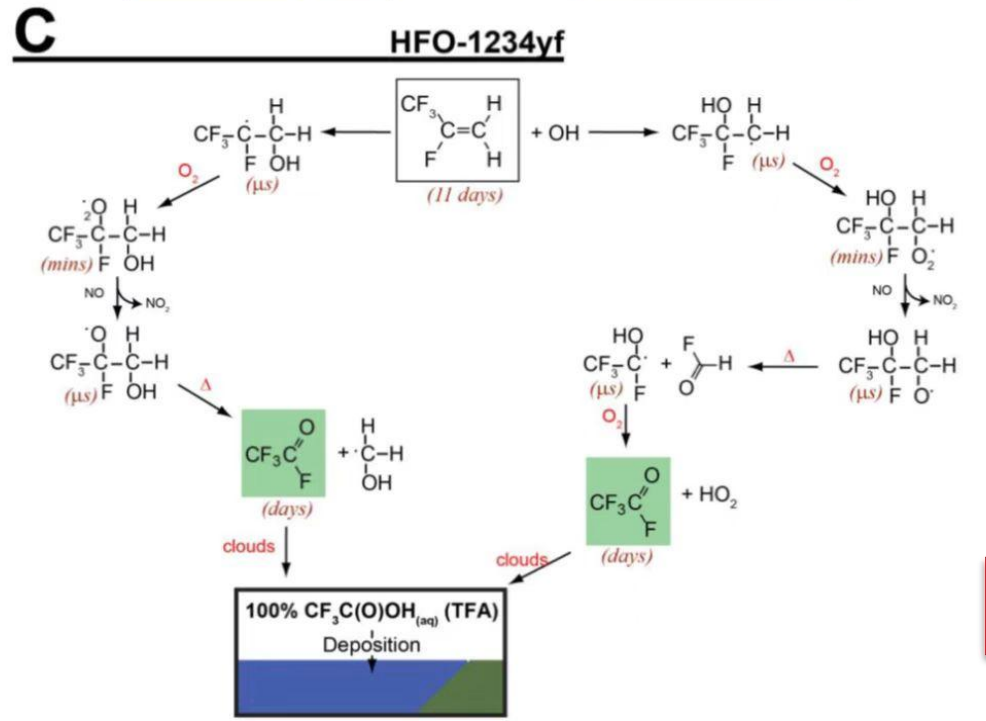
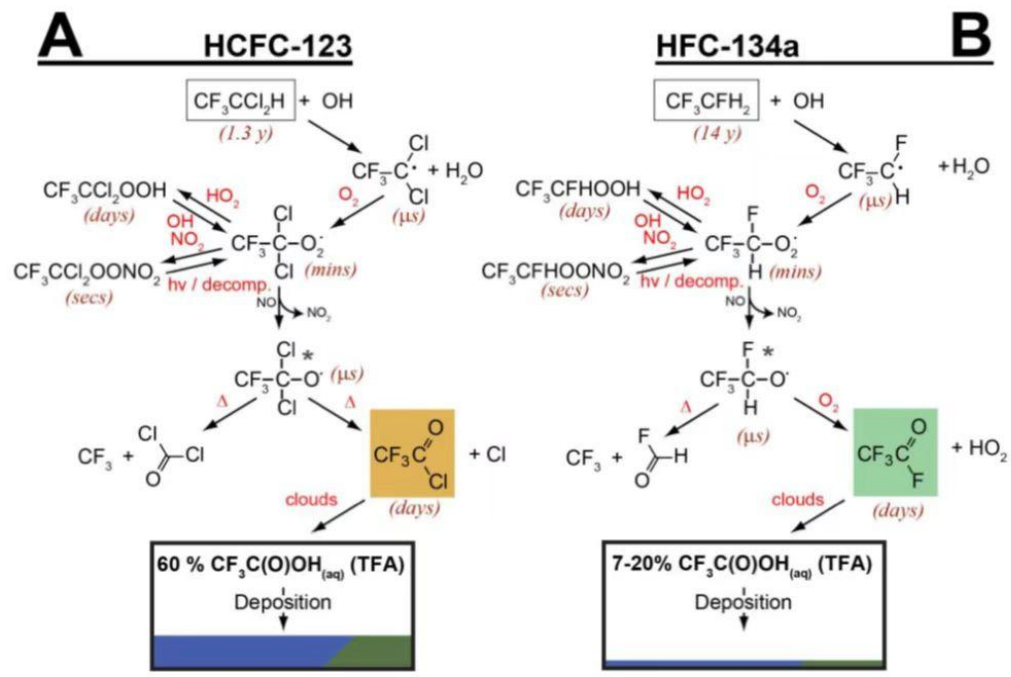
PFC  
NF<sub>3</sub>  
和SF<sub>6</sub>

CF<sub>4</sub>

C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>  
SF<sub>6</sub>  
NF<sub>3</sub>

# 制冷剂与绿色低碳的关系

- 人工制造化学物质特点
  - 带来全球环境影响（如何才能产生全球环境影响？）
  - 持久性（长寿命）、迁移性（挥发性）、危害（直接或者间接）
- 直接影响
- 温室气体（GHG）：HFCs、PFCs、SF<sub>6</sub>、NF<sub>3</sub>
- 消耗臭氧层物质（ODS）：CH<sub>3</sub>Br、CCl<sub>4</sub>、CFCs、HCFCs
- 间接影响
- 潜在的环境和健康影响（持久性有机污染物（POPs）：全氟羧酸PFAS等）
  - 替代品降解产物
- 不同制冷剂不同行业产品的能效



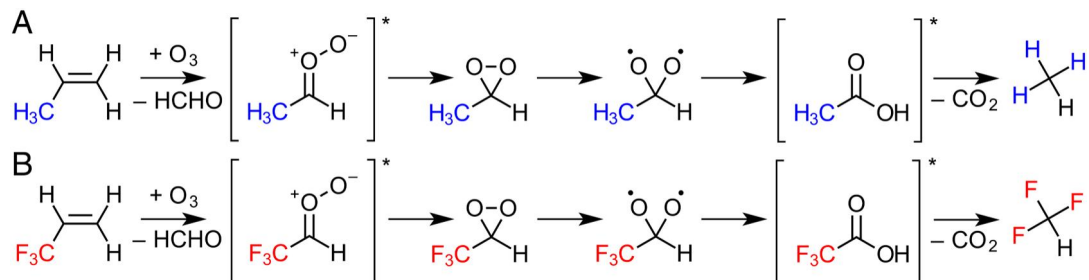
降解成三氟乙酸的问题

## Ozonolysis can produce long-lived greenhouse gases from commercial refrigerants

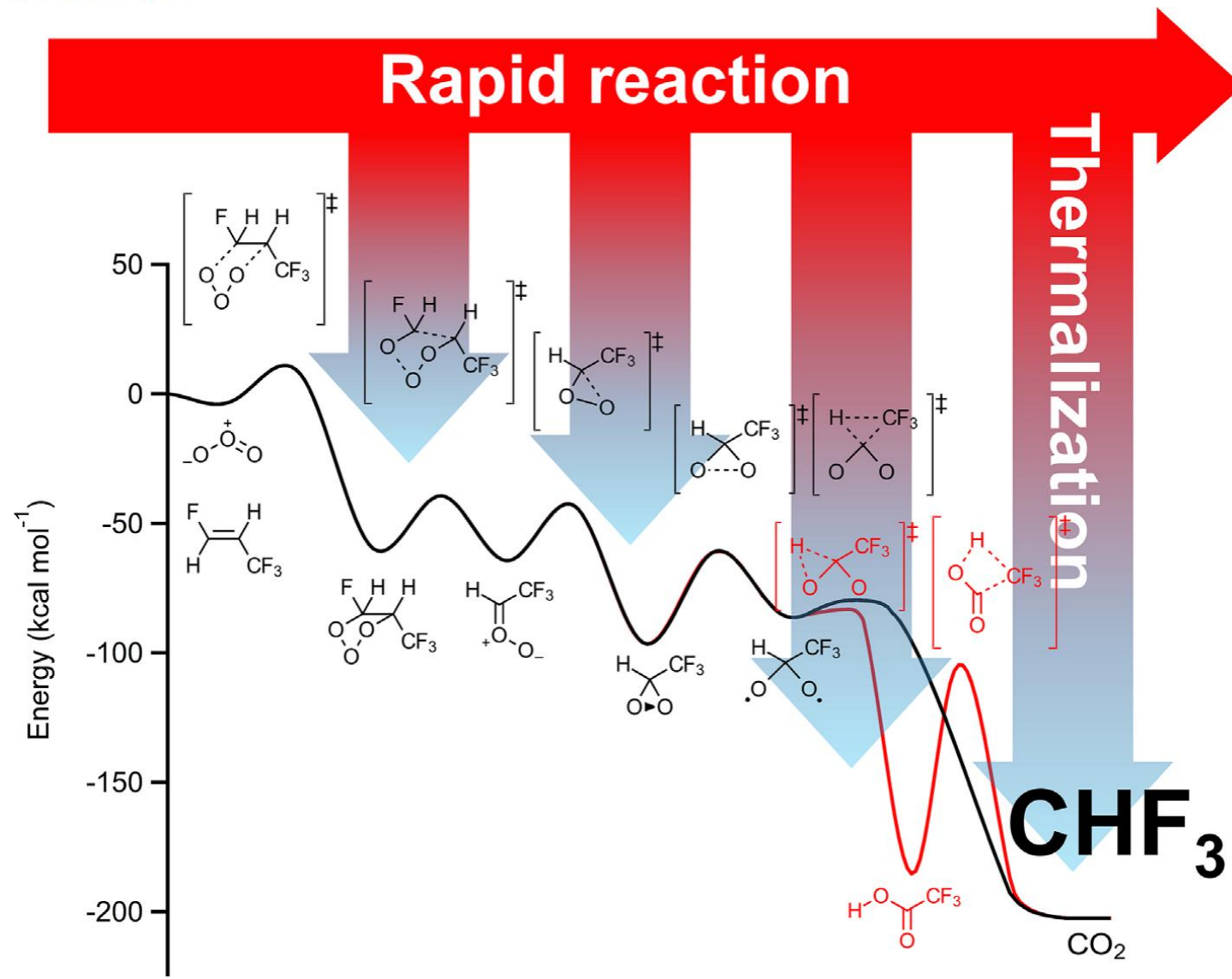
Max R. McGillen<sup>a,1</sup>, Zachary T. P. Fried<sup>b</sup>, M. Anwar H. Khan<sup>c</sup>, Keith T. Kuwata<sup>d</sup>, Connor M. Martin<sup>e</sup>, Simon O'Doherty<sup>c</sup>, Francesco Pecere<sup>f</sup>, Dudley E. Shallcross<sup>c</sup>, Kieran M. Stanley<sup>c</sup>, and Kexin Zhang<sup>g</sup>

<https://doi.org/10.1073/pnas.2312714120>

Published December 11, 2023.



降解成三氟甲烷HFC-23的问题



# 限用提案关于PFAS的定义

- 提案PFAS的定义：任何含有至少一个 $-CF_3$ 或 $-CF_2-$ 碳原子的物质（该碳原子上无H/Cl/Br/I原子）
- 仅包含 $CF_3-X$ 或 $X-CF_2-X'$ 结构的物质不在限制范围内，其中：
  - $X=-OR$ 或 $-NRR'$ ；
  - $X'$ =甲基 $(-CH_3)$ ，亚甲基 $(-CH_2-)$ ，芳香族基团、羰基 $(-C(O)-)$ 、 $-OR''$ 、 $-SR''$ 或 $-NR''R'''$ ；
  - ✓ 其中 $R/R'/R''/R'''$ 是氢 $(-H)$ 、甲基 $(-CH_3)$ 、亚甲基 $(-CH_2-)$ 、芳香族基团或羰基 $(-C(O)-)$

01

全氟烷基酸和全氟烷基醚酸 (PFAA)

- ① 全氟烷基羧酸  
( $C_nF_{2n+1}COOH$ ):  
PFOA、 $CF_3COOH$
- ② 全氟烷基磺酸  
( $C_nF_{2n+1}SO_3H$ ): PFOS
- ③ 全氟烷基磷酸  
( $C_nF_{2n+1}PO_3H_2$ )
- ④ 全氟烷基醚羧酸:  
HFPO-DA  
...

02

多氟烷基酸和多氟烷基醚酸 Poly-FAAs

- ① 多氟烷基羧酸:  
 $H-C_nF_{2n}-COOH$
- ② 多氟烷基醚羧酸:  
 $CF_3C_3F_6OCHF_2COOH$
- ③ 多氟烷基醚磺酸:  
 $ClC_6F_{12}OCF_2CF_2SO_3H$   
...

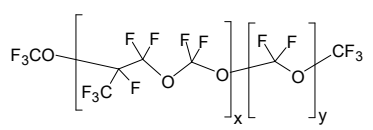
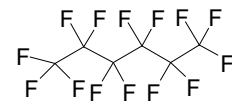
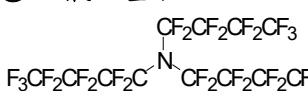
03

PFAA前体

- ① HFCs ( $C_nF_{2n+1}C_mH_{2m+1}$ )
- ② HFOs ( $C_nF_{2n+1}CH=CH_2$ )
- ③ HFEs ( $C_nF_{2n+1}OC_mH_{2m+1}$ )
- ④ n:1-氟调聚物醇:  
 $CF_3CH_2OH$
- ⑤ 全氟烷基碘( $C_nF_{2n+1}I, n>1$ )
- ⑥ 全/半氟化烷基酮
- ⑦ 全氟烯烃( $C_nF_{2n}, n>2$ )
- ⑧ 全氟烷基醚侧链氟化聚合物  
...

04

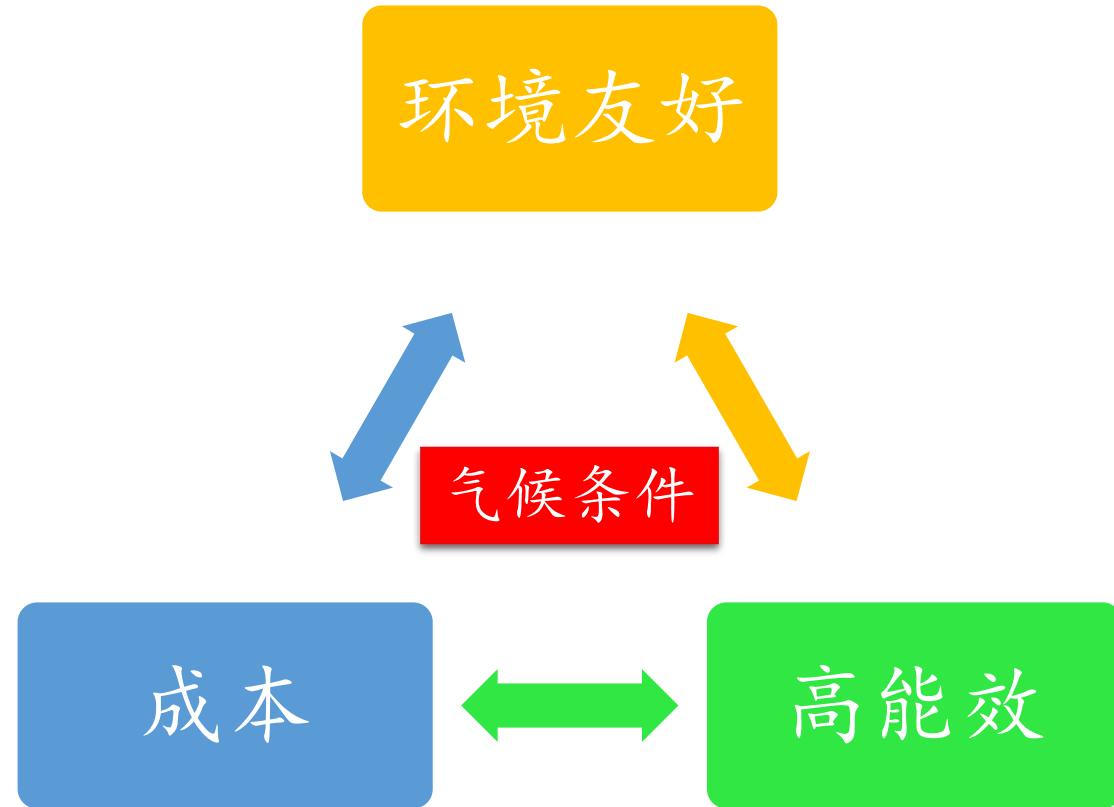
其他PFAS

- ① 氟聚合物(PFs):  
PVDF、PTFE  
PCTFE、FEP
- ② 全氟聚醚(PFPEs):  

- ③ 全氟醚:  
( $C_nF_{2n+1}OC_mF_{2m+1}$ )
- ④ 全氟烃( $C_nF_{2n+2}$ ):  

- ⑤ 全氟烷基叔胺:  
  
...



# 面临的形势（制冷剂风险评估）（哪个问题更重要？）

- 碳中和（2060年之前）
- 臭氧层（2045年恢复到1980年水平）
- 美丽中国（到2035年，生态环境质量实现根本好转，美丽中国目标基本实现）
  - “努力建设人与自然和谐共生的美丽中国” “努力建设天蓝地绿水净的美丽中国” “让天更蓝、山更绿、水更清、生态环境更美好”。



不以国家为尺度，而是气候条件作为边界

# HFOs---的TFA问题会怎么样？

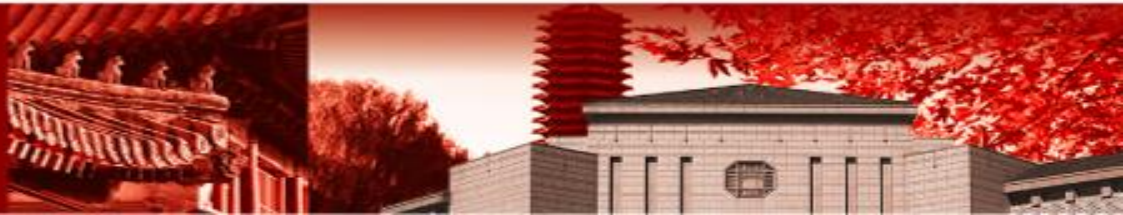
HFO-1243zf	$\text{CF}_3\text{CH}=\text{CH}_2$
(E)-HFO-1234ye	(E)- $\text{CHF}=\text{CFCHF}_2$
(Z)-HFO-1234ye	(Z)- $\text{CHF}=\text{CFCHF}_2$
(E)-HFO-1234ze	(E)- $\text{CF}_3\text{CH}=\text{CHF}$
(Z)-HFO-1234ze	(Z)- $\text{CF}_3\text{CH}=\text{CHF}$
HFO-1234yf	$\text{CF}_3\text{CF}=\text{CH}_2$
3,3,4,4-tetrafluorocyclobutene	c- $\text{CH}=\text{CHCF}_2\text{CF}_2$ -
2,3,3,4,4-pentafluorocyclobut-1-ene	c- $\text{CH}=\text{CFCF}_2\text{CF}_2$ -
(E)-HFO-1225ye	(E)- $\text{CF}_3\text{CF}=\text{CHF}$
(Z)-HFO-1225ye	(Z)- $\text{CF}_3\text{CF}=\text{CHF}$
HFO-1345zfc	$\text{C}_2\text{F}_5\text{CH}=\text{CH}_2$
(E)-HFO-1336mzz	(E)- $\text{CF}_3\text{CH}=\text{CHCF}_3$
(Z)-HFO-1336mzz	(Z)- $\text{CF}_3\text{CH}=\text{CHCF}_3$
3,3,3-trifluoro-2-(trifluoromethyl)-1-propene	$(\text{CF}_3)_2\text{C}=\text{CH}_2$
HFO-1447fz	$\text{CH}_2=\text{CHCF}_2\text{CF}_2\text{CF}_3$
1,3,3,4,4,5,5-heptafluorocyclopentene	cyclo- $\text{CF}_2\text{CF}_2\text{CF}_2\text{CF}=\text{CH}$ -
(E)-HFO-1438mzz	(E)- $\text{CF}_3\text{CH}=\text{CHCF}_2\text{CF}_3$
(E)-HFO-1438ezy	(E)- $(\text{CF}_3)_2\text{CFCH}=\text{CHF}$
3,3,4,4,5,5,6,6,6-Nonafluorohex-1-ene	$\text{C}_4\text{F}_9\text{CH}=\text{CH}_2$
3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8-Tridecafluorooct-1-ene	$\text{C}_6\text{F}_{13}\text{CH}=\text{CH}_2$
HFO-174-13fz	
3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,10-Heptadecafluorodec-1-ene	$\text{C}_8\text{F}_{17}\text{CH}=\text{CH}_2$
HFO-194-17fz	

# WMO/UNEP科学评估委员会SAP 2022

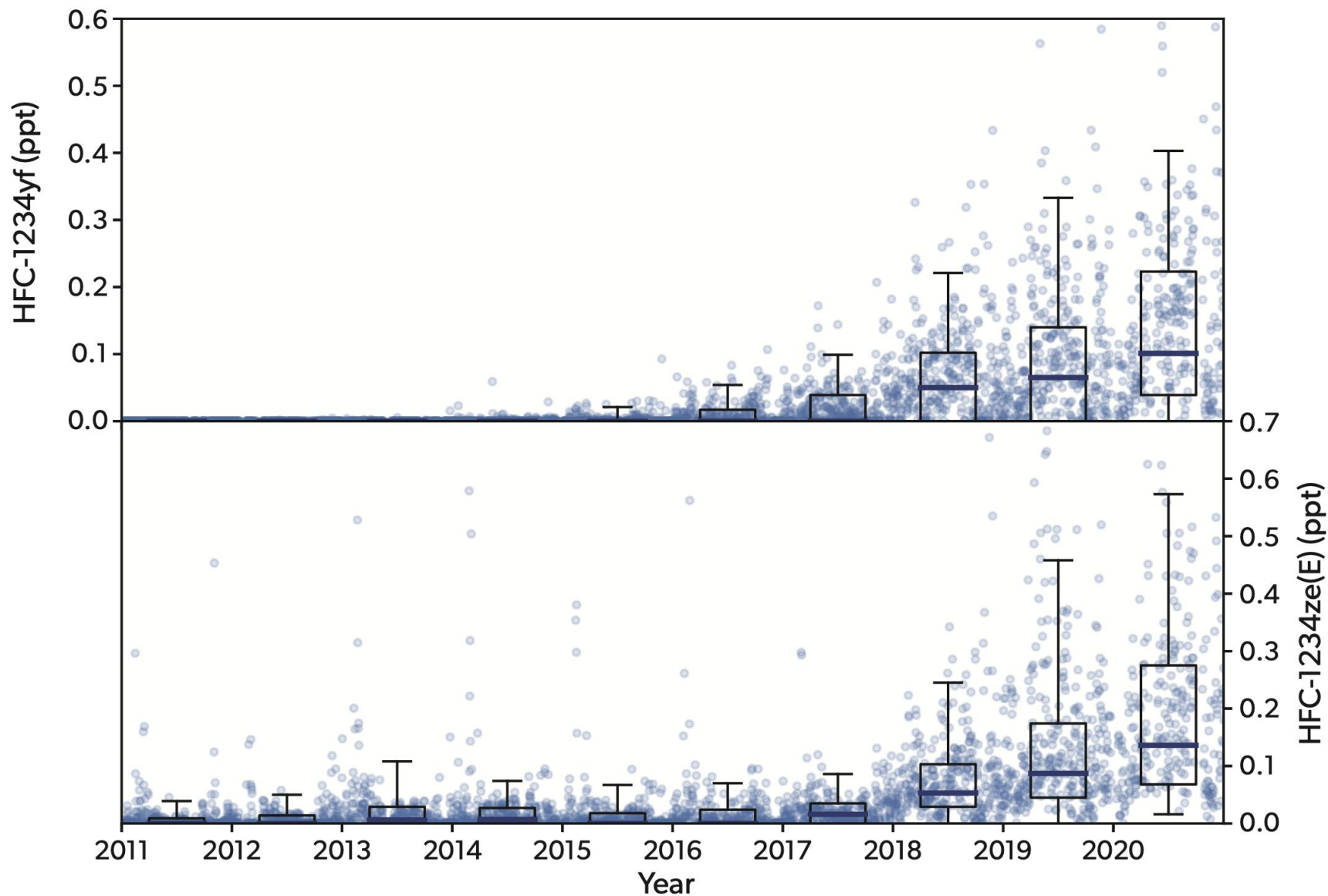
- 由于氟烯烃和氟氯烯烃的使用增加，预计在未来几十年内，三氟乙酸（TFA）在大气中的形成将增加。TFA是一些HFCs、HCFCs、HFOs和HCFOs的分解产物，是一种持久性化学品，对动物、植物和人类有潜在的有害影响。一般来说，目前雨水和海水中的TFA浓度大大低于已知的毒性极限。由于TFA的持久性，其潜在的环境影响需要在未来进行评估。



北京大学



# HFO-1234yf and HFO-1234ze(E) 大气浓度 at Jungfraujoch.



# 2022年UNEP环境影响评估委员会EEAP报告

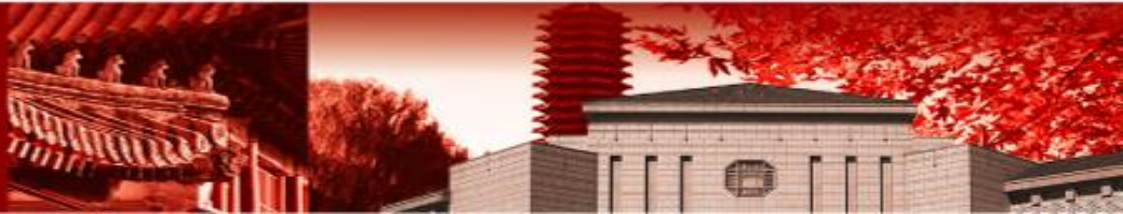
- TFA的环境寿命很长，在地表和地下水中积累，并在血液、饮用水、饮料、灰尘、植物和农业土壤中被发现。然而，它不与生物分子发生作用，而且由于其在水中的高溶解度，它不会进行生物累积。它不太可能对陆生和水生生物造成不利影响。然而，由于TFA沉积的不确定性及其对海洋生物的潜在影响，建议继续进行监测和评估。
- 目前，由于臭氧消耗物质的替代而导致的三氟乙酸浓度的增加，预计不会对人类或环境造成重大风险。三氟乙酸（TFA）继续存在于环境中，包括在偏远地区，尽管浓度很低，目前对人类和生态系统产生不良毒理学后果的可能性很小。由于计划用短寿命的含氟化学品替代 ODS，预计 TFA 的累积量会增加。然而，根据对这些 TFA 前体的未来使用的预测，预计不会有任何危害。其他来源的 TFA 的规模存在很大的不确定性（例如，潜在的自然来源、含氟农药和药品），这些来源不属于《蒙特利尔议定书》的范围。三氟乙酸的生物特性与长链多氟烷基物质（PFAS）有很大的不同，将三氟乙酸纳入这个更大的化学品群进行监管，与三氟乙酸的风险评估可能不一致。

# 面临碳中和的形势

(制冷剂-最重要的含氟气体)



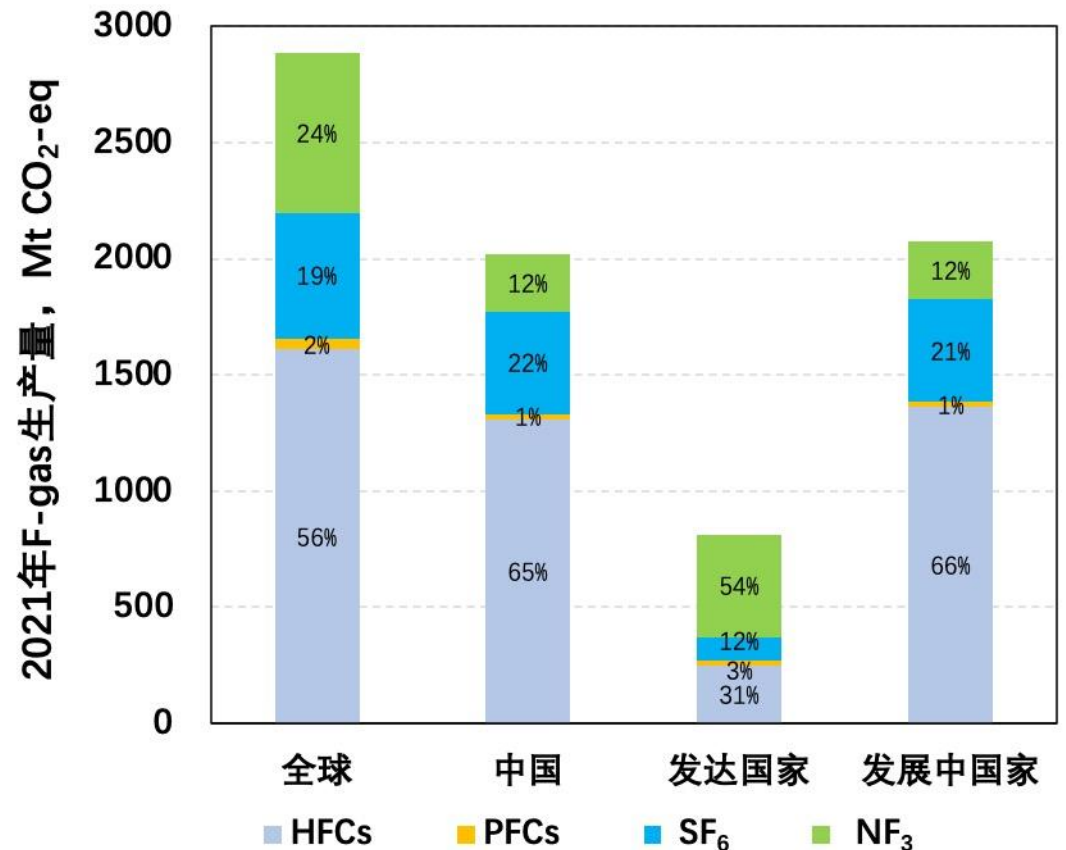
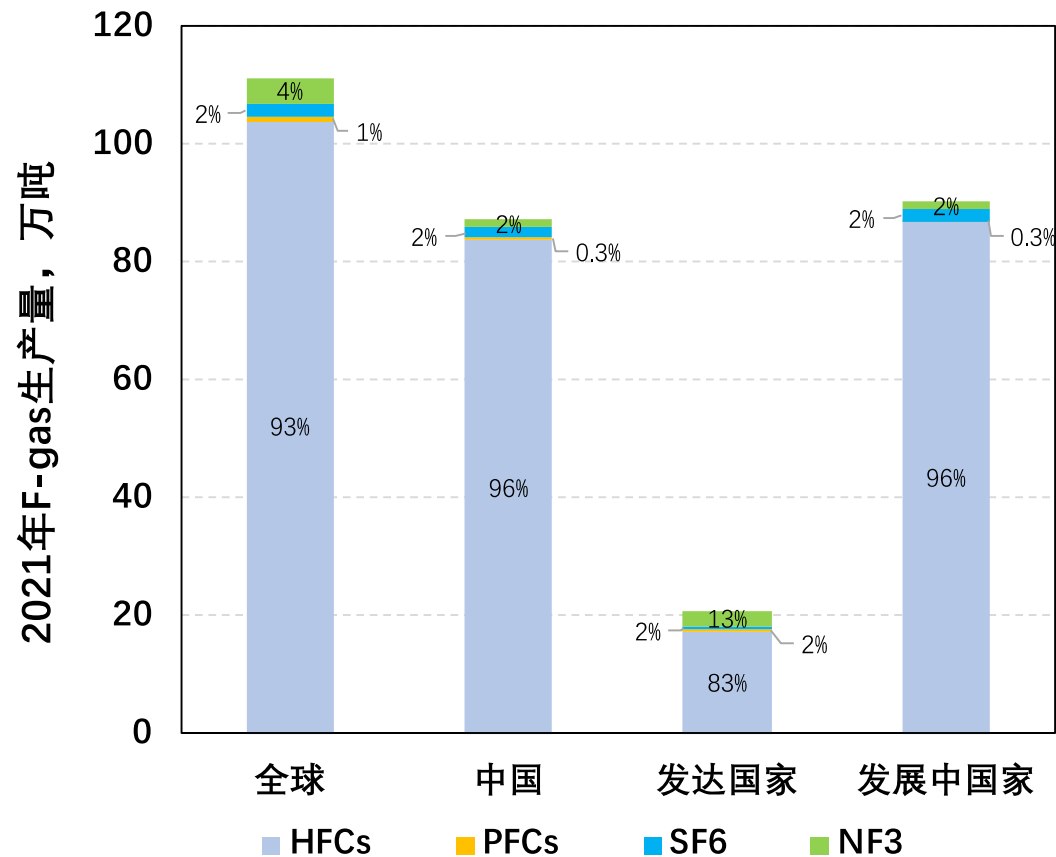
北京大学



# F-gas涉及的生产 and 消费行业

行业	SF <sub>6</sub>	NF <sub>3</sub>	CF <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> F <sub>8</sub>	c-C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>	HFCs
F-gas生产行业	√	√	√	√	√	√	√
电力设备行业	√	x	x	x	x	x	x
镁生产行业	√	x	x	x	x	x	x
原铝生产行业	x	x	√	√	x	x	x
半导体制造行业	√	√	√	√	√	√	√
医疗行业	√	x	x	x	√	x	√
气体示踪行业	√	x	x	x	x	x	x
消防行业	√	x	x	x	x	x	√
军事行业	√	x	x	x	x	x	x
<b>制冷剂行业</b>	<b>√</b>	<b>x</b>	<b>√</b>	<b>√</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>√</b>
显示器行业	x	√	x	x	x	x	√
光伏行业	x	√	x	x	x	x	√
副产物排放行业	x	x	√	√	x	√	√
泡沫制造行业	x	x	x	x	x	x	√

# 2021年中国及全球F-gas生产供应量



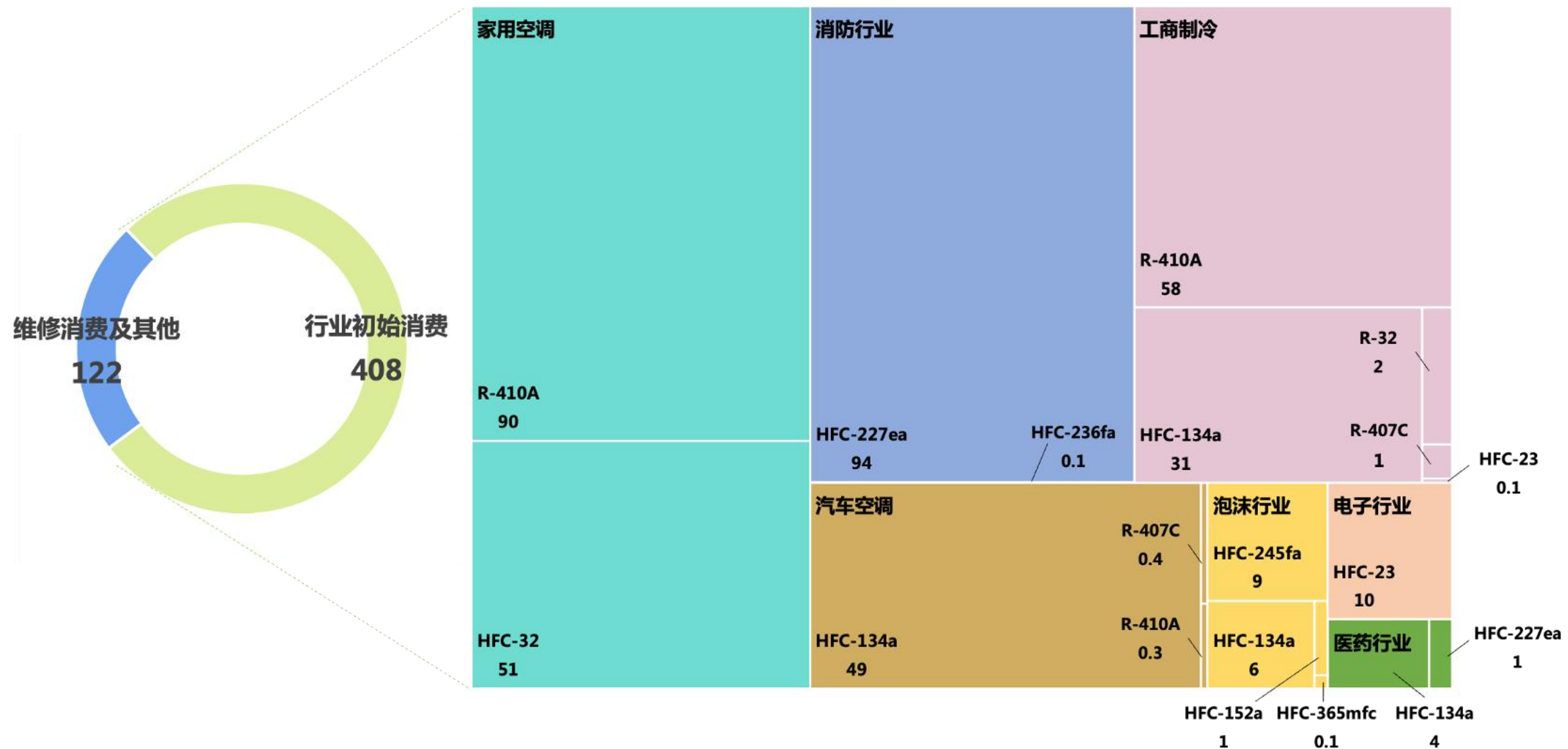
全球F-gas产量约为111万吨，其中HFCs、NF<sub>3</sub>、SF<sub>6</sub>和PFCs占比分别为93%、4%、3%、1%。

中国F-gas产量约占全球产量的79%，其中HFCs、NF<sub>3</sub>、SF<sub>6</sub>和PFCs的产量分别为84万吨、2万吨、2万吨、0.3万吨。



# 2020年HFC行业消费量，Mt CO<sub>2</sub>-eq

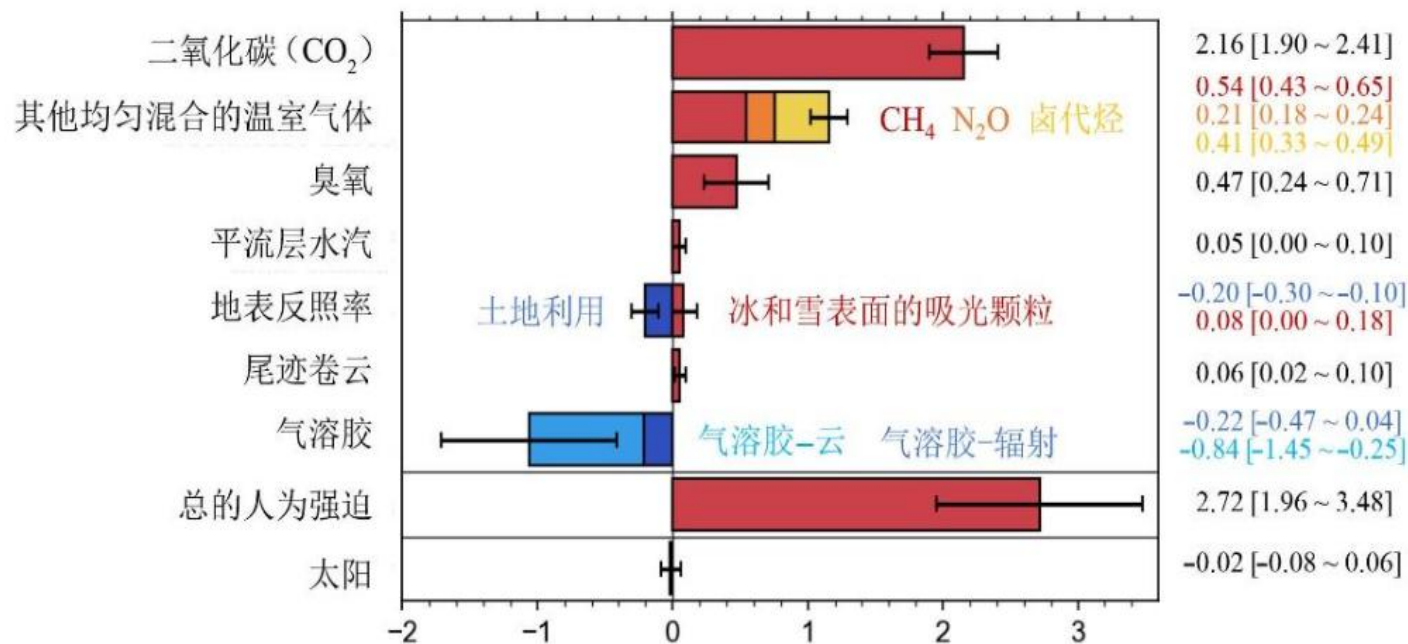
■ 汽车空调 
 ■ 家用空调 
 ■ 工商制冷 
 ■ 泡沫行业 
 ■ 消防行业 
 ■ 医药行业 
 ■ 电子行业



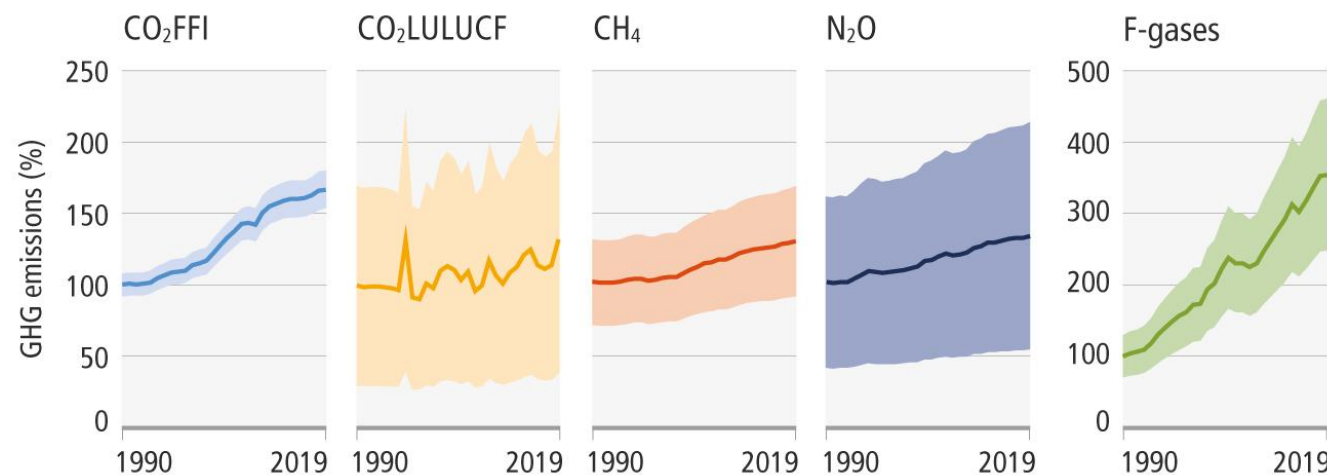
**维修消费及其他**  
**122**

**行业初始消费**  
**408**

# IPCC AR6, 2019年辐射强迫 (占12%)



卤代烃有效辐射强迫: 0.41W/m<sup>2</sup>

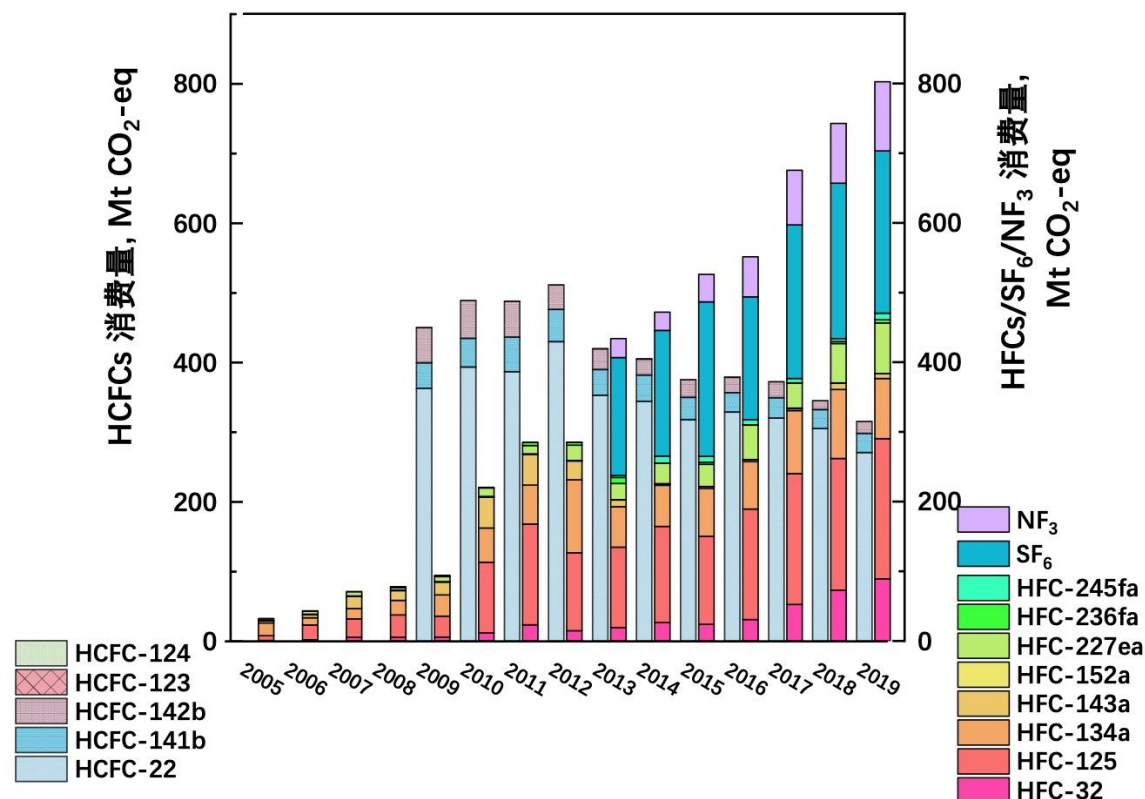
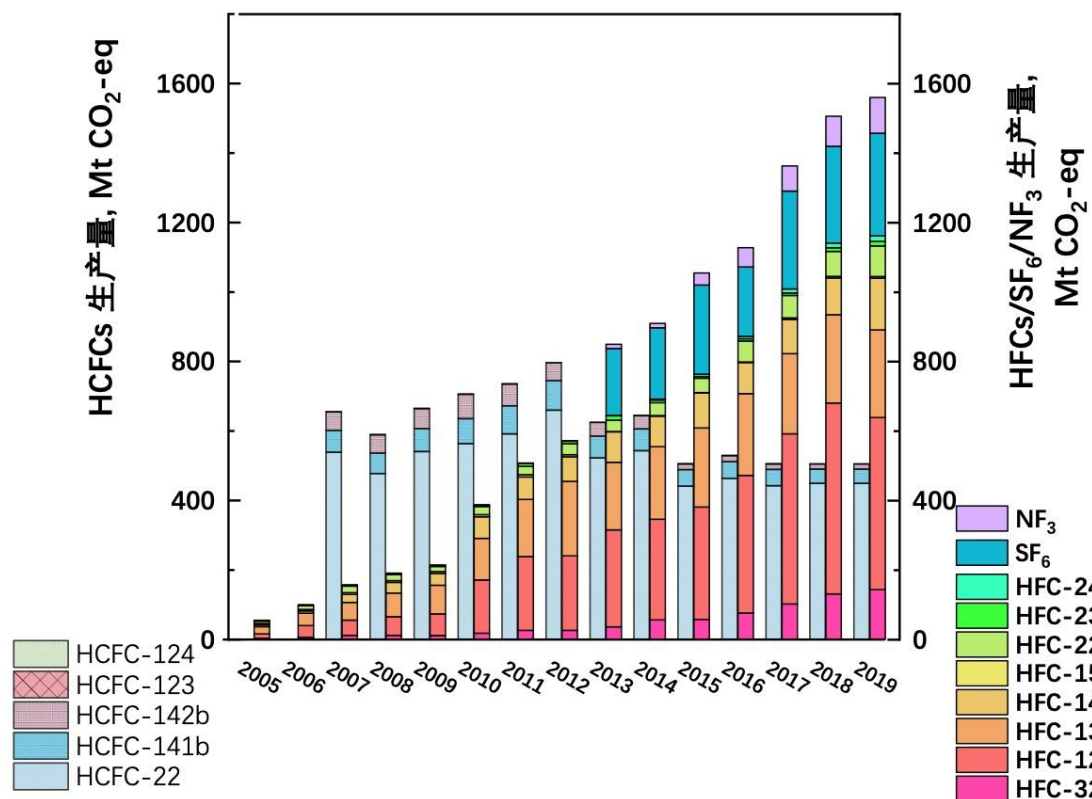


The solid line indicates central estimate of emissions trends. The shaded area indicates the uncertainty range.

过去30年温室气体排放变化  
F-gas大气排放增长了250%，  
是同期CO<sub>2</sub>浓度增长速率的4  
倍、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O浓度增长速率  
的8倍

# 历年中国主要F-gas的生产和消费

2019年生产（16亿）和消费（8亿）（GWP100年）



站在2060年角度看：中国制造每年增加F-gas等16亿吨CO<sub>2</sub>潜在排放量 > 甲烷+N<sub>2</sub>O

# 中国及全球HFCs基线及削减比例

- 根据CCAC和公约秘书处数据，全球HFC的消费基线数据为23亿 tCO<sub>2</sub>（生产24.9亿 tCO<sub>2</sub>）。
- 根据各国的分类（非A5和A5-II削减85%和A5-I削减80%），全球消费量削减量18.7亿 tCO<sub>2</sub>，假设生产量的削减量相同。
- 中国基线及削减量
- 按照《基加利修正案》有关规定，确定我国 HFCs 生产基线值为18.52亿tCO<sub>2</sub>、HFCs 使用基线值为9.04亿tCO<sub>2</sub>（含进口基线值0.05亿tCO<sub>2</sub>）。
- **在2045年之后，中国将分别将生产和消费基线水平削减到3.704亿 tCO<sub>2</sub>和1.808亿tCO<sub>2</sub>。生产和消费削减量分别是14.816亿tCO<sub>2</sub>和7.232亿tCO<sub>2</sub>。**
- 中国生产和消费减排量占全球的78%和38%。
- 中国的生产和消费减排量是美国的4.56倍和2.80倍。

## 中国现有F-gas控制目标

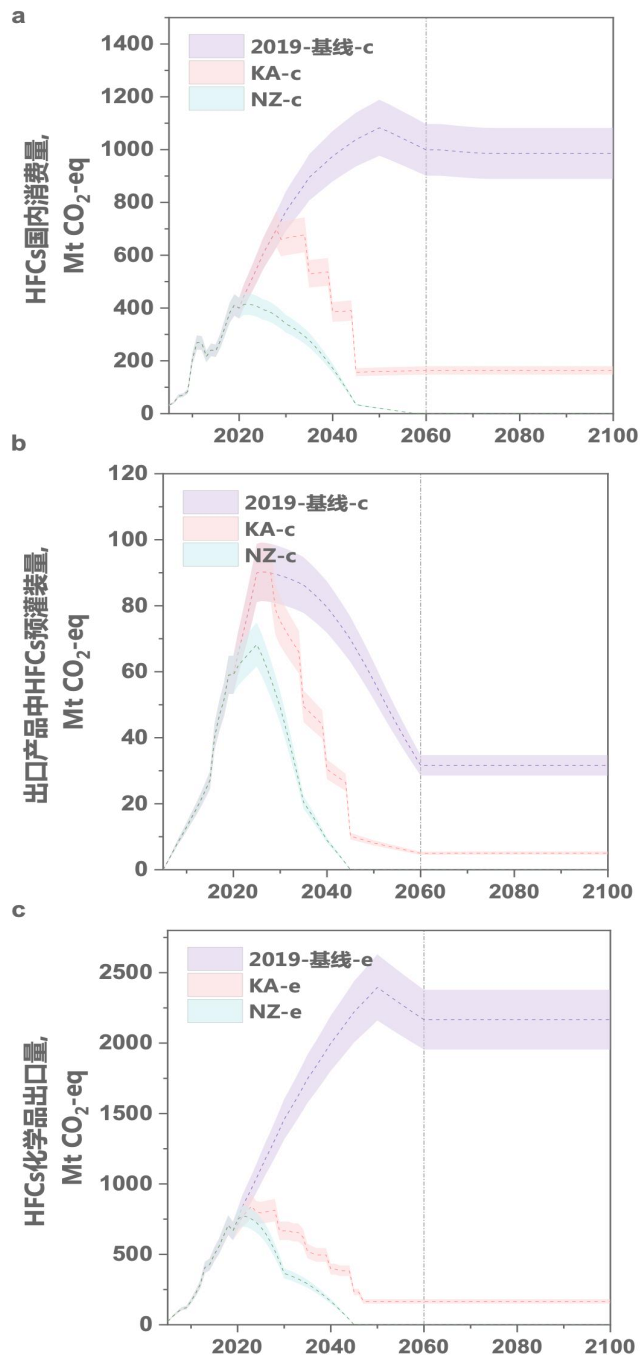
- 按照现有政策目标，在中国全面履行《基加利修正案》的前提下，2060年中国仍可生产3.7亿吨CO<sub>2</sub>-eq的HFCs，其中国内消费量为1.8亿吨CO<sub>2</sub>-eq。
- 除在电力领域SF<sub>6</sub>替代以及电解铝副产PFCs减排有明确要求外，中国对NF<sub>3</sub>、SF<sub>6</sub>和PFCs的总体的管控目标并不够明确。
- 按照《基加利修正案》（KA情景）减排80%的HFCs生产和消费，而其他F-gas维持现有排放水平，**预计2060年，中国境内全部F-gas年均排放在4亿吨CO<sub>2</sub>-eq水平。**

# 近零减少生产和消费、避免排放

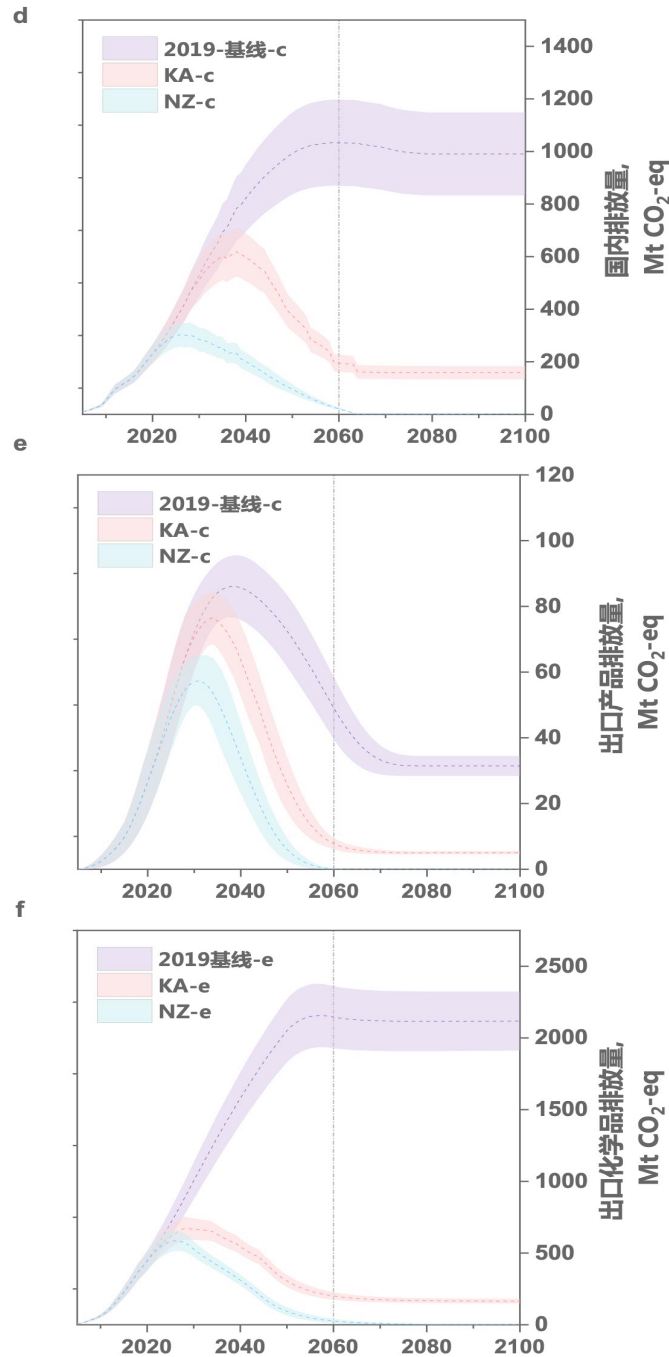
- 假设在2060年F-gas接近零排放。基于对替代技术的综合评价，利用综合评估模型进行近零（NZ）情景分析HFCs的替代减排量。
- NZ情景下中国HFCs在2045年只保留设备维修用途的生产量和消费量，在2060年完全削减至0。
  - 与基加利修正案（KA）情景相比，2020-2060年间，中国HFCs累积生产量和消费量分别减少了 $180 \pm 17$  亿吨  $\text{CO}_2\text{-eq}$ 、 $94 \pm 9$  亿吨  $\text{CO}_2\text{-eq}$ ，可分别避免 $100 \pm 15$  亿吨  $\text{CO}_2\text{-eq}$ 的国内HFCs累积排放和 $76 \pm 6$  亿吨  $\text{CO}_2\text{-eq}$ 的出口HFCs累积排放。

# 中国生产氢氟碳化物排放

国境内消费



生产量

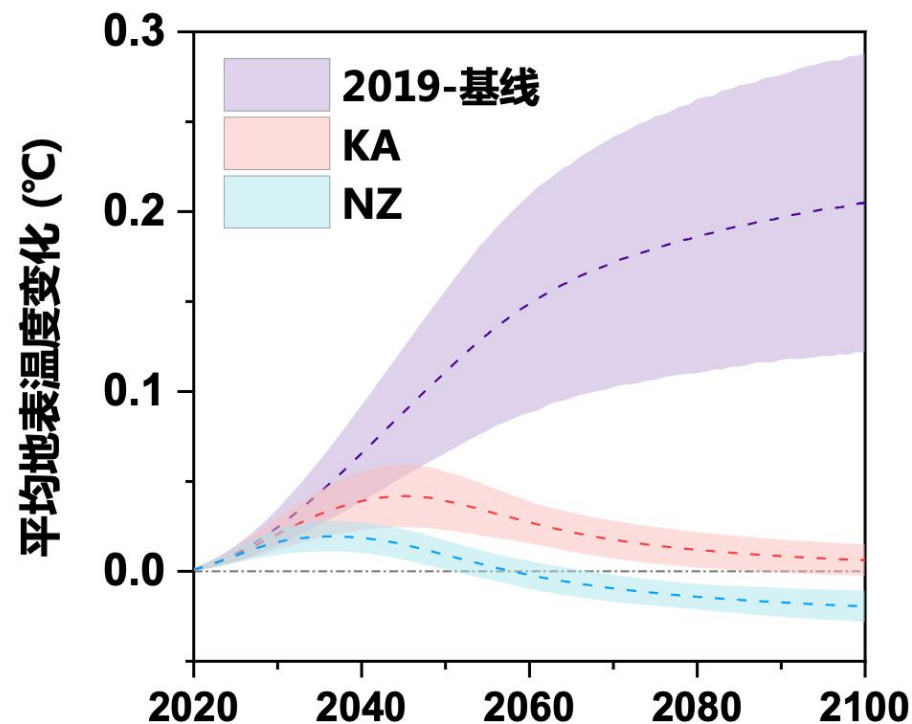
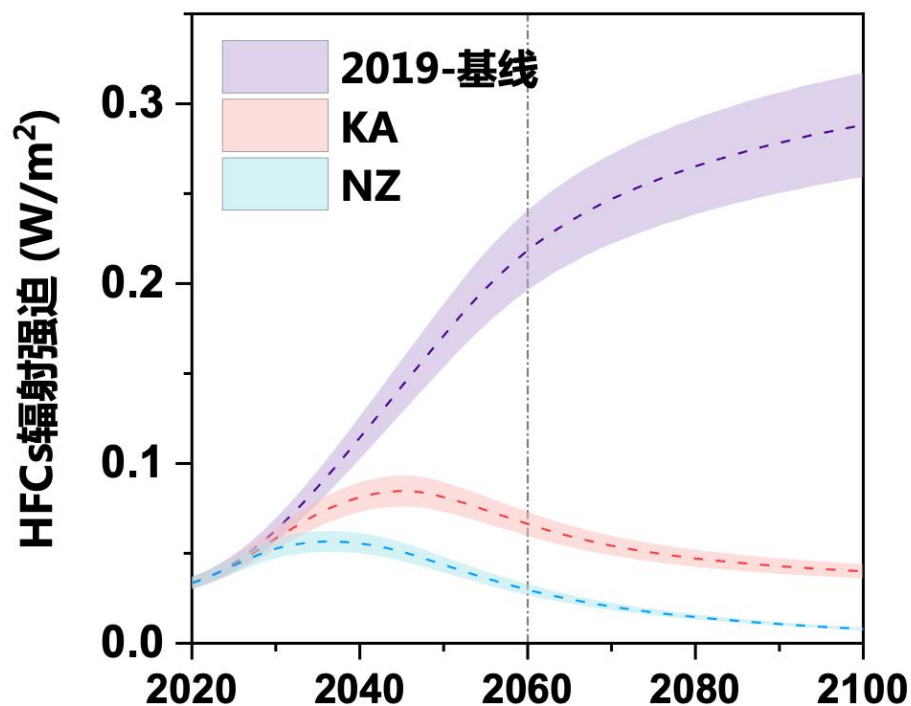


国境内排放

出口排放

# 近零情景相比现有目标（基加利修正案）KA情景

- KA情景和NZ情景HFCs辐射强迫分别于2045、2037年达峰。NZ情景的辐射强迫达峰时间相较于KA情景提前了8年，峰值从 $89 \pm 9 \text{ mW/m}^2$ 降低到了 $60 \pm 6 \text{ mW/m}^2$ ，更有助于缓解温度过冲。
- 若严格履行《基加利修正案》（KA情景），HFCs的排放到2060年仍有 $0.03 \pm 0.01^\circ \text{C}$ 的温升潜力；而按照NZ情景的HFCs排放路径，到2060年，HFCs的辐射强迫可低于2019年的辐射强迫水平。显而易见，NZ情景的HFCs减排可以带来更高的气候效益。





# 制冷剂替代与社会、经济和环境影

(a) 拟采取的控制措施在实现减少风险目标方面的成效和效率:

(i) 技术可行性; 和 (ii) 成本, 包括环境和健康成本;

(b) 替代手段 (产品和工艺):

(i) 技术可行性; (ii) 成本, 包括环境和健康成本; (iii) 成效; (iv) 风险; (v) 可行性; 以及 (vi) 可获取性;

(c) 实施拟采取的控制措施对社会产生的积极和/或消极影响:

(i) 卫生, 包括公共、环境和职业卫生; (ii) 农业, 包括水产养殖业和林业; (iii) 生物区系 (生物多样性); (iv) 经济方面; (v) 可持续发展的推进; 以及 (vi) 社会成本;

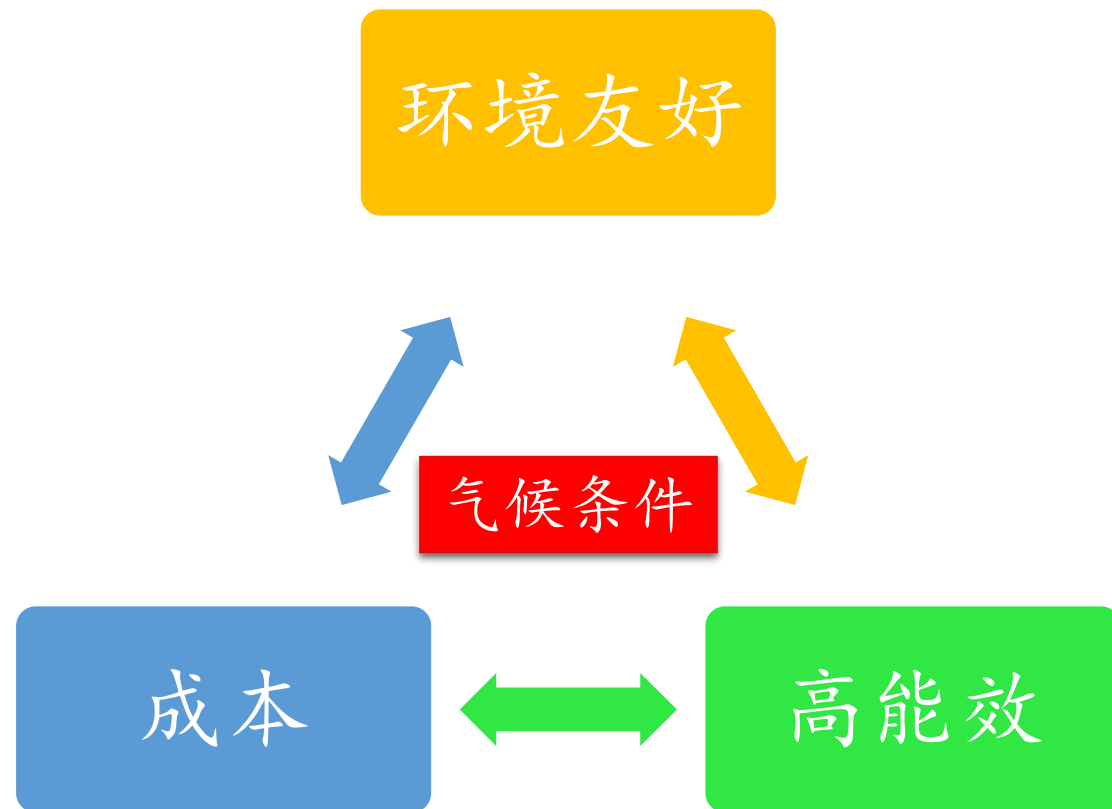
(d) 废物及其处置所涉及的问题 (特别是对过期农药库存和受污染场所的清理):

(i) 技术可行性; 和 (ii) 成本;

(e) 信息获得和公众教育;

(f) 控制和监测能力的状况; 以及

(g) 所采取国家或区域控制行动, 包括有关替代手段的信息和其他相关的风险管理信息。

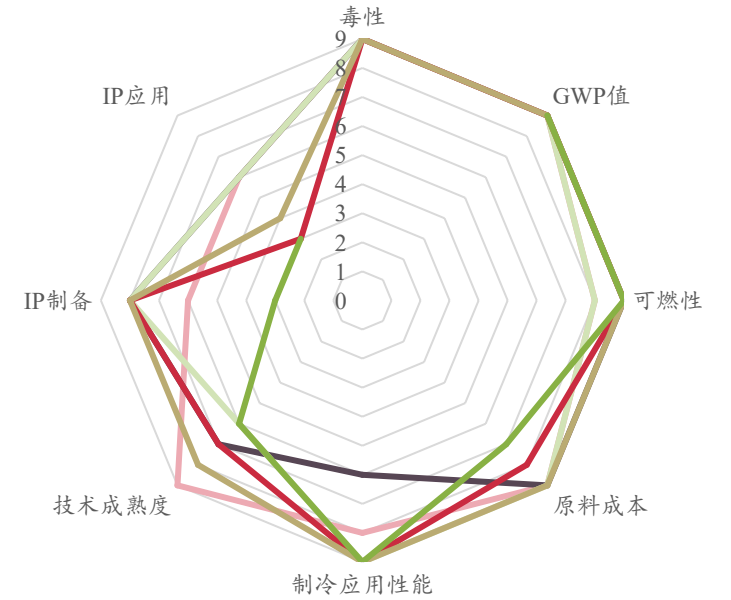


# 目前主要应用的HCFCs、HFCs产品及其替代技术

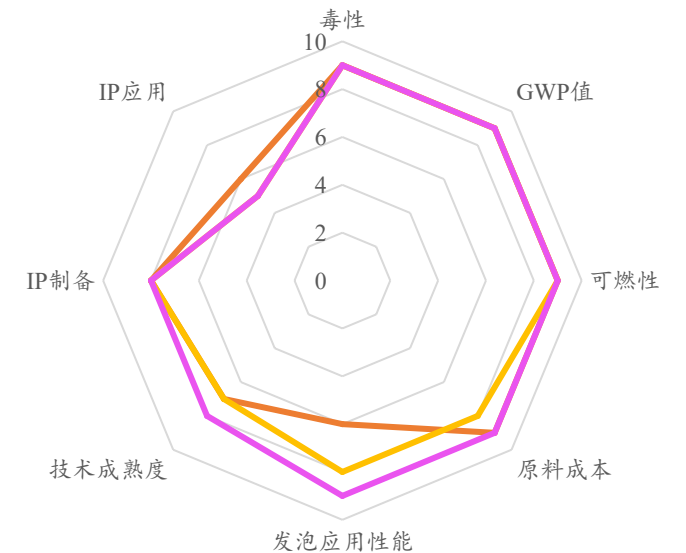
应用领域		目前主要应用的产品			替代技术
		HCFCs	HFCs	其它	
制冷	房间空调器	HCFC-22	R410A	-	R290、HFC-32、HFC-161
	单元/多联式空调机	HCFC-22	R410A、R407C	-	HFC-32
	冷水机组/热泵	HCFC-22	R410A、R407C、HFC-134a	-	HFC-32、R290
	热泵热水机	HCFC-22	HFC-134a、R410A、R407C、R417A、R404A	-	R290、CO <sub>2</sub>
	工业/商业制冷	HCFC-22	HFC-134a、R404A、R507A	NH <sub>3</sub> 、CO <sub>2</sub>	R600a、R290
	运输空调	HCFC-22	HFC-134a、R410A、R407C	-	HFO-1234yf、CO <sub>2</sub> 、HFC-152a
	运输制冷	HCFC-22	HFC-134a、R404A、R407C	-	CO <sub>2</sub>
泡沫	聚氨酯泡沫	HCFC-141b	HFC-245fa、HFC-365mfc	环戊烷、正戊烷、异戊烷、甲酸甲酯、甲缩醛及其混合物、二甲醚、水	HCFO-1233zd、HFO-1336mzz、HFO-1234ze
	挤塑聚苯乙烯泡沫	HFCF-22、HCFC-142b	HFC-152a、HFC-134a	-	CO <sub>2</sub> 组合发泡技术、HFO-1234ze、HFO-1243zf
溶剂	清洗等	HCFC-141b	HFC-4310mee、HFC-365mfc、HFC-245fa	氯代烃类、醇类、醚类、酮类	碳氢溶剂、HFEs、HCFO-1233zd

# HFCs替代品评估（张建君等，浙江化工研究院）

— HFO-1234yf    — HFO-1234ze(E)    — HFO-1234ze(Z)  
— HFO-1336mzz(Z)    — HCFO-1233zd(E)    — HCFO-1224yd(Z)



— HFO-1234ze(E)    — HFO-1336mzz(Z)    — HCFO-1233zd(E)



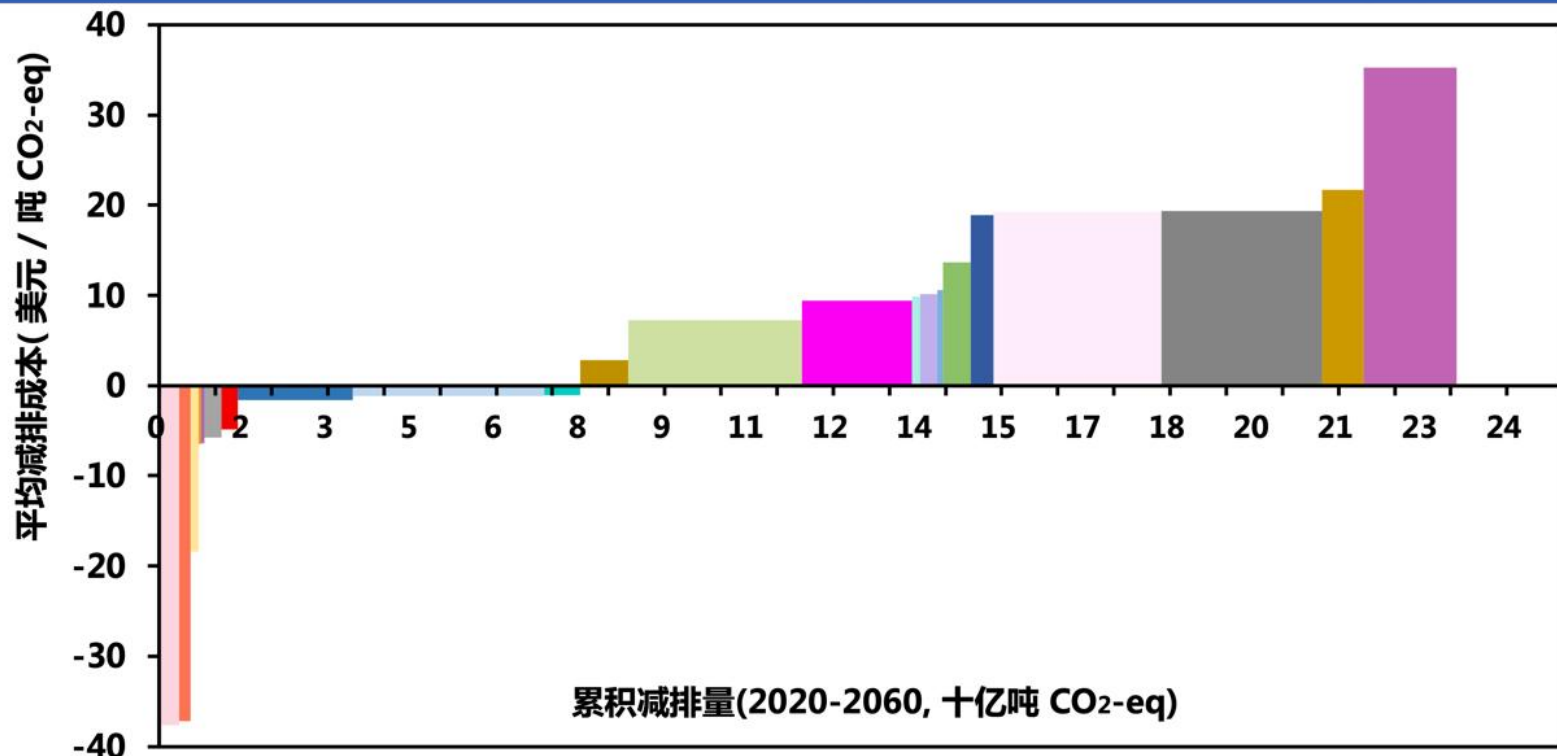
替代品	替代目标	环境性能 GWP <sub>100</sub>	毒性 LC <sub>50</sub>	燃烧性 (干空气, 25°C)	原材料成本 万元/吨	应用领域	应用性能	技术成熟度	IP制备	IP应用
HFO-1234yf	HFC-134a	<1 (9)	> 406,000 (9)	6.2~12.3% (8)	3.58 (9)	制冷剂	COP较HFC-134a下降3% (8)	产业化 (9)	卤代烃合成路线受限至2027年(5)	汽车空调制冷应用受限至2025年(7)
HFO-1234ze(E)	HFC-134a HFC-245fa	<1 (9)	> 207,000 (9)	不可燃 (9)	3.27 (9)	制冷剂	制冷量较HFC-134a下降25% (6)	产业化 (7)	合成路线不受限(9)	制冷应用受限至2025年(7)
						发泡剂*	气体导热系数比HFC-245fa高8.3% (6)		合成路线不受限(9)	发泡应用受限至2025年(7)
HFO-1234ze(Z)	HFC-245fa	<1 (9)	2,8650 (9)	9.75~16.3% (8)	3.42 (9)	制冷剂	COP比HFC-245fa高2~3% (9)	工程化 (6)	合成路线不受限(9)	制冷应用受限至2025年(7)
HFO-1336mzz(Z)	HFC-245fa	6 (9)	103,000 (9)	不可燃 (9)	4.06 (8)	制冷剂	COP与HFC-245fa持平 (9)	产业化 (7)	合成路线不受限(9)	离心冷却应用受限至2030年(3)
						发泡剂*	气体导热系数比HFC-245fa低8.9% (8)		合成路线不受限(9)	发泡应用受限至2026年(5)
HCFO-1233zd(E)	HFC-245fa	1 (9)	120,000 (9)	不可燃 (9)	2.44 (9)	制冷剂	COP比HFC-245fa高2~3% (9)	产业化 (8)	合成路线不受限(9)	离心制冷应用受限至2029年(4)
						发泡剂*	气体导热系数比HFC-245fa低15.8% (9)		合成路线不受限(9)	发泡应用受限至2026年(5)
HCFO-1224yd(Z)	HFC-245fa	<1 (9)	-	不可燃 (9)	4.06 (8)	制冷剂	COP与HFC-245fa持平 (9)	工程化 (6)	合成路线受限至2036年(3)	冷水机组应用受限至2032年(3)

# 减排成本技术与参数

行业	HFCs 替代	设备参数		成计算参数 (2020 年价格)		
		寿命 <sup>d</sup> (年)	减排量 (t CO <sub>2</sub> -eq·yr <sup>-1</sup> )	CC (\$)	OC (\$)	Marginal abatement cost (\$/t CO <sub>2</sub> -eq)
汽车 空调	Car/Truck-HFC-134a → HFO-1234yf	10	0.08 <sup>d</sup>	27.66 <sup>b,d</sup>	3.26 <sup>b</sup>	86.01 <sup>d</sup>
	Bus-HFC-134a → HFO- 1234yf		0.30 <sup>d</sup>	85.99 <sup>b,d</sup>	3.26 <sup>b</sup>	45.36 <sup>d</sup>
房间 空调	HFC-410A → HFC-32	19	0.08 <sup>d</sup>	7.58 <sup>d</sup>	-2.66 <sup>d</sup>	-25.04 <sup>d</sup>
	HFC-410A → HC-290		0.11 <sup>d</sup>	23.72 <sup>d</sup>	-1.77 <sup>d</sup>	-0.36 <sup>d</sup>
	HFC-32 → HC-290		0.02 <sup>d</sup>	25.10 <sup>d</sup>	0.89 <sup>d</sup>	128.21 <sup>d</sup>
商业 空调	HFC-410A → HFC-32	15	2.1 <sup>b</sup>	-32.58 <sup>b</sup>	-3.26 <sup>b</sup>	-2.90 <sup>d</sup>
	HFC-410A → HFOs					51.40 <sup>c</sup>
	HFC-134a → HFOs					51.40 <sup>c</sup>
	HFC-407C → HC-290				27.97 <sup>c</sup>	
冷链	Small food retail: HFC- 404A→HCs	10	0.1 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	-1.18 <sup>a</sup>	-11.80 <sup>d</sup>
	Large food retail: HFC- 404A→HCs		834 <sup>a</sup>	59304 <sup>a</sup>	-9813 <sup>a</sup>	-3.20 <sup>d</sup>
	Cold storage and industrial refrigeration: HFC-404A→ NH <sub>3</sub> /CO <sub>2</sub>		712 <sup>b</sup>	232519 <sup>b</sup>	-89820 <sup>b</sup>	-86.85 <sup>d</sup>
泡沫	HFC-245fa → CO <sub>2</sub>	15				-15.91 <sup>c</sup>
消防	HFC-227ea/HFC-236fa → FK-5-1-1	20	0.03 <sup>b</sup>	11.34 <sup>b</sup>	0.03 <sup>b</sup>	27.70 <sup>d</sup>
泄漏 修复						-1.89 <sup>a</sup>
维修 回收						19.51 <sup>a</sup>
报废 回收						5.68 <sup>a</sup>

Bai. etc, Pathway and cost-benefit analysis to achieve China's zero hydrofluorocarbon emissions

# 近零情景下2020-2060年间HFCs国内消费行业平均减排成本及累积减排量



- |   |   |
|---|---|
| ■ 工商制冷-冷库和工业制冷: HFC-404A→NH <sub>3</sub> /CO <sub>2</sub> | ■ 工商制冷-冷库和工业制冷: HFC-507A→NH <sub>3</sub> /CO <sub>2</sub> |
| ■ 房间空调: HFC-410A→HFC-32                                   | ■ 工商制冷-大型食品零售: HFC-404A→HCs                               |
| ■ 泡沫发泡剂: HFC-152a→CO <sub>2</sub>                         | ■ 泡沫发泡剂: HFC-245fa→CO <sub>2</sub>                        |
| ■ 泡沫发泡剂: HFC-134fa→CO <sub>2</sub>                        | ■ 工商制冷-小型食品零售: HFC-404A→HCs                               |
| ■ 房间空调: HFC-410A→HC-290                                   | ■ 商业空调: HFC-410A→HFC-32                                   |
| ■ 泄漏修复  | ■ 报废阶段的制冷剂回收  |
| ■ 其他  | ■ 消防: HFC-227ea→氟化酮                                       |
| ■ 消防: HFC-236fa→氟化酮                                       | ■ 维修阶段的制冷剂回收  |
| ■ 商业空调: HFC-407C→HCs                                      | ■ 汽车空调-客车: HFC-134a→HFO-1234yf                            |
| ■ 汽车空调-货车: HFC-134a→HFO-1234yf                            | ■ 商业空调: HFC-410A→HFOs                                     |
| ■ 商业空调: HFC-134a→HFOs                                     | ■ 房间空调: HFC-32→HC-290                                     |
| ■ 汽车空调-乘用车: HFC-134a→HFO-1234yf                           |   |

Bai. etc, Pathway and cost-benefit analysis to achieve China's zero hydrofluorocarbon emissions

# 结论和建议

1. 替代减排就是发展-作为制造大国，中国面临制造产品面临转型替代。
2. 对于HFOs而言，其使用必将带来TFA的增加，但预期增加带来的环境和健康风险有限，需要进一步的研究。
3. 氢氟碳化物对碳中和影响显著，预期必需设立超过基加利修正案的减排目标。
4. 协同减排是完全可以实现并且费用有效\*。
5. 推动制冷剂替代减排纳入气候变化国家行动。
6. 房间空调、汽车空调、冷链行业或许是提前减排的行业之一（兼顾低GWP和能效、进一步细分产品）。

\*姜鹏南等，Coordinating to promote refrigerant transition and energy efficiency improvement of room air conditioners in China: Mitigation potential and costs, Journal of Cleaner Production 382 (2023)

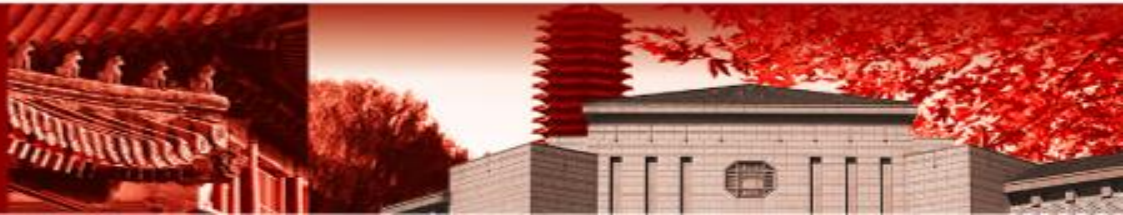
\*姜鹏南等，海南省房间空调行业温室气体协同减排潜力和效益分析,气候变化研究进展，2023



感谢关注!



北京大学



# 2023年6月

## 3M公司与美国城镇达成103亿美元的和解协议

- 3M公司因PFAS污染而面临着来自美国各州和市政当局的约4000起诉讼，该公司不承认有任何责任。该公司表示，和解协议涵盖了对检测到或将来可能检测到“任何水平”这种化学物质的水供应商的补救措施。
- 3M董事长兼首席执行官迈克·罗曼在一份声明中称，该协议是“3M向前迈出的重要一步”，并表示该协议建立在“我们宣布将在2025年底前停止所有PFAS生产”的基础上。
- 这项需要法院批准的和解协议将结束包括佛罗里达州斯图尔特市提起的一起判例案件在内的所有法律诉讼。该案原定于6月5日在联邦法院进行审判。斯图尔特的市政主管迈克·莫特尔表示，社区对达成和解感到“感激”。
- 3M公司表示，参与和解“不代表承认责任”，并称“如果被法庭驳回，3M准备继续为自己辩护。”
- 此前，科慕化学、杜邦和科迪华等公司也达成了类似的协议，它们于6月2日同意向一个基金支付11.9亿美元，用于从公共饮用水系统中去除PFAS。



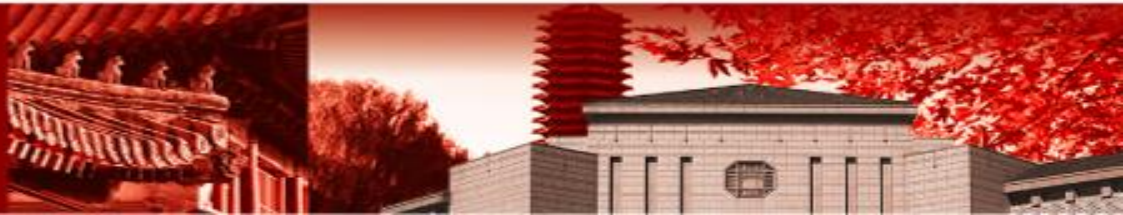


# 2020年11月中共中央十四五规划和2035年远景目标的建议

持续改善环境质量。增强全社会生态环保意识，深入打好污染防治攻坚战。继续开展污染防治行动，建立地上地下、陆海统筹的生态环境治理制度。强化多污染物协同控制和区域协同治理，加强细颗粒物和臭氧协同控制，基本消除重污染天气。治理城乡生活环境，推进城镇污水管网全覆盖，基本消除城市黑臭水体。推进化肥农药减量化和土壤污染治理，加强白色污染治理。加强危险废物医疗废物收集处理。完成重点地区危险化学品生产企业搬迁改造。**重视新污染物治理。**全面实行排污许可制，推进排污权、用能权、用水权、碳排放权市场化交易。



北京大学



# 什么是新污染物？

## Emerging Contaminants

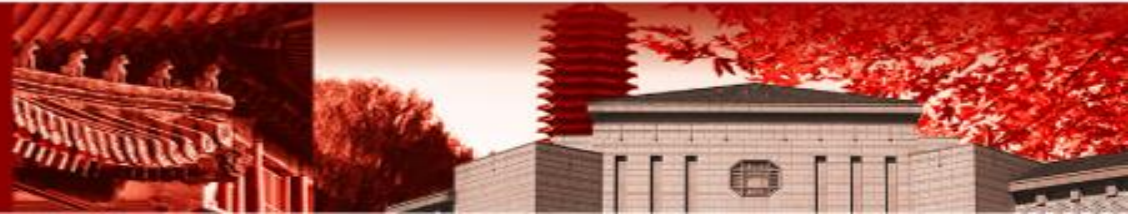
- 新认定甚至没有认定、没有法规管控的、对人体和生态健康产生影响的
- 传统处置无法解决或者没有包括的
- 包括持久性有机污染物（POPs）、内分泌干扰物（EDC）和抗生素等
- 依据用途的分类：表面活性剂、阻燃剂、增塑剂、个人护理品PPCP等

## 新兴污染物

## 新型污染物



北京大学

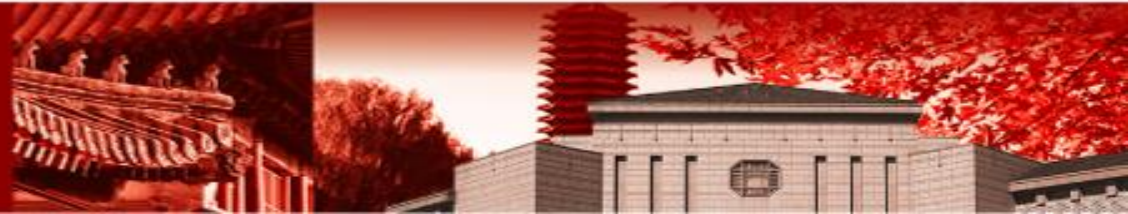


# 国务院印发新污染物治理行动方案（2022年5月）

- 有毒有害化学物质的生产和使用是新污染物的主要来源。目前，国内外广泛关注的**新污染物主要包括国际公约管控的持久性有机污染物、内分泌干扰物、抗生素等**。为深入贯彻落实党中央、国务院决策部署，加强新污染物治理，切实保障生态环境安全和人民健康，制定本行动方案。



北京大学



# PFOS、PFOA和PFHxS的管控

- PFOS：2009年，列入《斯德哥尔摩公约》附件B（限制）
- PFOS：2019年，列入《斯德哥尔摩公约》附件A（淘汰）
- PFHxS：2022年，列入《斯德哥尔摩公约》附件A（淘汰）
- 国务院办公厅印发的《新污染物治理行动方案》



## 生态环境部规章

生态环境部网站

【字体：大 中 小】

### 重点管控新污染物清单（2023年版）

（2022年12月29日生态环境部、工业和信息化部、农业农村部、商务部、海关总署、国家市场监督管理总局令第28号公布，自2023年3月1日起施行）

第一条 根据《中华人民共和国环境保护法》《中共中央 国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见》以及国务院办公厅印发的《新污染物治理行动方案》等相关法律法规和规范性文件，制定本清单。

第二条 新污染物主要来源于有毒有害化学物质的生产和使用。

本清单根据有毒有害化学物质的环境风险，结合监管实际，经过技术可行性和经济社会影响评估后确定。

第三条 对列入本清单的新污染物，应当按照国家有关规定采取禁止、限制、限排等环境风险管控措施。

第四条 各级生态环境、工业和信息化、农业农村、商务、市场监督管理等部门以及海关，应当按照职责分工依法加强对新污染物的管控、治理。

第五条 本清单根据实际情况实行动态调整。

第六条 本清单自2023年3月1日起施行。

# 全球现有F-gas控制目标

- 全球于2016年10月对HFCs的管控目标在《蒙特利尔议定书（基加利修正案）》进行了明确。设定2035年主要发达国家替代基线水平85%的生产和消费、2045年主要发展中国家替代基线水平80%的生产和消费目标。
- 在发达国家中，当前美国国家立法依然采用的是《基加利修正案》时间表，但欧盟和澳大利亚采用了更快的时间表。**欧盟选择了在2036年削减到基线水平的3.7%。**
- 欧盟对HFCs之外其它F-gas的大部分具体用途进行了使用限制，美国也开展了大量替代其它F-gas的行动，但都还没有明确总量限制。

